

DOI: 10.11779/CJGE202212021

城市内河底泥物理-矿物成分-污染性状关联性试验研究

王 钢¹, 吉 锋², 曾玲玲^{*3}, 崔慧贞⁴

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029; 3. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310023; 4. 台州市污染防治工程技术中心, 浙江 台州 318001)

摘 要: 针对福州市晋安区 5 处物理化学性状不同的代表性内河河道底泥, 进行了颗粒分析、黏土矿物成分、界限含水率、烧失量、总氮总磷和重金属测定试验, 结合收集的相关文献数据, 系统分析了底泥物理-矿物成分与污染物的相互影响。结果表明: 河湖库底泥中的污染物不仅与污染源相关, 也与底泥颗粒级配和黏土矿物成分有关; 底泥中的有机质、总氮、重金属含量与底泥中细颗粒含量的相关性较高, 黏粒中的蒙脱石黏土矿物吸附和贮存污染物能力较强; 底泥中有机质含量与总氮、总磷含量以及重金属含量之间均具有良好的相关性。

关键词: 底泥; 颗粒级配; 黏土矿物; 污染物; 物理性质

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)12-2327-08

作者简介: 王 钢(1992—), 男, 福建三明人, 博士研究生, 主要从事疏浚泥基本性质与处理技术研究。E-mail: 18305943110@163.com。

Experimental study on physical-mineral composition-pollution behaviour interrelations of urban river sediments

WANG Gang¹, JI Feng², ZENG Ling-ling³, CUI Hui-zhen⁴

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Jiangsu Water Resource Co., Ltd. of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project, Nanjing 210029, China; 3. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 4. Taizhou City Pollution Control Engineering Technology Center, Taizhou 318001, China)

Abstract: River and lake pollution is a seriously environmental problem in China. In this study, the particle analysis, clay mineral composition, Atterberg limits, loss of ignition, total nitrogen, total phosphorus and heavy metals tests are carried out for five representative sediments with different physical and chemical properties in Jin'an District, Fuzhou. By considering the collected data from literatures, the interrelations among physical properties, clay minerals and pollutants of sediments are investigated. The results show that the pollutants in the sediments are related to the pollution source and the particle gradation and clay mineral composition of the sediments. The organic matter, total nitrogen and heavy metals in the sediments are highly correlated with fine particle content in the sediments. The smectite clay mineral is conducive to the adsorption and storage of pollutants. There is a good correlation among the organic matter, total nitrogen, total phosphorus and heavy metal content in the sediments.

Key words: sediment; particle gradation; clay mineral; pollutant; physical property

0 引 言

随着经济的不断发展和城市人口的增长, 中国城市内河的污染问题日益凸显。据统计中国有 80% 以上的城市内河受到了不同程度污染^[1]。河湖底泥的污染物主要分为有机质、氮磷营养盐、重金属三大类。

底泥污染物含量通常受底泥物理-化学性质的影响较大, 大部分的有机质与黏土矿物结合在一起, 并随细颗粒含量增加而增加, 且有机质含量与底泥的比表面积线性相关^[2]; 矿物表面的吸附过程对于有机质的保存起着重要作用, 不同黏土矿物对有机质的吸附机理不同^[3]; 底泥液限、塑限和塑性指数与黏粒中有

机碳含量、黏粒含量与蒙脱石含量显著相关^[4]; 不同矿物和不同有机质对底泥的物理性状影响显著不同^[5]。

底泥中的有机质、营养盐和各種重金属影响底泥的物理性质和工程性质, 进而影响底泥的处理技术与效果。因此, 分析河湖底泥污染物与底泥物理-化学性质的相关性, 对污染底泥的处置以及资源化利用具有重要的工程意义。

已有的研究成果表明了河湖底泥污染物与底泥物理-矿物成分密切相关, 但是底泥物理-矿物成分-污染

收稿日期: 2021-11-18

*通信作者(E-mail: linglz413@126.com)

性状关联性的实例研究较少。本研究针对福州市晋安区河道的 5 处代表性污染底泥,进行了物性指标、矿物成分与污染物含量试验,同时搜集已有的国内外不同底泥污染物含量数据,分析了底泥物理-矿物成分与底泥污染物含量的关联性,并且探讨了底泥中不同污染物含量的相关关系,为河湖底泥的污染治理和处理技术选择提供科学依据。

1 材料与方法

选取福州晋安区水系 5 个代表性点位,分别用 A, B, C, D, E 表示,如图 1 所示。该水系有两条干流,分别是凤坂河和浦东河,浦东河有 3 条支流,分别是福兴河、新厝河、淌洋河,浦东河干流的最下游处为一个公园内的人工湖。B 位于凤坂河干流的中段,A 位于浦东河干流的上游点,C 位于新厝河与浦东河干流的汇集处,D 位于淌洋河与浦东河干流的汇集处,E 位于浦东河下游的人工湖处。



图 1 底泥取样点位

Fig. 1 Sampling location of sediments

采集 A, B, C, D, E 共 5 处 0~10 cm 深度的表层底泥,测定有机质(OM)、总氮(TN)、总磷(TP)和重金属(Cu, Zn, Ni, Pb),测定方法见表 1。底泥的颗粒组成、黏土矿物组成和界限含水率见表 2,采用筛分法和密度计法对底泥进行颗粒分析,分别采用 Casagrande 法和搓条法测定液限 w_L 和塑限 w_P ,采用 X 射线衍射法测定底泥黏粒中主要矿物成分,包括伊利石(I)、高岭石(K)、绿泥石(C)、蒙脱石(S)的含量。

表 1 本研究底泥污染物测定方法

Table 1 Method for determination of pollutants in sediments			
序号	测试项目	测试方法	试验标准
1	OM	烧失量法	ASTM D2974
2	TN	凯氏法	HJ717—2014
3	TP	钼锑抗分光光度法	HJ 632—2011
4	重金属	ICP-MS 法	US EPA 3050B

表 2 本研究底泥颗粒组成、黏土矿物组成及界限含水率

Table 2 Particle composition, clay mineral composition and atterberg limits of sediments (%)									
底泥	颗粒组成			矿物组成				w_L	w_P
	Clay	Silt	Sand	I	K	C	S		
A	42.4	47.5	10.2	19	48	24	9	79.2	35.3
B	12.3	78.8	8.9	22	59	19	0	44.0	31.5
C	12.3	82.9	4.8	33	47	20	0	38.5	23.3
D	26.0	64.0	10.0	27	53	20	0	83.6	35.0
E	28.3	62.4	9.3	24	46	30	0	111.9	44.0

表 3 显示了来源于文献的具有不同颗粒级配、界限含水率、黏土矿物组成,以及不同污染物含量的河道底泥数据,结合本文的试验数据,分析底泥物理-矿物成分-污染性状的关联性。

表 3 不同文献收集的底泥数据

Table 3 Database of sediment pollutants compiled from literatures

序号	颗粒级配	界限含水率	黏土矿物	污染物						主要污染来源	参考文献
				OM	TN	TP	Cu	Zn	Ni	Pb	
1	✓	—	—	✓	✓	✓	—	—	—	—	魏岚等 ^[6]
2	✓	—	—	✓	✓	✓	—	—	—	—	Xia 等 ^[7]
3	—	—	—	✓	✓	✓	—	—	—	—	孙广垠等 ^[8]
4	✓	—	—	—	✓	✓	—	—	—	—	废水、肥料
5	✓	—	—	—	—	—	✓	✓	✓	✓	废水
6	✓	—	—	—	—	—	✓	✓	✓	✓	养殖场
7	—	—	✓	✓	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	✓	✓	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	✓	—	—	✓	✓	✓	✓	生活污水
10	—	—	—	✓	—	—	✓	✓	✓	✓	生活污水
11	—	—	—	—	✓	✓	✓	✓	✓	✓	废水
12	—	✓	—	✓	—	—	—	—	—	—	—
13	—	✓	—	✓	—	—	—	—	—	—	—
14	—	✓	—	—	—	—	✓	—	—	—	—
15	—	✓	—	—	—	—	—	✓	—	—	—
16	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	✓	—
17	—	✓	—	—	—	—	✓	✓	—	✓	—

2 底泥试验结果与分析

2.1 污染物与底泥颗粒级配的关系

(1) 有机质与底泥颗粒级配的关系

底泥有机质与细颗粒含量的关系绘制于图 2 中, 可以发现底泥的细颗粒与有机质之间具有较强的相关性, 有机质含量随细颗粒含量的增加而增加。底泥有机质含量随细颗粒含量的关系曲线的斜率不同, 斜率越大表明底泥中的细颗粒对有机质的吸附作用越强。细颗粒具有较大的比表面积, 有利于对有机质的吸附和聚集。底泥中有机质不仅与颗粒级配有关, 还有底泥附近的污染源和环境有关。本研究河道底泥位于城市居民区, 周围有大量排污管道将居民生活废水排入河道中, 使得底泥中含有较高的有机质, 文献[6, 7] 的样品分别取自水库底泥和海湾底泥中, 周围没有人为污染源, 由于水库的流动性小于海湾, 使得水库底泥的有机质含量>海湾底泥的有机质含量。

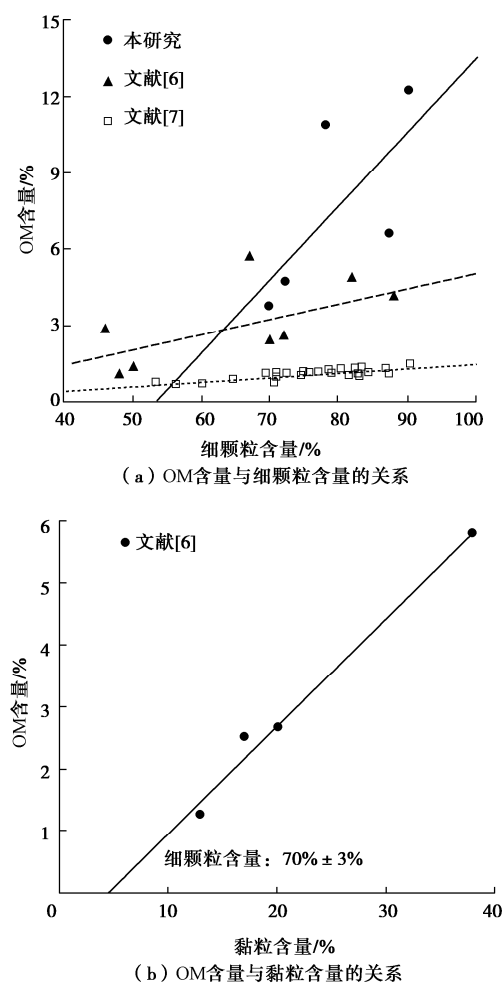


图 2 底泥有机质含量与颗粒级配的关系

Fig. 2 Relationship between organic matter content of sediments and particle gradation

(2) 总氮、总磷与底泥颗粒级配的关系

底泥细颗粒含量与总氮、总磷含量的关系绘制于图 3 中, 可以发现同一河道底泥的总氮、总磷含量随底泥细颗粒含量的增加而增加, 这与有机氮、有机磷易于吸附在细颗粒上有关。底泥周边环境, 黏土矿物成分的不同造成了总氮、总磷含量与细颗粒含量的关系曲线的斜率不同。

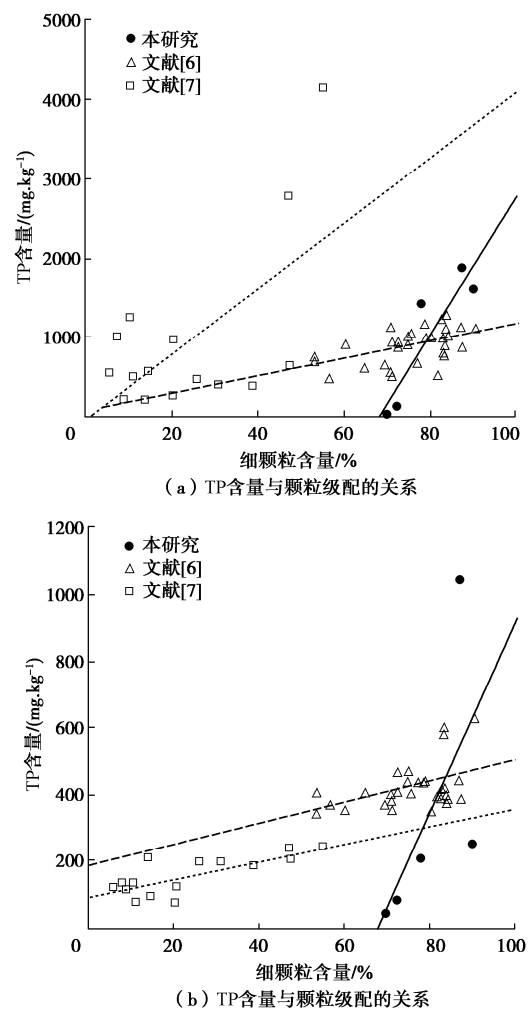


图 3 底泥总氮、总磷含量与颗粒级配的关系

Fig. 3 Relationship between TN/TP of sediments and particle gradation

(3) 重金属含量与底泥颗粒级配的关系

底泥细颗粒含量与重金属含量的关系绘制于图 4 中。由图 4 可见, 底泥中重金属的积累受底泥颗粒级配的影响, 底泥的 Cu, Zn, Ni 含量随底泥细颗粒含量的增加而增加, 由于粒度影响底泥的比表面积、孔隙体积以及活性组分, 使得底泥细颗粒具有强吸附能力, 有利于重金属元素的汇集。同时, 底泥粒径越细, 所含有机质也越多, 对重金属的吸附络合作用也越强。本研究的底泥重金属含量较高, 与沿河汽车修理厂等工厂废水的长期污染有关, 且本研究底泥中的有机质含量较高, 使得重金属元素大量累积。

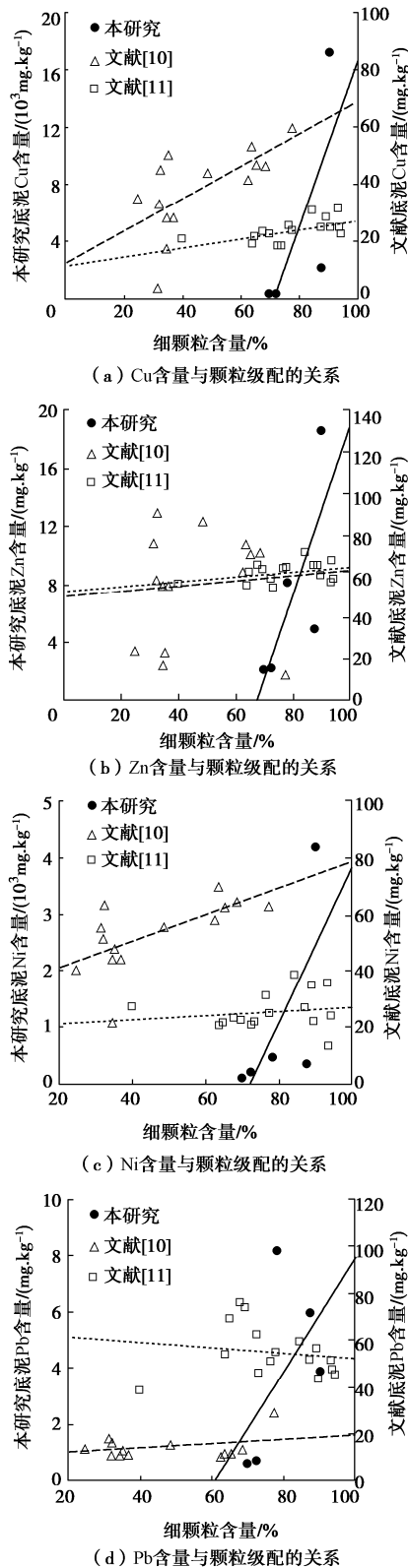


图4 底泥重金属含量与颗粒级配的关系

Fig. 4 Relationship between particle gradation of sediments and heavy metal

2.2 有机质与黏土矿物的关系

为了研究黏土矿物组成与底泥有机质含量的关系,选取文献[12, 13]黏粒含量在 $40\% \pm 1\%$ 范围内的底泥,其有机质含量与各黏土矿物组成的关系绘制于

图5中,可以发现,对于相同黏粒含量的底泥,不同黏土矿物对有机质含量有不同的影响,蒙脱石与高岭土对有机质的吸附和储存能力较强,且与有机质含量呈现明显的正相关,伊利石与有机质含量呈弱负相关。虽然伊利石的比表面积大于高岭石,但是本研究对比发现高岭石含量高的底泥中有机质含量较伊利石多,其原因可能是黏土矿物对有机质存在选择性的吸附,不同的黏土矿物保存着不同的有机组分,高岭石易于吸附有机质中的 $-\text{CH}_2$ 基团,而在底泥中含量较多有机质是胡敏酸, $-\text{CH}_2$ 是其主要官能团,易与高岭石吸附结合。这一现象有待今后积累更多的试验数据,开展进一步的探讨。

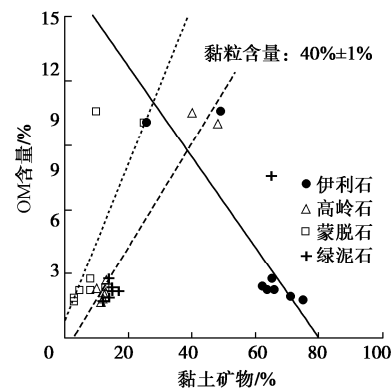


图5 底泥有机质含量与黏土矿物含量的关系

Fig. 5 Relationship between organic matter content of sediments and clay mineral contents

2.3 底泥各污染物之间的关系

(1) 底泥有机质与总氮、总磷的关系

底泥有机质含量与总氮、总磷含量的关系绘制于图6中。由图6(a)可以发现底泥总氮含量随有机质含量的增加而增加,由图6(b)可以看出底泥中总磷含量随有机质含量增加的规律不明显,有机质与总磷含量的相关性较有机质与总氮含量的相关性弱。底泥中的氮素有95%以上存在于有机物质中,因此总氮含量与有机质含量呈显著正相关。

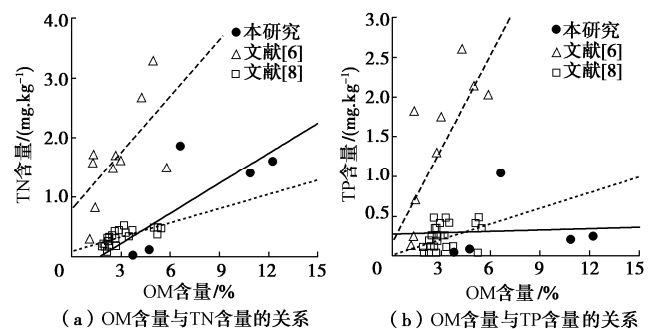


图6 底泥有机质含量与总氮、总磷含量的关系

Fig. 6 Relationship between OM and TN/TP

(2) 底泥有机质与重金属含量的关系

底泥有机质与重金属含量的关系绘制于图7中。

可以发现不同底泥中的重金属含量差异巨大, 某些重金属元素的含量甚至相差 100 倍以上, 本研究底泥的重金属含量明显远大于文献[14, 15]底泥, 这与重金属污染源有关, 本研究底泥河道沿线有不锈钢加工厂、汽修厂等众多污染源, 造成底泥中重金属污染严重, 文献[14, 15]底泥的主要污染源为生活污水, 因此文献[14, 15]底泥的重金属污染程度较本研究底泥轻。底泥重金属含量随有机质含量的增加而增加, 不同文献底泥关系曲线的斜率不同, 重金属污染源对曲线斜率的大小影响很大。

(3) 底泥总氮、总磷含量与重金属含量的关系

底泥总氮、总磷含量与重金属含量的关系绘制于图 8 中。可以发现底泥的重金属含量随底泥总氮、总磷含量的增加而增加。有机质与总氮总磷的同源性, 以及有机质对重金属的吸附和络合作用, 使得底泥重金属含量与底泥总氮总磷含量同样具有正相关的关系。

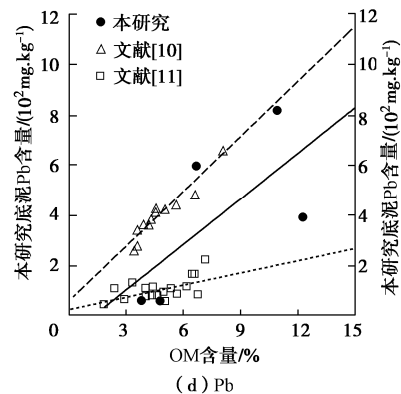
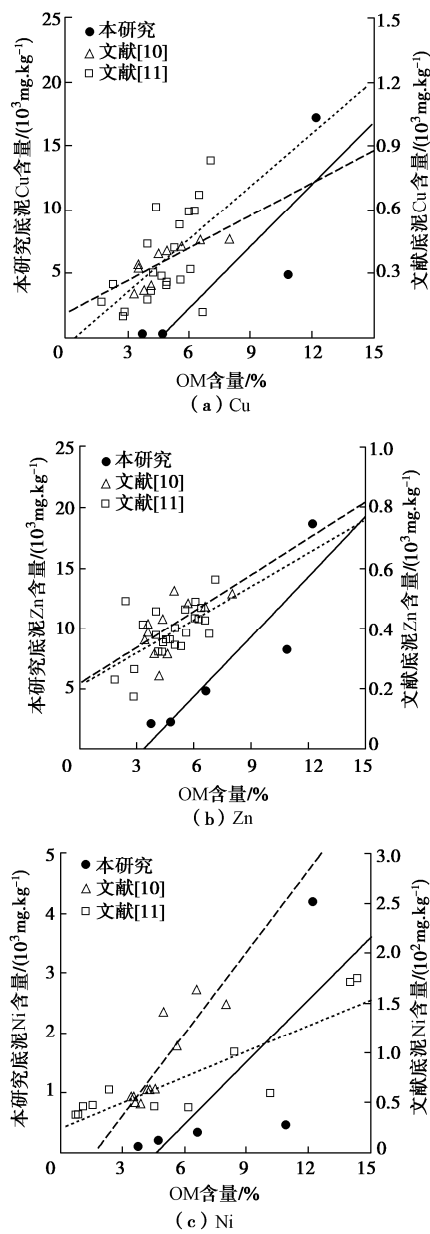


图 7 底泥有机质含量与重金属含量的关系

Fig. 7 Relationship between OM and heavy metal content

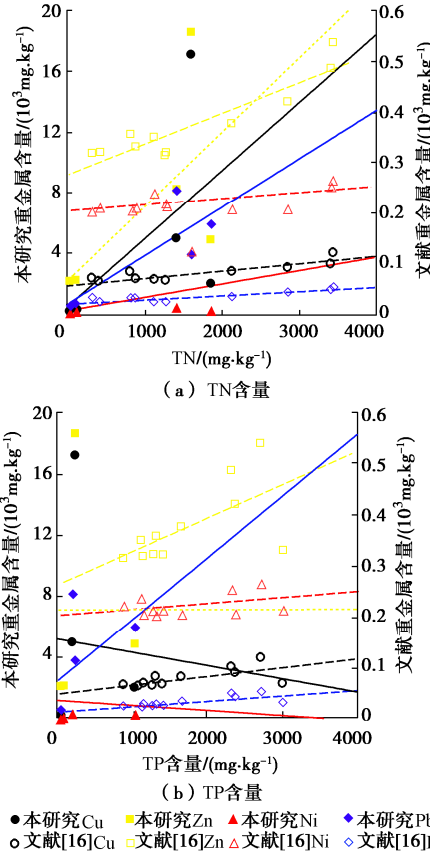


图 8 底泥重金属含量与总氮、总磷含量的关系

Fig. 8 Relationship between contents of TN/TP and heavy metals in sediments

2.4 污染物与底泥界限含水率的关系

(1) 有机质与底泥界限含水率的关系

底泥有机质含量与液限、塑限和塑性指数的关系绘制于图 9 中, 可以发现底泥中液限、塑限及塑性指数随底泥有机质含量的增加而增加, 底泥的有机质含量与液塑限及塑性指数之间具有较强的相关性, 液塑限、塑性指数与有机质的关系式列于图中。有机物对液限和塑限的影响是通过改变土颗粒结合水膜的厚度来实现的, 有机物具有较高的比表面积和较强的持水能力, 可吸附在黏土矿物表面, 形成较厚的结合水膜, 从而提高底泥的液塑限。

表 4 底泥污染物及物理性质的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of sediment pollutants and physical properties

污染物与底泥颗粒级配			污染物与黏土矿物			污染物与污染物			污染物与底泥物理性质		
Clay	OM	0.231	Illite	OM	-0.099	OM	TN	0.809	OM	w _L	0.915
Silt	OM	0.524	Kaolinite	OM	-0.185	OM	TP	0.456	OM	w _p	0.916
Sand	OM	-0.485	Chlorite	OM	-0.194	TN	TP	0.623	OM	I _p	0.797
Clay+Silt	OM	0.717	Smectite	OM	0.020	OM	Cu	0.636	TN	w _L	0.254
Clay	TN	0.686	Illite	TN	-0.249	OM	Zn	0.794	TN	w _p	0.242
Clay	TP	0.439	Illite	TP	-0.356	OM	Ni	0.490	TN	I _p	0.161
Silt	TN	-0.026	Kaolinite	TN	-0.216	OM	Pb	0.777	TP	w _L	-0.009
Silt	TP	-0.097	Kaolinite	TP	-0.269	TN	Cu	0.452	TP	w _p	-0.005
Sand	TN	-0.763	Chlorite	TN	0.485	TN	Zn	0.603	TP	I _p	-0.033
Sand	TP	0.321	Chlorite	TP	0.264	TN	Ni	0.511	Cu	w _L	-0.342
Clay+Silt	TN	0.763	Smectite	TN	0.197	TN	Pb	0.433	Cu	w _p	0.300
Clay+Silt	TP	0.321	Smectite	TP	0.054	TP	Cu	0.335	Cu	I _p	-0.350
Clay	Cu	0.355	Illite	Cu	-0.216	TP	Zn	0.577	Zn	w _L	-0.331
Clay	Zn	0.363	Illite	Zn	-0.382	TP	Ni	0.203	Zn	w _p	-0.317
Clay	Ni	0.335	Illite	Ni	-0.270	TP	Pb	0.501	Zn	I _p	0.275
Clay	Pb	0.335	Illite	Pb	-0.286	Cu	Zn	0.655	Pb	w _L	0.067
Silt	Cu	0.572	Kaolinite	Cu	-0.229	Cu	Ni	0.610	Pb	w _p	-0.365
Silt	Zn	0.558	Kaolinite	Zn	-0.329	Cu	Pb	0.551	Pb	I _p	0.112
Silt	Ni	0.639	Kaolinite	Ni	-0.245	Zn	Ni	0.539			
Silt	Pb	0.006	Kaolinite	Pb	0.047	Zn	Pb	0.729			
Sand	Cu	-0.555	Chlorite	Cu	0.258	Ni	Pb	0.406			
Sand	Zn	-0.593	Chlorite	Zn	0.482						
Sand	Ni	-0.641	Chlorite	Ni	0.445						
Sand	Pb	-0.292	Chlorite	Pb	0.362						
Clay+Silt	Cu	0.554	Smectite	Cu	-0.137						
Clay+Silt	Zn	0.591	Smectite	Zn	-0.214						
Clay+Silt	Ni	0.635	Smectite	Ni	-0.159						
Clay+Silt	Pb	0.295	Smectite	Pb	0.103						

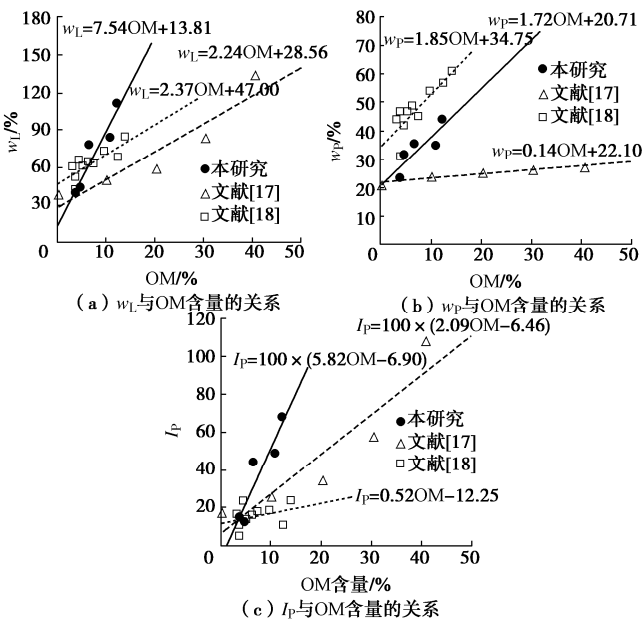


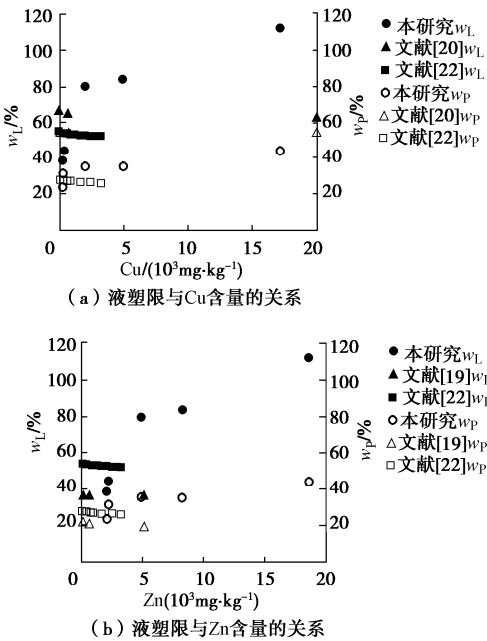
图 9 底泥液塑限及塑性指数与有机质含量的关系

Fig. 9 Relationship between Atterberg limits and plasticity index of sediments and OM

(2) 重金属含量与底泥界限含水率的关系

底泥重金属含量与液限、塑限及塑性指数的关系绘制于图 10 中。可以发现文献[19~22]底泥的液塑限随着重金属含量的增加而减小。重金属离子对底泥液

塑限的影响主要是引起了黏土矿物的聚集和双电层厚度的改变。本研究底泥的液塑限及塑性指数则随着重金属含量的增加而增加，这是因为本研究底泥中有机质含量较高，而文献[19~22]底泥中几乎不含有机质，重金属含量会随着有机质含量的增加而增加，且有机质对液塑限的增加作用大于重金属对液塑限的减小作用。



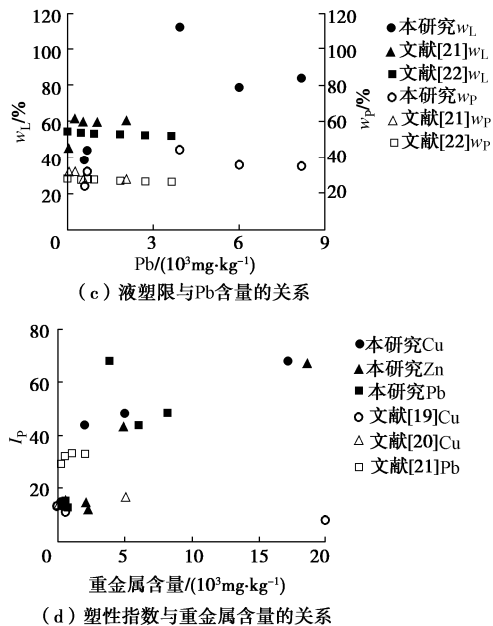


图 10 底泥液塑限及塑性指数与重金属含量的关系

Fig. 10 Relationship between Atterberg limits and plasticity index of sediments and heavy metal content

3 底泥污染物及物理性质相关性分析

对底泥中的污染物与物理性质数据进行相关性分析, 为了减少底泥所处环境因素对相关性分析的影响, 对底泥污染物和物理性质按区域进行分析, 后取其相关系数平均值。底泥污染物与物理性质的相关系数, 如表 4 所示。有机质、总氮及 Cu, Zn, Ni 重金属含量与底泥中黏粒含量和粉粒含量的相关性较高, 相关系数均大于 0.5 以上; 污染物与黏土矿物相关性不强, 相关系数均小于 0.5, 这是由于黏土矿物在整个底泥颗粒中所占比重较小, 影响力有限; 有机质含量与各污染物含量之间的相关系数均较高, 表明底泥污染性状与有机质含量密切相关; 有机质对底泥液限、塑限、塑性指数的相关系数分别为 0.915, 0.916, 0.797, 这表明有机质对底泥的物理性质有着重要的影响, 其他污染物与底泥物理性质的相关系数均较低, 对底泥物理性质的影响较小。

4 结 论

基于福州晋安区五处河道底泥系列试验研究结果, 结合搜集的独立试验数据, 进行了底泥物理-矿物成分-污染性状关联性分析, 得出 4 点结论。

(1) 在细颗粒含量较高的底泥中, 有利于污染物的吸附积累, 随着细颗粒含量的增加, 污染物含量近似呈线性增加的趋势。而在砂粒含量较高的底泥中, 则缺少这种吸附能力, 底泥中污染物含量低。

(2) 底泥中不同黏土矿物对有机质含量有不同的

影响, 蒙脱石与高岭土与有机质含量呈现明显的正相关。

(3) 底泥中有机质与氮磷营养盐一般具有同源性, 同时有机质对重金属具有络合作用, 底泥中有机质含量与总氮总磷含量, 有机质含量与重金属含量, 总氮总磷含量与重金属含量, 均具有良好的线性关系。

(4) 底泥中的液限、塑限和塑性指数随着底泥有机质含量的增加而增加, 相比于有机质, 重金属对底泥界限含水率的影响较小。

参考文献:

- [1] 曹承进, 陈振楼, 王 军, 等. 城市黑臭河道底泥生态疏浚技术进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011(1): 32 - 42. (CAO Cheng-jin, CHEN Zhen-lou, WANG Jun, et al. Review of sediment ecological dredging in urban black-odors river treatment[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2011(1): 32 - 42. (in Chinese))
- [2] MAYER L M, MACKO S A, CAMMEN L. Provenance, concentrations and nature of sedimentary organic nitrogen in the gulf of Maine[J]. Marine Chemistry, 1988, **25**(3): 291 - 304.
- [3] 薛含斌. 底泥腐殖酸在黏土矿物上的吸附特性[J]. 环境化学, 1983, **2**(3): 42 - 46. (XUE Han-bin. Adsorption characteristics of humic acid in sediment on clay minerals[J]. Environmental Chemistry, 1983, **2**(3): 42 - 46. (in Chinese))
- [4] ODELL R T, THORNBURN T H, MCKENZIE L J. Relationships of atterberg limits to some other properties of Illinois soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1960, **24**(4): 297 - 300.
- [5] 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.
- [6] 魏 岚, 刘传平, 邹献中, 等. 广东省不同水库底泥理化性质对内源氮磷释放影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(7): 1304 - 1310. (WEI Lan, LIU Chuan-ping, ZOU Xian-zhong, et al. Release of nitrogen and phosphorus from the sediments of ten reservoirs in Guangdong Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(7): 1304 - 1310. (in Chinese))
- [7] XIA P, MENG X W, YIN P, et al. Eighty-year sedimentary record of heavy metal inputs in the intertidal sediments from the Nanliu River Estuary, Beibu Gulf of South China Sea[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 92 - 99.
- [8] 孙广垠, 刘 勇, 鄢雨康, 等. 原著湿地公园底泥中氮、磷

- 和有机质的分布规律[J]. 中国给水排水, 2018, **34**(21): 92 - 95. (SUN Guang-yin, LIU Yong, QIE Yu-kang, et al. Distribution of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of an original wetland park[J]. China Water & Wastewater, 2018, **34**(21): 92 - 95. (in Chinese))
- [9] 余成, 陈爽, 张路, 等. 坦噶尼喀湖东北部入湖河流表层沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 334 - 342. (YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu, et al. Phosphorus fractions and their spatial distribution in surface sediments of inflow rivers in the northeastern Lake Tanganyika[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(2): 334 - 342. (in Chinese))
- [10] EL-SAYED S A, MOUSSA E M M, EL-SABAGH M E I. Evaluation of heavy metal content in Qaroun Lake, El-Fayoum, Egypt. Part I: bottom sediments[J]. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2015, **8**(3): 276 - 285.
- [11] WANG A J, BONG C W, XU Y H, et al. Assessment of heavy metal pollution in surficial sediments from a tropical river-estuary-shelf system: a case study of Kelantan River, Malaysia[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **125**(1/2): 492-500.
- [12] KHIM B K. Two modes of clay-mineral dispersal pathways on the continental shelves of the East Siberian Sea and western Chukchi Sea[J]. Geosciences Journal, 2003, **7**(3): 253 - 262.
- [13] ANDRADE G P, AZEVEDO A D, CUADROS J, et al. Transformation of kaolinite into smectite and iron-illite in brazilian mangrove soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, **78**(2): 655 - 672.
- [14] NGUYEN H T L, OHTSUBO M, LI L, et al. Heavy metal characterization and leachability of organic matter-rich river sediments in Hanoi, Vietnam[J]. International Journal of Soil, Sediment and Water, 2010, **3**(1): 5.
- [15] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江(广州河段)表层底泥中污染物的相关性研究[J]. 环境科学与技术, 2007(增刊 1): 41 - 43. (NIU Hong-yi, WU Qun-he, CHEN Xin-geng. Correlation of pollutants in surface sediments in Guangzhou section of Pearl River[J]. Environmental Science and Technology, 2007(S1): 41 - 43. (in Chinese))
- [16] 严玉林. 北运河底泥污染物评价及资源化利用研究[J]. 人民珠江, 2020, **41**(8): 132 - 138. (YAN Yu-lin. Study of the sediment pollutant evaluation and resource utilization in the north canal[J]. Pearl River, 2020, **41**(8): 132 - 138. (in Chinese))
- [17] 徐日庆, 郭印, 刘增永. 人工制备有机质固化土力学特性试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, **41**(1): 109 - 113. (XU Ri-qing, GUO Yin, LIU Zeng-yong. Experimental study on mechanical properties of stabilized artificial organic soil[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, **41**(1): 109 - 113. (in Chinese))
- [18] STANCHI S, CATONI M, D'AMICO M E, et al. Liquid and plastic limits of clayey, organic C-rich mountain soils: role of organic matter and mineralogy[J]. Catena, 2017, **151**: 238 - 246.
- [19] PHANIJA N, CHAVALI R V P. Solidification/stabilization of copper-contaminated soil using phosphogypsum[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, **6**(3): 1 - 11.
- [20] 储亚, 刘松玉, 蔡国军, 等. 锌污染土物理与电学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(10): 2862 - 2868. (CHU Ya, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. An experimental study of physical and electrical characteristics of zinc contaminated silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(10): 2862 - 2868. (in Chinese))
- [21] AYODELE A L, BABALOLA O T, AGBEDE O A. The effects of ferrous sulphate heptahydrate and lead nitrate on the Atterberg limits and consolidation indices of laterite[J]. Ife Journal of Technology, 2013, **22**(1): 39 - 45.
- [22] 吕伟豪. 重金属污染的南阳膨胀土物理力学特性试验研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2018. (LÜ Wei-hao. Experimental Study on the Physical Mechanical Properties of Heavy Metal Contaminated Expansive Soil in Nanyang[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2018. (in Chinese))