

里运河淮安段清淤淤泥 重金属污染特征及风险评估

谢昶琰¹, 徐 昕², 蒋 力², 刘景禹², 李梦莎³, 章安康¹

(1. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001; 2. 淮安市水利工程建设管理服务中心, 江苏 淮安 223005;
3. 淮安市洪金灌区管理所, 江苏 淮安 223126)

摘要:为对比研究里运河淮安段清淤前后淤泥重金属污染特征变化,评价淤泥重金属生态风险,分别在河道刚开展清淤时和清淤后固化105d时间下采集淤泥样品,分析样品重金属含量和有机污染物分布特征,选用内梅罗综合指数法和潜在生态风险指数法,相似比对重金属污染等级及评价潜在生态风险,以期为里运河开展重金属风险防控、水生态保护与环境规划管理等工作提供科学依据。

关键词:河道淤泥; 重金属; 污染特征; 生态风险

中图分类号:X522,TV85

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2025)01-0044-0005

Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution from dredging sludge in Huai'an section of Li Canal

XIE Changyan¹, XU Xin², JIANG Li², LIU Jingyu², LI Mengsha³, ZHANG Ankang¹

(1. Huaiyin Institute of Agricultural Sciences of Xuhuai Region in Jiangsu, Huai'an 223001, China;
2. Huai'an Water Conservancy Engineering Construction Management Service Center, Huai'an 223005, China;
3. Huai'an Hongjin Irrigation District Administration, Huai'an 223126, China;)

Abstract: In order to compare and study the changes in the characteristics of heavy metal pollution in sludge before and after dredging in Huai'an section of Li Canal and assess the ecological risk of sediment heavy metals, the sludge samples were collected at the beginning of dredging and at the solidification time of 105 d after dredging, and the heavy metal contents and organic pollutants of the samples were analyzed. The Nemerow comprehensive index method and potential ecological risk index method were selected to similarly compare of heavy metal pollution levels and evaluation of potential ecological risks, in order to provide scientific basis for the Li Canal to carry out heavy metal risk prevention and control, water ecological protection and environmental planning and management.

Key words: river sludge; heavy metals; pollution characteristics; ecological risk

收稿日期: 2024-07-17

基金项目: 江苏水利科技项目(2023056); 淮安市农业科学研究院科技发展基金项目(HNY202125); 江苏省现代农业(水稻)产业技术体系项目(JATS[2023]190-1); 淮安市自然科学研究计划(联合专项)(HABL202230)

作者简介: 谢昶琰(1990—), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事农业资源化利用和作物养分管理方面研究。E-mail: 1139908946@qq.com

通信作者: 章安康(1966—), 男, 研究员, 主要从事水稻栽培和土壤肥料方面研究。E-mail: 13905239366@139.com

河道淤泥是水体生态系统的重要组成部分,既可为水环境提供营养,又可转化污染物。淤泥被称为水体污染物的“源”与“汇”^[1-4],不仅作为“汇”蓄积水体中重金属,当水体发生扰动或者其他环境条件变化时,又作为“源”将重金属重新释放至上覆水中,引起水体的二次污染,对动植物及人类健康造成威胁^[5]。作为水环境治理主要措施之一,河道清淤可有效削减河道内源污染负荷,加速河道水环境修复,但由于河道淤泥成分复杂,含有一定的污染物,故经过清淤挖出的淤泥必须经过合理的处置^[6],因此,开展淤泥重金属及其污染研究对于河道环保清淤、污染综合治理以及生态整治与改善等具有重要的现实意义。

里运河位于中国京杭大运河江苏省段的中段,全长 169.5 km,不仅是江苏省江水北调工程的输水干河,也是南水北调工程东线的输水主干线,在保障和促进区域经济社会可持续发展中发挥着不可替代的作用^[7]。里运河是国家二级航道,以承担防洪排涝和通航任务为主,兼顾饮用水源地、灌溉输水、调水和景观等多种生态服务功能^[8-9]。近年来,随着人类活动的加强,夹带泥沙的雨水及大量内外源污水直排进入里运河干支流,河床不断淤积,淤积深度达 2.0 m 以上,水生态安全受到威胁。2023 年,为解决里运河内源污染问题,改善水质,淮安市政府根据里运河水环境综合治理的总体部署和《关于印发 2023 年中心城市建设重点项目计划的通知》(淮政发〔2023〕2 号)相关要求实施了里运河淮安段环保清淤工程。为此,本研究于 2023 年 9 月份里运河淮安河段(起点-终点:淮阴船闸-与大运河汇合处)清淤期,分别在刚清淤时采集其上游、中游以及下游的河道淤泥和清淤时通过绞吸船运至堆场固化 105 d 后的淤泥进行多点采集混合样品,对其重金属、矿物油、多环芳烃等含量进行测定分析,并采用内梅罗综合污染指数法和潜在性生态风险评估法进行多重评估,以期为里运河开展重金属风险防控、水生态保护与环境规划管理等工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

里运河位于 118°57'E'~119°30'E 和 32°16'N~33°34'N 之间,是京杭大运河的组成部分,河段从扬州的施桥船闸延伸至淮安的杨庄闸,流经淮安市区、宝应县、高邮市和江都区,全长 169.5 km,流

域面积 321 km²。其中扬州段北起宝应泾河,南接长江,全长 143.3 km;淮安段为宝应泾河到施桥船闸,长度 26.2 km。两岸堤距 80~250 m,最宽达 1 100 m^[10]。试验于 2023 年 9 月,在淮安市城区河道清淤工程开展时期,选取里运河淮安段其中一段(起点-终点:淮阴船闸-与大运河汇合处),全长 24.3 km,河宽 70 m。经过实地调研,该河段流域周围土地利用类型以居住用地、道路交通用地、农业用地为主。

1.2 样品采集

2023 年 9 月,在该河流域刚开展疏浚清淤时对河段上游、中游和下游进行取样。淤泥被绞吸船吸取后,经过管道统一运输到淤泥固化场进行脱水处理。淤泥的采样地点位于淤泥固化场的外围堆置区域。根据清淤时间进行淤泥溯源定位,淤泥取样过程中,按照多点取样法,每份样品 5 kg 以上。淤泥样品用自封塑料袋装好带回实验室,经自然风干、除杂、混合均匀后,将样品过 5 mm 筛,用四分法进行缩分,从中取出 500~1 000 g 混合后备用。

在 2023 年 12 月,淤泥固化 105 d 时,在固化场分多点采集淤泥样品,待自然晾干后过 5 mm 筛,用四分法进行缩分,从中取出 500~1000 g 混合后备用。

1.3 样品分析

采用电感耦合等离子体质谱仪(赛默飞 iCAP Q ICP-MS)检测淤泥中 As、Cd、Cr、Hg、Ni、Pb 的含量。参照 HJ 950—2018《固体废物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法》,采用气质联用仪(赛默飞 Trace1300 ISQ LT)检测淤泥中多环芳烃的含量。

1.4 重金属污染评价方法

以《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)规定的风险筛选值($pH > 7.5$)作为参比值,采用单项污染指数(P_i)和内梅罗综合指数(P_N)对淤泥重金属进行污染评价,评价分级依据《土地质量地球化学评价规范(DZ/T0295—2016)》执行。以 GB 15618—2018 中的农用地污染风险筛选值为标准,采用潜在生态风险指数(某一重金属的毒性响应系数 E_i 和综合潜在生态风险指数 RI)法评价淤泥重金属污染的潜在生态风险^[11-12],其中 Cd、Pb、Cr、Hg、As 的毒性系数分别为 30、5、2、40、10,评价等级参见文献^[13]。

1.5 数据分析

采用 Excel 2017 软件进行数据计算,采用 SPSS 25 进行统计分析,采用 Origin Lab 软件进行作图。

2 结果与讨论

2.1 淤泥重金属含量特征

里运河淮安段清淤淤泥重金属含量如表1所示,淤泥重金属含量随着固化时间的延长表现降低的趋势(镉含量除外),在固化105 d时淤泥的铅、镍、铬、砷和汞含量相较0d降低了14.70%、27.82%、41.63%、5.17%和83.54%。但是不管是刚清淤时还是固化105 d后淤泥的6种重金属含量均未超过《GB4284—2018 农用污泥污染物控制标准》的A级污染产物限值。根据《GB15618—2018 土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准》中标准来看,除0 d时淤泥中砷含量平均值略高于标准含量,105 d时表现出低于标准值的趋势外,其他重金属含量平均值均未超过风险值筛选标准。该河段淤泥重金属元素富集,可能主要是内外源环境污染导致,外源污染有排污口排污,内源污染主要有航运污染、河道内码头和居民生产生活污水直排河道和水面养殖污染等。

通常认为,重金属含量的离散以及受人为活动影响的程度可通过变异系数来反映,变异系数越大,表明受外界活动干扰越强烈。根据 Wilding^[14]对变异系数的分类,变异系数<15%属于弱变异,15%<变异系数<36%属于中等变异,36%属于强变异。由表1可知,刚清淤时淤泥的6种重金属的变异系数均小于15%,属于弱变异;随着固化时间的增加到105 d时铅的变异系数相较0 d时明显降低,镍、镉、铬和汞的变异系数相较0 d显示增加趋势,其中镍和汞仍属于弱变异,镉变异系数介于15%~36%之间,属于中等变异,铬的变异系数达到47.17%,表现为强变异,砷的变异系数较0 d时有所降低,仍处于弱变异。本研究表明,清淤固化对降低淤泥重金属含量有明显效果,清淤0 d和105 d下淤泥的铅含量分布较均匀,而其余5种重金属含量呈不均匀分布状态。

2.2 淤泥有机污染物含量特征

刚清淤时淤泥的矿物油、苯并(a)芘和多环芳烃含量均显著高于清淤固化后(图1)。其中,不管

表1 清淤淤泥重金属含量

| 测试项目 | 清淤前(0 d) | | | 清淤后(固化105 d) | | | GB 4284— 2018A级污染 产物限值/ (mg/kg) | GB 15618— 2018风险筛 选值/ (mg/kg) |
|------|------------------|-----------------|--------|------------------|-----------------|--------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| | 含量范围/ (mg/kg) | 平均值/ (mg/kg) | 变异系数/% | 含量范围/ (mg/kg) | 平均值/ (mg/kg) | 变异系数/% | | |
| Pb | 51.84~59.64 | 56.25±3.99a | 7.09 | 47.14~49.39 | 47.98±1.23b | 2.56 | 300 | 170 |
| Ni | 43.50~53.11 | 47.73±4.91 | 10.29 | 30.77~38.58 | 34.45±3.92 | 11.38 | 100 | 190 |
| Cd | 0.501~0.573 | 0.532±0.037 | 6.95 | 0.578~0.805 | 0.685±0.114 | 16.64 | 3 | 0.6 |
| Cr | 108.82~127.05 | 115.64±9.94 | 8.60 | 31.07~90.01 | 67.50±31.84 | 47.17 | 500 | 250 |
| As | 22.46~29.74 | 26.10±3.64 | 13.95 | 20.43~24.52 | 21.75±2.58 | 11.86 | 30 | 25 |
| Hg | 0.148~0.183 | 0.164±0.018 | 10.98 | 0.025~0.031 | 0.027±0.004 | 14.81 | 3 | 3.4 |

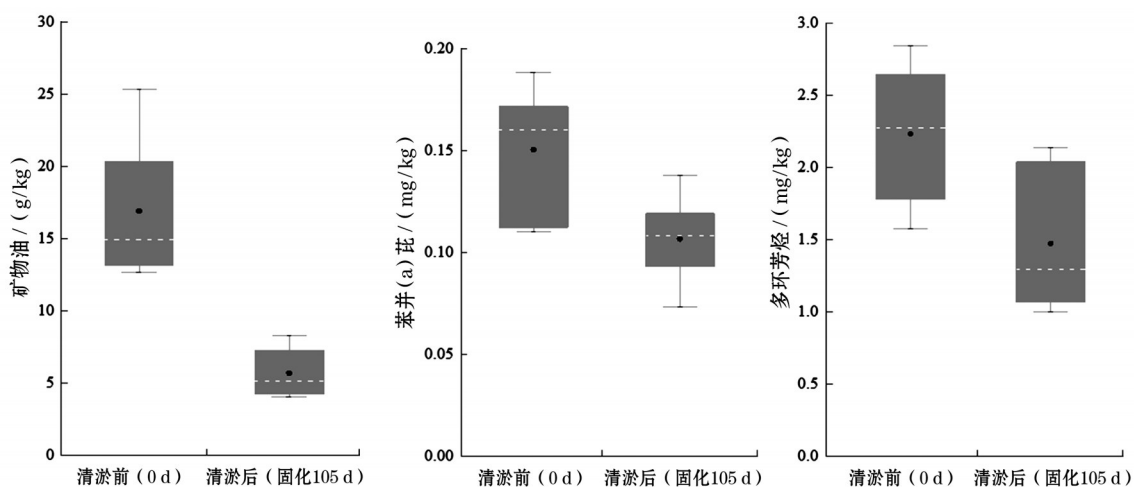


图1 清淤淤泥有机污染物含量

是刚清淤还是清淤固化后,淤泥的矿物油含量均超过GB 4284—2018A级污染产物限值B级标准,推断原因可能是由于含有矿物油的洗涤剂合成、机械加工等废水进入河道导致^[15]。尽管随着淤泥固化时间的推移(105 d),矿物油含量显著降低,但依然高于相关标准限制,这可能是由于固化沉降时间较短,矿物油残留物还有待继续降解。虽然在《GB15618—2018 土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准》中并未有对矿物油含量的限值执行标准,但笔者将持续关注淤泥在固化4个月、5个月甚至更长时间下的矿物油含量,确保淤泥能够用于农业生产。淤泥样品中多环芳烃及苯并(a)芘含量均满足标准要求,明显低于GB 4284—2018 A级污染产物限值和《GB15618—2018 土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准》,多环芳烃含量在刚清淤时集中分布在1.78~2.85 mg/kg,固化105 d后集中分布在1.07~2.14 mg/kg,相比刚清淤时有明显降低。

2.3 潜在生态污染评价

2.3.1 内梅罗综合指数法评价

将清淤前后淤泥中6项重金属元素进行单项污

染指数计算,得出 P_i 值,在此基础上,通过数据统计整理后进行内梅罗综合指数计算,得出 P_n 值,见表2。单项污染指数评价结果表明,除清淤时和清淤后固化105 d时间下淤泥砷元素含量的 P_i 大于1,污染程度为轻度污染之外,不管是0 d还是105 d时,其余重金属含量的 P_i 值均小于1,污染程度均为清洁。内梅罗综合指数评价结果表明,清淤时和清淤后固化105 d时间下的淤泥 P_n 值差别不大,均介于0.7~1之间,污染程度为尚清洁,未超警戒限值。总体而言,里运河淤泥重金属含量不会造成环境污染。

2.3.2 潜在生态风险指数评价

如表3所示,0 d和105 d下淤泥的 E_i 值均处于40以下,说明不论是刚清淤还是固化105 d后淤泥均表现为低风险等级。对淤泥中6种重金属元素的综合潜在生态风险指数(RI)进行统计分析,结果表明 RI 值均在40左右,远远小于轻微生态风险的 RI 值150,即所有时间点样品的潜在生态风险均为轻微生态风险,表明里运河清淤淤泥中重金属生态风险低,且不会随着固化时间的增加而造成生态性风险。

表2 单因子污染指数和内梅罗综合指数评价结果

| 采样时间 | 单项污染指数(P_i) | | | | | | 内梅罗综合指数 P_n |
|--------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| | Pb | Ni | Cd | Cr | As | Hg | |
| 清淤时(0 d) | 0.234 | 0.251 | 0.665 | 0.330 | 1.305 | 0.164 | 0.986 |
| 清淤后(固化105 d) | 0.200 | 0.181 | 0.856 | 0.193 | 1.238 | 0.027 | 0.931 |

表3 潜在性生态风险评价结果

| 采样时间 | E_i | | | | | | RI |
|--------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| | Pb | Ni | Cd | Cr | As | Hg | |
| 清淤时(0 d) | 1.17 | 1.26 | 19.95 | 0.66 | 13.05 | 6.56 | 42.65 |
| 清淤后(固化105 d) | 1.00 | 0.91 | 25.68 | 0.39 | 12.38 | 1.08 | 41.43 |

3 讨论与结论

本研究结果表明,里运河淮安段清淤前后淤泥重金属含量均值从高到低排序均为Cr、Pb、Ni、As、Cd、Hg,刚清淤时淤泥的矿物油、苯并(a)芘和多环芳烃含量均显著高于清淤固化后;通过对重金属进行潜在性生态风险评价分析,刚清淤时和固化105 d下淤泥的内梅罗综合指数分别为0.986和0.931,潜在生态风险指数法分别为42.65(0 d)和42.13

(105 d),生态风险较低。综上所述,里运河淮安段淤泥重金属综合污染较轻,潜在生态危害较低。另与长江流域、太湖流域等重要的河湖相比,该河段淤泥受到重金属污染较轻。由于里运河淮安段既承担防洪排涝和通航任务,又兼顾饮用水水源地、灌溉输水、调水和景观等功能作用,虽然近年来随着人类活动的加强,河流堤防安全和水生态健康产生了一定的威胁,但通过清淤工程开展后的调查发现,该河段流域周围未有工业园区(电缆、五金、精

密电子、磁铁、电镀、印染等),未产生工厂污染物。

参考文献:

- [1] CARREIRA R S, WAGENER A L R, READMAN J W, et al. Changes in the sedimentary organic carbon pool of a fertilized tropical estuary, Guanabara Bay, Brazil: an elemental, isotopic and molecular marker approach [J]. Marine Chemistry, 2002, 79(3-4): 207-227.
- [2] 冯峰, 王辉, 方涛, 等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3): 342-345.
- [3] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 961-968.
- [4] 方家琪, 祁闯, 张新厚, 等. 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5367-5374.
- [5] 沈佳怡, 高铭晶, 刘钰, 等. 典型草本植物对镉锌铜污染河道淤泥的修复[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2022, 28(1): 9.
- [6] 孙淑云, 陈晓芳, 刘广兵. 河道淤泥疏浚和底泥污染评价研究——以三亚市某河道为例[J]. 四川环境, 2024, 43(4): 33-40.
- [7] 戴永琪, 刘爱军, 代菊, 等. 里运河东堤险工险段调查分析[J]. 江苏水利, 2019(7): 64-68.
- [8] 戴永琪, 李宏恩, 刘晓青. 里运河堤防险工险段典型失效模式分析[J]. 水利水电工程学报, 2019(2): 104-110.
- [9] 刘振清, 寇军, 徐兆春. 老里运河淮安段水环境变化趋势分析[J]. 江苏水利, 2012(3): 40, 42.
- [10] 张奇谋, 林思群, 邵雅, 等. 里运河水生态状况评价及保护对策[J]. 中国科学院大学学报, 2023, 40(5): 605-613.
- [11] 周杨, 周文斌, 马嘉伟, 等. 缙云县某复垦地块土壤环境质量调查及生态风险评价[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(2): 388-395.
- [12] 赵靓, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5552-5561.
- [13] 张云芸, 马瑾, 魏海英, 等. 浙江省典型农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1233-1241.
- [14] WILDING L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil survey [J]. Spatial Variations, 1985(2): 166-194.
- [15] 陈灿, 饶思威, 欧阳培毓, 等. 广州城市污泥泥质特征及其农用风险评价[J]. 环境科技, 2023, 36(2): 47-52.

(上接第32页)

法实行将处于空转状态。为此,需严格按照国家和地方用水定额标准,同时结合用户实际用水情况,核定用水计划指标。

3.6 加强宣传引导

进一步加大宣传和引导力度,使非居民用水户更深刻理解加价制度主要是基于资源节约利用目的而设立的。加价自来水水费反映出自来水来之不易,自来水是由地表水或地下水经过混凝、沉淀、过滤、消毒等水处理工艺,通过管道、加压泵等输送到千家万户,应加大对水资源的保护力度,促使用水户进一步提高节约用水意识。

3.7 提高服务水平

累进加价制度的设立旨在促进节水,体现水资源的稀缺性,要通过节水服务指导用户合理化用水,挖掘节水潜力,提高用水效率。

(1)建立用水户、供水企业、节水主管部门3级登录端口的取用水管理信息系统,实现用户用水信息、供水企业供水信息、节水主管部门计划管理信息共享。

(2)增设超定额用水预警提示服务,建议增加

考核周期内第一个月超定额预警提醒服务^[5]。

(3)建立超定额用水复核机制,对水表故障、水管爆裂、灭火救灾、消防演练、基建施工、生产临时用水等非主观原因导致超定额用水的单位,执行用水复核制度。

参考文献:

- [1] 李肇桀, 张旺, 王亦宁. 计划用水管理面临的问题及对策建议专题调研报告[J]. 水利发展研究, 2023, 23(11): 18-22.
- [2] 王一文, 钟玉秀, 刘洪先, 等. 加快完善并推进非居民用水超计划(定额)累进加价制度[J]. 中国水利, 2016(6): 50-53.
- [3] 王亦宁. 对完善非居民用水超定额累进加价制度的思考和建议[J]. 水利经济, 2021, 39(6): 72-76.
- [4] 罗琳, 邵薇薇, 王灏, 等. 关于加强对供水企业计划用水监管的思考[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(增刊1): 428-431.
- [5] 费丽丽, 管潇. 清江浦区节水型社会建设成效与思考[J]. 江苏水利, 2024(9): 12-14.