科研报告

大运河苏州段底泥中重金属的污染状况及评价

汪祖强 张桂英 钱敏仁
(中国科学院南京土壤研究所) (苏州市环保局)

一、研究底泥中重金属污染的意义

含有重金属的工业废水、废渣通过各种途径进入水体，部分难溶性重金属化合物很快沉降在排放口附近，部分溶性重金属化合物以离子态被水中悬浮物吸附随水迁移. 在迁移搬运过程中，当其负荷超过水的搬运营力时，悬浮物逐渐向河底下沉，最后静止于河底形成底泥. 随悬浮物颗粒的大小、水体流量与流速、污染源排放时间的长短的影响，底泥中重金属的含量表现出明显的水平和垂直分布规律. 因此，研究水体底泥中重金属含量及其水平和垂直分布是考察河流水化学状况，查明污染源，追查该区域水环境污染的历史演变的主要依据. 由于苏南地区农民有用河泥制作有机肥料的习惯，严重污染的底泥被农民随意的无控制的挖取利用，农田土壤势必受到重金属二次污染. 土壤一旦被重金属污染就很难排除，进而会污染农产品.

二、大运河的特点

大运河又称京杭运河(以下称运河)，是一条沟通南北的人工河流，全长约1700km[1]，是世界上最长的人工河流，也是最古老的运河之一. 本课题研究的河段是运河中的苏州段(吴县、苏州市、吴江县境内的河段).

运河苏州段长约 80km. 在吴县境内约 33km，苏州市境内约 9km，吴江县境内约 40km. 其主要特点:

1. 河面不很宽，水体流量小，流速不大.

2. 水层浅，河床高，枯水期河中心水层约 3m，丰水期约 4—5m.

3. 河内航行量大. 运河是江南主要的水路，航行频繁，船只大都是 50t 以下的机动拖列.

4. 个别河段污染严重. 沿河两岸各种大小工厂很多，仅吴县在运河水系范围内有工厂数拾家，每天排放废水量约 4×10^4t/d.

5. 运河中底泥的特征. 运河苏州段的地质母质在吴县境内是全新统黄色粉砂亚粘土沉积层，吴江县境内是全新统黄色粘土沉积层. 运河水层浅，船舶航行频繁，河床中心受船舶推进器的旋击水体，使河床中心的底泥推向二侧，与二侧的底泥混合沉降，底泥沉积层次不很明显，亦造成部分河段河床中心无底泥.

三、底泥样品的采集和分析

(一) 样品的采集和制备

底泥样品是用旋转开口式水下采样器采集. 全苏州段共采 60 个断面(见图 1)，每个断面采东、西二个样品. 采样点距河岸 3—5m 范围内. 采样深度为 0—15cm，取混合样. 为了解污染物迁移沉积规律，部分采样点同时采集垂直样品. 采集到的样品放在聚乙烯塑料袋中，室内自然风干，过 100 目塑料筛备用.

(二) 分析方法

底泥中的重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Co 的前处理用王水-高氯酸消化法，Cr 用硝酸-氢氟酸消化法．除 Cd 用 KI-MIBK 萃取，原子吸收无焰法测定外，其他都用原子吸收火焰法[2]．Hg 的前处理用硝酸-硫酸-五氧化二钒消化法，冷原子吸收法测定[2]．As 用王水浸提法，原子荧光法测定．

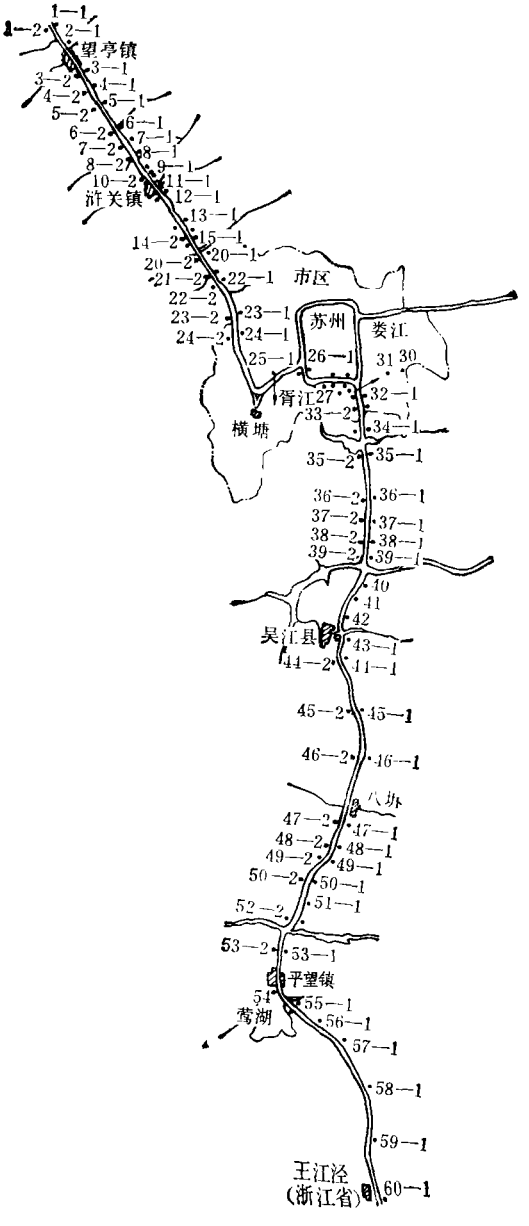

图 1　大运河苏州段(吴县、吴江县)底泥采样点

四、结果和讨论

(一) 底泥中重金属元素的污染标准(污染起始值)的确定

河流底泥的本底值要受到地质母质和沿岸土壤类型的影响．据报道，研究河流底泥中重金属元素污染状况，采取在测定的河道上钻取足够深度的柱状样中重金属含量作为本底值．这些报道都是研究江、河如湘江或海湾中的底泥．在人工开挖的运河中，底泥沉积较浅．据我们采样时发现苏州段运河中，底泥层浅的不到 1m，深的约 3m 左右．底泥层浅可能是与苏南地区农民有挖取河泥沤制草塘泥做肥料有关．用河流深层的重金属含量作本底值，其含量偏低，使污染评价偏高．我们在评价运河底泥重金属污染程度时，选择五个样品(一个底泥下 80cm 黄色粘土沉积物、二个沿岸的土壤、二个未受污染或少受污染的运河底泥）的重金属含量的平均值加二个标准差，作为底泥污染积累的起始点，为底泥的污染标准(见表 1)．

(二) 运河底泥中重金属的污染现状及污染源

从 60 个采样断面中取部分主要采样点的分析数据绘成重金属含量水平分布图．从图 2、3、4 中看出，一号点出现 Cu、Zn 含量高峰值，而西点比东点高出 2 和 10 倍，这是由于西岸有农科所试验场长期施用含 Cu、Zn 农药残留在土壤表层，经降雨、迳流进入运河水体，导致底泥中 Cu、Zn 含量增高．8 号点位于苏州钢铁厂冶炼车间的排放口附近，炼钢废水、废渣直接排入运河．在排放口附近水下废钢渣厚达 1m 以上．废水中含有大量金属离子，致该河段底泥中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量为 119、764、229、2.13mg/kg，分别超过污染标准 4.5、8.8、7、10 倍．Ni、Cr、Co、As 的含量也普遍超标．15 号点底泥中出现全河段中最高含量，东样点高于西样点，

表 1　运河苏州段底泥的污染标准

元素	黄泥土	青紫泥	底泥下 80 cm 的沉积物	未污染的底泥（吴江县）	未污染的底泥（吴县）	平均值（$\bar{x}$）	标准差（s）	污染标准 $\bar{x}+2s$
Cu	23.69	24.27	18.63	18.73	21.65	21.39	2.66	26.71
Zn	67.50	73.12	57.83	79.47	74.72	70.53	8.29	87.11
Pb	28.99	27.31	18.54	21.38	25.00	24.24	4.28	32.80
Cd	0.125	0.164	0.021	0.075	0.110	0.099	0.054	0.207
Ni	27.10	29.72	45.18	33.73	37.09	34.56	7.05	48.66
Co	10.14	11.72	12.79	35.92	23.12	18.54	10.78	40.10
Hg	0.136	0.135	0.22	0.110	0.180	0.16	0.04	0.24
Cr	61.79	57.52	30.03	42.86	54.46	49.33	12.87	75.07
As	10.19	7.98	8.21	6.96	8.90	8.45	1.20	10.85

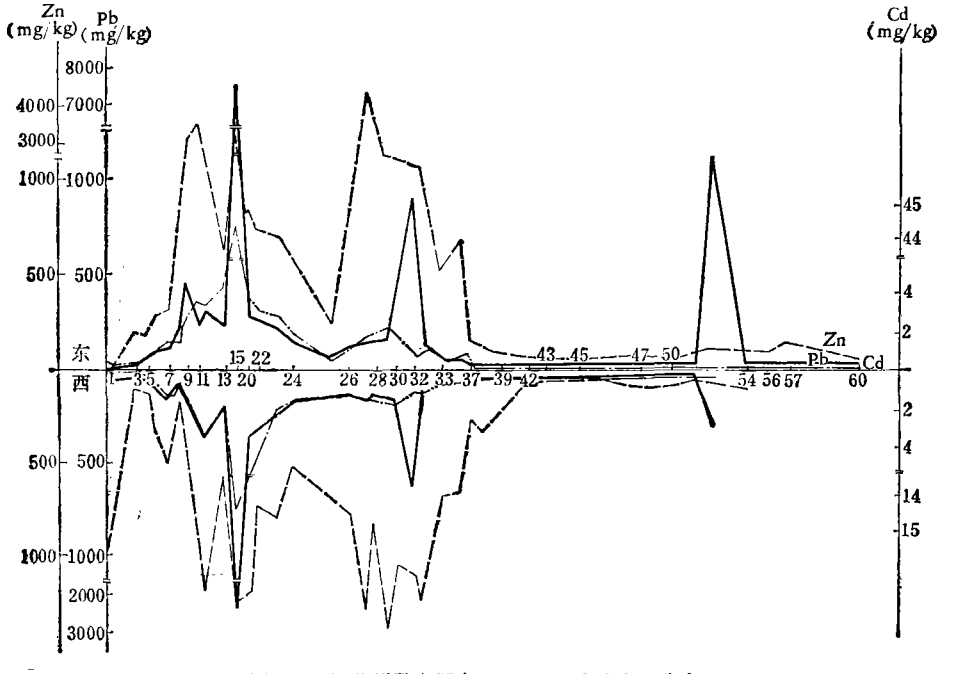

图 2　运河苏州段底泥中 Zn、Pb、Cd 的含量分布

其 Cu、Zn、Pb、Cd、As 的含量分别为 1894、3679、7735、45、476mg/kg，为污染标准的 70、42、235、215、47 倍。同时也出现全河段中唯一的 Co 的污染区。导致该河段严重污染是由于采样点东岸的吴县磷肥厂的粗硫酸车间和磷肥车间造成。硫酸车间是利用安徽、吴县的铅锌洗矿厂的含硫尾矿粉来生产粗硫酸，生产粗硫酸过程中既有尾矿粉的流失，又有大量含重金属的废水排出。在采样点采到的暗黑色的底泥即是该厂排出的废水、废渣和沉积淤泥的混合物，厚度可达 1—2m 深。该厂对运河污染如此严重的主要原因：一是只顾生产不顾环境的污染。该厂是县级工厂，1978 年粗硫酸的生产量为 0.8×10^4t，到 1984 年增至 1.46×10^4t，仅增产 55%。而废水排放量从 1×10^4t 猛增至 27.6×10^4t，都是未经处理直接排入运河。二是生产管理不善，尾矿粉搬运过程中大量

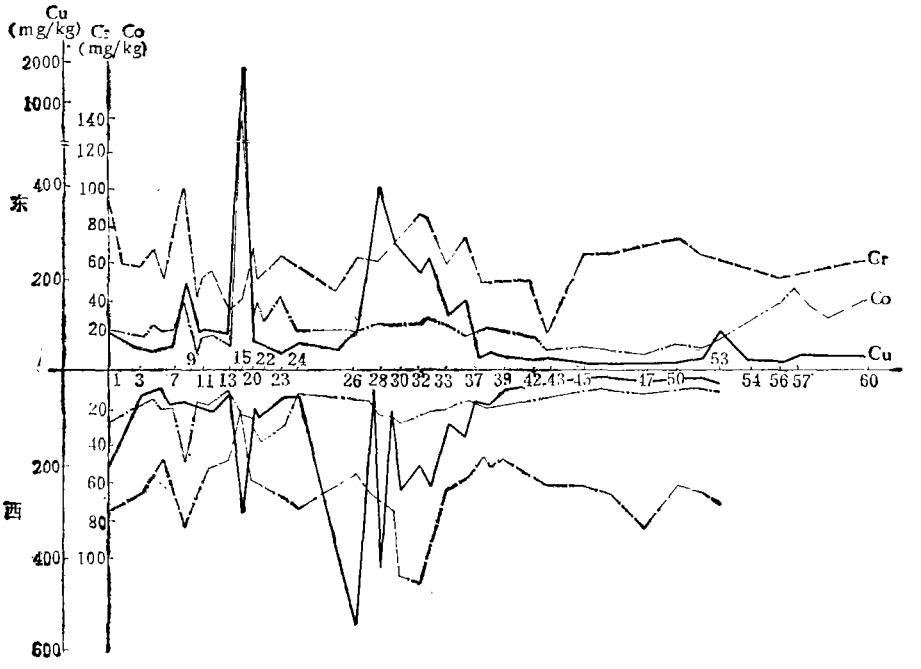

图 3　运河苏州段底泥中 Cu、Cr、Co 的含量分布

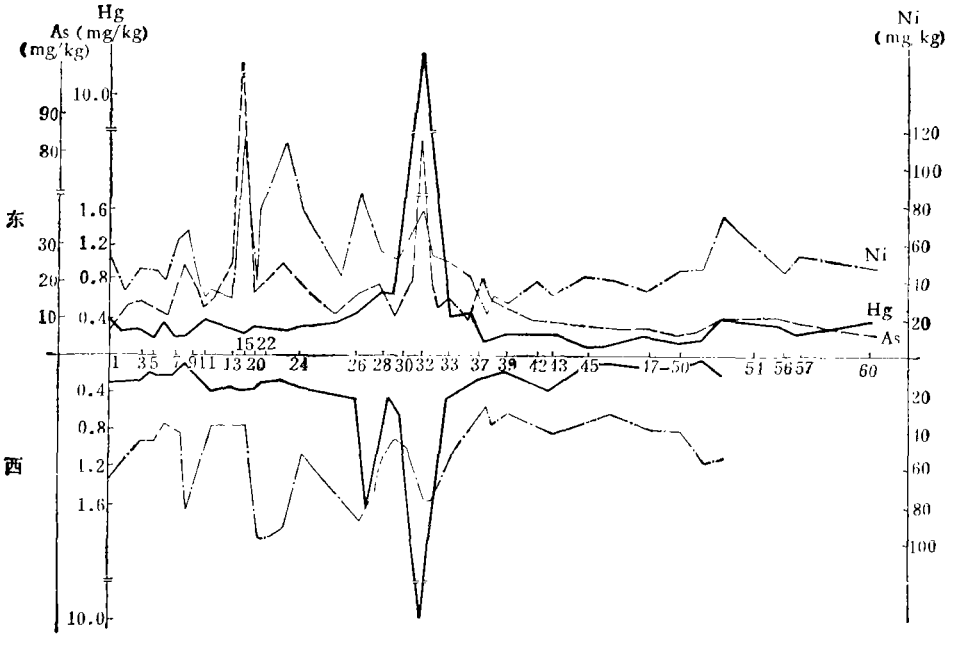

图 4　运河苏州段底泥中 As、Hg、Ni 的含量分布

失散. 露天仓库在河边咫尺，受风吹和降雨冲刷，大量尾矿粉进入运河. 如稍加管理是可以减少污染. 吴县磷肥厂的污染物不仅污染了厂区附近河段的水体和底泥，还受到运河水流的作用，污染物随水体和悬浮物的迁移，扩大了底泥的污染面. 在正常年份，运河

水流由北向南流. 在旱季，要调长江水补充太湖水量，苏州段运河水流由南向北倒流，造成污染物向上游扩散. 既污染了下游，又污染了上游. 从表 2 和图 2、3、4 中明显的看出，底泥中 Cu 的污染向南达 4km 远，向北与 3km 外的浒关镇 (11、12 号点) 及 6km 外的苏钢厂的污染物会合. Pb、Cd 的污染向南延伸 8km，向北有 6km. Zn、Cd 的污染从苏钢厂河段开始直至运河和胥江会合处长 10km，形成水下底泥污染带. 在胥江中段北岸的铜材厂 (25 号点)附近的底泥中还有暗黑色尾矿粉夹杂其中. 由此可见，吴县磷肥厂外排的污染物在流速、流量不大的情况，其污染可扩散至十多公里之远，污染面如此之大. 如果水流速、流量增加，则此种污染的扩散将越益严重. 32 号点是苏州化工厂排水区，底泥中 Cu、Zn、Pb、Hg、As 含量为 206、1084、930、12、82mg/kg，分别超标 7、12、28、50、7 倍. 其中 Hg 污染源是五十年代生产汞制剂农药“富民隆”时排放大量含 Hg 废水残留在底泥中的. 时隔三十年，虽然表层水中 Hg 含量不高，但在底泥中 Hg 化合物长期稳定的滞留下来. 从图 4 中可看到，东、西二采样点 Hg 的含量接近，说明 Hg 已污染了整个断面，表明当时含 Hg 废水排放量大浓度高. 从 41 号点开始进入吴江县河段，只有位于平望镇 (53 号点)附近底泥中出现 Cu、Pb、Hg、Ni 含量较高，其余各点均未超过污染标准.

表 2 离吴县磷肥厂排水口不同距离的底泥中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量 (mg/kg)

采样号	离排水口距离	Cu	Zn	Pb	Cd
15	工厂排水口	1894.9	3679.5	7735.3	44.56
16	20m	332.0	1227.4	2478.0	14.85
17	40m	93.38	733.3	416.2	6.19
18	200m	72.20	720.0	401.2	6.24
19	800m	68.70	690.1	290.0	4.20
20	1100m	70.31	836.3	286.7	4.11
22	3000m	60.00	772.4	239.4	3.23
23	4400m	50.89	514.1	135.9	1.64
24	6100m	62.70	651.7	164.4	2.18
25	10km	50.51	263.7	71.61	0.59
26	12km	90.40	777.9	130.41	1.30

(三) 运河苏州段底泥中重金属的垂直积累

底泥中重金属垂直积累量与工厂废水、废渣排放量、排放时间长短、离污染源的距离、流速、流量有关. 污染物排放年代越长，排放量越多，底泥污染物沉积越厚. 从表 3 看出，随着有污染物排放的工厂生产量的增加，废水、废渣也随之递增，则底泥中重金属含量由深层向表层大幅度增加. 15 号点在 150cm 深的底泥中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量超

表 3 底泥中重金属含量的垂直积累量 (mg/kg)

样 号	深 度 (cm)	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Co	Hg	Cr
15	0—15	1894.9	3679.5	7735.3	44.56	115.8	133.5	0.23	39.33
	100—125	164.1	952.5	561.2	5.28	38.27	21.02	0.34	49.99
	130—150	82.82	651.9	319.1	3.50	34.67	18.64	0.28	41.23
20	0—15	70.31	436.3	286.7	4.11	40.56	27.08	0.34	66.96
	40—50	57.42	672.3	206.2	2.38	38.63	10.52	0.26	58.45
	80—90	74.94	909.5	351.3	1.80	21.17	22.82	0.33	51.12
58	0—15	18.73	79.47	21.38	0.075	33.73	35.92	0.11	42.86
	20—30	19.49	75.97	22.47	0.117	38.25	30.09	0.18	54.13
	30—45	16.92	98.80	22.72	0.096	31.39	28.23	0.18	52.24

标3、7、9、1.6 倍，估计该河段受污染底泥的深度在 2.5m 以上。离 15 号点 1km 处的 20 号点，在接近相同深度的底泥中含量则较低。在无重金属废水排入的河段（58 号点）底泥中垂直积累量基本无变化。

（四）运河苏州段底泥污染程度的评价

河流底泥（沉积物）的污染评价方法，曾北危等采用西德缪勒的地质积累指数来表示湘江沉积物的金属污染[3]。也有用沉积物金属富集系数表示富集程度。本文是用国内常用的等标污染指数法来表示污染程度，即用底泥中实测某金属元素浓度与污染标准相比，得到某元素的污染指数。指数越大，表示底泥受到沿岸工厂排放的废水、废渣的污染越严重。根据运河苏州段底泥中重金属污染物累积现状，污染指标拟定为四级污染等级来表示某河段某元素的污染程度（见表 4）

表 4　运河苏州段底泥中重金属污染等级表

污染指数	未污染	轻度污染	中度污染	重度污染
P	≤1	1—4	4—8	>8

通过对运河苏州段底泥中各重金属污染的评价表明，全河段主要是重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的污染。在吴县、苏州市境内有二分之一河段的底泥超过重度污染。部分河段 Hg、As 也超过重度污染。在吴江县境内在平望镇附近有 Pb 的重度污染，其余都未受污染。

按我国 1985 年 3 月 1 日实施的“农用污泥中污染物控制标准”[4] 规定了每亩农田施入干污泥不超过 2000kg 的情况下，污泥中各重金属元素最高允许量。以运河苏州段底泥中的含量相比较（见表 5），可以明显的看出，苏州段部分底泥用于农田必须严格控制施用量。划分的重金属污染等级可订为；未污染和轻度污染的底泥可安全施用，中度污染的底泥每亩施用量不得超过 2000kg，重度污染的底泥不宜施用于农田。

表 5　部分河段底泥中重金属和农用污泥控制标准比较（mg/kg）

元素	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg
农用污泥控制标准	250	500	300	5	5
14 号	283	1511	1285	12	—*
15 号	1894	3679	7735	45	—
16 号	332	1227	2478	12	—
20 号	—	1123	400	—	—
28 号	442	1479	—	—	—
29 号	353	1389	—	—	—
31 号	—	716	395	—	6
32 号	255	1084	930	—	12

* 表示未超过控制标准

五、小结

（一）运河苏州段，在吴县和苏州市河段底泥受沿岸工厂废水及城镇生活污水污染，有二分之一河段底泥污染严重。吴江县境内大部分河段未受到重金属污染。

（二）在吴县和苏州市河段有三分之一的底泥，泥中 Cu、Zn、Pb、Cd 的个别元素含量超过我国农用污泥控制标准最高允许量。所以，用于农田要控制施用量。

（三）为了根除运河水体继续受污染，建议苏州市建立沿河工厂废水处理厂或督促工厂内部处理，控制废水排放标准。吴县的县、乡、镇级工厂布局分散，厂规模又小，应全面规划，重新调整工厂布局。对现存的污染严重又难以治理的工厂，在工业调整改革过程中，实施关、停、并、转。必须继续保留的，要限期治理。

参考文献

[1] 陈吏坚，中国的河流，1951.
[2] «环境监测标准分析方法»，科学出版社，1980.
[3] 曾北危等，环境化学，1(5)，353—358，(1982).
[4] GB4284-84. «农用污泥中污染物质控制标准».