

廿二、河口沉積物在海水中對銅之吸附

蔡政翰 王銘農 宋吉清

國立臺灣海洋大學海洋系

摘 要

本研究以實驗方法測試沉積物濃度及銅濃度對河口沉積物在海水中對銅吸附之影響。本實驗所用之沉積物及銅之濃度範圍分別為 100 至 1,000 mg/l 及 0.1 到 1.0 mg/l，海水的 pH 值為 8.0，另外為考慮顆粒之沉降對吸附之影響，本實驗的沉積物分為兩種狀態，一為沉降態，另一為懸浮態。

在所取各變數範圍內，本實驗的結果顯示：

- 一、在前 10 分鐘，沉積物迅速的吸附銅，然後速度變慢下來，大部份的實驗皆於 50 分鐘後達一準平衡狀態。
- 二、吸附在沉積物上之銅濃度隨沉積物濃度之增加及所添加銅之濃度之減少而減少。
- 三、懸浮物的顆粒所吸附之銅通常都比沉降顆粒為多（最高多到 30%），這是因為前者停留於水中的時間較長之故。
- 四、本沉積物因差別沉降速度所造成之顆粒聚集現象對其吸附銅之能力無影響。
- 五、所添加的銅濃度與沉積物濃度之比有一臨界值，低於此臨界值時所加入之銅幾乎被吸光。沉降顆粒之臨界比為 0.0005，而懸浮顆粒為 0.002。
- 六、當銅幾乎被吸光時，吸附在沉降顆粒上之銅濃度與吸附在懸浮顆粒之濃度相差不大。
- 七、所添加的銅濃度與沉積物濃度之比如超過臨界值，則殘留於水中之銅濃度與此一比值成線性關係。
- 八、由第七項之線性關係可得到一 Freundlich 型的經驗式，此式將吸附於沉積物上的銅濃度表示為殘留於水中之銅濃度（線性）及沉積物之函數。

1. 緒 論

重金屬是天然水域中的主要污染物之一，其來源包括：大氣中的塵埃，工業及家庭的廢水，由於重金屬具有持久的毒性，因此他們不僅對生物有害，假如他們進入食物鏈或水源中，對公共衛生亦有嚴重影響。由於重金屬進入水文環境已引起世人極大的關切，因而這些金屬在水中的運送已成為當今水污染研究學者所重視的問題。

一般而言，在水中的重金屬可分為溶解態及吸附態，特別是吸附於細泥顆粒上者，而這些顆粒又包括懸浮顆粒及沉積於水底之顆粒，現已有很多的研究證明重金屬會集中於沉積物顆粒上 (Martin, 1977; Gibbs, 1973; Bryan, 1976; Turekian, 1977)，例如 Sigg (1985) 發現 Fe, Zn, Cu, Cd 及 Pb 其吸附於顆粒的濃度與溶解態濃度的比分別為 10,000; 100; 35; 30 及 1,000。另外 Müller 及 Förstner (1975) 的實驗顯示在 Elbe 河口之底泥中重金屬濃度至少為水中之重金屬濃度的 1,000 倍以上。當然研究水中重金屬的運送量，吾人不僅要考慮溶解於水中的量更重要的還須知道吸附於顆粒上之量。

在水中沉積物顆粒的運動主要取決於水流流況，在水流流速較慢或潮流較緩時，懸浮的沉積物將

沉至水底，因此底層沉積物可成爲重金屬的滙集點，然而當流速漸增時，沉降的沉積物再度被懸浮至水中，此時懸浮的沉積物會依水中的環境因素，即不是將原先所吸附的重金屬釋放到水中就是繼續從水中吸附重金屬，因此重金屬的傳輸與沉積物顆粒的運送，及其對重金屬之吸附和釋放等皆有密切的關係。

沉積物對重金屬之吸附視很多因素而定，其中較重要的有：礦物種類，顆粒上之氧化物種類，顆粒的有機物含量，沉積物顆粒大小分佈（或沉積物顆粒比表面積分佈），沉積物濃度，pH 值，水的鹽度及重金屬濃度。有許多的研究人員根據不同的參數對不同黏土礦物及自然界的沉積物對重金屬之吸附做了研究，如 O'Connor 及 Kester (1975)，Petuzzelli 等人 (1978)，Salim 及 Cooksey (1980) 及 Lion 等人 (1982)，這些究提供了我們對吸附過程許多基礎認識，本文的主要目的即是用實驗的方法研討河口沉積物於海水的環境下對銅的吸附現象，我們所考慮的是在沉積物及重金屬濃度影響下，量出吸附在沉積物上之重金屬濃度及水中所殘留之重金屬濃度。由於沉積物於水中可呈現沉降 (settling) 及懸浮 (suspension) 兩種不同狀態，故本實驗亦討論兩種狀態之吸附情形，以了解沉降對吸附的影響。

2. 實 驗

沉積物樣品乃採自淡水河口淺灘，其大部份是細泥顆粒而且粒徑的中間值約 $10\ \mu\text{m}$ 。所含黏土礦物主要有綠泥石，伊利石，蒙特土及高嶺土。其可燃性有機碳約爲重量的百分之五。

沉積物除了以 $63\ \mu\text{m}$ 之篩網篩除大於此大小的顆粒外並無作其他前處理。沉積物的懸浮液以篩過的沉積物加上海水泡製而成。海水的鹽度爲千分之三十四點五，pH 值 8.0，並以 Whatman GF/C 玻璃纖維濾紙濾過。沉積物原本所含有的銅經測得爲 $60\ \text{mg/kg}$ ，而海水的含銅量則低於探測下限。

爲了要了解因顆粒沉降對沉積物吸附銅所產生的影響，實驗分爲兩類型。其一爲沉降實驗，即是把沉積物懸浮液在沉降管內添加銅並均勻攪拌後，讓其自由沉降，另一組爲懸浮實驗，則是把沉積物懸浮液添加銅後以磁攪拌持續攪拌，沉降實驗中，沉降管中之懸浮液有三種不同高度，分別爲 6，15，25 公分高，經由變化高度，可觀察其駐留時間對吸附銅所產生的影響，懸浮實驗中，只以 15 公分高的沉降高度來做實驗。

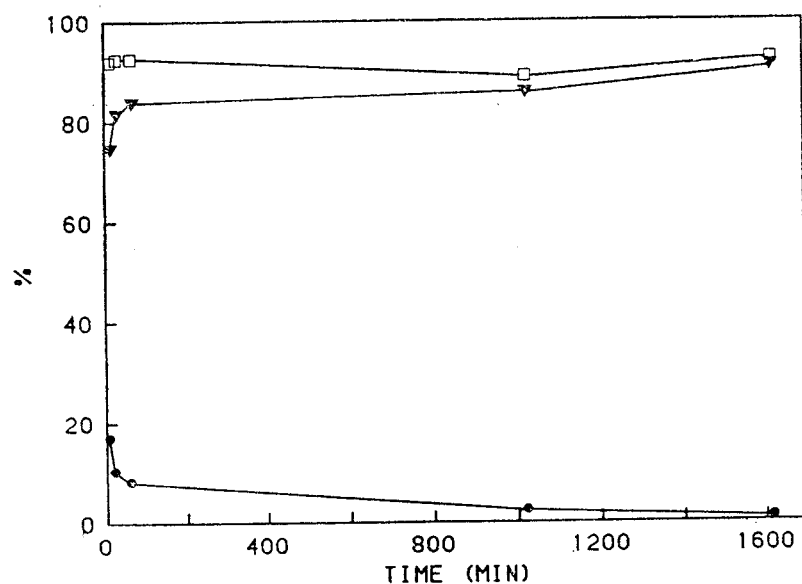
初始添加的銅濃度範圍蓋括了從 $0.1\ \text{mg/l}$ 到 $1.0\ \text{mg/l}$ 。沉積物濃度從 $100\ \text{mg/l}$ 到 $1,000\ \text{mg/l}$ 。將銅添加入懸浮液後，即立刻將懸浮液倒入以酸清洗過的壓克力沉降管，因爲大部分顆粒皆於 16 小時後，沉降完畢，故所有吸附實驗的反應，時間皆爲 16 小時，實驗前後之 pH 值經測得皆爲 8.0 左右。

爲了要測液態與固態的銅濃度，首先將沉降後的顆粒以 $0.45\ \mu\text{m}$ Gelman 濾紙過濾。然後濾液裏面銅濃度可以測得。留在濾紙上的沉積物以去離子蒸餾水沖洗以洗去鹽份後，並置於烤箱烘乾以備秤重。經實驗證實以蒸餾水沖洗沉降物並不會將其上吸附的銅洗掉。烘乾後的沉降物則連同濾紙以 2N 硝酸消化 2 小時後，再過濾以備測銅，本實驗之銅乃以火焰式原子吸光儀測量，其爲日立 Z-8000，爲了確保測量準確性，所有標準溶液皆以已知量之銅，添加入濾過之海水或 2N 硝酸。本實驗法之探測下限爲 $30\ \text{ppb}$ ($\mu\text{g/l}$)。

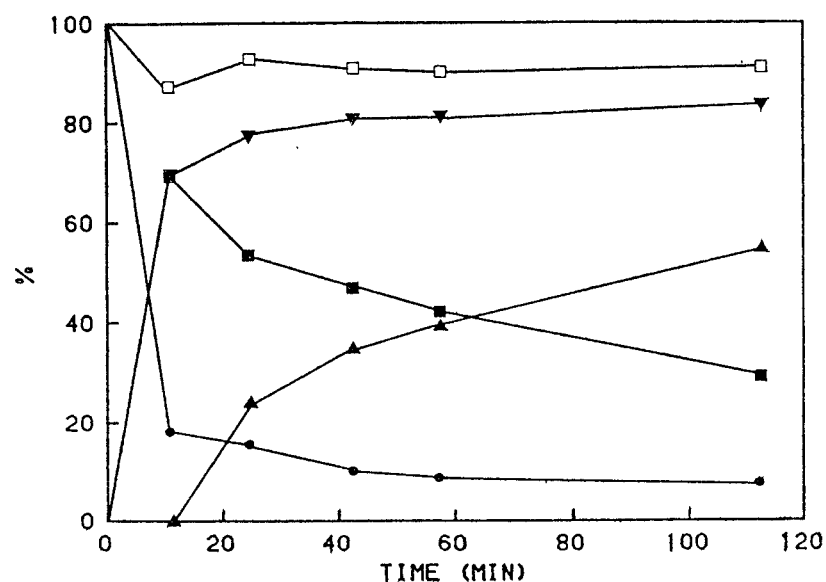
3. 結 果

本實驗先測試了沉積物對銅的吸附速率。在這些實驗裏，其作法是測吸附在沉積物上的銅與殘留於水中的銅隨時間變化的情形。圖一所示爲典型沉降及懸浮實驗的結果。在這個例子中，沉積物和銅的濃度分別爲 $500\ \text{mg/l}$ 與 $0.5\ \text{mg/l}$ 。圖一 a 中所示爲以磁攪拌器攪拌而呈懸浮態之實驗，我們可

以看出，顆粒起初的 10 分鐘對銅之吸附非常之快（約 74%）然後再慢下來。在起初的 50 分時，吸附達到一準平衡狀態。也就是此時大部分可吸附的銅都被吸附。接著吸附的速率慢了下來，由 50 分鐘的 84% 到 27 小時時 91%，相反地溶解態銅的百分率起初急速減少，而後漸緩。圖一 b 為沉降實驗的結果，其示出沉降及懸浮顆粒以及全部顆粒的吸附百分比。如同懸浮實驗，在起初的 10 分鐘銅快速的吸附在顆粒，然後慢下來。沉降顆粒的吸附百分比隨時間的增加而增加，而懸浮顆粒的吸附百分比確隨時間的增加而減少，此乃因為會有越來越多的顆粒沉降下去。同樣地在起初的 50 分時，吸附於顆粒之銅達到一準平衡狀態。



1(a) Snsension test



1(b) Settling test

Fig. 1. Time variations of Cu percentages on solid and liquid phases for the tests with sediment concentration of 500 mg/l and spiked Cu 0.5 mg/l. (□) total recovered. (▼) total solids. (▲) settled particles. (■) unsettled particles. (●) in water.

Table 1. Results of Cu adsorption tests. "T" means that trace amount of Cu detected, but it was below detection limit

1(a) Settling tests

Settling distance (cm)	Sediment conc (mg/l)	Spiked Cu conc (mg/l)	Adsbd Cu on sed (mg/kg)	Cu remained in water (mg/l)	Cu totally recovered (%)
6	100	0.1	650	0.03	89
15	100	0.1	635	0.03	88
25	100	0.1	570	0.03	81
6	500	0.1	250	T	95
15	500	0.1	245	T	92
6	1,000	0.1	151	T	91
15	1,000	0.1	148	T	90
25	1,000	0.1	146	T	86
6	100	0.5	3,100	0.13	87
15	100	0.5	3,220	0.13	89
25	100	0.5	2,970	0.15	88
6	500	0.5	905	0.04	92
15	500	0.5	850	0.04	87
25	500	0.5	900	0.04	92
6	1,000	0.5	530	T	98
15	1,000	0.5	530	T	98
25	1,000	0.5	540	T	100
6	100	1.0	5,800	0.25	83
15	100	1.0	6,000	0.26	85
25	100	1.0	5,680	0.30	86
6	500	1.0	1,640	0.08	86
15	500	1.0	1,650	0.07	87
25	500	1.0	1,700	0.08	90
6	1,000	1.0	930	0.04	91
15	1,000	1.0	920	0.05	91
25	1,000	1.0	935	0.05	92

1(b) Suspension tests

Sediment conc (mg/l)	Spiked Cu conc (mg/l)	Adsbd Cu on sed (mg/kg)	Cu remained in water (mg/l)	Cu totally recovered (%)
100	0.1	860	T	79
500	0.1	259	T	99
1,000	0.1	159	T	99
100	0.5	3,800	0.09	93
250	0.5	1,825	T	88
500	0.5	1,050	T	99
1,000	0.5	555	T	99
100	1.0	6,240	0.21	83
250	1.0	3,415	0.05	89
500	1.0	1,850	T	93
1,000	1.0	1,059	T	99

銅吸附實驗的結果（包括沉降及懸浮實驗）分別列舉於表一 a 及一 b。其顯示了吸附於全部顆粒上的銅濃度， C_s 及殘留於水中的銅濃度， C_1 ，隨沉降距離長度，沉積物濃度， C 和原境添加銅濃度， C_i 改變之結果。表中的每一組資料至少為六組實驗的平均，其中 C_1 項為 T 的，表示低於探測下限。所必須注意的是表中的 C_s 為最後量出吸附在顆粒上的銅濃度，這包含了原先就存在顆粒上的銅，其濃度為 60 mg/kg。

由表一可看出於現有的實驗參數範圍內，吸附在沉積物上的銅濃度並不隨沉降距離的改變而有明顯變化，取各個不同沉降距離所做出的 C_s 來平均，吾人可以畫出如圖二以吸附於顆粒上之銅濃度對沉積物濃度和原始添加銅濃度的函數圖。由圖二可發現對相同之添加濃度而言，吸附濃度會隨沉積物濃度增加而減少，此乃因為有更多沉積物吸附位置來競爭等量的銅所致。銅在顆粒上的濃度亦隨添加濃度變化而改變。於沉積物濃度一定的情况下，前者會隨後者的增加而增加。

圖二中的虛線表示懸浮實驗的結果，其顯示了懸浮實驗的 C_s 與 C 和 C_i 之關係與沉降實驗中的關係有相同的趨勢。另外由圖二可以看出，吸附在懸浮顆粒上的銅濃度一般皆比沉降顆粒上的銅濃度為高。很自然的，這是因為沉降的顆粒有較少的時間來吸附銅。然而仍有一些實驗其懸浮顆粒的 C_s 要沉降顆粒幾乎相等。這是因為所加入之銅幾乎全為兩種狀態的顆粒吸光。由表一可看出有這種現象的實驗為添加的銅濃度為 0.1 mg/l 而其沉積物濃度為 500 mg/l 及 1,000 mg/l 之試驗，還有添加的銅濃度為 0.5 mg/l 而其沉積物濃度為 1,000 mg/l 之試驗。

表一另列有由沉積物上及水中所回收銅的百分率。百分比從 81 到 100，視其沉積物濃度與添加的銅濃度而學。其回收的百分率之所以不足 100% 乃因沉降管管壁的吸附及過濾時的損失 (Gardiner, 1974)。本實驗中已將過濾的損失盡量減至最低。其方法是於過濾分離水及顆粒時，先使過濾器壁上之吸附的銅與過濾液之銅達平衡後，將此濾液倒掉不用，然後接著再過濾之濾液才上機測試銅濃度，如此所測得於水中之銅濃度已不受過濾器壁吸附所影響，因此回收不足的部分可視為是沉降管管壁所吸附的。

令 P_s ， P_1 及 P_w 分別為吸附在顆粒的百分比，殘留於水中的百分比及吸附在管壁上的百分比。任何情況下下列關係式均成立

$$P_s + P_1 + P_w = 100 \quad (1)$$

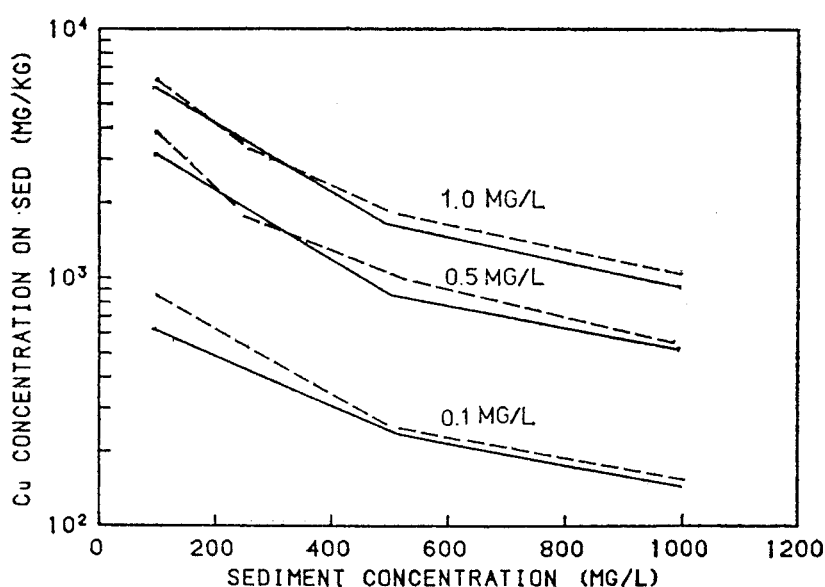


Fig. 2. Adsorbed Cu concentration on particles as a function of sediment and spiked Cu concentrations. (—) settling tests. (---) suspension tests.

當吸附達平衡時，很明顯地平衡是存在於沉積物顆粒，水及管壁上。而不是只在前兩項中。若將上式重組，可得

$$P_s + P_i = 100 - P_w \quad (2)$$

右式即為所測得的回收率 P_r ，因此將吸附於管壁的部分扣除，實際上原始添加濃度， C_{it} ，可寫為

$$C_{it} = C_i \times P_r / 100 \quad (3)$$

至於吸附於顆粒的百分比為

$$P_s = (C_s - C_{s0}) C \times 10^{-4} / C_{it} \quad (4)$$

其中 C_{s0} 為原先就在沉積物上的銅濃度。式中的常數乃為了使式子左右的單位一致； C_s 及 C_{s0} 單位為 mg/kg ， C_{it} 及 C 為 mg/l 。由此式可看出吸附的百分比隨添加銅濃度增加及沉積物濃度的減少而減少。

為了要研究吸附的等值線，吾人定義一個無因次參數，可分配比 R

$$R = C_{it} / C \quad (5)$$

物理上此參數的意義為單位重量沉積物在吸附時所能分配到的添加銅量。因此 R 乃指平均分配給沉積物的金屬量，其與沉積物的吸附能力無關。

圖三為殘留於水中的銅濃度 C_1 對可分配比 R 所作的圖，其包含了沉降與懸浮實驗。沉降實驗資料乃是不同的三種沉降距離所得之平均。圖三所示的沉降與懸浮實驗皆可劃分為兩區域。在 R 小於某值之區域， C_1 低於探測下限即銅幾乎被吸光。在 R 高於此值時， C_1 高於探測下限，而且不同實驗有幾乎相同之 C_1 值只要其 R 值相近，例如沉降實驗 C 為 100, 500, 1,000 mg/l ， C_1 分別為 0.1, 0.5 及 1.0 mg/l 之試驗其 R 值皆近於 0.0009 而其 C_1 值則近 0.04 mg/l 。將這區域劃分為兩部份的臨界值 R_{cr} 之值可由圖三預估出來，即沉降實驗為 0.0005，懸浮實驗為 0.002。此外圖中亦顯示，對同一可分配比而言，沉降實驗所殘留於水中的銅濃度大於懸浮實驗的。由此再度可看出懸浮的顆粒吸附能力確比沉降顆粒大。

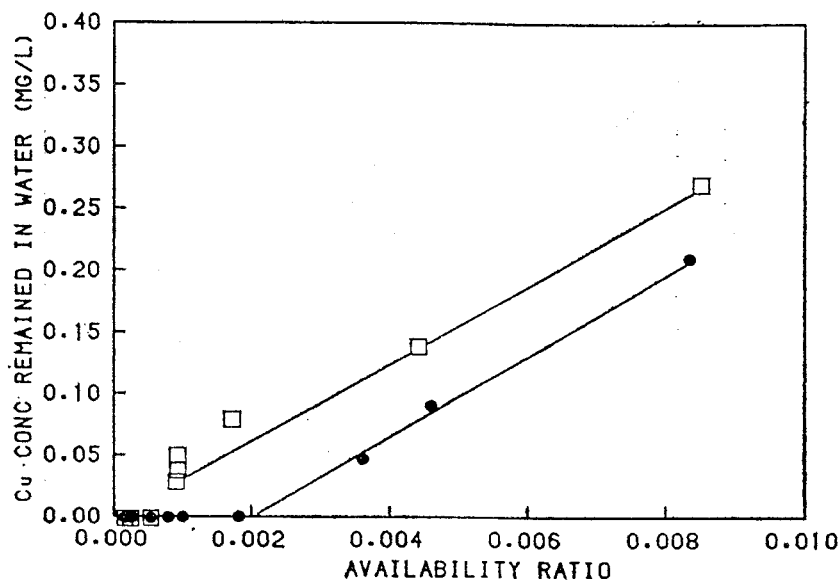


Fig. 3. Concentration of Cu remained in water as a function of availability ratio. (□) settling tests. (●) suspension tests.

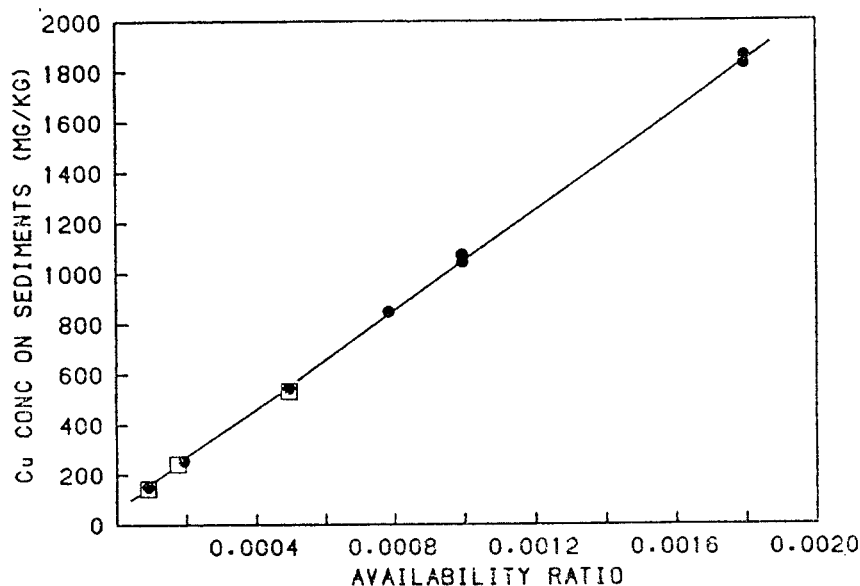


Fig. 4. Adsorbed Cu concentration on particles for the tests in which the spiked Cu was totally adsorbed. The solid line is calculated from Eq. (8), and solid circles (suspension tests) and open squares (settling tests) are measured.

對於銅幾乎完全被吸附的實驗裏，吸附於顆粒的平衡濃度 C_s 可被簡單地計算出

$$C_s = R \times 10^6 + C_{s0} \quad (6)$$

圖四所示為根據 (6) 式所算出的值與實驗值。吾人可以看出兩者之間相當吻合。

由圖二可看出在 C_1 高於探測下限的區域，其與 R 成線性關係。他們的線性關係可寫成

$$C_1 = A + BR \quad \text{當 } R > R_c \quad (7)$$

由圖中推測得沉降實驗中 $A=0$, $B=30.9$ ，而懸浮實驗中 $A=-0.0062$, $B=32.7$ 。

在得知 C_1 後，吸附於沉積物上的銅濃度 C_s 即可由下式求得

$$C_s = (C_{it} - C_1) \times 10^6 / C + C_{s0} \quad (8)$$

將 (7) 式代入 (8) 式再經過一些步驟即可得到 C_s 與 C_1 的關係式

$$C_s = aC_1 + b + C_{s0} \quad (9)$$

其中

$$a = (C - B) \times 10^6 / BC \quad \text{and} \quad b = -A \times 10^6 / B \quad (10)$$

由本實驗數據，吾人可知對沉降實驗而言

$$C_s = C_1(C - 30.9) \times 10^6 / 30.9C + C_{s0} \quad (11)$$

就懸浮實驗而言

$$C_s = C_1(C - 32.7) \times 10^6 / 32.7C + C_{s0} + 1900 \quad (12)$$

其中 C_s 和 C_{s0} 之單位為 mg/kg 而 C 之單位為 mg/l。以上的方程式為本實驗所用沉積物之等值線，由式中吾人可以得知銅吸附於沉積物之平衡濃度不只與殘留於水中之銅濃度有關，且與沉積物濃度有關，畫於圖五中的實線為 (11) 式，虛線為 (12) 式，而點則為實驗所測得的數據，吾人可清楚

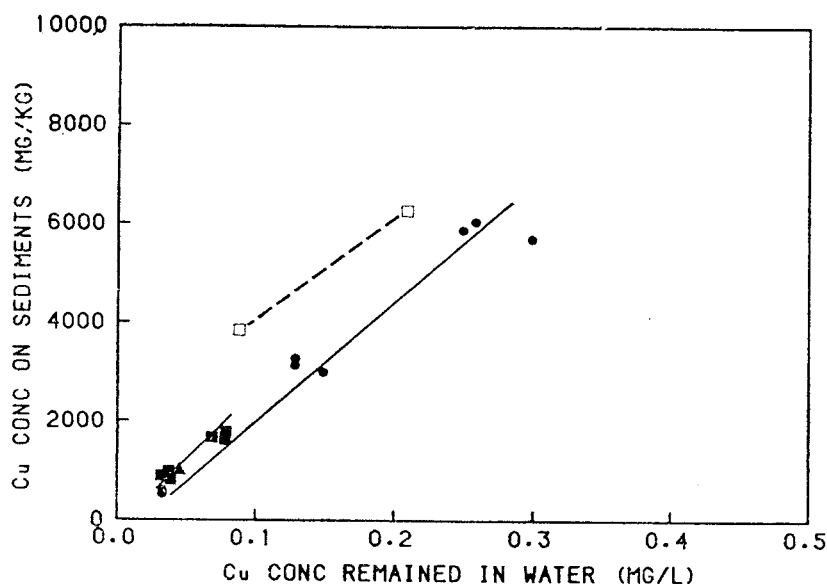


Fig. 5. Adsorption isotherm for the tests in which Cu was not totally adsorbed. Solid lines are calculated from Eq. (11) for settling tests and dashed line from Eq. (12) for suspension tests. (●), (■), (▲), and (□) are measured values for tests with sediment concentration of 100, 500, 1000, and 100 mg/l, respectively.

的看出，所計算的結果與實驗值相當吻合，圖中亦顯示出沉積物濃度越大其等值線的差別就越小，例如沉積物濃度 500 mg/l 的等值線就與沉積物濃度 1,000 mg/l 的等值線差不多。

上面所導出之 (9) 式，乃是 Freundlich isotherm 的一種 (Langmuir, 1981)

$$C_s = k C_1^{1/n} \quad (13)$$

其中 k 及 n 皆為常數，(13) 式與 (9) 式所不同的乃是一截距 $b + C_{s0}$ ，截距之意為當殘留於水中的銅濃度接近於零時（於本實驗為小於 $30 \mu\text{g/l}$ ），吸附於沉積物上的銅濃度不一定為零，這不為零的原因一方面是由於沉積物原本就含有銅，另一方面是有些所添加的銅幾乎完全被吸附，如本實驗所示，當吾人考慮一受污染的河口時，沉積在底下的沉積物很可能原本就含有重金屬，當其被水所捲起時，其被懸浮起的顆粒的吸附過程即可以 (7) 式暨 (9) 式描述之。

沉積物因相碰而聚集為影響細泥顆粒運送極重要的現象，因這種現象改變了顆粒的大小及沉降速度，因而懸浮顆粒在何處沉積受了聚集現象很大的影響。

重金屬在於水中的運送受聚集影響主要有兩部分，第一、吸附在沉積物上的重金屬其運送間接地受聚集影響，因為如前所述聚集會改變顆粒的運送。第二、聚集可直接影響沉積物對重金屬的吸附。重金屬的吸附一般皆認為是一表面反應 (Benjamin & Leckie, 1980 及 Evans, 1989) 沉積物因聚集增加粒徑也就會降低其比表面積，也就是降低吸附位置的數目，進而減少吸附其上的重金屬濃度。

本實驗中，沉降實驗中的顆粒可因其彼此間的沉降速度不同而發生碰撞進而產生聚集現象降速度不同。然而於懸浮實驗中，顆粒持續地被攪拌器所攪拌。攪拌的動作產生了亂流而使得顆粒懸浮並防止其聚集。沉降實驗及懸浮實驗結果之間的比較，並沒有清楚顯示因不同沉降速度所造成的聚集對顆粒吸附銅有任何影響。

圖 2 及 3 皆證明在兩種狀態的實驗中，不管是殘留於水中的銅或吸附於顆粒上銅，其隨變數變化的趨向皆相同，表示聚集因素並無很明顯地對吸附有影響。特別是兩種狀態的實驗中吸附於顆粒上銅

濃度皆隨顆粒濃度增加而減少，一般而言沉積物濃度越高，其聚集的程度及減低吸附的效果也就越大，但懸浮實驗顯示單單沉積物濃度增高就會降低吸附態的銅濃度，將兩種狀態中實驗吸附態銅降低的濃度與沉積物增加的濃度之比例相互比較可能會有些。爲了要排除因全部吸附所造成的偏差，吾人選取沉積物濃度爲 100 mg/l 及 500 mg/l，而添加銅濃度爲 1.0 mg/l 的結果。由表一可看出在減去沉積物原本所含有的 60 mg/kg，沉降實驗中 100 mg/l 與 500 mg/l 的吸附濃度比爲 3.6 而懸浮實驗爲 3.4。這顯示本實驗所用的沉積物，因沉降速度差異所造成的聚集並不是一個影響銅吸附的因素。這種現象大概是因爲顆粒吸附銅及聚集之速率不同所致，如前所述，大部份能被吸附的銅在 10 分鐘內就被顆粒吸收而顆粒之聚集却一直進行至所有顆粒全部沉降完畢爲止，因此銅的吸附就不太會受聚集之影響。

4. 結 論

本研究以實驗方法探討沉積物沉降，沉積物濃度及重金屬濃度等因素對河口的沉積物於海水的環境中對銅之吸附的影響。本實驗所採取的沉積物及添加銅濃度範圍分別爲 100 到 1,000 mg/l 及 0.1 到 1.0 mg/l 海水的 pH 值爲 8.0，吸附實驗的沉積物不是呈沉降態就是呈懸浮態。

從本實驗所採取的變數範圍內，結果顯示：

一、在前 10 分鐘，沉積物迅速的吸附銅，爾後速度即慢下來，大部分的實驗皆於 50 分時達一準平衡。

二、吸附在沉積物上的銅濃度隨沉積濃度之增加及添加銅濃度之減少而減少。

三、一般懸浮態的顆粒所吸附的銅通常都比沉降顆粒爲多（最高達 30%）這是因爲前者停留於水中的時間較長之故。

四、本沉積物因差別沉降速度所導致的聚集，對其吸附銅之能力無影響。

五、所添加的銅濃度與沉積物濃度之比有一臨界值，低於此臨界值時所添加的銅幾乎被吸光。此臨界值對沉降態的顆粒而言爲 0.0005，而對懸浮態的顆粒而言爲 0.002。

六、在銅幾乎爲沉積物所吸附光時，吸附在沉降顆粒上的銅濃度與吸附在懸浮顆粒上的銅濃度相差不大。

七、所添加的銅濃度與沉積物濃度之比如超過此臨界值，則殘留於水中的銅濃度與此一比值成線性關係。

八、由第七項的關係，吾人導得一 Freundlich 型的經驗式（9 式）。此式將吸附在懸浮沉積物上的銅濃度表示爲殘留於水中的銅濃度（線性）與沉積物濃度之函數。

本實驗的結果提供了我們對於在一般海水中（其 pH 及其他水化學成份值頗穩定的情況下），銅被吸附之情形的了解，吾人證明了欲研究沉積物對銅之吸附時，銅濃度與沉積物濃度爲必須考慮的因素，也就是所添加的銅濃度與沉積物濃度之比爲一重要參數。

基於五、七及八項的陳述，吸附在懸浮沉積物上的銅濃度可以用下列的步驟得知，首先懸浮於水中之沉積物濃度及水中的銅濃度必須知道，然後如果銅對沉積物濃度之比小於臨界值時，吾人可以 (6) 式算出吸附在沉積物上的銅濃度，而殘留於水中則小於 30 mg/l，如果此比值大於臨界值時，吸附在沉積物上及留於水中之銅濃度可用 (7) 及 (11) 式或 (12) 式算出。然而本實驗的結果顯示，雖然吸附於沉降顆粒及懸浮顆粒上之銅濃度有別，但其差別最多也只有 30%，當考慮吾人可預測在任一水環境中被再懸浮顆粒濃度的準確性時，此銅濃度差別並非很大。另外一般海岸及河口區其水深也比本實驗所用的深度爲大，顆粒沉降的時間也比本實驗爲長。因此以懸浮實驗之結果來代表吸附於懸浮及沉降顆粒之吸附現象，仍不失爲可行的方法。

謝 誌

本計劃乃由行政院國家科學委員會贊助，計劃編號 NSC78-0209-M019-02，我們誠心感謝該會的支持，及海洋學門召集人李賢文博士之鼓勵，在本計劃執行期間，白書偵博士及龔國慶先生給予甚多寶貴的建議，在此亦深表謝意。

參 考 文 獻

- Benjamin, M.M. and J.O. Leckie (1980). "Adsorption of Metals at Oxide Interfaces: Effects of the Concentrations of Adsorbate and Competing Metals," in "Contaminants and Sediments—Vol. 2," Ed., Baker, R. A., Ann Arbor Science Publishers, Inc. Ann Arbor, MI. 305-422.
- Bryan, G. W. (1976). In "Marine Pollution", Ed., Johnson, R. Academic Press: London.
- Evans, L. J. (1989). "Chemistry of Metal Retention by Soils," *Environmental Science Technology*, Vol. 23, No. 9, 1046-1056.
- Gardiner, J. (1974). "The Chemistry of Cadmium in Natural Water-II. The Adsorption of Cadmium on River Muds and Naturally Occurring Solids," *Water Research*, Vol. 8, 157-164.
- Gibbs, R. J. (1973). "Mechanisms of Trace Metal transport in Rivers," *Science*, Vol. 180, 71-73.
- Langmuir, D. (1981). "The Power Exchange Function: A General Model for Metal Adsorption onto Geological Materials," in *Adsorption from Aqueous Solutions*, Ed., Tewari, P.H., Plenum Press, N. Y. 1-18.
- Lion, L. W., R. Scott Altmann, and J.O. Leckie (1982). *Environmental Science Technology*, Vol. 16, 660-666.
- Martin, J. H. (1970). "Trace Metal Transport via Copipod Moults," *Limnology and Oceanography*, Vol. 15, 756-761.
- Müller, G. and U. Förstner (1975). "Heavy Metals in Sediments of the Rhine and Elbe Estuaries: Mobilisation or Mixing Effect?" *Environmental Geology*, Vol. 1, 33-39.
- O'Connor, T.P. and D.R. Kester (1975). "Adsorption of Copper and Cobalt from Fresh and Marine Systems," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 39, 1531-1543.
- Petruzzelli, G., G. Guidi and L. Lubrano (1978). "Organic Matter as an Influencing Factor on Copper and Cadmium Adsorption by Soils," *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 9, 263-269.
- Salim, R. and B.G. Cooksey (1980). "Kinetics of the Adsorption of Lead on River-Mud," *Plant and Soil*, Vol. 54, 399-417.
- Sigg, L. (1985). "Metal Transfer Mechanisms in Lakes; The Role of Settling Particles," in "Chemical Processes in Lakes," Ed., W. Strumm, Wiley, 283-310.
- Turekian, K. K. (1977). "The Fate of Metals in the Oceans," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 41, 1139-1144.

The Adsorption of Cu onto Estuarine Sediments in Sea Water

Cheng-Han Tsai, Min-Non Wang and Ji-Chin Song

*Department of Oceanography, Taiwan Ocean University,
Keelung, Taiwan, R. O. C.*

ABSTRACT

Experimental investigations were carried out to determine the effects of sediment settling, sediment concentration and metal concentration on the adsorption of Cu by estuarine sediments in sea water. The concentration of sediment and spiked Cu ranged from 100 to 1,000 mg/l and 0.1 to 1.0 mg/l, respectively, and the pH of the sea water was 8.0. The adsorption tests were performed with either the particles were allowed to settle or were kept in suspension. From the results and for the above ranges of parameters, the following was demonstrated: (1) The Cu was adsorbed very rapidly at the first 10 minutes and then more slowly. In most tests, a quasi-equilibrium was reached in 50 minutes. (2) The adsorbed Cu concentration decreased with increasing sediment concentration and decreasing spiked Cu concentration. (3) The adsorbed Cu concentrations obtained from suspension tests were generally higher (maximum 30%) than those obtained from settling tests. This was attributed to the effect of the time period the particles remained in water. (4) The effect of particle flocculation due to differential settling was not important for this sediment. (5) For the tests in which the spiked Cu was totally adsorbed, the adsorbed concentrations on settling particles differ very little from those on suspended particles. (6) There existed a critical ratio of concentration of spiked Cu to that of sediments. When the ratio is less than the critical value—0.0005 for settling particles and 0.002 for suspended particles—the spiked Cu was totally adsorbed. (7) For the tests with the concentration ratio larger than the critical value, the Cu concentration remained in water was found to be linearly proportional to this ratio. (8) Based on the relation found in the statement 7, an Freundlich type of adsorption isotherm was derived. In which the adsorbed concentration was expressed as a linear function of Cu concentration remained in water and a function of the sediment concentration.