

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.097



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



城市内河底泥与上覆水的污染物相互关系试验研究

王钢¹, 曾玲玲², 吉锋³

(1. 福州大学土木工程学院, 福州 350108; 2. 浙江工业大学土木工程学院, 杭州 310023;
3. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210029)

摘要: 针对福州市晋安区水系 5 个点位的河道底泥与其上覆水, 开展有机质、总氮总磷、重金属污染物含量试验, 采用分配系数定义底泥污染物和水中污染物的浓度比值, 通过有机质、总氮总磷、重金属污染物的分配系数分析底泥其与上覆水中污染物的关联性, 导入分配系数标准差与相关系数的关系, 探讨底泥与上覆水污染物的关联度, 进而明确其关键影响因素。结果表明: 不同污染物在底泥与其上覆水中的分配比重不同, 上覆水与底泥中污染物的相关系数差异较大, 污染物分配系数越稳定, 底泥与其上覆水中污染物的相关性越高; 底泥中黏粒含量、有机质含量及塑性指数对污染物分配系数具有显著影响, 污染物分配系数均随底泥黏粒含量的增加而增大, 重金属分配系数随着底泥有机质含量的增加而增大; 有机质分配系数与总氮分配系数随塑性指数的增大大致呈增大趋势, 各重金属分配系数的对数值与底泥塑性指数之间具有良好的线性关系。

关键词: 城市内河; 河道底泥; 上覆水; 污染物; 分配系数

中图分类号: X522; TU411.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)05-0212-10

Experimental study on relationship between pollutants of sediment and overlying water in urban river

WANG Gang¹, ZENG Lingling², JI Feng³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, P. R. China; 3. Jiangsu Water Resource Co., Ltd. of Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Eastern Route Project, Nanjing 210029, P. R. China)

Abstract: A series of pollutant content tests of organic matter, total nitrogen, total phosphorus and heavy metals were performed on the river sediment and overlying water obtained from five sites in Jin'an District, Fuzhou. Partition coefficient was introduced to study the correlation of pollutants between the river sediment and overlying water. The correlation of pollutants between sediment and overlying water was analyzed by the distribution coefficients of organic matter, total nitrogen, total phosphorus and heavy metals. Then, introduced the relationship between the standard deviation of partition coefficient and correlation coefficient, discussed the

收稿日期: 2022-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(52178361); 江苏水源公司科技研发项目(SSY-JS-2020-F-48)

作者简介: 王钢(1992-), 男, 博士生, 主要从事疏浚泥基本性质与处理技术研究, E-mail: 18305943110@163.com。

曾玲玲(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: linglz413@126.com。

Received: 2022-05-08

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52178361); Technical R & D Project of Jiangsu Water Source Co., Ltd. (No. SSY-JS-2020-F-48)

Author brief: WANG Gang (1992-), PhD candidate, main research interests: basic properties and treatment technology of dredged sediment, E-mail: 18305943110@163.com.

ZENG Lingling (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: linglz413@126.com.

correlation between pollutants in sediment and overlying water, and clarified its key influencing factors. The results show that the partition proportion of different pollutants in sediment and overlying water is different, and the correlation coefficient between pollutants in overlying water and sediment is quite different. The more stable the pollutant distribution coefficient is, the higher the correlation is with the pollutants in the overlying water. The clay content, organic matter content and plasticity index of sediment have a significant impact on the pollutant partition coefficient. The pollutant partition coefficient increases with the increase of clay content in the sediment, and the heavy metal partition coefficient increases with the increase of organic matter content in the sediment. The partition coefficient of organic matter and total nitrogen show an increasing trend with the increase of plasticity index. There is a good linear relationship between the logarithm of heavy metal partition coefficient and the plasticity index of sediment.

Keywords: urban river; river sediment; overlying water; pollutants; partition coefficient

城市居民区和工业区长期将生活污水和工业废水直接排入城市内河,导致城市内河黑臭问题日益凸显。内河底泥是城市内河污染物的主要储存库,底泥污染物主要包括有机质污染物、氮磷营养盐和重金属3大类^[1-3]。底泥粒径对污染物的吸附效果具有重要影响^[4],不同污染物之间也能相互影响,特别是有机质与重金属污染物之间的络合作用对其在泥-水环境中的迁移分配规律具有显著影响^[5]。通过沉淀、吸附等作用,有机质、氮磷营养盐和重金属等污染物在底泥中逐渐累积,其含量通常高于上覆水中污染物含量。当污染物含量超过底泥的吸附能力或水体污染物含量减少及周围水环境发生变化时,底泥中的可溶性污染物重新释放到上覆水体中,底泥与其上覆水中的污染物保持着动态平衡关系^[6-9]。当底泥或上覆水体严重污染时,会对生态和人体健康造成长期危害,此时需要对污染河道进行治理。

是否需要污染河道进行治理不是简单地比较污染物含量,而是建立在底泥与其上覆水的污染物相互关系及生态效应风险的基础上^[10-11]。同时,已有研究表明,底泥及其水体中的有机质、氮磷营养盐、重金属污染物都会影响底泥的比重、液塑限、压缩性、不排水抗剪强度等物理-力学性状^[12-16],底泥的液塑限、强度等物理-力学性状对底泥的处理方法与效果有显著影响^[17-20]。因此,研究城市内河底泥及其上覆水体污染指标之间的相关关系能为城市黑臭内河的综合治理提供参考。但目前的研究主要集中于河流水体的污染特征分析、底泥中污染物向上覆水释放的规律^[21],以及底泥或水体中某种污染物对于其物理-力学性状的影响^[12-16],关于底泥与其上覆水中污染物相关性及其在底泥与其上覆水中分配系数的研究鲜有报道。

笔者采集福州市晋安区水系5个点位的底泥和上覆水体试样,测定其有机质、氮、磷、重金属含量,

探讨底泥与其上覆水体中污染物之间的相互关系及关键影响因素。

1 试样与试验方法

1.1 试样

图1显示了福州市晋安区水系取样的5个点位,分别用S1、S2、S3、S4、S5表示。该水系有两条干流,分别是凤坂河和浦东河,福兴河、新厝河、淌洋河为汇入浦东河干流的3条支流,浦东河干流的最下游处为一个公园内的人工湖。S1位于浦东河干流的中段,S2位于浦东河干流的上游点,S3位于新厝河与浦东河干流的汇集处,S4位于淌洋河与浦东河干流的汇集处,S5位于浦东河下游的人工湖处。5个点位的的基本情况见表1,其中水体的溶解氧含量(DO)采用《水质溶解氧的测定碘量法》(GB 7489—87)^[22]测得。根据《水质采样技术指导》(HJ 494—2009)^[23]的采样方法获取底泥和上覆水样品,底泥呈黑色流体状态,臭味浓,其上覆水呈淡黄色。采集底泥试样后剔除植物、石子等杂物,用聚乙烯袋封装,运至实验室后避光保存。相应的底泥上覆水封存于无菌聚乙烯瓶中,运至实验室后在4℃、避光的条件下保存。



图1 底泥取样点位

Fig. 1 Sampling location of sediments

表1 取样点位情况表

Table 1 Testing methods

点位	植物情况	底泥厚度/ m	水体 DO/ (mg/L)	水域面积/ m ²
S1	挺水植物	1.1	7.04	847
S2	挺水植物	1.4	5.10	1 805
S3	挺水植物	1.2	5.34	2 070
S4	挺水、浮叶植物	1.3	4.53	1 058
S5	挺水、浮叶植物	1.9	4.05	17 136

底泥的基本物理性质如表2所示,底泥颗粒分析按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[24]中的筛析法和密度计法测定,点位S1~S5底泥黏粒含量(<0.005 mm)、粉粒含量(0.005~0.075 mm)、砂粒含量(>0.075 mm)分布范围分别为12.3%~42.4%、47.5%~82.9%、4.8%~10.2%。底泥颗粒中以黏粒、粉粒居多,砂粒较少。液限(w_L)和塑限(w_P)分别采用Casagrande法和搓条法测定。

表2 底泥基本物理性质

Table 2 Basic physical property of sediments

底泥	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	液限/%	塑限/%
S1	12.3	78.8	8.9	44.0	31.5
S2	42.4	47.5	10.2	79.2	35.3
S3	12.3	82.9	4.8	38.5	23.3
S4	26.0	64.0	10.0	83.6	35.0
S5	28.3	62.4	9.3	111.9	44.0

1.2 试验分析方法

针对S1~S5河道底泥,测定有机质含量(OM)、总氮含量(TN)、总磷含量(TP)和重金属(Cu、Zn、Ni、Pb)含量;对应的上覆水体测定化学需氧量(COD)、总氮含量(TN)、总磷含量(TP)和重金属(Cu、Zn、Ni、Pb)含量,测定方法见表3。

表3 底泥及其上覆水污染物测定方法

Table 3 Method for determining pollutants in sediment and overlying water

序号	测试项目	测试方法	试验标准
1	底泥OM	烧失量法	ASTM D2974
2	底泥TN	凯氏法	HJ 717—2014
3	底泥TP	钼锑抗分光光度法	HJ 632—2011
4	底泥重金属	ICP-MS法	US EPA 3050B
5	水体COD	重铬酸盐法	HJ 828—2017
6	水体TN	紫外分光光度法	HJ 636—2012
7	水体TP	钼酸铵分光光度法	GB 11893—89
8	水体重金属	ICP-MS法	US EPA 3050B

2 污染物分配系数

污染物在底泥与水体之间的分配系数定义为两相体系达平衡状态时污染物在颗粒物和水中浓度的比值^[25]。分配系数反映了污染物在固相和水相之间的分配、释放、迁移、贮存能力。分配系数越大,表明污染物以结合态形式存在得越多,容易通过吸附反应滞留在固相中^[26]。同时,某些污染物,如有机质,其生物利用度和降解率都与分配系数直接相关^[27]。分配系数是描述污染物在底泥-水环境中行为的重要物理化学特征参数^[28]。

2.1 底泥与其上覆水有机质关联性分析

图2为福州晋安区水系5个点位底泥有机质含量,分布在3.8%~12.3%范围内。其中,点位S5底泥的有机质含量最高,该区域水生植物繁茂,且点位S5处于人工湖内,湖泊面积大,水流速度滞缓,有利于植物凋亡后沉积产生的有机质在底泥中吸附累积。

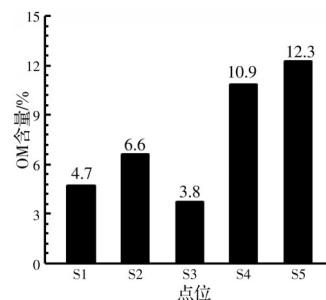


图2 各点位底泥有机质含量

Fig. 2 Organic matter content of sediments

随着时间的增长,底泥上覆水中有机质容易发生降解,长时间静置后将达到稳定状态^[29]。图3显示了经360 d静置后上覆水体中的化学需氧量(COD),分布于42~103 mg/L范围内,平均值为66.2 mg/L。

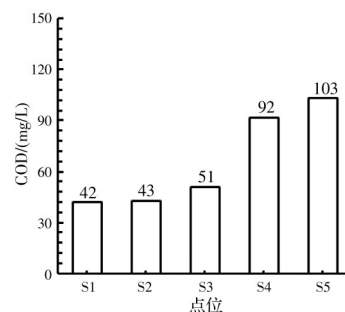


图3 各点位上覆水化学需氧量

Fig. 3 Chemical oxygen demand of overlying water at each point

定义底泥中有机质含量与其上覆水体中COD含量的比值为有机质分配系数 K_{OM} ,如式(1)所示。

$$K_{OM} = C_{SOM} / C_{WCOD} \quad (1)$$

式中: C_{SOM} 为底泥颗粒物的有机质含量,%; C_{WCOD} 为水体COD值,mg/L。

点位S1~S5的 K_{OM} 如图4所示。由图4可以看出,5个点位 K_{OM} 各不相同,其中点位S2的 K_{OM} 最高,点位S3的 K_{OM} 最低。由表2可以发现,点位S2底泥黏粒含量最高,点位S3底泥黏粒含量最低,造成各点位 K_{OM} 不同的原因主要是底泥中黏粒含量或物理化学性质的不同。已有研究表明^[30],黏粒含量较高的土体有机质分配系数也较高,这与本研究结果类似。同时,有研究表明,黏土矿物种类及含量、水体DO值、pH值等对土体的有机质分配系数也有显著影响^[31]。点位S1和S3的黏粒含量一致(12.3%),但点位S1的 K_{OM} 明显高于S3,由表1可知,点位S1水体DO值高于S3,在水体溶解氧充足时,好氧微生物可以利用有机质进行代谢,将有机质转化为自身的能量,同时将有机物分解为水和二氧化碳,进而减少了底泥COD的释放^[32],因此造成点位S1的 K_{OM} 高于S3。

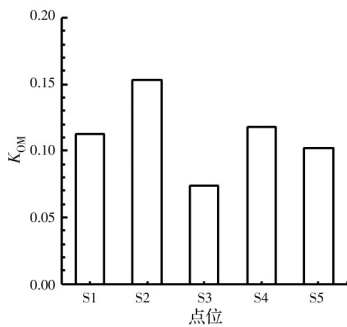


图4 各点位有机质分配系数

Fig. 4 Organic matter partition coefficients at each point

2.2 底泥与其上覆水总氮、总磷关联性分析

图5列出了福州市晋安区水系5个点位底泥总氮、总磷含量的测定结果,底泥中总氮含量范围为28~1 857 mg/kg,平均含量为998 mg/kg;总磷含量范围为43~1 042 mg/kg,平均含量为324 mg/kg。

福州市晋安区水系5个点位底泥上覆水体的总

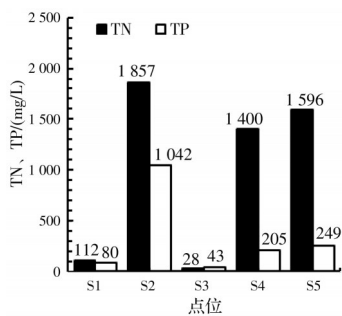


图5 各点位底泥总氮、总磷含量

Fig. 5 Total nitrogen and total phosphorus in overlying water at each point

氮、总磷含量如图6所示,上覆水中总氮含量范围为4.6~21.9 mg/L,平均值为11.0 mg/L;总磷含量范围为0.38~1.17 mg/L,平均值为0.80 mg/L。

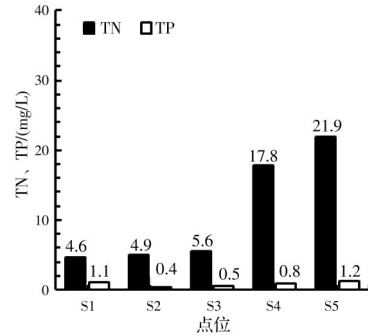


图6 各点位上覆水总氮、总磷含量

Fig. 6 Total nitrogen and total phosphorus in overlying water at each point

定义底泥颗粒中总氮、总磷含量与水体中总氮、总磷含量的比值分别为总氮分配系数 K_{TN} 、总磷分配系数 K_{TP} ,其表达式为

$$K_{TN} = C_{STN} / C_{WTN} \quad (2)$$

$$K_{TP} = C_{STP} / C_{WTP} \quad (3)$$

式中: K_{TN} 为总氮分配系数; K_{TP} 为总磷分配系数; C_{STN} 为底泥颗粒物的总氮含量,mg/kg; C_{STP} 为底泥颗粒物的总磷含量,mg/kg; C_{WTN} 为水体中总氮含量,mg/L; C_{WTP} 为水体中总磷含量,mg/L。

总氮、总磷分配系数如图7所示。由图7可以看出,点位S2的 K_{TN} 、 K_{TP} 最大,点位S3的 K_{TN} 、 K_{TP} 最小,这是因为点位S2底泥中TN、TP含量较高或其上覆水中TN、TP含量较低,点位S3反之。对比图5与图6可以发现,该水系底泥中TN、TP含量对 K_{TN} 、 K_{TP} 影响较大,表明因底泥物理化学性质不同而导致的吸附氮磷营养盐能力的不同将影响水系统的 K_{TN} 、 K_{TP} 。文献^[33]表明,氮、磷分配系数受到多种因素的影响,如比表面积、矿物组成和底泥颗粒表面电荷分布等。

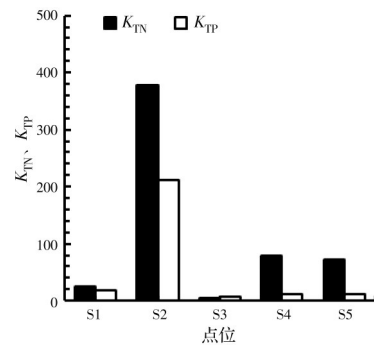


图7 各点位总氮、总磷分配系数

Fig. 7 Total nitrogen and total phosphorus partition coefficients at each point

2.3 底泥与其上覆水重金属关联性分析

点位 S1~S5 底泥重金属含量如图 8 所示,各点位底泥重金属含量差异较大。除 Pb 元素外,底泥中各重金属含量最多的点位均为 S5,原因是点位 S5 处于人工湖泊内,水流速度极缓,有利于水体中的重金属污染物吸附到底泥上,加之该湖泊底泥长时间不清理,使得重金属污染物在底泥中大量累积。点位 S5 处 Pb 元素含量相对较低,其原因可能是不同重金属的络合能力有所不同,Plaza 等^[34]研究表明,可溶性有机质对不同重金属的络合能力大小排序为 Pb>Cu>Zn 等。点位 S5 上覆水中可溶性有机质含量较高,导致 Pb 元素更容易进入到上覆水中,因此,相比于其他重金属元素,Pb 元素在底泥中占比较小。

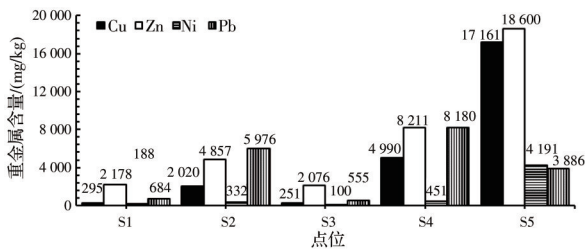


图 8 各点位底泥重金属含量

Fig. 8 Content of heavy metals in sediment at each point

福州市晋安区水系点位 S1~S5 底泥上覆水体中 Cu、Zn、Ni、Pb 四种重金属的含量见图 9, Cu、Zn、Ni、Pb 的含量范围分别为 40~85、430~1 225、40~165、175~340 $\mu\text{g/L}$ 。

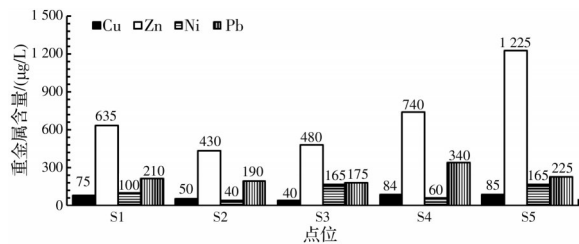


图 9 各点位上覆水重金属含量

Fig. 9 Content of heavy metals in overlying water at each point

定义底泥颗粒与水体中的重金属含量比值为重金属分配系数 K_{HM} ,其表达式为

$$K_{\text{HM}} = C_{\text{SHM}} / C_{\text{WHM}} \quad (4)$$

式中: K_{HM} 为重金属分配系数; C_{SHM} 为底泥颗粒物的重金属含量,mg/kg; C_{WHM} 为水体中重金属含量, $\mu\text{g/L}$ 。

Cu、Zn、Ni、Pb 元素的重金属分配系数 K_{HM} 如图 10 所示。由图 10 可以看出, K_{HM} 从点位 S1 到 S5 呈逐渐增大的趋势,各重金属元素分配系数大小顺序

为 Cu>Zn>Pb>Ni。说明该水系底泥,特别是有机质含量较高的底泥,对其上覆水体中 Cu 元素的固定作用最强,这是由于该水系底泥中有机质含量较高,且底泥中的有机质大部分为腐植酸。研究表明,有机质,尤其是腐植酸,对 Cu 具有很强的吸附能力,吸附效果甚至高出其他重金属元素 1 个数量级,腐植酸对 Cu 的吸附主要来自羧基与酚羟基的协同络合作用^[35-37]。

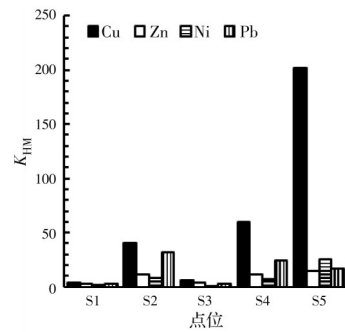


图 10 各点位重金属分配系数

Fig. 10 Heavy metals partition coefficients at each point

由图 10 可以发现,在底泥对其上覆水重金属的固定作用中,不同重金属之间存在竞争关系。当上覆水中存在 Cu 元素时,其他 3 种重金属的吸附都会被抑制,特别是当底泥有机质含量增加时,底泥中 Cu 与其他重金属含量的差距也在变大。

同时,由图 10 还可以发现,不同点位的重金属分配系数大小排序为 S5>S4>S2>S3>S1,说明点位 S5 底泥对其上覆水体中重金属的固定作用最强。比较图 4、图 7 与图 10 可以发现,5 个点位污染物分配系数的大小排序规律并不一致。例如,点位 S2 的 K_{OM} 、 K_{TN} 高于点位 S5,而点位 S2 的 Cu 分配系数则明显低于点位 S5,这是由于有机质分配系数、总氮、总磷分配系数主要受底泥黏粒含量及水体溶解氧含量的影响,而重金属分配系数还受底泥有机质含量的影响。点位 S5 的高有机质含量及有机质对重金属的络合作用使得点位 S5 的重金属分配系数高于点位 S2。

3 底泥与其上覆水污染物的关联度

相关系数 r 能反映两变量间线性相关关系,对 5 个点位底泥与其上覆水的污染物指标进行相关系数分析,矩阵如表 4 所示。当 $0 < |r| < 0.3$ 时,两者为微相关关系;当 $0.3 < |r| < 0.5$ 时,两者为低相关关系;当 $0.5 < |r| < 0.8$ 时,两者为中度(显著)相关关系;当 $0.8 < |r| < 1.0$ 时,两者为高度相关关系。由表 4 可知,上覆水中 COD 含量与底泥中有机质含量高度相关,其相关系数为 0.963。上覆水与底泥中

TN、TP的相关系数较低,分别为0.016、0.076,几乎不存在线性相关关系。除了Cu元素外,上覆水体与底泥中的其他重金属含量具有显著相关关系,相关系数均大于0.5。不同污染物在底泥与其上覆水

之间相关系数不同的原因是底泥对污染物的吸附能力不同导致污染物在上覆水与底泥中的分配系数不同。

表4 底泥与其上覆水中污染物指标间的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of pollutant indexes between sediment and overlying water

污染物指标	底泥 OM	底泥 TN	底泥 TP	底泥 Cu	底泥 Zn	底泥 Ni	底泥 Pb
上覆水 COD	0.963	0.275	-0.453	0.790	0.800	0.711	0.306
上覆水 TN	0.954	0.016	-0.076	0.881	0.907	0.778	0.501
上覆水 TP	0.048	0.337	0.076	0.590	0.576	0.626	0.049
上覆水 Cu	0.765	0.311	-0.294	0.080	0.639	0.534	0.372
上覆水 Zn	0.810	0.337	-0.308	0.948	0.850	0.933	0.130
上覆水 Ni	-0.024	-0.458	-0.645	0.402	0.320	0.731	-0.665
上覆水 Pb	0.662	0.345	-0.196	0.222	0.295	0.036	0.513

由图4、图7、图10可以看出,福州市晋安区水系不同点位的 K_{OM} 较为稳定,而 K_{TN} 、 K_{TP} 以及Cu元素的 K_{HM} 差异较大。标准差反映了参数的离散程度,标准差越大,表明参数越离散,反之越稳定。底泥-水系统中污染物分配系数标准差 S_K 与相关系数的关系如图11所示。由图11可以发现,随着污染物分配系数标准差的增大,底泥与其上覆水之间污染物的相关系数逐渐减小,由此可以推测,污染物在底泥-水系统中分配系数的稳定程度是影响底泥与其上覆水中污染物之间相关性的主要原因,分配系数越稳定,底泥与其上覆水中污染物的相关性越高。相关系数 r 与污染物分配系数标准差 S_K 的关系为 $r=0.848 3e^{-0.027S_K}$,由此可以得到,当污染物分配系数的标准差 $S_K < 2$ 时,底泥与其上覆水中污染物为高度相关关系;当 $2 < S_K < 19.5$ 时,底泥与其上覆水中污染物为显著相关关系;当 $19.5 < S_K < 39$ 时,底泥与其上覆水中污染物为低度相关关系;当 $S_K > 39$ 时,底泥与其上覆水中的污染物几乎不存在相关关系。

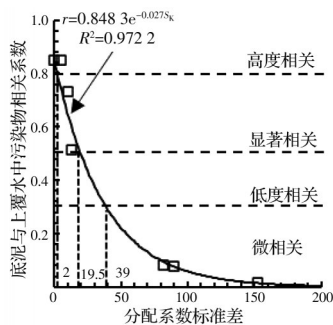


图11 污染物相关系数与分配系数标准差关系

Fig. 11 Relationship between correlation coefficient and standard deviation of partition coefficient for pollutant

4 污染物分配系数的关键影响因素

4.1 黏粒含量对污染物分配系数的影响规律

福州市晋安区水系5个点位底泥-水体系统的有机质分配系数 K_{OM} 与底泥黏粒含量的关系见图12。由图12可见, K_{OM} 随黏粒含量的增加而增大。

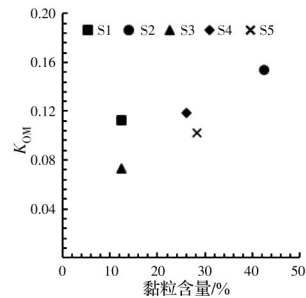


图12 有机质分配系数与底泥黏粒含量的关系

Fig. 12 Relationship between K_{OM} and clay content in sediment

总氮、总磷分配系数(K_{TN} 、 K_{TP})、重金属分配系数 K_{HM} 与底泥黏粒含量的关系分别见图13、图14。由图13、图14可以发现,与 K_{OM} 相同, K_{TN} 、 K_{TP} 、 K_{HM} 均随着底泥黏粒含量的增加而增大。

污染物分配系数随黏粒含量的增加而增大是因为黏粒粒径极小,单位质量的底质颗粒吸附污染物的能力强,使得更多污染物被吸附到底泥颗粒上。同时,在受到水力扰动后,黏粒会长时间悬浮在水中,有利于充分吸附水体中的污染物,黏粒在吸附污染物后沉积到底泥中,造成底泥中污染物含量增加,水体中污染物含量下降,从而导致污染物分配系数增大。

4.2 有机质含量对重金属分配系数的影响规律

重金属分配系数 K_{HM} 与底泥中有机质含量的关

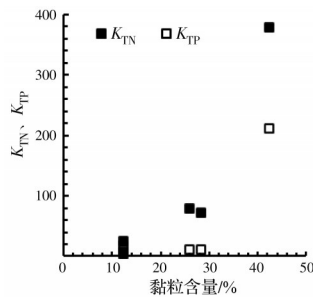


图 13 总氮、总磷分配系数与底泥黏粒含量的关系

Fig. 13 Relationship between K_{TN}/K_{TP} and clay content in sediment

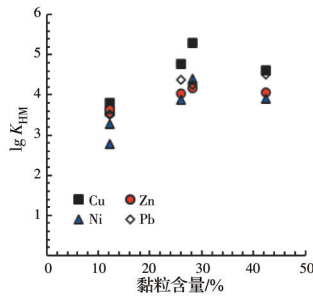


图 14 重金属分配系数与底泥黏粒含量的关系

Fig. 14 Relationship between K_{HM} and clay content in sediment

系见图 15。由图 15 可以发现,重金属分配系数随着底泥中有机质含量的增加而增大,这是由于有机质含有羧基、羟基、羰基等活性官能团,使得其对重金属元素具有很强的吸附络合能力^[38],有机质与重金属之间的离子交换吸附、络合等一系列反应促进了重金属在底泥中的吸附、沉淀与固定。对比图 14 可以发现,相较黏粒含量,有机质含量与 $\lg K_{HM}$ 的线性关系更强, K_{HM} 受底泥中有机质含量的影响较大。

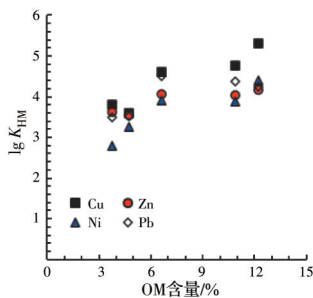


图 15 重金属分配系数与有机质含量的关系

Fig. 15 Relationship between K_{HM} and OM content

4.3 塑性指数对污染物分配系数的影响规律

底泥塑性指数 I_p 等于液限与塑限之差,其大体上能表示底泥吸附弱结合水质量与土粒质量之比,塑性指数越大,说明吸附弱结合水的能力就越强。有机质、总氮、总磷、重金属分配系数与塑性指数的关系分别见图 16~图 18。可以发现,有机质分配系

数与总氮分配系数随塑性指数的增加大致呈增大趋势,总磷分配系数与塑性指数规律的关系不明显,各重金属分配系数的对数值与底泥塑性指数之间具有良好的线性关系。

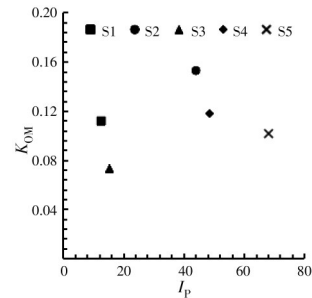
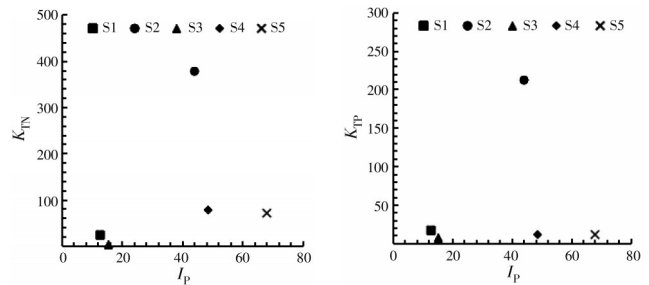


图 16 有机质分配系数与底泥塑性指数的关系

Fig. 16 Relationship between K_{OM} and I_p



(a) K_{TN} 与塑性指数的关系 (b) K_{TP} 与塑性指数的关系

图 17 总氮、总磷分配系数与塑性指数的关系

Fig. 17 Relationship between K_{TN} , K_{TP} and I_p

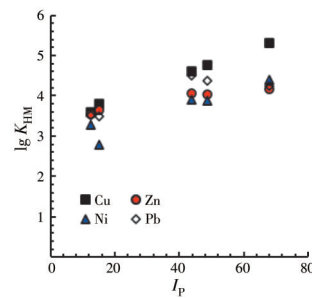


图 18 重金属分配系数与塑性指数的关系

Fig. 18 Relationship between K_{HM} and I_p

5 结论与建议

测定了福州市晋安区水系 5 个点位底泥与其上覆水的有机污染物、氮磷污染物、重金属污染物指标,分析了底泥与其上覆水中污染物的相互关系及其主要影响因素。主要结论如下:

1) 有机质分配系数 K_{OM} 较为稳定,而总氮、总磷分配系数 K_{TN} 、 K_{TP} 及 Cu 元素的分配系数 K_{HM} 差异较大。

2) 上覆水与其底泥中污染物的相关系数差异

较大,上覆水中COD含量与其底泥中有机质含量为高度相关关系,上覆水与底泥中TN、TP几乎不存在相关关系。除了Cu元素外,上覆水体与其底泥中其他重金属含量为显著相关关系,污染物分配系数越稳定,底泥与其上覆水中污染物的相关性越高。

3) 污染物分配系数 K_{OM} 、 K_{TN} 、 K_{TP} 、 K_{HM} 均随着底泥黏粒含量的增加而增大。随着底泥颗粒粒径的减小,更多污染物被吸附在底泥颗粒上,底泥-水系统中位于固相的污染物比重增大。由于有机质的络合能力,重金属分配系数 K_{HM} 随着底泥有机质含量的增加而增大。

4) 有机质分配系数与总氮分配系数随塑性指数的增大大致呈增大趋势,总磷分配系数与塑性指数的规律关系不明显,各重金属分配系数的对数值与底泥塑性指数之间具有良好的线性关系。

5) 基于对福州市晋安区水系底泥与其上覆水体污染物相互关系的研究,给出以下建议:对于污染程度较轻的点位S1、S3,可采用引入清洁水稀释河道污染物浓度的方法进行处理;对于黏粒含量较高的点位S2,可采用清洁的砂、砾石等材料覆盖或置换的方法降低底泥对污染物的吸附能力;对于污染程度较高的点位S4、S5,对底泥进行环保疏浚,同时清除水面上的浮叶植物,增加水体的溶解氧含量,降低底泥的有机质含量,避免污染物在此继续吸附沉积。

参考文献

- [1] 张双双. 南四湖底泥有机质、氮磷及重金属空间分布特征分析[D]. 山东 青岛: 青岛理工大学, 2014.
ZHANG S S. Analysis of organic matter, TN, TP and heavy metals spatial distribution in surface sediment of Nansi Lake [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao University of Tehcnology, 2014. (in Chinese)
- [2] 李继洲, 吴海旭, 姜万, 等. 南京城区黑臭河道底泥污染特征及生态风险评估[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1913-1919.
LI J Z, WU H X, JIANG W, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of sediment from malodorous rivers in Nanjing City [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(11): 1913-1919. (in Chinese)
- [3] YANG H J, JEONG H J, BONG K M, et al. Organic matter and heavy metal in river sediments of southwestern coastal Korea: Spatial distributions, pollution, and ecological risk assessment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 159: 111466.
- [4] 冉艳, 何强, 袁若愚, 等. 不同粒径悬移质泥沙对邻苯二甲酸二正丁酯的吸附特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 178-186.
- RAN Y, HE Q, YUAN R Y, et al. Adsorption characters of dibutyl phthalate in different grain-size suspended particulate matter [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 178-186. (in Chinese)
- [5] 关小红, 谢嫔. 环境中金属离子与有机污染物复合污染研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 120-128.
GUAN X H, XIE P. Literature review of combined pollution of metal ions and organic pollutants [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 120-128. (in Chinese)
- [6] GÄBLER H E. Mobility of heavy metals as a function of pH of samples from an overbank sediment profile contaminated by mining activities [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 58(2/3): 185-194.
- [7] BACHMANN T M, FRIESE K, ZACHMANN D W. Redox and pH conditions in the water column and in the sediments of an acidic mining lake [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2001, 73(2): 75-86.
- [8] MORILLO J, USERO J, GRACIA I. Partitioning of metals in sediments from the Odiel River (Spain) [J]. Environment International, 2002, 28(4): 263-271.
- [9] 王沛芳, 胡燕, 王超, 等. 动水条件下重金属在沉积物水之间的迁移规律[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(3): 151-158.
WANG P F, HU Y, WANG C, et al. Analysis on mobility of heavy metals between sediment-water under different hydrodynamic conditions [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(3): 151-158. (in Chinese)
- [10] 范成新, 胡维平, 张路, 等. 太湖底泥内源污染及污泥疏浚研究[R]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2004.
FAN C X, HU W P, ZHANG L, et al. Study on internal pollution of Taihu Lake sediment and sludge dredging [R]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, 2004. (in Chinese)
- [11] FAN Z Y, WANG W C, TANG C Y, et al. Targeting remediation dredging by ecological risk assessment of heavy metals in lake sediment: A case study of Shitang Lake, China [J]. Sustainability, 2019, 11(24): 7251.
- [12] 王婧, 牟聪, 赵含瑞, 等. 重金属污染土物理性质强度定量关系试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 30-36.
WANG J, MOU C, ZHAO H R, et al. Experimental study on quantitative physical-strength relationship of heavy-metal-contaminated soils [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 30-36. (in

- Chinese)
- [13] 黄烁菡, 王婧, 牟聪, 等. 高含水率有机质河道底泥压缩性状试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(5): 35-41.
HUANG S H, WANG J, MOU C, et al. One-dimensional compression behavior of reconstituted river sediments with organic matter [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(5): 35-41. (in Chinese)
- [14] 陈日高, 马福荣, 庞迎波. 重金属污染土强度特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(6): 94-98.
CHEN R G, MA F R, PANG Y B. Experimental analysis of the strength properties of the heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(6): 94-98. (in Chinese)
- [15] 王绪民, 崔芮, 王铖. 营养盐浓度对胶结重塑泥岩试样力学特性及微观结构的影响试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 76-83.
WANG X M, CUI R, WANG C. Experimental study on effect of nutrient concentration on mechanical properties and microstructure of cemented remolded mudstone [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 76-83. (in Chinese)
- [16] ZENG L L, HONG Z S, WANG C, et al. Experimental study on physical properties of clays with organic matter soluble and insoluble in water [J]. Applied Clay Science, 2016, 132/133: 660-667.
- [17] 刘晓玲, 徐瑶瑶, 宋晨, 等. 城市黑臭水体治理技术及措施分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 519-529.
LIU X L, XU Y Y, SONG C, et al. Analysis of treatment technologies and measures for the urban black-stinking water body [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(3): 519-529. (in Chinese)
- [18] 周成, 杨国录, 陆晶, 等. 河湖底泥污染物释放影响因素及底泥处理的研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(5): 113-117, 94.
ZHOU C, YANG G L, LU J, et al. Research progress about sediment disposal and factors influencing release of sediment pollutants in rivers and lakes [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(5): 113-117, 94. (in Chinese)
- [19] 朱超鹏, 潘林有, 余闯, 等. 水泥固化温州污染土的力学性质和微观结构特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(3): 117-123.
ZHU C P, PAN L Y, YU C, et al. Mechanical properties and microstructure characteristics of cement solidification pollution soil from Wenzhou [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(3): 117-123. (in Chinese)
- [20] 陈四利, 杨雨林, 张精禹. 污水环境对水泥土力学性能的影响试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(4): 112-117.
CHEN S L, YANG Y L, ZHANG J Y. Experimental analysis of effects of polluted water environment on mechanical properties of cemented soil [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(4): 112-117. (in Chinese)
- [21] 孙洋阳. 松花江哈尔滨段水质调查与底泥吸附释放特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
SUN Y Y. Study on survey of water quality and sediment adsorption and release of Songhua River in Harbin section [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [22] 水质 溶解氧的测定 碘量法: GB 7489—1987 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
Water quality-Determination of dissolved oxygen-Iodometric method: GB 7489—1987 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1987. (in Chinese)
- [23] 水质 采样技术指导: HJ494—2009 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
Water quality-Guidance on sampling techniques: HJ 494—2009 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [24] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [25] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
JIN X C. Sediment pollution chemistry [M]. Beijing: China Environment Science Press, 1992. (in Chinese)
- [26] COVELO E F, VEGA F A, ANDRADE M L. Heavy metal sorption and desorption capacity of soils containing endogenous contaminants [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143(1/2): 419-430.
- [27] FRANCO A, TRAPP S. Estimation of the soil-water partition coefficient normalized to organic carbon for ionizable organic chemicals [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(10): 1995-2004.
- [28] 霍文毅, 陈静生. 我国部分河流重金属水-固分配系数及在河流质量基准研究中的应用[J]. 环境科学, 1997, 18(4): 10-13.
HUO W Y, CHEN J S. Water-particulate distribution coefficient of heavy metal and application in sediment quality criteria in China river [J]. Environmental Science,

- 1997, 18(4): 10-13. (in Chinese)
- [29] 张世坤, 张建军, 田依林, 等. 黄河花园口典型污染物自净降解规律研究[J]. 人民黄河, 2006, 28(4): 46-47.
ZHANG S K, ZHANG J J, TIAN Y L, et al. Study on self-purification and degradation law of typical pollutants in Huayuankou of the Yellow River [J]. Yellow River, 2006, 28(4): 46-47. (in Chinese)
- [30] 杨宁伟, 毕二平. 源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2568-2576.
YANG N W, BI E P. Effects of dissolved organic matter fractions extracted from humus soil on sorption of benzotriazole in brown soil and black soil [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2568-2576. (in Chinese)
- [31] BI E P, SCHMIDT T. Determination of soil-water distribution coefficients of organic compounds [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(Sup1): 199-208.
- [32] 朱健, 李捍东, 王平. 环境因子对底泥释放COD、TN和TP的影响研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(8): 44-49.
ZHU J, LI H D, WANG P. The impact of environmental factors on COD, TN, TP release from sediment [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(8): 44-49. (in Chinese)
- [33] HUANG L, FANG H W, XU X Y, et al. Stochastic modeling of phosphorus transport in the Three Gorges Reservoir by incorporating variability associated with the phosphorus partition coefficient [J]. The Science of the Total Environment, 2017, 592: 649-661.
- [34] PLAZA C, BRUNETTI G, SENESI N, et al. Molecular and quantitative analysis of metal ion binding to humic acids from sewage sludge and sludge-amended soils by fluorescence spectroscopy [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(3): 917-923.
- [35] 陈义镛, 毛雪琴, 朱东伟, 等. 大孔型腐植酸树脂的合成及其对重金属离子的螯合性[J]. 高分子通讯, 1985(6): 408-415.
CHEN Y Y, MAO X Q, ZHU D W, et al. Syntheses of macro-porous humic acid resins and their chelating properties for heavy metal ions [J]. Acta Polymerica Sinica, 1985(6): 408-415. (in Chinese)
- [36] ZACCONE C, COCOZZA C, D'ORAZIO V, et al. Influence of extractant on quality and trace elements content of peat humic acids [J]. Talanta, 2007, 73(5): 820-830.
- [37] 费珊珊. 腐殖酸对自然水体生物膜吸附重金属的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
FEI S S. Effect of humic acids on the adsorption of heavy metals to natural surface coatings [D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [38] KÖRDEL W, DASSENAKIS M, LINTELMANN J, et al. The importance of natural organic material for environmental processes in waters and soils (Technical Report) [J]. Pure and Applied Chemistry, 1997, 69(7): 1571-1600.

(编辑 黄廷)