

出國報告(出國類別：專題研究)

底泥污染及危害性評估方法 之比較及發展趨勢

服務機關：行政院環境保護署環境檢驗所

姓名職稱：科長 王世冠

派赴國家：美國

出國期間：96.5.10~96.8.10

報告日期：96.11.5

內容目次

一、出國目的與計畫目標

二、計畫執行過程

三、研究心得

1、底泥毒性評估之重要性

2、底泥品質評估方法之演進

3、底泥品質指引

4、底泥品質指標整合

5、急性毒性試驗

6、放流物、周界水及其他水體之毒性降低、毒性識別評估

7、野外底泥生物毒性測試

四、檢討與建議

一、出國目的與計畫目標

1、核定研究項目：底泥污染調查及危害性風險評估

2、研究計畫主要內容

- (1) 底泥污染物長期毒性評估方法研究
- (2) 底泥毒性對水生物影響研究
- (3) 底泥毒性鑑識評估(Toxicity Identification Evaluation)程序研究與應用
- (4) 底泥品質指引(Sediment Quality Guidelines)建立探討

3、預期達成目標及效果

- (1) 完成底泥持久性污染物的檢測方法及底泥生物毒性評估方法相關技術研究，並利用底泥危害性評估技術進行國內底泥評估，以作為河川整治及底泥清理之參考。
- (2) 與美國政府與學界等底泥污染調查相關學者與研究機構建立合作關係，作為未來經驗與技術交流之基礎。

二、計畫執行經過

1. 研究單位介紹

本次專題出國研究地點位於美國密蘇里州哥倫比亞市之美國內政部地質調查所(US Geological Survey, USGS)轄下之哥倫比亞環境研究中心(Columbia Environmental Research Center, CERC)。



圖一、哥倫比亞環境研究中心入口與中心一隅

專題研究內容主要涵蓋以下主題：

1. 底泥相關聯長期毒性評估之方法與應用
2. 如何進行水生物族群實驗室底泥毒性試驗 (底泥品質三要素)
3. 底泥毒性鑑識評估程序
4. 底泥品質指引
5. 如何以權重法來建立及執行整體性底泥評估
6. 污染場址底泥污染物毒性或生物累積效應評估

7. 如何以淡水魚與海洋無脊椎動物評估底泥毒性及生物累積效應
8. 急毒性及長期性毒性試驗方法評估瀕臨絕種與稀有魚類與兩棲類對污染物質之敏感度

2.研究單位及指導專家

相關研究主題由哥倫比亞環境研究中心底泥毒性專家環境毒理組(Environmental Toxicology)主任 Christopher Ingersoll 博士協助安排。全程在該中心進行為期三個月專題研究。

CERC 環境毒理組主要負責底泥採樣及實驗室毒性研究，利用實驗室與野外之試驗，以瞭解及評估污染物對水生生態之影響，該單位例行研究範圍包括有

- (1) 淡水、海水及河口底泥毒性分析(Sediment toxicology)；
- (2) 急慢性毒性(Acute and chronic toxicity test)測試標準方法之建立；
- (3) 場址評估包括生態風險評估(Ecological Risk Assessment)、自然資源受損評估及復育(Natural Resource Damage Assessment and Restoration, NRDAR)；
- (4) 採礦重金屬污染之生物可利用性(Bio-availability)；
- (5) 瀕鄰絕種魚類、兩棲類及貽貝(mussels)之敏感性評估(Sensitivity evaluations)；
- (6) 魚類、兩棲類、無脊椎動物及貝類之急慢性毒性測試；
- (7) 魚類、兩棲類、無脊椎動物及貝類之培養。

Christopher Ingersoll 博士為一國際知名水生生物學者及環境毒物專家，擔任美國試驗及材料協會(American Society of Testing and Materials, ASTM)底泥毒性分支委員會 ASTM E47.03 主席，負責所有 ASTM 底泥試驗方法審查與編撰。也曾擔任 1995~1996 國際環境毒理與化學學會 SETAC(The Society of Environmental Toxicology and Chemistry)北美地區分會主席。曾經參與美國大湖區、華盛頓州 Puget Sound 及佛羅里達州等大型底泥品質調查計畫，美國環保署全國底泥調查報告所使用之底泥品質指引他也是主要制定委員之一。因此在這個研究主題上，他擁有極高

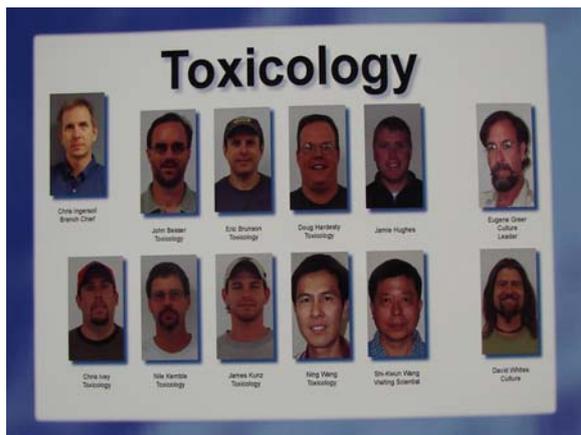
的豐富經驗與權威地位，不但能夠提供寶貴的意見，而且也是給國內相關領域與國際專家學者建立良好溝通管道難得的機會。



圖二、哥倫比亞環境研究中心環境毒理組主任

Dr. Christopher Ingersoll

哥倫比亞環境研究中心環境毒理組主要研究人員除主任 Dr. Ingersoll 之外，有三位資深生物科學家，分別是 Dr. John Bessler，Dr. Ning Wang 及 Dr. Nile Kemble。另外有 7 位專業技術人員，以及 2 位密蘇里大學環境科學研究所博士班研究生。



圖三、環境毒理組研究人員及實驗室

3. 其他研究單位

除了環境毒理組外，哥倫比亞環境研究中心中還有其他五個相關研究專業組室，環

境化學組(Environmental Chemistry)、生態研究組(Ecological Research)、生化及生理組(Biochemistry and Physiology)、大河研究組(Large River Studies)、諮詢及技術轉移組(Information—Technology Transfer)。

其中環境化學組研究主題涵蓋包括模擬生物污染而建立的被動式採樣方法開發、特殊毒性物質如藻毒、抗生素及新產生之農藥分析方法開發、環境基質及生物體一般有機污染物濃度含量儀器分析，主要工作在於整合化學分析結果與生物效應間之對應關係。環境化學組主任為 Dr. Carl Orazio，轄下有約 20 位研究人員。



圖四、環境化學組及主任 Dr. Carl Orazio

二、研究心得

1. 底泥毒性評估之重要性

底泥為許多水棲生物之棲息地，但同時也是諸多被帶入表面水體之持久性汙染物質的主要蓄積處。在水體中，大多數合成化學物質及廢棄物包括毒性有機及無機物終究會累積在底泥之中。在許多文獻中顯示，很多環境劣質化(degraded)的地區雖然其水質並沒有明顯高於水質污染管制標準，但棲息在底泥中或接近底泥的生物卻明顯受到不利影響。⁽²⁾ 水質污染管制標準是被設計用來保護水中生物，並非設計用於底泥上面。而底泥中的汙染物濃度可能千百倍於其上層水體中的汙染物含量，但底泥總汙染物含量和所謂生物可利用性之間又不全然存在絕對的相關性⁽³⁾。化合物在水質與底泥間的分配或吸附和很多因素有關，包括水溶解性、酸鹼度、氧化還原性、對有機碳間的親和性、底泥中溶解有機碳的粒徑大小、底泥中的礦物組成(鐵、錳、鋁等氧化物)、底泥中酸性揮發硫化物(Acid Volatile Sulfides)含量等⁽⁴⁾。雖然有些化合物對底泥有很強親合力，但這些化合物仍然可被生物利用。因此受污染底泥可能直接對水生物造成危害，或是藉由食物鏈的生物累積形成一個汙染源。

大多數的環境調查對於底泥品質評估這個領域都不是做得很完整，這主要是因為對於底泥始終缺乏適當的品質指引或標準評估方法⁽⁵⁾。在過去底泥品質的評估方式一直都是侷限在化學分析上面。然而底泥中汙染物濃度與生物供給性間的關係一直都不是很清楚，汙染物的濃度值顯然並不足以評估其對水生生物潛在的不利影響。化合物間可能有交互反應作用，生物供給性的時間相依性(time-dependent)也都要一併考量。如果想要了解污染底泥對水生生物之效應，必須要先進行控制毒性測試(controlled toxicity test)及生物累積試驗(bioaccumulation test)。

參考資料：

- (1) Christopher G. Ingersoll, "Sediment Tests", Fundamentals of Aquatic Toxicology, Effects, Environmental Fate, and Risk Assessment, Second Edition, Edited by Gary M. Rand, Ph.D., Taylor & Francis, 1995.

- (2) Chapman, P.M. 1989. Current approaches to developing sediment quality criteria. *Environmental Toxicology and Chemistry* 8:589-599.
- (3) Burton, G. and C. Ingersoll. 1994. Evaluating the toxicity of sediments *in* The ARCS Assessment Guidance Document. EPA/905-B94/002. Chicago, Illinois.
- (4) Di Toro, D.M., C.S. Zarba, D.J. Hansen, W.J. Berry, R.C. Swartz, C.E. Cowan, S.P. Pavlou, H.E. Allen, N.A. Thomas, and P.R. Paquin. 1991. Technical basis for establishing sediment quality criteria for nonionic organic chemicals using equilibrium partitioning. *Environmental Toxicology and Chemistry* 10:1541-1583.
- (5) Lyman, W.J., Glazer A.E., Ong, J.H., and Coons S.F., An overview of sediment quality in the United States. EPA-905/9-88-002. Washington, DC;U.S.EPA, 1987.

2、底泥品質評估方法之演進

環境品質與人民的生活息息相關。當經濟進步到一個階段，人們開始意識到經濟活動對環境的破壞終會反噬。底泥中蓄積了人類經濟活動所產生的污染及破壞，水系生物的生態活動，遭到空前的浩劫。許多物種在短短數十年之間消失殆盡。爲了給後代子孫留下一片淨土，有識之士不斷呼籲要正視這一個問題。

然而，既成的污染整治要花費極大的成本來整治，以各種藉口如資源開採或娛樂活動等人爲的侵入生態系也不可能完全停止，在經濟與環保之間，勢必要有一妥協的空間。要說服人們作出適當的犧牲或自我克制，只有使用精確的科學數據來將問題的嚴重性表達出來，當決策者要下定決心來投資於環境整治或工商活動與資源濫採限制前，一個好的環境評估方法是絕對需要的。

底泥品質攸關著環境生態保護，尤其是水體動植物保護的成敗，同時，爲了有效且適當地執行環境政策，必須有一客觀的底泥品質評估方法。在許多環保法規中，最難制訂且爭議最大的就是底泥品質規範。

睽諸環境保護歷史發展的過程，往往先有空氣品質管制標準，進而制定飲用水或其他水質標準，再來是有害廢棄物及土壤污染管制標準。最後才會輪到底泥品質規範。其主要原因是底泥污染源的追溯最爲困難，其對環境的傷害也最不容易被察覺，而要進行管理，牽涉的層面更是廣泛。在技術面上，底泥品質評估也最爲複雜，如何建立一個客觀可靠的評估方法，並依照評估調查數據結果，制定一合理的品質標準來提供環境決策者之參考，是一件重要的任務。

底泥品質評估方法及規範訂立多年來在許多學者及各國政府的努力下，不斷精進。在這個章節中，主要在介紹底泥品質評估的演進歷程。

底泥毒性測試(Sediment toxicity tests)包含全底泥(whole sediments)以及其萃出物(extracts)如溶出液(elutriate)、間隙水(pore water)及溶劑萃液(solvent extract)等。而底泥品質優劣的基準，也就是底泥品質規範(Sediment Quality Guideline(SQGs))，通常要考量許多個層面，例如背景濃度(Background conc.)，參考廢水排放管制標準(concentrations derived from sewerage assessments)，由生物及化學實驗與理論機轉推導方式來推估

(biological-chemical empirical and mechanical (theoretical) approaches)以及折衷的共識基準(consensus-based approaches)等方式。

表 1 底泥品質評估方法演進歷程

年代	重要發展
1863	Penny 及 Adams 提出第一個水質毒性試驗方法
1890	河川及港口法案(Rivers and Harbors Act)第十條生效
1937	Galtsoff 等發表無脊椎動物培養方法
1960	Reish 及 Barnard 提出第一個使用 <i>Capitella capitata</i> 在野外暴露條件進行海洋底泥瓶式毒性試驗
1967	DeFalco 出書「 <i>The Septic Tank of the Megalopolis</i> 」預測紐約市港口底泥與水質預見之問題
1971	Gannon 及 Beeton 提出第一個淡水全底泥毒性試驗方法(fresh water whole-sediment toxicity test)
1971	美國陸軍工程處主任 Jensen (US Army Office, Chief of Engineers)擬定以背景值訂出之浚挖物質評估基準，稱之為 Jensen Criteria 。
1970s	美國陸軍工兵工程處(US Army Office Corps of Engineers ,USACE)制定浚挖物質研究計畫(Dredged Material Research Program DMRP)。
1972	美國國會通過施行海洋保護研究及衛生法案(Marine Protection, Research, and Sanctuaries Act ,MPRSA)及聯邦水污染控制法案(Federal Water Pollution Control Act ,FWPCA)
1973	美國環保署/美國陸軍工兵工程處(USEPA/USACE)聯合發布浚挖物質海洋棄置規範正式版(Final regulation for ocean disposal of dredged material)
1977	美國環保署/美國陸軍工兵工程處發布海洋棄置規範及標準(Ocean disposal regulations and critical)
1977	美國環保署/美國陸軍工兵工程處發布海洋浚挖綠皮書(Green book marine

	dredging)
1977	Wentsel 等發表淡水底泥毒性測試方法
1979	Swartz 等發表第一個海水全底泥毒性測試方法(marine whole-sediment toxicity test)
1981	Oshida 等發表第一個有關鉻對多足綱動物繁殖之影響多世代研究
1982	Chapman 等發表在華盛頓州 Puget 海灣所進行數個候選毒性測試方法之相對績效報告
1983	美國環保署第十區於西雅圖召開計畫會議評估發展全國性底泥標準(National Sediment Criteria)之數個候選方案
1984	Dickson 等舉辦第一屆 SETAC Pellston 研討會
1985	Adams 提出第一個以毒性為基礎之平衡分配模式(toxicity-based equilibrium partitioning model)
1985	Long 與 Chapman 提出底泥品質三要素(Sediment Quality Triad)來探討 Puget 海灣底泥汙染問題
1985	Dinnel 與 Stober 採用棘皮動物(Echinoderm)之 胚胎試驗(embryo test) 來進行底泥測試
1985	Schiewe 等研發對 Puget 海灣底泥萃出液進行微生物毒性試驗(Microtox tests)
1986	Neff 等依據水生族群(benthic community)與底泥化學(sediment chemistry)數據發表篩選值濃度(Screen-level concentration,SLCs)
1986	Beller 第一次為 Puget 海灣底泥提出明顯作用初始值(Apparent Effects Threshold ,AET values) ，並第一次評估其預測能力(predictive ability)。
1987	ASTM 針對底泥毒性測試成立 E47.03 分支協會
1988	Barrick 等針對 Puget 海灣底泥提出修訂版明顯作用初始值(Revised AET values)
1988	Puget 海灣浚泥棄置分析計畫(Puget Sound Dredged Disposal Analysis Program, PSSDA) 開始採用依據明顯作用初始值 AET 所制定之底泥品質指引來進行浚

	挖物質之評估。
1989	國家研究委員會污染底泥報告發行(NRC report on contaminated sediments)。
1989	美國環保署科學指導聯席會(USEPA Science Advisory board ,SAB)審查地方法規使用之 AET 法底泥品質指引(AET approach on regional regulatory use)。
1990	第一個有關海水與淡水毒性測試(marine and freshwater toxicity testing)與底泥採樣與處理方法(marine and freshwater toxicity testing)之 ASTM 標準方法發表。
1990	美國環保署發表科學指導聯席會(SAB)之 EqP 法評估報告(the evaluation of the EqP approach)。
1990	Long 與 Morgan 為 NOAA 發表第一組效應範圍底泥品質指引(Initial set of effects-range SQGs)。
1990	Di Toro 發表關於鉻金屬之 SEM/AVS 法 (SEM/AVS approach for Cd)。
1990	第一個 SETAC 淡水底泥毒性測試方法短期課程(freshwater sediment toxicity testing methods)。
1991	第一個 SETAC 比較各種發展底泥品質指引之方式包括 EqP、 ERL、ERM 及 AET 之短期課程(comparing various approaches for developing SQGs including EqP, ERL, ERM, and AET)。
1991	美國環保署頒布底泥品質標準草案(Draft sediment quality criteria)。
1991	華盛頓州採納包含化學(AET-型)與生物管制標準之底泥管理標準規則(Sediment Management Standards rule)，同時並發表底泥污染場址清理與污染源控制動作之指導手冊 (guidance manuals for both sediment site cleanups and source control activities)。
1991	Di Toro 等發表非離子性有機化合物管制標準之技術基礎(Technical basis for criteria for nonionic organic chemicals)。
1991	Lorenzato 等在加州 Richmond 召開專家會議指導加州州政府有官底泥品質評估

	與底泥品質目標主題(Panel of experts convened in Richmond to guide the state of California on development of sediment quality objectives)。
1991	美國環保署發表淡水底泥毒性鑑別評估方法指引手冊(Draft TIE methods guidance manual for freshwater sediments)。
1991	Johns 等發表以多足綱動物幼蟲進行慢性底泥毒性試驗之發展與實施(Development and implementation of a chronic sediment toxicity test using juvenile polychaetes)。
1992	Carr 與 Chapman 比較海洋間隙水與全底泥試驗之相對靈敏度。(Relative sensitivities of marine porewater and whole-sediment tests)
1992	加拿大環境部(Environment Canada)發布海洋毒性試驗方法手冊(Marine toxicity methods manual)
1992	Long 與 Morgan 報告再度印行。
1992	Persaud 等發表加拿大安大略省之 SLC 值。
1992	美國環保署發表科學指導聯席會報告以平衡分配法推估非離子性有機污染物。
1993	環境毒性與化學學會(SETAC)舉辦底泥評估方式短期研習會作為美國環保署大湖國家計畫(the USEPA Great Lakes National Program)之一部分。
1993	美國環保署訂定三種多環芳香烴及兩種殺蟲劑農藥的管制值草案，但隨後放棄不用。
1994	美國環保署頒佈淡水及海洋底泥毒性與生物累積測試方法手冊(Toxicity and bioaccumulation method manual for freshwater and marine sediment)。
1994	Macdonald 為佛羅里達州提出海水效應濃度值作為底泥品質建議指引。
1995	美國國家海洋與大氣總署之 Anderson 等利用底泥萃出物之人類報導基因系統(HRGS)分析應用在監控上。
1995	SETAC 舉辦美國環保署淡水底泥獨毒性與生物可利用性測試方法短期課程
1995	Long 等發表修正版海水底泥品質指引效應範圍(Revised set of salt-water,

	effects-range SQGs) 。
1995	加拿大發表依據修正國家狀態與趨勢計畫(the National Status and Trends Program , NSTP)與添加底泥毒性試驗(the Spiked-Sediment Toxicity Tests , SSTT)發布淡水與海水底泥品質指引 SQGs 草案。
1996	MacDonald 發表有關佛羅里達州海水之毒性效應閾值效應濃度(TELs)及可能效應濃度濃度值(Saltwater effects-level TELs and PELs published for Florida)
1997	SETAC 舉辦底泥品質指引使用之短期課程(SETAC short course on use of SQGs) 。
1997	美國環保署發行第一次全國底泥品質清單 (First National Sediment Quality Inventory issued by USEPA) 。
1998	Long 等發表 ERL/ERM、TEL/PEL 及 SQG 比值法實驗法之預測性比較 (Comparison of predictive ability of ERL/ERM and TEL/PEL values and mean SQG quotients) 。
1998	Long 等發表 SEM:AVS 以及以實驗法推估底泥品質指引之預測性評估 (Predictive ability of SEM:AVS and empirically derived SQGs) 。
1998	美國環保署/美國工兵工程處聯合制定內陸測試手冊(Inland testing manual for sediments issued by USEPA/USACE) 。
1999	Field 等發表關於暴露反應關係之 對數回歸模式法(Logistic regression model of exposure-response relationships) 。
1999	Swartz 發表共識推估法 PAHs 指引[(Consensus-based PAH guidelines) 。
1999	Hyland 等發表修正版底泥品質指引比值之暴露-反應關係與水生物衝擊 (Exposure-response relationships for revised SQG quotients and benthic impacts) 。
2000	美國環保署修訂淡水底泥毒性與生物累積測試方法手冊(Toxicity and bioaccumulation methods manual for freshwater sediment)以包含納入異腳目動物 (amphipods)與搖蚊幼蟲(midge)之慢性毒性測試項目(chronic methods)

2000	美國環保署科技處(USEPA Office of Science and Technology)草擬推導 EqP 型共識型底泥指引技術基礎與程序手冊草案(draft manuals on technical basis and procedures for derivation of EqP-derived sediment guidelines)
2000	Mac Donald 等發表淡水底泥之共識型底泥品質指引 (Consensus-based SQGs for freshwater sediments) 。
2000	Mac Donald 等發表多氯聯苯之共識型底泥品質指引 (Consensus-based SQGs for PCBs) 。
2000	Long 等發表以底泥品質指引預測毒性之或然率(Probabilities of toxicity predicted by SQGs) 。
2001	美國環保署與美國工兵工程處發表以 <i>Leptocheirus plumulosus</i> 作慢性毒性測試手冊(Chronic toxicity testing manual for <i>Leptocheirus plumulosus</i>) 。
2001	Fairey 等發表修訂底泥品質指引分率之暴露-反應關係(Exposure-response relationships for revised SQG quotients)及異腳目存活率。
2002	MacDonald 等發表佛羅里達州淡水效應型底泥品質指引 (effects-based SQGs) 。
2002	MacDonald 以底泥品質指引(SQGs)及一權值證據法(WOE)來評估相對於內政部標準的底泥受損情形。
2002	Wenning 與 Ingersoll 主持第三屆 SETAC Pellston 底泥品質評估研討會(workshop on sediment quality assessments) 。
2002	美國環保署研發處(USEPA Research and Development Office) 草擬推導 EqP 型底泥管制標準(EqP-based sediment benchmark)程序手冊。
2002	Hylan 發表河口底棲族群之擴大暴露-反應關係。

2.1 背景說明

1890 河川及港口法案第十節生效(Rivers and Harbors Act)– 禁止任何對美國水域可航行容量之阻礙。管理許可證計畫。

1960 年代晚期 美國工兵工程處 USACE(Army Corps of Engineers)將該法案擴充其許可申請的審查範疇至包含魚類及野生動物保護、污染、美觀、生態及一般大眾利益考量(聯邦法律 CFR 1968)。

1969 國家環境政策法案(National Environmental Policy Act)

內容涵蓋大眾利益的審查及籌備一份環境衝擊聲明書(environmental impact statement, EIS)。

1967 Defalco 在其出版的書中預言港口及大城市如紐約洛杉磯聖地牙哥等之沖積淤泥會由於經由河川及溪流傳輸水質問題至海岸環境而提高污染。大多數初期對污染底泥關切的重點集中在將污染底泥棄置於水體之問題上。(*Aquatic Disposal of Contaminated Sediment*)

公眾法(Public Laws) 92-532 海洋保護、研究及庇護區法案 (MPRSA, Marine Protection, Research, and Sanctuaries Act 1972) 與 92-500 聯邦水質保護管制法案 1972 年修正案 (FWPCA, Federal Water Protection Control Act, Amendments of 1972)中要求美國環保署與美國工兵工程處著手進行草擬規範浚挖與回填物質之排放。

1970 河川及港口法案修正案授權美國工兵工程處藉由**浚挖物質研究計劃 DMRP** (Dredged Material Research Program, 1973~1978)，來進行浚挖底泥棄置對環境效應的全面性評估。DMRP 是第一個針對浚挖底泥棄置需符合清潔水質法案(Clean Water Act)與海洋棄置法案(Ocean Dumping Act)之評估與管理全國性問題探討的計畫。它評估了水體、高地與溼地中浚泥管理的善意使用(beneficial uses)與法規層面。DMRP 藉由國內立法與規範海洋棄置的國際條約(倫敦公約 The London Convention)構建了浚泥測試與評估的技術基礎。DMRP 同時也建立了發展鑑識、評估及管理浚挖物質所需要的技術。DMRP 的主要結論---對於浚泥問題沒有單一的解決方案，而是對任何計畫都有一些管理方案必須考量及評估。美國環保署與美國工兵工程處，開始發展一種多線證據 (Multiple lines of evidence (LOEs))，植基於效應之評估方式。在其法規計畫中強調毒性試驗與生物可利用性，佐以化學及物理成份。

1980s 美國環保署開始重視污染底泥對各種型態水體及底泥中底棲水生物之潛在衝

擊，而不在僅限於港口與浚挖物質。

1987 美國環保署啓動污染底泥評估與整治計畫(the Assessment and Remediation of Contaminated Sediments ,ARCS Program) ，以支持大湖盆地(the Great Lakes basin)污染底泥之評估與管理。

2.2 初期底泥品質指引(Initial Sediment Quality Guidelines)

美國最早的底泥品質指引應該是 1971 的建森指引(Jensen Guideline) – 這是第一個美國環保署聯邦水質局(FWQA)爲五大湖港口，所公告浚挖底泥之底泥品質指引。它是由污水評估標準所推估得到，並非來自生物效應評估。當時認爲港口底泥主要承受污水排放，因此相信應該可以外插適用到底泥上。此一指引係因當時簽署備忘錄文件的美國環保署總部經理的名字而得名。在同一年美國工兵工程處發表文件表示建森指引應適用於全美國所有水域。

在建森指引中規範了在底泥中七種化學組成份之限值，包括化學需氧量 COD，總凱氏氮(TKN)，揮發性固態物，油脂，汞，鉛和鋅。限值標準爲基於乾基底泥。

一般反對建森指引之理由可大略歸納爲以下幾點 1. 此一程序未考量到浚挖物中污染物的地理化學位置。2. 未對污染物對生物的潛在利用性提出說明。3.未考慮到同一成份之背景濃度。整個程序僅是提供一個清單來描述底泥中各成份之總量而已。

在 1977 年美國環保署第五區提出一套新的底泥標準值(Region V sediment criteria)這是一套由建森標準值更新所得到之標準。不過比較其標準值與平均地殼含量，卻發現列爲八個被列爲重度污染的標準值居然低於自然界平均地殼含量。

由於產生了這麼多的問題，在海洋保護、研究及庇護區法案 MPRSA 與聯邦水質保護管制法案 FWPCA 中，於是指示美國環保署須與美國工兵工程處諮詢及聯合來研擬出合理的管制標準及指引。

美國環保署最後定案的管制海洋浚挖底泥棄置的法規與標準是 1973 年的聯邦登錄法規(Federal Register 1973)。以化學程序來評估浚挖底泥海拋的妥適性，主要包含的是淘析物試驗(elutriate tests)，取代全底泥分析(whole sediment analysis)。

海洋保護、研究及庇護區法案 MPRSA 要求這份海拋管制標準要每三年更新一次。第一次更新是在 1977 頒布的聯邦登錄法規(Federal Register 1977), 提供廢棄物及其他物質傾倒海洋污染防治公約(the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter)。以回應國家野生動物聯盟(*the National Wildlife Federation*) 對 1973 年標準不足所提出之司法挑戰。

1977 年海洋保護、研究及庇護區法案 MPRSA 的法規促成第一個雙重政府機關執行浚挖物質海拋評估的準則手冊。**USEPA/USACE 1977** 敘述為估計在棄置點之混合情形的全底泥毒性試驗及生物可利用性之進行方法。底泥品質以液相、懸浮顆粒及全底泥測試配合液相之化學分析來進行。這些第一個全底泥毒性試驗是將生物暴露在多層底泥上(表層浚挖物質鋪蓋在一底層棄置點底泥上)。化學成份對水層的衝擊性判定方式是在經初步混合後比較其淘析物(elutriate)濃度與水質標準濃度, 抑或是經由液相的毒性試驗。**USEPA/USACE 1991** 的修訂進一步反應了毒性與生物可利用性試驗以及棄置、混合與遷移模式在科學上與經驗上進步。此一手冊包括生物的選擇, 實驗的設計, 統計方法, 模式輸入, 化學及品保品管。

至於公共法第 92-500 條(清潔水質法案)施行指引的定案版發布在 1975 年 9 月 5 日的聯邦法規 Federal Register Vol. 45, No. 249。要求排放者必須考量物理效應(尤其是對濕地的衝擊)以及化學-生物效應, 並要實施徹底的場址選擇評估。水體的化學效應評估是以淘析物測試來進行。發照當局並可依個案指定申請者進行淘析物與全底泥毒性試驗(elutriate and whole-sediment toxicity test)。當局也可以在審核替代場址時要求全底泥化學分析(total sediment-chemical analyses)及/或底棲族群結構分析(benthic community structure analyses)。此一法規在 1981 年修訂, 使用相同的測試方式。在 1998 年採用海洋手冊的格式, 用在內陸水域(USEPA/USACE 1998)。對於浚挖底泥始終都要求要進行底泥毒性與生物可利用性試驗。

1981 年美國環保署第六區提出所謂底泥品質指標(sediment quality indicator)的概念。間隙水(interstitial or pore water)中的污染物濃度與美國環保署水質標準(WQC)比較, 認定間隙水是水生生物攝取的重要途徑。雖然後來沒有被採納, 但美國環保署管制

規範與標準部門(USEPA Criteria and Standard Division) 啓動了底泥管制標準發展計畫(sediment criteria development program)，重點放在粒狀物與間隙水間的平衡分配(Equilibrium Partition, EqP)。雖然也和水質標準來比較，但底泥濃度經過了底泥-水分配係數正規化修正。1992 年研究發現底泥中非離子性有機化合物如 DDT 或 Kepone 的相對生物可利用率與總有機碳(TOC)有關。1995 年研究發現酸性揮發硫化物(AVS)與總有機碳(TOC)控制金屬的生物可利用性。這些修正都大大提高了原來間隙水概念的再現性與效應驗證率。1991 年美國環保署發布了第一個基於 EqP 的底泥管制標準。

在同一時期，參考元素法(Reference Element Approach)在 1990 年被 Schropp 等提出來評估河口底泥(estuarine sediment)金屬污染。它將金屬濃度正規化至一種參考元素。在佛羅里達州地區性河口底泥的研究，發現正規化至鋁元素最有用。不過 Loring 等 1991 年也使用過鋰或其他元素作為參考元素。

2.3 底泥毒性測試(Sediment Toxicity Tests)

在沒有可以使用在實驗室及野外之底泥毒性試驗發展出來之前，完全沒有辦法推導出效應基準之底泥品質指引。在以往，評估受體的污染物效應主要著重在表體水(water column)而非底泥。大多數水質評估方法集中在可溶解於水中的污染物，底泥則被認為是一吸附污染物之無害儲存所。因此只將重點放在測試生物在水體中的效應而不考慮底泥中化學物質之宿命究竟為何。

底泥毒性測試有許多種類，短期致死率測試(Short-term lethality tests)評估個別污染物對單一物種的效應。長期測試(Long-term tests)則用於決定混合化學物質對族群的結構與功能之影響。測試底泥相包括：

- 全底泥 Whole sediment
- 懸浮底泥 Suspended sediment
- 淘析物 Elutriates
- 底泥萃出物 Sediment extracts

測試底泥的數量由數個毫升至 800 公升都有。測試的生物體包括水藻(algae)、大型

水生植物(macrophyte)、魚類、底棲(benthic)、近底棲(epibenthic)及深海(pelagic)無脊椎動物。

底泥毒性試驗要在控制的實驗室條件下使用野外採集的底泥或以化學品添加之底泥來進行。它的用途包括有(1)決定毒性效應與生物利用性之關係(2)研究污染物間之相互反應(3)決定污染之空間與時間分佈(4)評估浚泥之危害性(5)將待清理區域分級(6)決定整治與管理之有效性。藉由已知濃度添加底泥之毒性試驗可以用來建立化合物與生物效應間之因果關係(cause-and-effect relationship)。

有一些早先用於放流水(effluent)及周界水體(ambient water)測試的方法如 daphnids、mollusk embryos、urchin gametes 或用於純化學物質的方法如 Microtox 也可被用來進行底泥毒性試驗。

1967 年 Reish 與 Barnard 曾進行各種水相與底泥萃出物毒性試驗，並將結果與底棲族群的族群結構受損害之證據相比較。結果 Reish 與 Lemay 在 1988 指出這些推論如果能用全底泥來進行，會得到更貼切之關聯。

1970 到 1980 年間，許多研究集中在量測及預估現場底泥對生物之不利影響。這段期間主要是 10 天以下之短期暴露試驗。其中第一個淡水底泥全底泥毒性試驗-----1971 Gannon 與 Beeton 以取自五大湖港口區域的底泥，評估水底異腳目生物 *Pontoporeia*、*Gammarus* 及搖蚊幼蟲 *Chironomus* 之 24 小時與 48 小時存活率。



Prater 和 Anderson 以水底生物(benthic organisms)和水中生物(water column organism)結合在一起進行底泥毒性試驗，認為藉由 hexagenid mayflies 底泥重組(sediment reworking)會將水中生物暴露於底泥之程度最大化。Malueg 等以密西根湖底泥用 *Daphnia magna* 及 *Hexagenia limbata* 作類似測試，後來水底生物改以 *Chironomus*

tentans 代替。1980 現在普遍被用的淡水底棲水生物寡足綱的 *Lumbriculus Variegates* 第一次被 Bailey 和 Liu 用在底泥毒性試驗上。1984 年 Nebeker 等發表以 *Hyalella Azecta* 和 *C. tentans*. 進行底泥急毒性測試之方法。1987 年 Milbrink 第一次推薦以水生寡足綱動物 *Tubifex tubifex* 作為測試物種。

發展底泥毒性試驗的一個重要的動機是基於浚泥工程許可取得前必須先進行測試。因此為了執行海洋或淡水水域棄置的工作，發行了一系列的相關準則手冊。因應 1975 年清潔水質法案(Clean Water Act, CWA)中關於浚挖與回填物質指引(Dredged and Fill Material Guidelines)的要求，第一本內陸準則(Inland Manual)在 1976 年由美國工兵工程處 USACE 發行。這是一步初步的草案內容，介紹了簡單的混合模式，有關水體中沉澱化學水藻分析，以及討論了水底層分析的本質。這部準則很少被使用到，主要是因為它並非由美國工兵工程處與美國環保署聯合製作，內容並不太多。在 1981 年清潔水質法案提到過聯合的方式，但直到 1990 年代初期之前，並沒有實際開始實行。第一本海洋棄置準則手冊(Ocean Disposal Manual)俗稱綠皮書 Green Book 在 1977 年由 美國環保署與美國工兵工程處 USEPA/USACE 聯合製作發行。

在底泥毒性試驗中最重要的進展是在十日靜態測試中採用了深層底棲的異腳目動物。這些測試主要在回應美國法規對浚挖物質棄置水體妥適性評估的需求。1977 年海洋拋棄規範及標準(Ocean Dumping Regulations and Criteria)要求測試中必須包含至少三個物種：一種濾食性動物 filter-feeder，一種沉積物食性動物 filter-feeder 及一種穴居性動物 burrower。推薦用作試驗之物種包括一種甲殼綱動物 crustacean，一種深層底棲雙殼貝動物 infaunal bivalve 以及一種深層底棲多足綱動物 infaunal polychaete。這三種動物中以深層底棲的異腳目動物似乎是最敏感的，因此也是最佳的固態物質生物分析生物。USEPA/USACE 在 1977 年推薦了兩種異腳目動物 *Ampelisca* spp. 和 *Paraphoxus* spp.，其中後者後來被更名為 *Rhepoxynius*。一開始，試驗是在水族箱中以流水式條件來進行，待測物以沉積方式置於生物體上面。Swartz 等在 1979 年發表了有關測試方法進一步的細節，

於 25 公升水族箱中，在一套五種不同生物組中選用唯一的甲殼綱動物是 *Paraphoxus epistomus* (現在分類學上重分類為 *Rhepoxynius abronius*)。三年之後，Swartz 等在 1982 年發表了關鍵性的文獻描述在一污染海洋場址美國華盛頓州坎門斯緬特灣(Commencement Bay)以此一甲殼綱動物進行大規模的底泥試驗。此一研究的目的並不在於作浚挖物質分類，而是在於快速測試大量樣品，因此測試在一 1 公升燒杯中以靜態方式測試。

這種 10 天底泥毒性試驗目前已以類似方法作為例行測試：

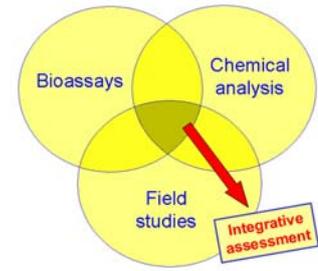
- Nebeker 等以 *H. azecta* 在淡水中進行；
- 1989 年 Scott 與 Redmond 以 *Ampelisca abdita*，同年 Dewitt 等以 *Eohaustorius estuarius*，在河口水進行；
- 1992 年 Schlekot 等及 1993 年 McGee 等以 *Leptocheirus plumulosus* 在海水中進行。

值得注意的是，以底棲異腳目動物作急毒性試驗已被申請浚挖底泥測試採用且列為必須檢測項目，因此在 1991 年成為一評估底泥品質普遍通用的工具。

國際 ASTM 學會於 1987 年 5 月成立 E47.03 底泥毒理分支委員會(Subcommittee E47.03 on Sediment Toxicology)，主要目標在於發展評估底泥污染物生物可利用性之標準指引。發展這些標準之目的在於提供可以用來評估污染底泥、土壤、污泥、鑽探液體及類似物質之毒理危害性(toxicological hazard)。這一分支委員會每兩年春天在 ASTM 國際 E47 委員會就生物效應與環境宿命(Biological Effect and Environmental Fate)開一次會，在秋天則在環境毒理與化學學會(the Society of Environmental Toxicology and chemistry, SETAC)年會上聚會。很重要的事是，不管其來自那些機關或單位，參加這些分支委員會 30 到 50 位對污染底泥評估與管理有興趣的個人，能夠有機會在其所提供的論壇中，以一種共識性的程序來討論標準方法之發展。

底泥品質三隅體觀念(The Sediment Quality Triad concept)

如右圖所示，由 Long 和 Chapman 在 1985 年首度應用在 Puget 海灣上，隨後 Chapman 等在舊金山灣的研究中進一步加以定義。Chapman 在 1990 年對分析三隅體結果報告之方法加以正式定調。



美國國家研究委員會(The National Research Council (NRC))在 1989 年於美國佛羅里達州坦帕市召集了一個科學會議，彙集各方學者對污染底泥評估及整治方面之見解。自從在 Puget 海灣發展出一套毒性試驗的標準作業程序之後，在 1980 年代末期累積了相當數量的化學分析與毒性試驗的數據，可以用來推估該地區的標準值。藉由異腳目動物存活率、幼蟲成長、Microtox(鹽水萃出物)試驗以及底棲族群效應測試結果推估 Puget 海灣之顯著效應閾值(apparent effects thresholds, AETs)。AETs 值構建了區域性浚挖指引及華盛頓州整治與污染源控制標準的基礎。

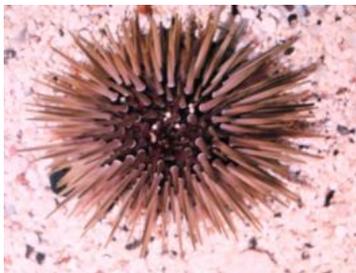
在 1990 年代間經過了五年的努力與審查，終於在 1998 年 2 月產生了第一部官方版本的內陸測試手冊(Inland Testing Manual)。其架構與海洋手冊(Ocean Manual)相似，都採用了階段式方式(tiered approach)來評估。不過它在技術上較海洋手冊有一些進步的地方。

- 手冊論及航道浚泥排放至美國水域以及由密閉式設備之流出與排放。
- 與 1991 年之綠皮書比較，內陸手冊提供較佳之採樣、分析、統計及暴露模式評估。
- 內陸手冊包含詳盡有關所有建議測試方法之測試條件及測試允收標準，包括淡水、河海交界水(brackish)以及海水生物，以及用以施行這些測試之標準方式。
- 手冊列出測試生物，涵蓋相當範圍靈敏度之物種，以及推薦之標竿生物。

國際美國試驗與材料協會(ASTM International), ASTM 標準方法年報第 11.05 冊

1. 淡水無脊椎動物之底泥關聯性毒性實驗標準測試方法(Standard test methods for

- measuring the toxicity of sediment-associated contaminants with fresh invertebrates) ASTM E1706-00) (全底泥，急性與慢性測試，淡水異腳目動物 freshwater amphipods，搖蚊幼蟲 midge，寡足綱動物 oligochaetes，水蚤類動物 cladocerans)
2. 海水無脊椎動物之底泥關聯性毒性實驗標準測試方法(Standard test methods for measuring the toxicity of sediment-associated contaminants with estuarine and marine invertebrates) ASTM E 1367-03。
 3. 底泥毒性生態測試用底泥之採集、貯存及操作以及底棲無脊椎動物採集用採樣器之選擇標準指引(Standard guide for collection, storage, and manipulation of sediments for toxicological testing and for selection of samplers used to collect benthic invertebrates) ASTM E 1391-03。
 4. 設計底泥生物試驗之標準指引| ASTM E 1525-02。
 5. 以多足綱環節動物進行底泥毒性試驗標準指引(Standard guide for conducting sediment toxicity tests with polychaetous annelids) ASTM E 1611-00。
 6. 以海膽胚胎進行靜態急毒性試驗標準指引 ASTM E 1563-98(s00)。



7. 以四種海水貽貝類胚胎進行靜態急毒性試驗標準指引(Standard guide for conducting static acute toxicity tests), ASTM E 724-98(2002)。
8. 測定底棲生物對底泥污染物之生物累積 ASTM E 1688-00a. 根據美國環保署指引手冊：鋪陳底泥生物累積測試:EPA 600/x-89/302,1989.

在同時期，加拿大環境部與美國環保署也已發展一系列淡水與海水毒性測試方法與上述各個 ASTM 標準方法相容的測試方法。

基於這些 ASTM 方法，經濟合作發展組織 OECD 正在發展以搖蚊幼蟲進行淡水底泥試

驗，以及以寡足綱動物來進行之生物累積毒性試驗。

在 1990 年代期間，重點放在發展進行長期毒性測試(28 至 60 天暴露)之方法，評估對淡水及海水測試生物存活、成長或繁殖之效應。

從 1990 年代開始，USEPA、NOAA 及 USGS 使用毒性測試來作為進行全國性河口與淡水監測計畫之調查工具。這些大規模調查所得到的資訊後來成為做推導與驗證底泥品質指引 SQGs 所需之資料庫。

以未達致死劑量(sublethal)或慢性(生命週期)終點之海洋底泥毒性測試被發展與應用於 NOAA 和 USGS 所主導的研究與調查中。包括對溶劑萃液之 Microtox 試驗以及各種在 Puget 海灣進行魚肉組織與無脊椎動物之各種測試。

在華盛頓州所有底泥管理計畫中採用了一個以多足綱生物幼蟲成長測試。

Long 等在 1990 年使用數種統計標準來評估舊金山灣所進行 5 種毒性試驗之相對績效。

2.4 效應基之底泥品質指引(Effects-based Sediment Quality Guidelines)

1. 由理論推導(機轉或平衡分配)(Theoretical (mechanical or EqP) approach)
2. 實驗(關聯式)推估(Empirical (correlative) approach)
3. 折衷共識方式推估(Consensus approach)

在 1980 年代晚期，由數個美國境內沖積底泥的數據以篩選值濃度(the screen level-concentration, SLC)推估方式(一種實驗推估方式) 來導出用以保護 90% 水生生物的數值。

由化學組成、毒性試驗和生物相數據，以 AET 推估法(一種實驗法) 導出了第一套應用在 Puget 海灣的指引值。這一套指引後來以較擴充的資料庫來加以重新估算過並得到最終定案數值。這一套被用在 Puget 灣的指引值最後經過美國環保署所召集的科學指導聯席會(the Science Advisory Board,SAB)審查通過。AETs 被用來建立地區性浚挖物質指引(regional dredged material guidelines)，同時也被用以作為華盛頓州底泥來源控管與預知清理之管制標準(criteria for use in sediment source control and cleanup prognosis)。

發展效應型(effects-based)底泥品質指引來自於 1980 年代中期由美國環保署一個包含研發處(Office of Research and Development, ORD)與水質處(Office of Water)的科學家及 OW 的合約廠家所組成工作小組。一開始這些數值被稱之為底泥品質標準(Sediment Quality Criteria, SQC)。

1988 年美國環保署科學指導聯席會 SAB 審查 EqP、AET 及 SLC 方法作為發展標準之方法基準。

- 底泥中金屬生物可利用性以酸性揮發硫/同步萃取金屬法(AVS/SEM)來評估。
- 在 1990 年初期第一套 EqP 型底泥標準已公開讓大眾表示意見。
- 1992 年 SAB 審查用於非離子有機污染物的 EqP 方法，在 1995 年審查 5 種金屬之 AVS/SEM 法。

基於這些審查的結果，EqP 法被選定為發展底泥品質標準較佳之方法。同時由於“標準”一詞具有法律及規定之意涵，經 SAB 審查及參酌大眾意見反應後被“指引”所取代。在 SAB 審查的同時，SQC 草案同時也交由 ORD 及 OW 之科學家與 OW 之合約廠家來審查，所有文件並公佈給大眾提供意見。

2002 年訂出多環芳香烴混合物之標準(benchmarks)草案並送外進行外部同儕審查(peer review)。

在 1980 年代晚期與 1990 年代初期 Puget 海灣的 AETs 值的預測性包括其效率、靈敏度及整體可靠度均被用來進行評估。

第一組基於實驗法得到之效應範圍低限(effects range low, ERL 與效應範圍中值 effect range median, ERM) 由美國國家海洋大氣總署 NOAA 的 Long 與 Morgan 在 1990 年提出，用以協助詮釋 NOAA 之國家現況與趨勢計畫(the National Status and Trends Program)中的底泥化學數據。這些數據是由分析許多全國性海水與淡水調查研究計畫中底泥化學與生物數據所得到。

1991 年在加州召開專家會議來對加州底泥品質目標之研訂提供科學指導。

1992 年 Persaud 等為加拿大安大略省由底棲族群數據的分析得到篩選值濃度(SLC values)。

初期的 ERLs 和 ERM 範圍被批評混用了淡水與海水數據，且忽略了無效應之部份。有鑑於此，Long 在 1995 發行修訂版之 ERLs 和 ERM 為植基於擴充的資料庫，排除了淡水數據。

MacDonald 在 1994 及 1995 年進行佛羅里達州海洋底泥計算閾值效應濃度(the threshold effect level, TEL)與可能效應濃度(the probable effect level, PEL)指引之計算上，對效應與無效應之觀測結果都納入。

1996 年 Smith 依據加拿大環境部 1995 年所頒布之國家標準程序，為加拿大發展淡水與海水底泥之過渡型底泥品質指引(interim SQGs)。

毒性鑑識評估(TIE)研究所用之方法草案為基於間隙水之分析，是由美國環保署所發行，用以協助鑑別造成底泥毒性之化學品。

1994 年美國環保署公告三種個別多環芳香烴 PAH 及兩種殺蟲劑之底泥品質標準 SQC 草案值供大眾審視，反應了當時科學之發展現狀。隨著新數據、模式及分析之加入，三種個別多環芳香烴底泥品質標準結合成為一混合 PAHs 之 SQC，以反應其在自然界存在之實際狀況，以及其毒性物質加成性之特質。其後 Swartz 等在 1990 年代間發展出估計 PAHs 混合物毒理特徵的方法。早期發表之三種 PAHs 的標準草案因而放棄了，併入合併 PAHs 混合物用之程序。1999 年 Swartz 推導出將個別由不同方法所得個別 SQGs 值合併成共識型 SQGs(consensus-based SQGs)。因此共識法(consensus approach)成為第三個推導效應基 SQGs 之主要類別。

由實驗法所推衍出的 SQGs 被批評為不是由因果法所推導出。共識法結合了理論(機轉)法與實驗法所意涵之真實世界實況。

回應對 ERL、ERM、TEL、PEL 數值預測能力的顧慮，Long、Field 與 MacDonald 在 1998 年對這些特定 SQGs 預測能力作了定量評估。2000 年 Long 等將暴露-反應關係以擴充之資料庫加以重新計算，並以或然率表加以表示。其後，2001 年 Fairey 等重新檢視用以計算平均 SQG 分率之化合物清單，將那些最能提供與毒性資料相穩合的化合物找出來。

MacDonald 及 DiPinto 與 MacDonald, Ingersoll, Berger 分別以共識型方法應用在為總多氯聯苯及淡水 SQGs 之計算。多氯聯苯之共識型 SQGs 係用於找出構成對 PCB 污染場址造成損害中該等物質濃度。佛羅里達州依據 2002 年 McDonald 等早先用來推導其等之海洋 SQGs 之程序，發佈非正式的淡水底泥指引值。

Ingersoll 在 2001 年以一淡水底泥毒性資料庫對共識型底泥品質指引之預測能力進行評估。Field 在 1999 年及 2002 年發表文獻中首次以對數回歸模式方式(**logistic regression model approach**) 應用在由底泥化學來對海水異腳目動物毒性之預測。

到了 1990 年代末期，對於超出平均 SQG 分率值(average SQG quotient)或 SQG 數值的暴露與實驗室中異腳目動物毒性試驗反應(**the response in laboratory toxicity test with amphipods**)兩者間的整體關係已相當清楚。然而這些研究都是基於實驗室毒性測試結果，至於與底棲族群分析資料間的關係還不是很清楚。

Hyland 等在 1999 年研究美國東南河口底棲族群衝擊與平均 SQG 分率間的關係。在 2003 年重新以包含大西洋與墨西哥灣河口與 Puget 海灣之擴充資料庫來分析。Long 等在 2002 年由佛羅里達州比斯凱恩灣的數據也建議對高度污染區在邁阿密河下游底棲族群反應超出由異腳目動物存活試驗。整體而言，這些結果顯示，底棲族群指數在遠比實驗室異腳目動物毒性試驗更低的化學濃度就已受到影響。不過自然因子(指鹽度、粒徑或 TOC)相較於化學誘發毒性(chemical induced toxicity)對底棲族群之相對影響力還尚未完全量化。

2002 年美國環保署發表所收集之底泥文件，名之為研發處技術程序出版物(ORD technical procedure publications)。提供使用者美國環保署所擁有已知最新與最好的資訊以推導評估底泥污染所需數值。

在 2002 年底泥品質指引被 MacDonald、Ingersoll、Smorong、Lindskog、Sparks 等用在一件自然資源損害評估與復育(Nature Resource Damage Assessment and Restoration)個案中作為一種權重證據法(weight-of-evidence (WOE) approach)。

Current research on development of TIE procedures is focusing on whole sediments(Ho et al. 2002).

2002 年水體環境聯盟(the Water Environment Federation, WEF) 發表底泥品質評估手冊(handbook on sediment quality assessments)，內容包含蒐集到之採樣方法，分析程序，當時所了解知底泥品質指引在海水的預測能力等。

參考資料：

- (1) Robert M. Engler, Edward R. Long, Richard C. Swartz, Dominic M. Di Toro, Christopher G. Ingersoll, Robert M. Burgess, Thomas H. Gries, Walter J. Berry, G. Allen Burton, Thomas P. O'Connor, Peter M. Chapman, L. Jay Field, Linda M. Porebski; "Chronology of the Development Quality Assessment methods in North America", Chapter 8, *Use of Sediment Quality Guidelines and Related Tools for the Assessment of Contaminated Sediments*, Edited by Richard J. Wenning, Graeme E. Batley, Christopher G. Ingersoll, David W. Moore, SETAC Press, 2004.
- (2) Lorenzato S.G., Gunther A.L., O'Connor J.M., 1991. "Summary of a workshop concerning sediment quality assessment and development of sediment quality objectives, Sacramento (CA)": California State Water Resources Control Board, 31p.
- (3) Persaud, D., Jaagumagi, R., and Hayton, A. 1993. "Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario". Water Resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Ontario. 27p.
- (4) MacDonald D. D., Ingersoll C.G., Smorong D.E., Lindskog R.A., Sparks D.W. Smith J.R., Simon T. P., Hanacek M.A.,2002; "Assessment of injury to sediments and sediment-dwelling organisms in the Grand Calumer River and Indiana harbor Area of Concern, USA", *Arch Environ Contam Toxicol* 43:141-155.
- (5) Water Environmental Federation, 2002; "Handbook on Sediment Quality.", Whitermore editor. Alexandria (VA):WEF. 372p.
- (6)

3、底泥品質指引(Sediment Quality Guideline)

底泥品質指引之目的在於保護生物資源，或預估底泥對該等生物資源可能造成之不利影響。這是一種用來評估對底泥棲息生物不利影響之相對基準(判定底泥具效應(effect)或無效應(no-effect)之化合物濃度)，通常可藉由機轉推算法(mechanistic approach)或實驗法(empirical approach)來估算得到。

3.1 常見的底泥品質指引及推估方法：

- 平衡分配法(Equilibrium Partitioning, EqP)^{1,2,3,4}
- 篩選值濃度(screen-level concentration, SLC)^{5,6}
- 效應範圍低限(effects range low, ERL)及效應範圍中值(effects range median, ERM)^{7,8}
- 界限效應濃度(Threshold effects level, TEL)及可能效應濃度(Probable effects level, PEL)^{9,10}
- 顯著效應界限值(apparent effects threshold, AET)^{11,12,13}
- 共識基準評估法(consensus-based evaluation)^{14,15,16}
- 對數迴歸模式(Logistic Regression Modeling, LRM)^{17,18}

機轉推算法底泥品質指引是以添加底泥樣品來測試，並與野外採集底泥之毒性測試結果相比較。實驗法底泥品質指引則是由野外採集樣品得到之大量資料庫數據化學分析值(特定底泥污染物濃度)與觀察生物效應(底泥毒性測試及底棲族群資訊)結果比較而得到。將所有數據依化合物濃度遞增連續排置，然後再依特定之判定基準來決定具效應或無效應之濃度值如ERLs、ERMs、TELs、PELs、AETs等。這些數據資料庫同時也被用來評斷底泥品質指引預估底泥毒性之能力。以實驗法底泥品質指引中的死亡率(casualty)來作為底泥毒性指標有時會產生爭議性，這是因為野外採集底泥所觀察到的毒性或生物危害(biological degradation)並不必然由所檢測到污染物質所造成。它可能由同時存在一或多種化合物所造成，也可能綜合底泥地質或底質棲息特性之影響所致。

在許多研究中，有些以作用性所推算之SQG對野外驗證研究中之急性作用有不錯之

預測績效。但在其他方面則尚有疑慮，如SQG是否足以預測慢性毒性之存在？是否可以預測生物累積毒性之影響？是否可以建立因果關係？是否可以由單一結果(例如異腳目動物致死率測試)來推估其他生物之影響？

爲了更周延進行底泥危害性評估，SQG需配合其他工具如底泥毒性測試、生物累積性及底棲族群調查等，以權重證據(weight of evidence, WOE)方式來進行。如何結合諸多單線證據(Line of Evidence, LOE)如生物性或化學性結果，以量化而非主觀或定性的方式來執行WOE，目前仍沒有定論。

3.2 機轉推算法底泥品質指引-平衡分配法(Equilibrium Partitioning Approach)

目前機轉推算法底泥品質指引是依據平衡分配理論所導出。1985年Adams W.J.等²⁴以kepone添加至三種不同有機碳含量之底泥中，以搖蚊幼蟲(midge larvae)進行暴露實驗，發現對三種底泥有顯著不同之反應。這顯示底泥組成對化合物在底泥中之生物利用率有很大關係。但他也發現如果改以間隙水(pore water)中之kepone含量作圖，則所有數據併爲一條濃度-反應曲線。這意謂著底泥中kepone之毒性潛勢與間隙水中之毒性物質濃度成正比。對於非離子性有機化合物，主要主宰底泥與間隙水間分配關係的就是底泥中有機碳含量。1991年Di Toro等建議將此一評估方法用於建立非離子性有機化合物之底泥品質指引。

$$C_{\text{SOC}} = C_{\text{PW}} \times K_{\text{OC}}$$

C_{SOC} 爲底泥中單位有機碳所含化合物濃度

C_{PW} 爲間隙水中所含化合物濃度

K_{OC} 爲化合物對有機碳之分配係數

如果把間隙水中所含化合物濃度 C_{PW} 取代爲在水相中產生生物作用之化合物濃度

$C_{\text{effect-water}}$ ：

$$C_{\text{SOC}} = C_{\text{effect-water}} \times K_{\text{OC}}$$

其中 C_{SOC} 爲預測在底泥中(正規化於有機碳)對水生生物造成相同生物效應之化合物濃度(假設水相及底棲生物具相同敏感度)。

因此，要推算一非離子性有機化合物的底泥品質指引，只需要兩個數值：(1) 可反映生物效應的 $C_{\text{effect-water}}$ 值，(2) K_{OC} 值。其中 $C_{\text{effect-water}}$ 值可借用既有水質毒性試驗之數值，毋須重新進行底泥毒性試驗，至於 K_{OC} 值則可由辛醇-水分配係數 K_{ow} 來推估。在某些情況下，也可以針對特定場址進行 K_{OC} 值測定，以符合特定之現場狀況。以EqP理論應用在底泥評估上並未限定是何種特定生物終點測定(biological endpoint)，可以是單一生物或群組生物，可以是致死(lethal)或非致死(sublethal)作用。特定的SQG固然是由某一特定終點測試得到，但也可以適當調整作為其他評估用途。

1993年美國環保署以EqP理論，採用既有USEPA周界水質標準(Ambient Water Quality Criteria, AWQC)中的最終慢性值(Final Chronic Value, FCV)來推導。

$$C_{\text{guideline}} (\mu\text{g/g OC}) = \text{FCV} \times K_{\text{OC}}$$

其後陸續導出包含phenanthrene, acenaphthene, fluorethene, endrin及dieldrin等五種化合物之SQG(Sediment Quality Criteria)¹⁹。

事實上雖然單一PAHs濃度未超出限值，但其混合物卻呈現毒性。由於PAHs很少單獨存在，之後的研究多捨棄以單一PAH來評估，改以PAH混合物來推導。Swartz等²⁰在1995年提出 Σ PAH模式，結合EqP理論、定量結構活性關係(Quantitative Structure-activity relationship, QSARs)、毒性單位(Toxicity Unit)、加成性以及濃度-反應次模式，來推估受PAH污染底泥對海洋或河口異腳目動物(amphipod)是否具有毒性。藉由水質10-d LC50 與濃度關係及 K_{ow} 評估個別PAHs毒性潛勢，再以EqP轉換成底泥之對應濃度，並依濃度值將個別PAHs加成。這些估計的PAHs毒性潛勢最後再以野外採集PAHs污染底泥的10-d毒性試驗結果進行校正。 Σ PAH模式得到之SQG以兩種方式來表示，(1) Σ PAH混合物LC50，相對於造成50%異腳目動物致死率之PAH混合物濃度，(2) Σ PAH 毒性界限值，相當於18.6%之 Σ PAH混合物LC50值。

在這裡面有用到將10-d QSAR模式外插到高度疏水性的PAHs，此一模式假設疏水性化合物之毒性單元結構具有加成性，可以用來預測全部混合物的毒性。但1999年Boese²¹發現這些預測並不盡然正確，計算預測毒性高達兩倍LC50值的PAH混合物卻發現並不具毒性。可能原因包括QSAR高估了PAH之毒性，也可能是低 K_{ow} 之PAHs毒性不

具加成性。兩者都會造成 Σ PAH模式高估底泥毒性。

Di Toro^{1,2}等進一步將 Σ PAH模式擴充到所有非離子性的有機化合物，稱之為“Nacosis approach”。先由個別化合物的 K_{ow} 估計其水中毒性，再藉由EqP計算其對應之底泥濃度。由各成分之毒性計算加資加總得到整個混合物之作用性。與前面提到之 Σ PAH模式相較，他所使用之毒性測試數據所涵蓋的水生生物種類較廣，不限定於異腳目動物，測試終點則不限於10-d 死亡率，包括慢性毒性數據。美國環保署根據Nacosis approach，於2000年訂出了PAH混合物之SQG。

EqP同時也被應用在底泥中金屬污染物之毒性計算上¹。假設底泥中金屬之毒性與其在間隙水中濃度成正比，而間隙水中金屬濃度與底泥相中金屬濃度可以平衡關係式來關聯。不過在應用EqP理論時，由於存在有多重結合相(multiple binding phase)，底泥好氧層(oxic layers)與無氧層(anoxic layers)不同結合相，及錯合化學而變得較複雜。在好氧層底泥中，假設金屬結合在好氧層有限的固相上，同時結合在固相上的金屬與間隙水中之自由金屬離子以一種類平衡狀態(quasi-equilibrium)存在。好氧層底泥主要金屬結合相為粒狀有機物、離子及氫氧化錳。因此需要知道好氧層底泥結合相以及結合金屬的濃度。如此才可由結合常數算出間隙水中的金屬活性度(activity)。不過除了水合鐵礦(Ferrihydrite)結合相外，這類結合或吸附常數無法得知。Tessier²⁵等以此一方法藉由使用半實驗結合常數成功地關聯了一種淡水貝類中鉻濃度與底泥中鉻濃度之關係。

由此一理論，也解釋了為什麼在早先研究報告中顯示好氧層沖積底泥與貝類中微量金屬砷、銅、汞及鉛的濃度關聯性，如果把底泥萃出金屬濃度先對有機碳或鐵濃度作正規化後，關聯性會大幅改善。在1980年代美國環保署曾考慮採納EqP方法，不過後來決定放棄。主要的考量是在自然界中要採集薄層氧化層底泥樣本有實務上之困難。

在無氧層底泥，微量金屬的化學現象主要由硫化物之反應來主宰。Di Toro等²⁶在1990年提出酸揮發性硫化物(AVS)之理論。依據這個模型，底泥中的硫化鐵 $FeS_{(s)}$ (=AVS)可以被另一種可以形成溶解度比 $FeS_{(s)}$ 低之微量金屬所置換出來，因而釋出相同當量之鐵至間隙水中。只要加在水中微量金屬濃度低於AVS值，間隙水中自由金屬離子的活性就可以維持在一個非常低的數值，此一底泥便不會具有此種金屬導致之毒性。但若金屬

濃度高於AVS，間隙水中自由金屬離子濃度會快速提高，底泥會具有此種金屬導致之毒性。要應用此一模型，需要測定在FeS(AVS)溶解同時，稀鹽酸所可萃出之金屬濃度。此一濃度稱之為同步萃出金屬(Simultaneously Extracted Metal, SEM)。

AVS模型有一些假設：(1)無氧底泥中氧化態硫配位子(ligand)可擊敗其他溶解態或固態之配位子對容易與氧化態硫反應金屬如Cd、Cu、Hg、Ni、Pb及Zn的競爭，(2)AVS是底泥中固態配位子主要的反應性對象，(3)溶解相與固相之平衡在底泥中取得優勢，(4)底泥中金屬的毒性主要取決於總體間隙水中溶解金屬離子之活性。

3.3 實驗法底泥品質指引(Empirical Approach Sediment Quality Guideline)

效應範圍(effect range)

效應範圍低限區(ERL)和效應範圍中值限區(ERM)主要用於提供以效應為基準的指引，以詮釋全國監測計畫中的化學分析數據。1990年Long和Morgan²³首次提出此一指引作為評估當時全國現況與趨勢計畫(National Status and Trends Program (NSTP))所採集得到底泥化學分析數據的一個NOAA非正式標準值。他們收集了許多野外與實驗室淡水、河口與海洋生物的效應與無效應數據。化學分析濃度C_{oc}為乾基有機碳正規化之數值，其中10%受測生物產生生物效應的對應濃度定義為效應範圍低限(ER-L)，50%受測生物產生生物效應的對應濃度定義為效應範圍中值(ER-M)。介於ER-L與ER-M之間的代表可能效應範圍(possible effect range)，高於ER-M代表很可能發生效應範圍(probable effect range)。實際上只有這個文獻中的銻和銀的ER-L被納入作為標竿值(benchmark)，其他的項目都引用較近的數值來作類似的計算¹⁰。

3.4 共識值法底泥品質指引(Consensus Approach SQGs)

這一數值是在多種底泥品質指引紛紛被使用後所採行的一種方式。所謂的“共識”並不意謂已取得各方面科學界專家們的一致認同，而是博採各方面的SQGs數值合併成爲一個SQG或是一個範圍的SQGs。共識值法並非單純只是將所有可以取得的SQG加以列舉後平均，其觀念主要植基於如果不同方法所推導出來的SQG值數值相近，那麼其結

果的真確度必然大幅提昇。只有在這種情形下共識值SQGs的計算才算被認同。

最早提出共識值法的是Swartz¹⁴在1999年對PAHs之計算。他點出混合物的矛盾(mixture paradox)之現象。他認為以單一PAH添加方式來在實驗室中推估SQG會有低估的結果。因為自然界中PAHs是以混合物方式存在，因此其毒性是一種所有PAHs綜合的效應。他認為PAH指引值應該以總PAHs來評估。他以各種不同方式重新計算含有13種PAH之TPAH指引。他發現了這些指引值有三個不同群落(clusters)大小差異在4倍以內有一致的關聯性。這三個群落分別代表初始值(threshold)、中值(median)及高值(high extreme)區。因此他提出三種共識值法指引，(1)Threshold Effect Concentration (TEC) (2) Median Effect Concentration (MEC) (3) Extreme Effect Concentration (EEC)。其中TEC及MEC分別是各群落指引值之算術平均，EEC則等於AET值，並非指引值之群落。

Mc Donald及Dipinto等¹⁵在2000年以類似的方法來應用到PCBs上面，也一樣推導出TEC、MEC和EEC值。他們採取的是一種逐步計算的方式，先將既有的指引值正規化至有機碳基底，以乾基計算，並假設1%有機碳含量。只取用實驗法底泥品質指引值，計算採用的是幾何平均值以降低特異單一數值對估計中間趨勢之影響，況且並不清楚每一領域對SQGs之貢獻度。

Mc Donald、Ingersoll與Berger¹⁶在2000年使用了兩類共識值法底泥品質指引，分別是初始效應濃度Threshold Effect Concentration(TEC)及可能效應濃度Probable Effect Concentration (PEC)。應用在28種包括重金屬、PAHs、PCBs及殺蟲劑農藥等化學品。其中TEC用於找出底泥棲息生物在這個濃度以下不會預期造成傷害的污染物濃度值，PEC則用於找出底泥棲息生物在這個濃度以上會經常預期造成傷害的污染物濃度值。其中TEC的計算涵蓋了TEL、ERL、LEL、加拿大環境部SLC所導出的最低效應值、美國環保署1997年公告之底泥品質建議濃度(Sediment Quality Advisory Levels)。PEC的計算涵蓋了PEL、ERM、SEL、加拿大環境部SLC所導出的毒性效應閾值。推算的過程與上面所提到PCBs共識值法底泥品質指引類似，同時也提出了適用引入這個程序SQG之三個條件。(1)推導該SQG之方法相關細節能充份了解且適用，(2)該SQG是基於有關對底棲生物產生不利效應所得到的污染物濃度實驗數據所推導得到，(3)原創性，該SQG並非單

純引用自其他來源。

3.5 參考文獻

- (1) Di Toro, D. M., J D. Mahony, D J. Hansen, K J. Scott, A R. Carlson, and G T. Ankley. "Acid volatile sulfide predicts the acute toxicity of cadmium and nickel in sediments." *Environ. Sci. Tech.* 26 (1992): 96-101.
- (2) Di Toro, D.M., Zarba, D.J., Hansen, D.J., Berry, W.J., Swartz, R.C., Cowan, C.E., Pavlou, S.P., Allen, H.E., Thomas, N.A., and Paquin, P.R., "Technical basis for establishing sediment quality criteria for nonionic organic chemicals using equilibrium partitioning", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 10(1991):1541-1583.
- (3) G.T. Ankley, D.M. Di Toro, D.J. Hansen, W.J. Berry, "Technical Basis and Proposal for Deriving Sediment Quality Criteria for Metals" *Environmental Toxicology and Chemistry*, 15(1996):2053-2055.
- (4) Di Toro, D.M., and McGrath J. A. "Technical Basis for Narcotic Chemicals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Criteria. II. Mixtures and Sediments," *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(2000):1971-1982.
- (5) Persaud, D., Jaagumagi, R., and Hayton, A. 1993. "Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario". Water Resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Ontario. 27p.
- (6) Von Stackelberg, K., and C. Menzie. 2002. "A cautionary note on the use of species presence and absence data in deriving sediment quality criteria". *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(2):466-472.
- (7) Long, E.R., D.D. McDonald, S.L. Smith, and F.D. Calder. 1995. "Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediment." *Environmental Management* 19:81-97.
- (8) U.S. Environmental Protection Agency. 1996. "Calculation and evaluation of

sediment effect concentrations for the amphipod *Hyalella azteca* and the midge *Chironomus riparius*.” *EPA 905-R96- 008*, Chicago, IL.

- (9) MacDonald, D.D., R.S. Carr, F.D. Calder, E.R. Long, and C.G. Ingersoll. 1996. “Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters”. *Ecotoxicology*, 5: 253-278.
- (10) Smith S.L., D.D. MacDonald, K.A. Keenleyside, C.G. Ingersoll and L.J. Field, 1996. “A Preliminary Evaluation of Sediment Quality Assessment for Freshwater Ecosystems.” *Journal of Great Lakes Research* 22:624-638.
- (11) Barrick, R., S. Becker, R. Pastorok, L. Brown, and H. Beller. 1988. Sediment quality values refinement: 1988 update and evaluation of Puget Sound AET. Prepared by PTI Environmental Services for Environmental Protection Agency. Bellevue, Washington.
- (12) Ginn, T.C., and R.A. Pastorok. 1992. Assessment and management of contaminated sediments in Puget Sound. In: *Sediment Toxicity Assessment*. G.A. Burton (ed). Lewis Publishers, Inc., Boca Raton, FL.
- (13) Cabbage, J., D. Batts, and S. Briedenbach. 1997. Creation and analysis of freshwater sediment quality values in Washington State. Environmental Investigations and Laboratory Services Program. Washington Department of Ecology. Olympia, Washington.
- (14) Swartz, R.C. 1999. “Consensus Sediment Quality Guidelines for Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Mixtures.” *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18(4): 780-787.
- (15) MacDonald, D.D., L.M. Dipinto, J. Field, C.G. Ingersoll, E.R. Long, and R.C. Swartz. 2000. Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Effect Concentrations for Polychlorinated Biphenyls. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19 (5): 1403-1413.

- (16) MacDonald, D.D., C.G. Ingersoll, and T.A. Berger. "Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment-Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems." *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 39:20-31..
- (17) Field, L.J., D.D. MacDonald, S.B. Norton, C.G. Severn, C.G. Ingersoll. 1999. "Evaluating sediment chemistry and toxicity data using logistic regression modeling." *Environmental Toxicology and Chemistry* 18:6, pp 1311-1322.
- (18) Field, L.J., D.D. MacDonald, S.B. Norton, C.G. Ingersoll, C.G. Severn, D. Smorong, and R. Lindskoog. 2002. "Predicting amphipod toxicity from sediment chemistry using logistic regression models." *Environmental Toxicology and Chemistry* 21:9, pp 1993-2005.
- (19) US Environmental Protection Agency. 1993. Sediment quality criteria for the protection of benthic organisms. Acenaphthene. Washington DC: USEPA, Office of Water. Report EPA-822/R-93-013.
- (20) Swartz, R.C., D.W. Schults, R.J. Ozretich, J.O. Lamberson, F.A. Cole, T.H. DeWitt, M.S. Redmond, and S.P. Ferraro. 1995. "ΣPAH: A model to predict the toxicity of field-collected marine sediment contaminated by polynuclear aromatic hydrocarbons." *Environ. Toxicol. Chem.* 14:1977-1987.
- (21) Boese, Bruce L, Robert J. Ozretich, Janet O. Lamberson, Richard C. Swartz, Judith Pelletier, F.A. Cole, J. Pelletier, and J. Jones. 1999. "Toxicity and phototoxicity of mixtures of highly lipophilic PAH compounds in marine sediment: can the ΣPAH model be extrapolated?" *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 36:270-280.
- (22) US Environmental Protection Agency. 2003. Procedures for the derivation of equilibrium partitioning sediment benchmarks (ESBs) for the protection of benthic organisms: Dieldrin. Washington DC: USEPA, Office of Research and Development. EPA-600-02-010.

- (23) Long, E.R. and L.G. Morgan 1990. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52. National Oceanic and Atmospheric Administration. Seattle, WA.
- (24) Adams, W.U., R.A. Kimerle, and R.G. Mosher. 1985. Aquatic safety assessment of chemicals sorbed to sediments. Aquatic Toxicol. and Hazard Assessment, Seventh Symposium, ASTM STP 854, ASTM, Philadelphia, PA. pp. 429-453.
- (25) Tessier A., Couillard Y., Campbell P.G.C., Auclair J. C., 1993. Modeling Cd partitioning in oxic lake sediments and Cd concentrations in the freshwater bivalve. *Aodonta grandis*. *Limnol Oceanogr* 38:1-17.
- (26) Di Toro, D.M., Mahony J. D., Hansen, D.J., Scott K. J., Hicks M.B., Mayr S.M., Redmond M.S., 1990 "Toxicity of cadmium in sediments: The role of acid volatile sulfide.", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 9:1487-1502.

4. 底泥品質指標整合(Integration of the Information on Multiple Indicators of Sediment Quality Conditions)⁽¹⁾

底泥品質評估主要在判斷底泥是否因土地或水體之不當使用而遭致污染。當發現有這類污染情況時，評估報告中必須涵蓋底泥污染的本質、嚴重程度以及範圍等資訊。這些資訊可提供確認區域內實際已造成以及可能會產生的損害。底泥品質指標如底泥化學、生物累積、族群調查或底泥毒性等之整合，目的即在詮釋各項數據所代表對於棲息於底泥中生物、水系野生動物或人體健康影響之程度。

在指標整合上，使用了權重證據評鑑法(weight-of-evidence approach)，依所謂的偶發性評估表(contingency table)來呈現當個別指標同時發現異常狀態時，污染可能對水生物、野生動物或人體健康造成之衝擊危害威脅。

每一種底泥品質指標在其應用上都秉承了某種程度的不確定度，藉由各個指標所提供資訊的整合，整體底泥污染評估的不確定度可以降低。舉例來說，在底泥品質三隅體評估(Sediment Quality Triad Assessment)即是以底泥化學、底泥毒性及水生物族群數據，以權重證據評鑑法對底泥棲息生物受污染底泥不利影響程度進行關聯性研究。以多種指標工具藉由權重證據評鑑法整合可以大幅降低評鑑上之不確定度，因而提昇了管理上執行判斷之準確性。^(2,3,4,5)

評估底泥品質數據首先要判斷各指標是否超出建立的管制目標值。

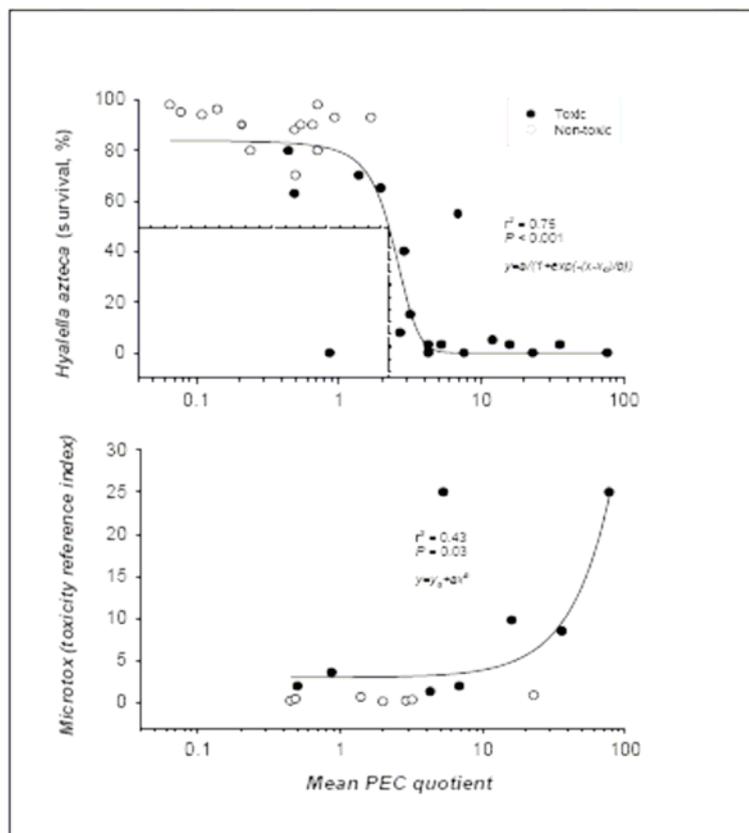
- 底泥中之潛在危害性化學品 (COPCs, Chemicals of Potential Concern)濃度是否超出相關底泥品質指引 SQGs?
- 相對於控制或標準組之樣本，底泥是否具毒性?
- 相對於標準狀況，野外無脊椎動物或魚類之族群是否受損害(degraded)?
- 生物組織中的潛在危害性化學品 COPCs 的濃度值是否超過 Tissue Residue Guidelines(TRGs)?
- 相對於標準狀況，魚體的健康情況是否被危及(compromised)?

這些問題可以幫助了解在採樣點所在地區之個別指標相關所代表之量尺相對於參考點地區是否已受到不利影響。不過個別指標間的關聯性也很重要。這些關連性可以藉

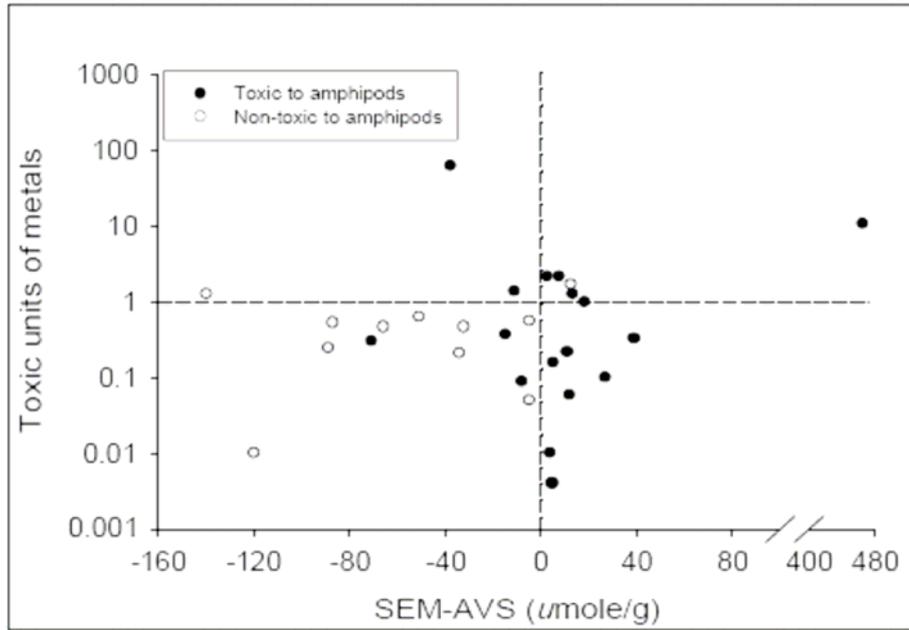
由繪製調查地區個別採樣站個各別樣品分樣所得數據散布圖來判斷成對指標(如底泥毒性對底泥化學)以及其所代表的量尺間是否相關。

此外，散布圖也可以用來了解在調查地區跨越地理位置間的趨勢變化(如魚類族群狀態或魚類健康對底泥化學)。魚類族群狀態或魚體組織化學通常會進行跨越數個採樣站間的比較來解釋魚類在調查地區內之遷移。

統計迴歸分析可以用來判斷成對指標或相關量尺間是否有顯著關聯性。下圖是底泥化學(以平均可能作用濃度比值 PEC-Q 函數表示)和底泥毒性(以 *Hyalella azteca* 十天底泥試驗毒性數據表示)間的關係圖。



類似的關係圖也可用於評估特定指標量尺間的關係。下圖說明兩種底泥化學指標量尺間的關係：經 AVS 常態化之 SEM 值(意即 SEM-AVS)以及間隙水(pore water)重金屬毒性單位(metal toxicity unit)。



像這類的分析可以用來建立各類指標間的一致性(concordance)，意即高化學濃度且具毒性，低化學濃度且無毒性。此外，這些分析也可以幫助找出各類指標呈現的偽陽性(意即高化學濃度但無毒性)或偽陰性(意即低化學濃度但具毒性)。

早期底泥品質調查中廣為採用三隅體法(Triad approach)評估底泥品質，以底泥化學分析、底泥毒性、水生物族群結構三項指標來評估底泥汙染對棲息生物之影響。採用到如下所示的偶發性評估表(contingency table)來作為對環境衝擊之評鑑。

Possible Outcome	Sediment Chemistry	Toxicity Test	Benthic Community	Possible Conclusions
1	+	+	+	Impact highly likely: Contaminant-induced degradation of sediment-dwelling organisms evident.
2	-	-	-	Impact highly unlikely: Contaminant-induced degradation of sediment dwelling organisms not evident.
3	+	-	-	Impact unlikely: Contaminants unavailable to sediment-dwelling organisms.
4	-	+	-	Impacts possible: Unmeasured contaminants or conditions exist that have the potential to cause degradation.
5	-	-	+	Impacts unlikely: No degradation of sediment-dwelling organisms in the field apparent relative to sediment contamination; physical factors may be influencing benthic community.
6	+	+	-	Impact likely: Toxic chemicals probably stressing the system.
7	-	+	+	Impact likely: Unmeasured toxic chemicals are probably contributing to the toxicity.
8	+	-	+	Impact likely: Sediment-dwelling organisms degraded by toxic chemicals, but toxicity tests not sensitive to chemicals present.

+ = Indicator classified as affected, as determined based on comparison to the established target.
 - = Indicator not classified as affected, as determined based on comparison to the established target.

評估表有三個欄位，對於每一項指標的評估如果確有不利影響者以“+”標示，如果沒有不利影響則以“-”標示。每一項指標之評估可能同時有多項量尺例如多種毒性測試

或化學分析等來進行評等。MacDonald 與 Ingersoll⁽⁷⁾或 MacDonald⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 認為在底泥毒性測試中，任何一項或一項以上毒性測試超過控制組或標準底泥即為具毒性。同樣的道理如果底泥化學分析任一項超出選定 SQG 目標值即可認定該底泥樣本具衝擊性。Canfield 等⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾則採用一套流程來對特定指標之多項量尺結果進行評級以認定底泥是否具環境衝擊性。Menzie 等⁽¹²⁾及 MacDonald 等⁽¹³⁾在執行生態風險評估時，於評級量尺結果時賦予各量尺不等的權重因子。Carr⁽¹⁴⁾等則採用了主成分分析(Principal Component Analysis)統計方式來對底泥品質指標進行分級，以確認其是否比參考標準狀態衝擊性高出。

Ingersoll 等⁽¹⁾在作加拿大卑詩省底泥評估時加入了生物累積性一項，將此一表的內容擴充為四個指標十六種可能狀態。評估資料內容包括底泥化學分析、底泥毒性測試結果、水生物族群狀態及或魚體組織化學分析。經由整合分析以評估底泥品質。其結果可用以預估底泥污染對水生物(底棲生物)、野生動物(脊椎動物)及人體健康之衝擊影響。

參考資料

- (1) Ingersoll, C. G. Donald D. MacDonald, 2002; **“A Guidance Manual to Support the Assessment of Contaminated Sediments in Freshwater Ecosystems , Volume III - Interpretation of the Results of Sediment Quality Investigations”**. EPA-905-B02-001-C, United States Environmental Protection Agency.
- (2) Long, E. R. and P. M. Chapman, 1985, **“A sediment quality triad: Measures of sediment contamination, toxicity and infaunal community composition in Puget Sound,”** *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 16, No. 10, pp. 405-415.
- (3) Chapman, P.M. 1992. **“Sediment quality triad approach”**, *Sediment Classification Methods Compendium*. EPA 823-R-92-006. Office of Water. United States Environmental Protection Agency. Washington, District of Columbia.
- (4) Canfield, T.J., F.J. Dwyer, J.F. Fairchild, P.S. Haverland, C.G. Ingersoll, N.E. Kemble, D.R. Mount, T.W. La Point, G.A. Burton, and M.C. Swift. 1996. **“Assessing contamination in Great Lakes sediments using benthic invertebrate**

communities and the sediment quality triad approach.” *Journal of Great Lakes Research* 22:565-583.

- (5) Ingersoll, C.G., T. Dillon, and R.G. Biddinger (Eds.). 1997. “**Methodological uncertainty in sediment ecological risk assessment.**” *Ecological Risk Assessments of Contaminated Sediment*. SETAC Press. Pensacola, Florida. 389 pp.
- (6) MacDonald, D.D. 1998. “**An ecosystem-based framework for assessing sediment quality in the Great Lakes Basin.**” A short course on collection, analysis, and interpretation of sediment quality data: Applications of sediment quality guidelines (SQGs) and various companion tools. Great Lakes National Program Office. United States Environmental Protection Agency. Chicago, Illinois.
- (7) MacDonald, D.D. and C.G. Ingersoll. 2000. “**An assessment of sediment injury in the grand Calumet River, Indiana Harbor Canal, Indiana Harbor, and the nearshore areas of Lake Michigan.**” Volume I. Prepared for the United States Fish and Wildlife Service. Bloomington, Indiana. 238 pp.
- (8) MacDonald, D.D., C.G. Ingersoll, D.E. Smorong, R.A. Lindskoog, D.W. Sparks, J.R. Smith, T.P. Simon, and M.A. Hanacek. 2002a. “**Assessment of injury to fish and wildlife resources in the Grand Calumet River and Indiana Harbor area of concern.**” *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 43:130-140.
- (9) MacDonald, D.D., C.G. Ingersoll, D.E. Smorong, R.A. Lindskoog, D.W. Sparks, J.R. Smith, T.P. Simon, and M.A. Hanacek. 2002b. “**An assessment of injury to sediments and sediment-dwelling organisms in the Grand Calumet River and Indiana Harbor area of concern.**” *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 43:141-155.
- (10) Canfield, T.J., N.E. Kemble, W.G. Brumbaugh, F.J. Dwyer, C.G. Ingersoll, and J.F. Fairchild. 1994. “**Use of benthic invertebrate community structure and the**

- sediment quality triad to evaluate metal-contaminated sediment in the upper Clark Fork River**", *MT. Environmental Toxicology and Chemistry* 13:1999-2012.
- (11) Canfield, T.J., F.J. Dwyer, J.F. Fairchild, P.S. Haverland, C.G. Ingersoll, N.E. Kemble, D.R. Mount, T.W. La Point, G.A. Burton, and M.C. Swift. 1996. **"Assessing contamination in Great Lakes sediments using benthic invertebrate communities and the sediment quality triad approach."** *Journal of Great Lakes Research* 22:565-583.
- (12) Menzie, C., M.H. Henning, J. Cura, K. Finkelstein, J. Gentile, J. Maughan, D. Mitchell, S. Petron, B. Potocki, S. Svirsky, and P. Tyler. 1996. **"Special report of the Massachusetts weight-of-evidence workgroup: A weight-of-evidence approach for evaluating ecological risks."** *Human Ecological Risk Assessment* 2:277-304.
- (13) MacDonald, D.D., C.G. Ingersoll, D.R.J. Moore, M. Bonnell, R.L. Breton, R.A. Lindskoog, D.B. MacDonald, Y.K. Muirhead, A.V. Pawlitz, D.E. Sims, D.E. Smorong, R.S. Teed, R.P. Thompson, and N. Wang. 2002. **"Calcasieu Estuary remedial investigation/feasibility study (RI/FS): Baseline ecological risk assessment (BERA)."** Technical report plus appendices. Contract No. 68-W5-0022. Prepared for CDM Federal Programs Corporation and United States Environmental Protection Agency. Dallas, Texas.
- (14) Carr, R.S., P.A. Montagna, J.M. Biedenbach, R. Kalke, M.C. Kennicutt, R. Hooten and G. Cripe. 2000. **"Impact of storm-water outfalls on sediment quality in Corpus Christi Bay, Texas, USA."** *Environmental Toxicology and Chemistry* 19(3):561-574.

5. 急性毒性試驗(Acute Toxicity Test)

急性毒性試驗在 50 年代起即廣泛用於潛在性毒性物質如農藥殺蟲劑、重金屬及工業排放等對水體生物遭受短期暴露下之危害性。早期的急毒性試驗多以淡水生物為對象，尤其以魚類為主。不過近來對出海口及海洋環境衝擊評估之需求日益殷切，因此針對海水系生物包括無脊椎動物及魚類在內之測試方法也自 70 年代起積極研究發展中。

另外也有以所謂單細胞藻類之毒性試驗法(稱之為光和毒性試驗法 Phyto-toxicity test)應用在化學物質篩選試驗上，尤其是除草劑類或其他具光合作用毒性活性之化學物質。這類試驗的測試原理和無脊椎動物及魚類的原理相近似，不過這類試驗即使只有 4~5 天暴露期即已可以代表慢性暴露之結果，因為細胞繁殖和細胞密度在這麼短的時間即已達到最高峰。因此雖然只是短時間測試，但在生命周期的觀點上，它已不算是急毒性試驗。

把急毒性試驗以標準化、詳盡的程序方法來進行操作是最近這些年才開始新建立起來。相關的方法主要是由水生生物毒性試驗方法委員會(Committee on Methods for Toxicity Tests with Aquatic Organisms)在積極推動。這一個委員會在 1971 年成立，美國環保署依照委員會建立之方法在 1975 年公告急性毒性測試方法。委員會之後自然解散了，主要是因為這類將毒性測試方法標準化的動作轉由具有共識性的組織來推動。美國測試及材料協會(American Society of Testing and Materials, ASTM)乃成為建立測試方法標準化的核心組織。1980 年 ASTM 發表兩個急性毒性測試方法(ASTM1980a,b)。

5.1 急性毒性測試基本原理

水生生物急性毒性測試之主要目的在測定待測物質如某一化學品或放流物質在特定條件下(如溫度或 pH 值)對一群受測生物於控制環境中短期暴露而產生有害性影響(deleterious effect)之濃度值。雖然毒性試驗也可以藉由監控直接注射至生物體或引入其食物中來進行，但多數方法都是藉由將物質混和在水中，在將生物暴露在不同濃度處理水體中來進行。由於死亡是一種容易偵測之有害性影響，最常見的急性毒性測試就是急性致死測試(acute lethality test)。死亡的判斷標準通常是無活動(lack of movement)，尤其是指魚鰓的無活動以及對溫和刺激缺乏反應。在實驗上，對待測物質之毒性產生 50%

的反應是最具在現性之結果，而 96 小時或更低則是標準之暴露時間。通常這時間已涵蓋多數急性致死反應所需之時間。因此，對魚類或大型脊椎動物 96 小時中值致死濃度 (96h LC50) (median lethal concentration)最常被用來量測急性毒性。不過，有些無脊椎動物之死亡不易判定，須以中值有效作用濃度 EC50(median effective concentration)代替。這裡所指的有效作用對某些無脊椎動物(如水蚤 Daphnia 及搖蚊幼蟲 midge larve)指的是無活動(immobilization)，其定義為缺乏移動(lack of movement)。用於螃蟹(crabs)、淡水螯蝦 (crayfish) 及蝦 (shrimp) 上則是指無活動 (immobilization) 及失去平衡 (loss of equilibrium)，意即無法維持正常姿勢(posture)。

一般急性毒性測試的設計要能獲得數量化的反應(意即一全或無反應：死或活)。測試物質的濃度和暴露於該物質之生物的受影響百分比值之關係可以得到，並繪出濃度-死亡率曲線。短期測試結果的表示方式包括(1) 每一濃度下被殺死或癱瘓生物的百分比(2)由觀察結果推估、內插或計算得到之 LC50 或 EC50。當計算中值致死濃度時，通常也會同時報告 95%信賴極限值。

急性毒性測試中的測試生物暴露於以下四種方式水流其中一種，包括靜態(static)、循環(recirculation)、換水(renewal)及流動式(flow through)。

急性毒性測試可快速測得對受測生物造成直接不可逆轉性傷害的物質濃度值。靜態和流動式是最常使用之急性毒性測試。靜態急性毒性測試提供(1)估計造成毒性效應之上限濃度(2)針對大量待測物質估計其相對毒性大小(3)評估不同受測生物對待測物質之相對敏感度(4)評估水質(溶氧濃度、pH 值、鹽度值、硬度、懸浮顆粒物數量)對待測物毒性之影響(5)發展及研究濃度-反應關係以及暴露於待測物質中時間之顯著影響性。流動式急毒性測試可提升穩定測試條件之維持度，不受到暴露期間長短之限制，可得到較完整暴露時間與影響關係之評估。

5.2 待測物質

待測物質可以是單一或多種純化合物或是一複雜混合物如放流物(effluent)獲配製物。它必須能具代表性如同它進入水體時一樣。樣品如果其中物質保持恆定，可以單一

抓樣(**grab**)方式來採集。對於成分相對恆定的放流物之靜態測試則建議採用複合抓樣(**composite grab**)方式採樣。建議每天六小時間隔採集一次，連續四次採集得到複合放流樣本。至於組成不是恆定的放流物則須在不同時間分開採集，且樣品不可以混合，因為了解最高毒性濃度和其潛在發生頻率比獲得該變化放流物的平均濃度要更為重要。這一種變換濃度的放流樣品可能的話最好採用流動式測試法。如果使用流動式測試，但無法連續採樣，則至少應每六小時採集一個複合式樣本並移置於放流樣品添加系統中。每一樣本只用在下一次採樣前的這段期間。放流樣本應完全加入樣品容器中以排除空間，容器應有容積讀值刻度。

如果待測物質夠穩定，可以移置儲存於適當容器中。放流物以外的物質應儲放於低溫處(以減低化學性或生化分解反應)及暗處(以減低光分解反應)。揮發性物質應存放於密封冷凍容器中(以減低逸散至大氣中)，但測試前應回溫至室溫條件。放流物應在低溫下(但在結凍溫度以上)運送，並應於採樣後 24 小時內送至測試實驗室。

如果有必要，

5.3 測試動物

測試動物應該選擇具敏感性，且是受到待測物質污染衝擊地區原產的重要生物種。可以由野生族群中收集，由市售來源購得或馴養在實驗室中。不可以用電擊方式或使用化學物質來收集，因為這些方式會造成一定程度的生理壓迫性(**physiological stress**)。

急性毒性測試常用魚類及無脊椎生物種

淡水類
脊椎動物
虹鱒(Rainbow Trout), <i>Salmo gairdneri</i>
北美溪鱒(Brook Trout), <i>Salvelinus fontinalis</i>
鱖魚(Fathead minnow), <i>Pimephales promelas</i>
河鯰(Channel catfish), <i>Ictalurus punctatus</i>

藍鰓(Blue gill), *Lepomis macrochirus*

無脊椎動物

水蚤(Daphnids), *Daphnia magna*, *D. pulex*, *D. pulicaria*

端足類(Amphipods), *Gammarus lacustris*, *G. Fasciatus*, *G. pseudolimnaceus*

螯蝦(Crayfish), *Orconectes* sp., *Cambarus* sp., *Procambarus* sp.,

or *Pacifastacus leniusculus*

6. 放流物、周界水及其他水體之毒性降低、毒性識別評估(Toxicity Reduction(TR), and Toxicity Identification Evaluation (TIE) for Effluents, Ambient Waters, and Other Aqueous Media)⁽¹⁾

河川是許多在生態上、經濟上及休閒活動上占有重要地位的魚類、無脊椎動物及其他水生物種的棲息地。許多物種都逐漸在消逝減少中。調查發現，採自河川的水質及底泥樣本在實驗室中之毒性測試下證實確有可能會造成多種水體生物的死亡⁽²⁾。結合暴露管道資訊，生物毒性測試加上化學分析、生物調查及生物累積分析數據，通常可有效預估環境衝擊之程度⁽³⁾⁽⁴⁾。但是如果找出確切造成生物毒性之原因，則有賴於化學分析與毒性識別評估TIE(Toxicity Identification Evaluation)。毒性識別評估TIE是被設計用來分析、識別及確認造成毒性的特定化合物之一種包含毒性測試與化學分析的反覆步驟與邏輯判斷環境診斷工具。主要用以找出底泥及水質中毒性之因果連結關係。

針對日益嚴重的水污染問題，美國在1972年通過清潔水質法案CWA(Clean Water Act)，其主要的一項具體作法就是全國污染物排放減量系統NPDES (National Pollutant Discharge Elimination System)，要求所有工業、都市及其他點排放源在排放污染物進入水體前需先取得美國環保署等權責單位許可。而這項許可程序的主要目標就是要確認排放水的毒性，全排放物毒性(Whole Effluent Toxicity, WET)測值必須通過管制標準才能獲得排放許可。如果WET超出急性或慢性毒性管制標準，通常必須進行毒性減量評估(Toxicity Reduction Evaluation, TRE)。這是一種針對工廠製程及排放物所進行的系統性評估。其中很重要的一個工具就是毒性識別評估TIE。一旦找出造成排放物毒性來源，可以採取最經濟有效的步驟來進行毒性減量，諸如改善製程、改變原料配方或是對特定小體積廢棄物先行處理。

凡是已被證實具有毒性，但不知確切原因的個案稱之為「不明來源毒性」TUC(Toxicity of Unknown Cause)。這些不明來源毒性的存在有幾種可能性，一是未進行毒性識別評估，或者是雖然進行了毒性識別評估，但結果無法找出結論性的毒性物質，或也可能雖找到一個毒性物質，但其量測濃度並不足以解釋毒性的大小。

表一列出加州中央河谷水質管制局委託進行調查Sacramento River河口地區一些造

成水生物毒性影響的項目中仍被列為不明來源毒性的項目。

表一、加州Sacramento 河水域中不明來源毒性之個案及造成因素⁽²⁾

Matrix	Ref. No.	Description of TUC	Magnitude of Toxicity	Reason Cause is Unknown
Water Column	[16]	Widespread, intermittent <i>P. promelas</i> toxicity	Mainly less than 100% mortality in 20% of samples collected	No follow-up TIEs
		Intermittent <i>S. capricornutum</i> toxicity except in ag. drains	Impairment in 50% of samples collected from American & Feather Rivers	No follow-up TIEs
	[24]	<i>S. capricornutum</i> toxicity in urban drainages during runoff events	Up to 80% reduction in algal growth	TIE identified toxicants, but concentration did not account for magnitude
	[21]	<i>P. promelas</i> toxicity detected in Strong Ranch Slough during runoff events	Less than 100% mortality observed	TIEs attempted – toxicity not persistent
	[18]	Widespread, intermittent <i>P. promelas</i>	Always less than 100% mortality	TIEs attempted – toxicity not persistent
		Widespread <i>C. dubia</i> reproductive impairment	Up to 75% reduction in reproduction in most samples collected during high flows	No follow-up TIEs
		<i>S. capricornutum</i> toxicity in Arcade Creek	Up to 50% reduction in cell number in 50% of samples collected	TIE identified toxicants, but concentration did not account for magnitude
	[25]	<i>O. mykiss</i> toxicity in Sacramento urban drainages during runoff events	Up to 100% mortality in all samples collected during first flush rain event	No follow-up TIEs
	[19]	Widespread, intermittent <i>P. promelas</i> toxicity	Less than 100% mortality in 13% of samples collected	TIEs attempted – toxicity not persistent
		Widespread <i>C. dubia</i> reproductive impairment	Up to 50% reduction in reproduction in over 50% of samples collected during high flows	No follow-up TIEs
	[20]	Widespread, intermittent <i>P. promelas</i> toxicity	Less than 100% mortality in 10% of the samples collected	TIEs inconclusive
		Widespread, intermittent <i>C. dubia</i> reproductive impairment	Up to 60% reduction in reproduction in 10% of samples collected	No follow-up TIEs
	[22]	Widespread, intermittent <i>P. promelas</i> toxicity in Cache Cr. at Rumsey Br. and in Putah Creek during runoff events	Up to 40% mortality in 40% of the samples collected from Cache Creek at Rumsey; up to 100% mortality in samples collected from Putah Creek during runoff events.	TIEs conducted. All TIEs were inconclusive.
Widespread, intermittent <i>C. dubia</i> reproductive impairment in Cache Creek.		Up to 90% reduction in reproduction in 14% of the samples collected.	TIEs attempted in some cases. All TIEs were inconclusive.	
[23]	Widespread, intermittent <i>C. dubia</i> reproductive impairment	Up to 50% reduction in reproduction in 15% of samples collected	TIE attempted – toxicity not persistent	
Sediment	[30]	Bulk sediment toxicity to <i>H. azteca</i> & elutriate water toxicity to <i>C. dubia</i> , <i>O. mykiss</i> & <i>P. promelas</i>	Average of 58% <i>H. azteca</i> mortality, 100% <i>C. dubia</i> mortality & 90% <i>O. mykiss</i> mortality	Metals suspected, but no confirmation TIEs conducted.
	[31]	Bulk sediment toxicity to <i>H. azteca</i> and sediment elutriate toxicity to <i>C. dubia</i>	50% of samples tested were toxic to <i>H. azteca</i> with normalized % mortality from 22-71%; 50% of samples tested were toxic to <i>C. dubia</i> with 100% mortality in one sample and 50% reduction in reproduction	No follow-up TIEs; no available chemistry data

Note: Widespread toxicity refers to the entire watershed rather than specific sites.

由表中可以看出執行毒性識別評估依據個別案例，仍有很大努力的空間。有許多未能識別出之毒性來源是受到缺乏標準TIE程序的限制所導致。

1988年美國環保署頒布了包含分析(characterization)、識別(identification)及確認(confirmation)三階段的毒性識別評估程序⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾⁽⁷⁾以鑑識淡水樣本中造成急性毒性之化學品種類。1991~93年間並有再修訂改版⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。1992年訂定了針對慢性毒性的毒性識別評估程序⁽¹¹⁾，1996年則完成海水基質毒性識別評估程序⁽¹²⁾。此一程序被應用在都市及

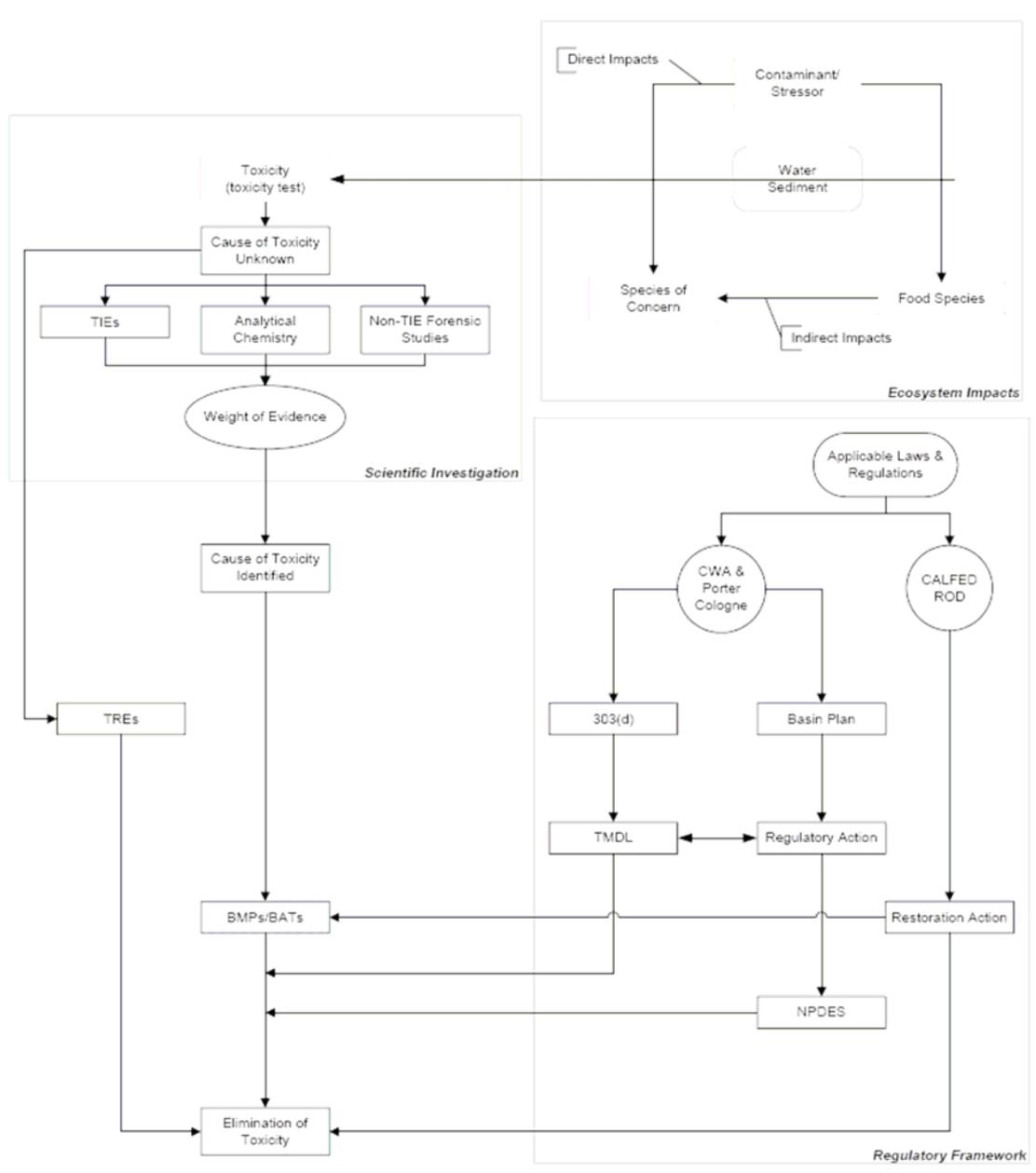
工業排放物(effluent)，但對表水(surface water)⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、暴雨逕流(storm runoff)、底泥本體(bulk sediment)及間隙水(pore water)卻得到不相符合的結果。

生物分析導向的分離步驟(bioassay – directed fractionation)是毒性識別評估最常採用的直接方法，對於有機物毒性物質會採用毒性測試結合溶劑萃取步驟。由於所耗費的人力與費用很高，在篩選階段通常並不會進行毒性識別評估。毒性識別評估同時採用毒性測試與化學分析，因此這兩者原本技術上的限制也會反映在TIE上。例如說某一TIE所採用之毒性測試對特定毒性物質不靈敏，則此一程序無法檢出該毒性物質。同樣道理如果某些物質的化學分析方法尚不完備，則由此一程序所推斷得到之結論可能不確定甚或誤導。表二列舉了一些無法順利執行TIE程序中的問題。

表二、無法順利執行TIE程序中所發現的問題

<i>Category</i>	<i>Herbicides</i>	<i>OP Insecticides</i>	<i>Pyrethroid Insecticides</i>
TIE Procedures	No published Phase I or II TIE profiles for major-use herbicides	Phase I and II TIE profiles published for only a few OPs e.g. diazinon, chlorpyrifos and carbaryl	No published Phase I and II TIE procedures for major use pyrethroids
Analytical Methods	Multiple analytical procedures needed to analyze different chemical classes of herbicides	Difficult to quantify in samples with matrix interferences	Inadequate sensitivity of analytical procedures
Other Considerations	TIE reagents not compatible with algal toxicity test method	Toxic interactions with metals and herbicides in ambient samples are poorly understood	Sampling and handling procedures not optimized for recovery
	Multiple toxicants present in a sample make toxicant identification difficult and expensive.		

Fig.1 Conceptual model of ecosystem impacts and framework for addressing toxicity issues.⁽²⁾



參考資料

(1) Thompson, B., et al., “Investigations into Toxicity of Unknown Cause in the Bay-Delta and Tributary Watersheds”, [http://calwater.ca.gov/Programs/Ecosystem Restoration/2002_Final_Proposals/128_compilation.pdf](http://calwater.ca.gov/Programs/Ecosystem%20Restoration/2002_Final_Proposals/128_compilation.pdf)

(2) de Vlaming V, Connor VM, DiGiorgio C, Bailey HC, Deanovic LA, Hinton DE.

2000. **“Application of whole effluent toxicity test procedures to ambient water quality assessment.”** *Environ Toxicol Chem* 19:42-62.
- (3) USEPA. 1999. **“A review of single species toxicity tests: Are the tests reliable predictors of aquatic ecosystem community responses.”** *EPA/600/R-97/11*. Technical Report. Office of Research and Development, Duluth, MN.
- (4) Waller WT, *et al.* 1996. **“Predicting in-stream effects from WET tests.”** In Grothe DR, Dickson KL, Reed-Judkins DK, eds. *Whole Effluent Toxicity Testing: An Evaluation of Methods and Prediction of Receiving Stream Impacts*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Pensacola, FL, USA, pp 271-286.
- (5) Mount D. I., Anderson-Carnahan L.;USEPA. 1988. **“Methods for aquatic toxicity identification evaluations. Phase I toxicity characterization procedures.”** *EPA/600/3-88/034*. Office of Research and Development. Duluth, MN. USEPA.
- (6) Mount D. I., Anderson-Carnahan L.;USEPA. 1988. **“Methods for aquatic toxicity identification evaluations. Phase II toxicity identification procedures.”** *EPA/600/3-88/035*. Office of Research and Development. Duluth, MN. USEPA.
- (7) Mount D. I., Anderson-Carnahan L.;USEPA. 1988. **“Methods for aquatic toxicity identification evaluations. Phase III toxicity confirmation procedures.”** *EPA/600/3-88/036*. Office of Research and Development. Duluth, MN. USEPA.
- (8) USEPA. 1991. **“Methods for aquatic toxicity identification evaluations. Phase I toxicity characterization procedures, 2nd ed.”** *EPA/600/6-91/ 0303*. Office of Research and Development. Duluth, MN. USEPA.
- (9) USEPA. 1993. **“Methods for aquatic toxicity identification evaluations. Phase II toxicity identification procedures for samples exhibiting acute and chronic toxicity.”** *EPA/600/R-92/080*. Office of Research and Development. Duluth, MN. USEPA.
- (10) Mount D. I., Norberg-King T, Ankley G., Burkhard L.P., Durhan, E. J.,

Schubauer-Berigan M.K., Lukasewycz M.; 1993. **“Methods for aquatic toxicity identification evaluations. Phase III toxicity confirmation procedures for samples exhibiting acute and chronic toxicity.”** *EPA/600/R-92/081*. Office of Research and Development. Duluth, MN. USEPA.

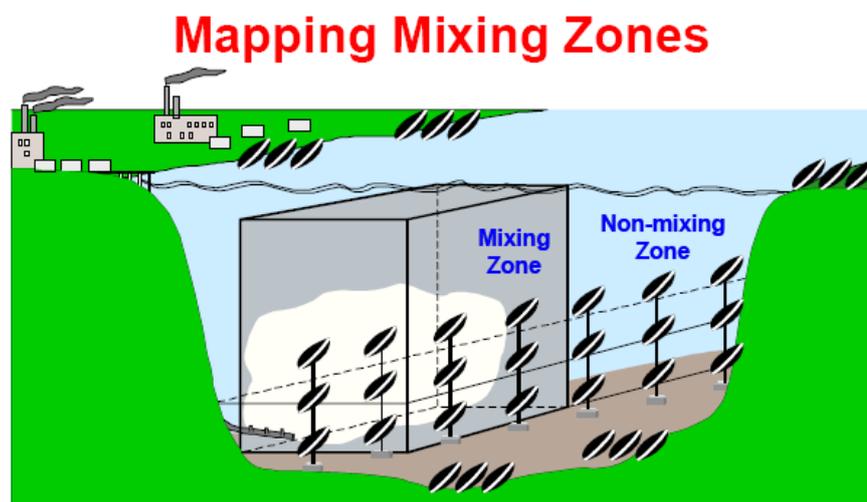
- (11) USEPA. 1992. **Toxicity identification evaluation: characterization of chronically toxic effluents, Phase I.** *EPA/600/6-91/005F*. Office of Research and Development. Duluth, MN. USEPA.
- (12) USEPA. 1996. **Marine Toxicity Identification Evaluation (TIE): Phase I Guidance Document.** *EPA/600/R-96/054*. Office of Research and Development, Washington, D.C.
- (13) Schubauer-Berigan M.K., Ankley G. T., 1991. **“The contribution of ammonia, metal, metals and nonpolar organic compounds to the toxicity of sediment interstitial water from an Illinois River tributary.”** *Environ. Toxicol. Chem.*, 21:2233-2241.
- (14) Ho K. T., McKinney R. A., Kuhn A., Pelletier M.C., Burgess R.M., 1997. **“Identification of acute toxicants in New Bedford Harbor sediments.”** *Environ. Toxicol. Chem.*, 16:551-558.
- (15) Doe K. G. Burton Jr G.A., Ho K.T.,2003. **“Pore water toxicity testing: An overview.”** In:Carr R.S., Nipper M., editors. *Pore water testing:biological, chemical and methodlogical considerations*. Pensacola(FL):Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). P.125-142.

7. 野外底泥生物毒性測試

野外底泥生物毒性測試是評估底泥污染物之毒性或生物累積量一個重要的環節。在實驗室控制環境下進行無論多接近野外，都有一些無法避免的差異性存在。

Ingersoll等⁽¹⁾比較Hyaella azteca野外三個月池塘暴露叢集(colonization)結果與實驗室中10~42天標準毒性測試之結果。使用的底泥包括添加DDD之底泥以及採集自印第安納州 Grand Calumet River之污染底泥。對於高添加量 (400微克DDD/每克有機碳)或是4%的GCR污染底泥觀察到兩者同時有影響，前者的活存率、10d成長長度及42d繁殖率與後者的族群數量在該濃度下都受到作用。研究結果顯示這兩種試驗同時可顯示底泥對水生動物之影響。野外實驗之DDD生物累積量與實驗室中以Lumbriculus variegates得到之結果十分接近，證實實驗室之設計確可評估野外之實際生物暴露所受到之危害風險。

Salazar等以雙殼貝進行野外底泥生物毒性測試^{(2)~(5)}，自1970年代迄今已超過30年，蒐集相當完整之生物累積與成長數據。並已發展成為標準ASTM方法 (ASTM2122-01)。



Quantifying exposure & effects over space & time

參考資料：

- (1) Christopher G. Ingersoll, Ning Wang, Jeannie M. R. Hayward, John R. Jones, Susan B. Jones and D. Scott Ireland; A Field Assessment of Long-Term Laboratory Sediment

Toxicity Tests with the Amphipod *Hyaella Azteca*. *Environmental Toxicity and Chemistry*, Vol. 24, No. 11, pp.2853-2870,(2005).

- (2) Michael H. and Sandra M. Salazar; *Using Caged Bivalves to Characterize Exposure & Effects over Space & Time: Controlled Field Experiments*, St. Lawrence Center, Montreal, 2002.
- (3) Salazar, M. H., and Salazar, S. M., 1998, "Using Caged Bivalves As Part of an DRAFT Standard Guide for Conducting Field Bioassays with Marine, Estuarine & Freshwater Bivalves Prepared by M. Salazar and S. Salazar, *Applied Bio-monitoring*, December 11, 1999 Page 58.
- (4) Exposure-Dose-Response Triad to Support an Integrated Risk Assessment Strategy," In *Proceedings, Ecological Risk Assessment: A Meeting of Policy and Science, SETAC Special Publication*, de Peyster, A., and Day. K., Ed., SETAC Press, pp. 167-192.
- (5) Salazar, M. H., and Salazar, S. M., In preparation, "Using Mussel Growth Rates to Evaluate Bivalve Biomarkers: Synoptic Testing in San Diego Bay."

四、檢討與建議

環保署多年以來一直十分重視水體底泥對生物與人體健康風險之影響，環境檢驗所自 87 年起持續執行國內河川調查監測計畫，採集台灣主次要河川底泥和生物檢體，作為國內河川污染監控與整治之重要依據。自 94 年起參考美國環保署做法，依照美國環保署國家底泥品質調查的標準與流程(U.S. Environmental Protection Agency, “The Incidence and Severity of Sediment Contamination in Surface Waters of the United States”, Vol.1 National Sediment Quality Survey, (1997))，嘗試評估河川底泥對生態與人體健康之危害性程度。

此次專題研究，主要在蒐集相關底泥品質評估的技術與底泥品質指引之形成，很幸運也十分感謝得到美國內政部轄下專門研究水體環境底泥品質監測技術之哥倫比亞環境研究中心的協助，順利完成本次專題研究之目標。

目前在環境檢驗所已將帶回來之相關生物毒性測試技術，落實在本所內生物毒性檢測實驗室中，同時也持續與美國政府與學界等底泥污染調查相關學者與研究機構建立合作關係，作為未來經驗與技術交流之基礎。預定在明年八月，將邀請 CERC 之毒理組主任 Christopher G. Ingersoll 博士前來訪問。

國內相關之研究目前仍十分缺乏，環境檢驗所是少數有相關能力來帶動這項研究的單位。建議未來配合政府與學術界之資源，並引介國外相關研究經驗，落實本土環境品質調查之質與量的提昇，以更精確的數據提供在河川、港灣與海洋污染防制與清理之決策參考。