DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2010.05.003

南通市河流底泥重金属污染及潜在生态风险评价

蒋庆丰,游 珍,倪黎明,钱 鹏

(南通大学地理科学学院,江苏 南通 226007)

摘要:通过对南通市区 5 条主要河道柱状底泥样品重金属元素质量比的实验分析,探讨河道重金属污染的分布特征,并进行潜在生态风险评价。结果表明:①各重金属元素质量比均超过土壤背景值,污染较重,其中 Hg 污染最为严重;②重金属污染在垂直分布上分为未受干扰、正常沉积的"表层高、底层低"和受清淤治理措施影响的非正常沉积的"表层低、底层高"两种分布格局,在水平分布上具有"城市中间河流高、外围河流低"和"中上游河段高、下游河段低"的分布特征;③从重金属污染的潜在生态风险看,濠河和法伦寺河潜在生态风险强,姚港河生态风险中等,任港河和南川河生态风险轻微。各重金属元素对生态风险的影响程度大小依次为:Hg > Cu > Zn > Cr > Pb。

关键词:南通市;重金属污染;生态风险评价;河流底泥

中图分类号:X82 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-6933(2010)05-0011-05

Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in river sediments of Nantong

JIANG Qing-feng, YOU Zhen, NI Li-ming, QIAN Peng

(*School of Geographical Science, Nantong University, Nantong* 226007, *China*)

Abstract: Based on sediment samples from five urban channels in Nantong City and analysis of the heavy metal mass ratios in the sediment, the distribution characteristics of heavy metal pollution were revealed and the potential ecological risk was evaluated. The results were as follows: (1) All the heavy metal mass ratios exceeded the background soil value, and the pollution was serious, with Hg pollution being the highest. (2) The vertical distribution of heavy metal pollution was divided into two types. One was normal deposit sediment unaffected by dredging measures, wherein the heavy metal pollution was high in the upper layer and low in the lower layer; the other was abnormal deposit sediment affected by dredging measures, wherein the heavy metal pollution was lower in the upper layer and high in the lower layer. The horizontal distribution of the heavy metal pollution had the characteristics of the heavy metal pollution being high in the river of the central city, lower in surrounding rivers, higher in the upper and middle stream of rivers, and lower downstream. (3) According to the evaluation of the potential ecological risk of heavy metals, the Hao River and Falunsi River were heavily polluted, the Yaogang River was moderately polluted, and the Rengang River and Nanchuan River were lightly polluted. The influence degrees of potential ecological risk of heavy metals were as follows: Hg > Cu > Zn > Cr > Pb.

Key words: Nantong; heavy metal pollution; ecological risk assessment; river sediment

城市河流主要是指发源于城区或者流经城市区域的河流或河流段,也包括历史上虽属人工开挖但经多年演化已具有自然河流特点的运河和渠系[1]。城市河流虽然在城市防洪排涝、水路运输和景观美化等方面具有重要作用,但相对封闭,自净能力及水体更新速度不及大江大河,因而易受沿岸排放的污

基金项目:南通大学自然科学基金(07Z115,07Z116);南通大学博士科研启动基金(08B22)

作者简介:蒋庆丰(1976—),男,安徽和县人,副教授,博士,主要从事环境与灾害研究。E-mail:qfjiangz@163.com

染物影响。通过各种途径进入河流水体的重金属绝大部分迅速由水相转入固相,结合到悬浮物和底泥中[2],最终富集于底泥中。因此底泥是河流中重金属的主要蓄积库,是河流水环境重金属污染的指示剂[3],也是水体的二次污染源[4],影响着河流疏浚治理的效果[5]。进行河流底泥中重金属元素质量比及其分布的研究可提供自然环境中重金属转移的信息,对河流水环境保护有着重要的意义。

重金属污染已成为河流水环境污染评价的重要内容[6]。河流底泥重金属潜在生态风险指数评价法[7]从底泥中重金属可能存在的生态风险效应角度出发,利用重金属总量化学指标分析数据,结合各重金属污染物生物毒性大小的不同、多种重金属污染物的综合作用等因素来综合评价底泥中重金属污染物潜在的生态风险效应,并能定量给出生态风险程度,因而具有一定的评价优势[5]。

南通市位于 31°41′06″ ~ 32°42′44″N,120°11′47″ ~ 121°54′33″E,濒江临海。市区地势北高南低,水网密布,河道纵横。内有各级河道 579 条,总长度 866.9 km,其中濠河环绕南通市城区,周长10 km,水面 72 hm^2,为城区最主要的河流。监测资料显示,市区河流地表水水质达标率几乎为零,各主要河段除濠河引水口处水质达Ⅲ类外,其余均为超Ⅴ类,超标因子主要为 COD、NH_3-N、TP 等[8-9]。河道黑臭、底泥污染严重[10],已成为南通城市发展的绊脚石。

笔者对南通市区 5 条主要河道底泥重金属的污染特征及潜在生态风险进行探讨和评价,旨在为城市河道污染治理提供背景数据和科学依据。

1 样品采集与测试方法

选取南通市区濠河、姚港河、任港河、法伦寺河和南川河等 5 条主要河流,布设 10 个断面,于 2008 年 4 月 9—11 日用重力采样器采集各断面柱状底泥样(图 1、表 1),各柱状样长约 10 ~ 46 cm 不等,样品编号密封后带回实验室以 1 cm 间隔对柱状样进行分割,常温下风干、碾碎,过 100 目筛保存备用。样品经 HCl-HNO_3-HF-$HClO_4$ 消解后,采用美国 Leeman 公司的电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定 Cr、Cu、Pb、Zn 等元素;Hg 元素采用 CVAAS 法,用美国 Leeman 公司的 Hydra-C 型总汞分析仪测定。样品分析由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室完成。

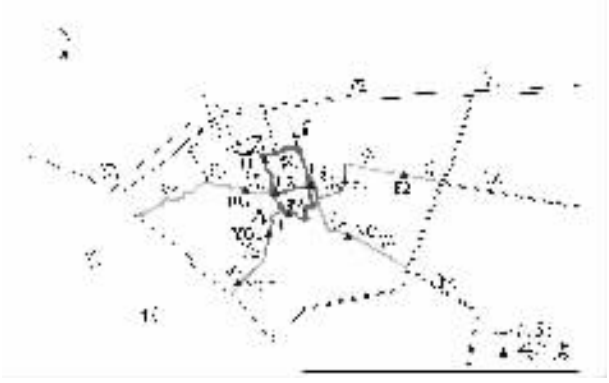

图 1 研究区采样点分布及污染程度示意图
(颜色深示意污染重)

2 结果与讨论

2.1 重金属质量比

南通市 5 条主要河流底泥的重金属平均质量比均超过了土壤背景值[11],最低为土壤背景值的 1.5 倍,最高为 20.4 倍,平均为 4.8 倍,污染严重(表 1)。其中 Hg 污染最为严重,为土壤背景值的 3.6 ~ 20.4 倍,平均为 9.8 倍;其次是 Cu、Zn、Pb,平均分别为土壤背景值的 3.1、4.0 和 5.0 倍;污染最小的是 Cr,平均为土壤背景值的 2.1 倍。各种重金属元素在不同河流以及同一河流不同河段的底泥中质量比不同,其中 Cr 在法伦寺河 F1 河段质量比最高,达 170.0 mg/kg,为土壤背景值的 3.2 倍;Cu 在濠河 H2 河段质量比最高,达 160.9 mg/kg,为土壤背景值的 10.1 倍;Pb 在法伦寺河 F2 河段质量比最高,达 123.8 mg/kg,为土壤背景值的 5.9 倍;Zn 在濠河 H4 河段质量比最大,达 688.2 mg/kg,为土壤背景值的 8.6 倍;Hg 在濠河 H3 河段质量比最大,达 1.43 mg/kg,为土壤背景值的 20.4 倍。

2.2 垂直分布

濠河:H1 河段底泥柱样长 34 cm,Cr、Cu、Pb、Zn 和 Hg 质量比的垂直分布趋势一致,表现出表层高,中部低,底部又上升的特征(图 2)。其中 0 ~ - 10 cm 质量比高且随深度增加而降低,- 10 cm 处达到最低值;- 10 ~ - 20cm为剖面的低值,- 20cm以下,随深

表 1 南通市河流底泥重金属元素平均质量比 mg/kg

重金属元素	濠河				姚港河		法伦寺河		任港河	南川河	土壤背景值[11]
	H1	H2	H3	H4	YG1	YG2	F1	F2	RG	NC	
Cr	77.2	150.3	105.6	100.5	82.2	96.7	170.0	128.4	84.8	95.7	53.1
Cu	38.5	160.9	89.9	103.0	31.0	49.8	124.0	91.5	59.2	50.9	16.0
Pb	51.0	87.1	79.1	63.9	31.0	41.8	73.2	123.8	60.6	43.2	20.9
Zn	238.7	480.2	500.1	688.2	129.0	129.0	334.1	240.6	286.4	165.0	79.7
Hg	0.48	0.89	1.43	0.98	0.43	0.37	1.06	0.52	0.48	0.25	0.07

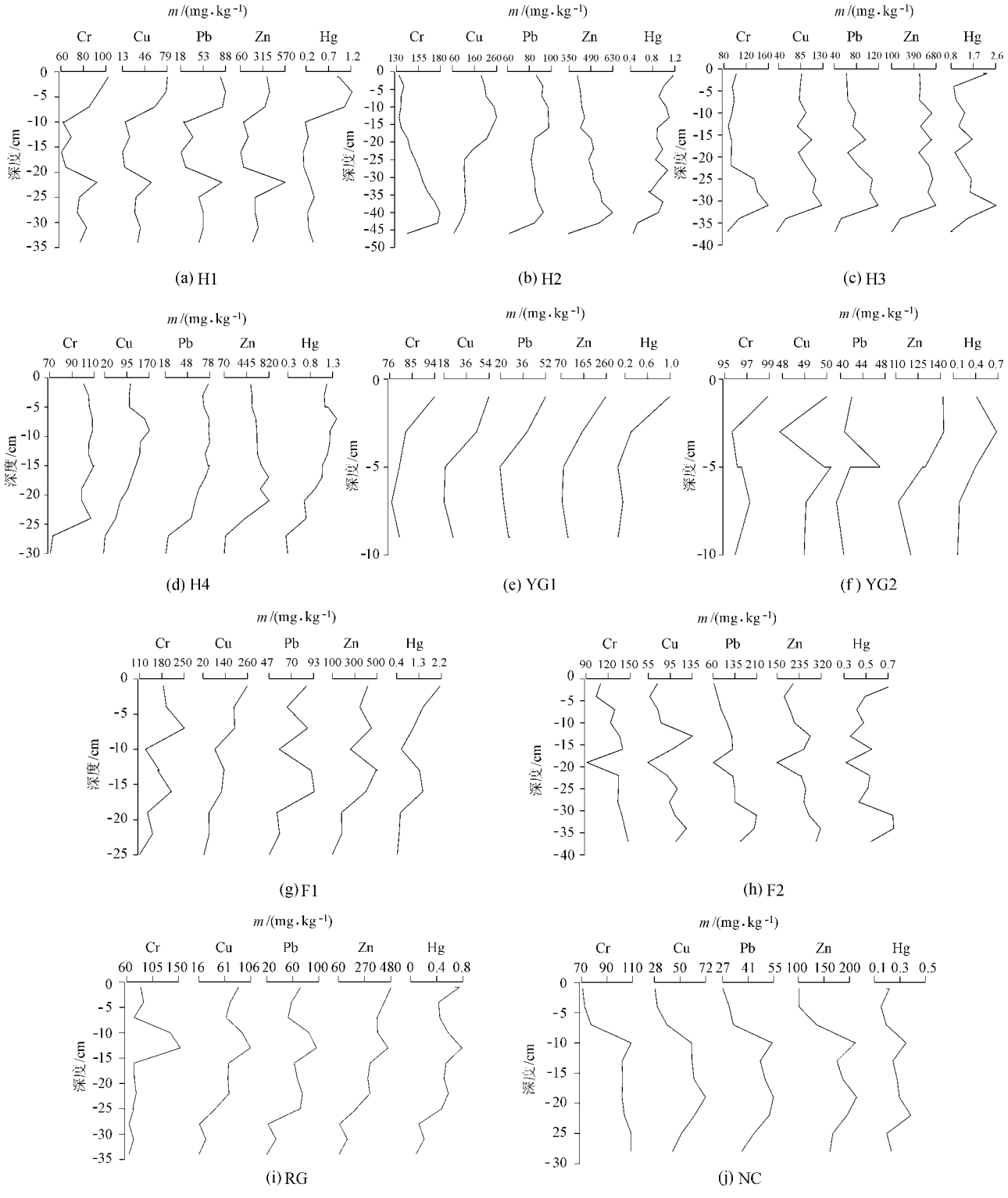

图 2　南通市河流底泥重金属污染垂直分布

度增加重金属质量比增加并趋于稳定。H2 河段底泥柱样长 46 cm，重金属质量比的分布明显不同于 H1 河段。Cr、Zn 质量比基本上随深度增加而增加，约在 40 cm 处达最高值。Cu、Pb 质量比在 0 ~ －15 cm 内较高且随深度增加而增加，－15 ~ －25 cm 随深度加深而降低，－25 cm 以下质量比低并趋于稳定。Hg 质量比波动较大，随深度增加呈锯齿状下降。H3 河段底泥柱样长 37 cm，各重金属元素质量比基本上表现为随深度增加而增加的趋势，底部－31 cm达最高值，－31 cm 以下逐渐降低至剖面最低值。其中 Cr、Hg 的垂直变化稍有不同，Cr 在 0 ~ －25 cm基本稳定，Hg 在 0 ~ －5 cm 质量比高，且随深度增加急降至剖面较低值。H4 河段底泥柱样长－30 cm，重金属元素质量比基本表现为随深度加深逐渐降低，其中 Cu 在 0 ~ －9 cm 内随深度加深质量比增加，Zn 在 0 ~ －22 cm 内随深度增加质量比缓慢

增加。

姚港河：YG1 和 YG2 河段底泥柱样均长 10 cm，两剖面重金属质量比垂直变化趋势较为一致。0 ~ -3 cm 质量比高，-3 ~ -7 cm 质量比低，-7 ~ -10 cm 质量比增加，均呈现“高、低、高”的变化特征。其中 Hg 质量比在 YG1 和 YG2 河段剖面的 -7 ~ -10 cm 均表现出随深度增加而降低的相反趋势，Cr 在 YG2 剖面的 -7 ~ -10 cm 也表现为逐渐下降的相反趋势，Pb 在 YG2 剖面中层 -3 ~ -5 cm 质量比最高。

法伦寺河：F1 河段底泥柱样长 25 cm，Cr、Cu、Pb、Zn、Hg 质量比的垂直分布趋势一致，总体上呈锯齿状波动，并随深度增加质量比减小。F2 河段底泥柱样长 37 cm，重金属元素质量比的垂直分布特征相似，基本上随深度增加质量比波动增大，其中 0 ~ -4 cm Cr、Cu、Zn、Hg 质量比随深度增加质量比下降。

任港河：RG 河段底泥柱样长 34 cm，Cr、Cu、Pb、Zn、Hg 质量比的垂直分布趋势一致，总体上随深度增加质量比降低，其中 -7 ~ -16 cm 为剖面重金属质量比最高值段。

南川河：NC 河段柱样长 27 cm，5 种重金属质量比的垂直分布趋势大致相同，大致 0 ~ -19 cm 随深度加深质量比增加，-10 cm 处达到剖面质量比最高值，-18 ~ -27 cm 随深度增加质量比下降。

从上述垂直分布结果可以看出，5 条河流 10 个断面重金属元素质量比的垂直分布大致具有 2 种分布格局：①“表层低、底层高”，随深度增加质量比增加的垂直分布模式，如濠河 H2、H3、法伦寺河 F2 和南川河 NC 河段。这种分布格局反映出了历史上河道清淤治理的印记，河道经清淤后中上层重金属质量比明显降低。濠河 H1、姚港河 YG1 河段的“表层高、中层低、底部高”分布格局也大致属于这种类型，“中层低”为清淤的结果，“表层高”为近年受工农业生产和居民生活污染物排放的影响重金属再次富集的结果。这与这些河流的治理记录具有很好的对应关系，濠河作为南通市的景观河流，从 20 世纪 80 年代以来数度经过“引清挤污”和清淤工程治理[8,10]，姚港河 YG1、法伦寺河 F2 和南川河 NC 河段河道均经过了“硬化”处理。②“表层高、底层低”，随深度增加质量比降低的垂直分布模式，如濠河 H4、姚港河 YG2、法伦寺河 F1、任港河 RG 河段。这种分布格局属于未经清淤治理或其他人为扰动的正常沉积过程，重金属元素质量比随污染排放强度的逐渐加强而逐年增加。

2.3 水平分布

南通市区河道底泥表层（1 cm）重金属质量比可以用于说明底泥重金属污染的水平分布情况（图 1、图 3）。从图 3 可以看出：①各河道表层重金属元素污染程度不一致。除法伦寺河的 Cr、Cu 和 Hg 元素和任港河的 Zn 元素外，位于城市中心的濠河表层底泥重金属污染明显重于与其连通的周边其他河流，如濠河 4 个河段剖面 Pb 的平均质量比为 76.1 mg/kg，明显高于姚港河的 47.1 mg/kg 和南川河的 27.1 mg/kg，也高于法伦寺河的 74.4 mg/kg 和任港河的72.1 mg/kg，其他重金属具有相似的分布特征，这与前人的研究结果一致[10]。②即使是同一河流，重金属的污染程度也不一致，总体表现为中上游段污染高于下游段，如位于法伦寺河中上游段的 F1 河段所有 5 种重金属质量比均明显高于位于下游段的 F2 剖面。

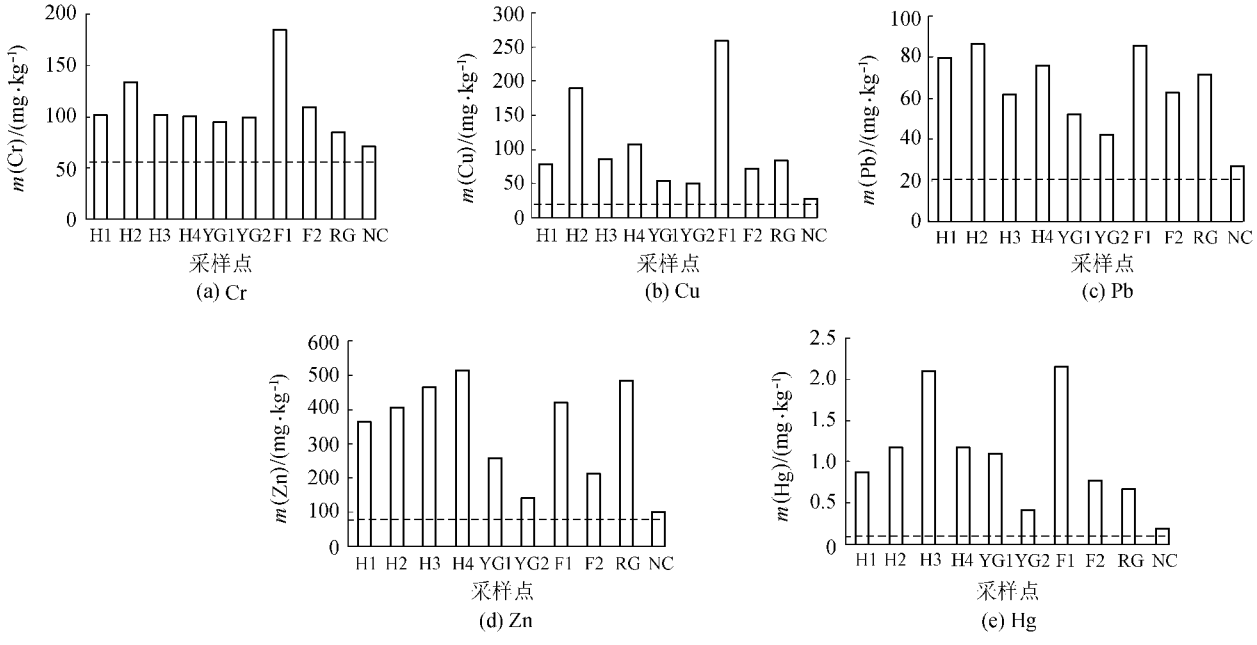

图 3 南通市河流底泥表层重金属质量比图（图中虚线为土壤背景值）

表 2　各采样点潜在风险指数及单因子污染参数

采样点	Cr		Cu		Pb		Zn		Hg		C_d	R_I
	E_r^i(Cr)	C_r^i	E_r^i(Cr)	C_r^i	E_r^i(Cr)	C_r^i	E_r^i(Cr)	C_r^i	E_r^i(Cr)	C_r^i		
H1	2.9	1.5	15.9	3.2	13.3	2.7	5.2	5.2	140.6	3.5	16.0	177.9
H2	3.8	1.9	37.9	7.6	14.4	2.9	5.8	5.8	188.3	4.7	22.9	250.3
H3	2.9	1.5	17.4	3.5	10.4	2.1	6.6	6.6	336.5	8.4	22.1	373.7
H4	2.9	1.4	21.4	4.3	12.7	2.5	7.3	7.3	187.6	4.7	20.3	231.9
YG1	2.7	1.3	10.8	2.2	8.7	1.7	3.7	3.7	175.4	4.4	13.3	201.2
YG2	2.8	1.4	10.1	2.0	7.0	1.4	2.0	2.0	65.9	1.6	8.5	87.8
F1	5.3	2.6	51.7	10.3	14.3	2.9	6.0	6.0	344.5	8.6	30.4	421.8
F2	3.1	1.6	14.4	2.9	10.5	2.1	3.0	3.0	125.6	3.1	12.7	156.7
RG	2.4	1.2	16.9	3.4	12.0	2.4	6.9	6.9	108.3	2.7	16.6	146.6
NC	2.0	1.0	5.7	1.1	4.5	0.9	1.5	1.5	31.2	0.8	5.3	44.9

2.4　潜在生态风险评价

利用 Hakanson 的潜在生态风险指数法[7]对南通市河道重金属进行生态风险评价。该方法的优势在于从重金属的生物毒性角度出发，反映了多种污染物的综合影响，并定量地划分出潜在生态风险的程度[5]。其计算公式为：

$$R_I = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n T_r^i C_r^i$$

$$C_r^i = C_s^i / C_f^i$$

式中：R_I 为底泥中多种重金属潜在生态风险指数；E_r^i 为第 i 种重金属潜在生态风险系数；T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数，反映其毒性水平和生物对其污染的敏感程度；C_r^i 为第 i 种重金属的污染参数；C_s^i 为表层底泥重金属实测值；C_f^i 为参比值，参比值采用南通市土壤重金属背景值[11]，用土壤中重金属元素自然质量比的最高值加 1 倍标准差进行计算，Cr、Cu、Pb、Zn、Hg 的背景参比值 C_f^i 经计算分别为 70 mg/kg、25 mg/kg、30 mg/kg、70 mg/kg、0.25 mg/kg，对应毒性系数 T_r^i 的值分别设为 2、5、5、1、40。

将上述数据代入公式中，可得各采样点潜在生态风险参数和潜在生态风险指数以及各单因子污染参数 C_r^i，结果见表 2；与多因子污染物污染程度 C_d、单因子污染物污染参数 C_r^i、潜在生态风险参数 E_r^i 和潜在生态风险指数 R_I 值相对应的污染程度以及总潜在生态风险程度如表 3 所示。

表 3　C_r^i、C_d、E_r^i 和 R_I 值相对应的污染程度以及潜在生态风险程度

C_r^i	单因子污染物污染强度	C_d	总体污染程度	E_r^i	单因子污染物生态风险程度	R_I	总潜在生态风险程度
< 1	低	< 8	低	< 40	低	< 150	轻微
1 ~ 3	中	8 ~ 16	中	40 ~ 80	中	150 ~ 300	中等
3 ~ 6	较重	16 ~ 24	较重	80 ~ 160	较重	300 ~ 600	强
6 ~ 10	重	24 ~ 32	重	160 ~ 320	重	≥600	很强
≥10	严重	≥32	严重	≥320	严重		极强

由表 2 和表 3 可知，从单因子污染参数来看，Hg、Cu 和 Zn 的污染参数 C_r^i 值多数为 3.0 ~ 10.0，在大部分采样点属于较重到重度污染，其中 Cu 在法伦寺河 F1 河段 C_r^i 值达到了 10.3，属于严重污染；Pb、Cr 的 C_r^i 值为 1.0 ~ 3.0，属于中度污染。多因子综合污染参数显示法伦寺河污染严重，濠河、姚港河、任港河污染程度较重，南川河污染较轻。

从总潜在生态风险程度看，濠河和法伦寺河的 R_I 值均超过了 150，个别河段超过了 300，属于中强生态风险，污染较重；姚港河的 R_I 值在其中 1 个河段超过了 150，属生态风险中等；任港河和南川河的 R_I 值均小于 150，生态风险轻微，污染较轻。各重金属元素对河道生态风险构成危害的影响程度大小排列次序为：Hg > Cu > Zn > Cr > Pb。

3　结　论

根据南通市区主要河流底泥重金属污染特征分析和潜在生态风险评价结果，得出以下结论：

a. 南通市区主要河流底泥的重金属元素质量比均严重超过南通市土壤背景值，平均为 4.8 倍，尤其是重金属 Hg，平均为 9.8 倍，最高质量比为土壤背景值的 20.4 倍；其他重金属元素也存在不同程度的质量比超标现象，平均超标 2.1 ~ 5.0 倍。

b. 底泥重金属污染在垂直分布上可分为两种分布格局：①受清淤治理措施影响，“表层低、底层高”，随深度增加质量比增加；②未受人类活动干扰的正常沉积，“表层高、底层低”，随深度增加质量比降低。前者与河流治理记录相吻合；在水平分布上大致有城市中间河流高于外围河流、同一河流中上游河段高于下游河段的分布特征。

c. 底泥重金属污染的潜在生态风险中，濠河和法伦寺河属于中强生态风险，污染较重，姚港河生态风险中等，任港河和南川河生态风险轻微，污染较轻。Hg、Cu 和 Zn 属于较重到重度污染，Pb、Cr 属于中度污染，各重金属元素对河道生态风险构成危害的影响程度大小排列次序为：Hg > Cu > Zn > Cr > Pb。

（下转第 19 页）

3 讨 论

上述研究结果表明,河流形态评价分值较高的河段,其水体也有较高的自净能力,河流形态与部分水质指标的改善存在着相关性。其原因有如下几个方面:

a. 河段的蜿蜒程度及断面多样性增加,一定程度上降低河水流速,减缓了水力冲刷作用,使得水体中悬浮颗粒物得到沉降,这可能是河流形态与 SS、浊度降解相关的原因。河道物理形态多样性形成的河水流态复杂性,有利于大气向水体的氧扩散,对于水体复氧有重要的意义[9]。

b. 河岸带对于削减、吸纳可能进入河流的面源污染起到关键作用,这实际上有助于增强污染物在河流中的降解程度。良好的河岸植物带的存在有利于稳定河流小区域的气候,降低热污染,从而也有助于水体的复氧[10]。

c. 河床生物栖境是影响底栖动物的重要因素。良好的河床生物栖境不仅能为底栖动物提供食物与栖息、繁殖、避难场所,还能稳定底质[11],降低大水对底栖动物的冲击[12]。河床附生植物通过光合作用为水体提供了丰富的氧气来源,这可能是河床底质状况影响 DO 降解率的直接原因。同时,水体中 DO 的提供使得好氧性动物大量出现,将进一步提高底栖动物的多样性和数量,从而有助于水质改善,促使 NH_3-N 向 NO_3^--N 和 NO_2^--N 的转化,使得河床生物栖境与 NH_3-N 的降解相关。

4 结 论

a. 构建了包括河道物理形态、河岸带状况、河床生物栖境等 3 项一级评价指标和河道分维数等 7 项二级评价指标的城市河流形态评价体系,并确定各指标的评价方法及评价标准。对乌涌的形态评价结果表明,该评价体系能够反映研究河段的形态差异。

b. 水质监测结果表明,河流形态评价分值较高的河段,其水体也有较高的自净能力,河流形态评价结果与 NH_3-N、SS、DO 和浊度的降解存在相关性,表明河流形态是影响河流自净能力的一个重要因素。

参考文献:

[1] 国家环境保护局.中国生态问题报告[M].北京:中国环境科学出版社,1999:34-35.

[2] 董哲仁.河流形态多样性与生物群落多样性[J].水利学报,2003(11):1-6.

[3] 王沛芳,王超,侯俊.城市河流生态系统建设模式研究及应用[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):68-71.

[4] 郑丙辉,张远,李英博.辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J].环境科学学报,2007,27(6):928-936.

[5] 赵焕臣,许树柏,和金生.层次分析法:一种简易的新决策方法[M].北京:科学出版社,1985:1-57.

[6] 文科军,马劲,吴丽萍,等.城市河流生态健康评价体系构建研究[J].水资源保护,2008,24(2):50-52.

[7] 《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社.2002.

[8] 魏永霞.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2005:1-130.

[9] 王锦旗,宋玉芝,王国祥.溢流堰基质及生物膜对水体复氧及水质的影响[J].水利水电技术,2009(1):34-36.

[10] 夏继红.生态河岸带综合评价理论与应用研究[D].河海大学,2005:27-40.

[11] DOWNES B J, LAKE P S, SCHREIBER E S, et al. Habitat structure, resources and diversity: the separate effects of surface roughness and macroalgae on stream invertebrates[J]. Oecologia, 2000, 123(4): 569-581.

[12] BEISEL J N, USSEGLIO-POLATERA P, THOMAS S, et al. Stream community structure in relation to spatial variation: the influence of mesohabitat characteristics [J]. Hydrobiologia, 1998, 389(1): 73-88.

(收稿日期:2009-11-29 编辑:徐 娟)

(上接第 15 页)

参考文献:

[1] 宋庆辉,杨志峰.对我国城市河流综合管理的思考[J].水科学进展,2002,13(3):377-381.

[2] LIVETT E A. Geochemical monitoring of atmospheric heavy metal pollution: theory and application [J]. Advances in Ecological Research, 1988, 18: 65-77.

[3] FÖRSTNER U, WITTMANN G T W. Metal Pollution in the Aquatic Environment[M]. Berlin: Springer Verleg, 1979: 110-192.

[4] DAMIAN S. Development sediment quality criteria [J]. Environmental Sciences & Technology, 1988, 22(11): 1256-1261.

[5] 汤莉莉,牛生杰,徐建强,等.外秦淮河疏浚后底泥重金属污染与潜在生态风险评价[J].长江流域资源与环境,2008,17(3):424-430.

[6] 陈静生,周佳义. 中国水环境重金属研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992:168-170.

[7] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach[J]. Water Research, 1980, 14: 975-1001.

[8] 张建岳.南通市主城区河道存在问题及整治对策[J].江苏水利,2001(8):32-33.

[9] 陆建军.南通市城市水环境治理思路[J].江苏水利,2005(4):42-43.

[10] 喻福涛,张东华.南通市城市水环境整治的实践[J].江苏水利,2006(10):29-30.

[11] 安强华,沃珍娣,童占明,等.南通市农业土壤和粮食中金属元素背景值的调查[J].环境科学技术,1989,2(2):27-31.

(收稿日期:2009-09-02 编辑:徐 娟)