

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2015.0001.008

梁滩河底泥间隙水与上覆水中污染物分布特征*

梅 杰¹, 刘 靛², 周安兴^{2*}

(1.中冶赛迪工程技术股份有限公司,重庆 400013;2.重庆大学 城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

摘 要:通过 2010 年 10 月和 2011 年 2 月、7 月共 3 次对梁滩河 3 个断面采样分析,探讨了表层底泥间隙水和上覆水中污染物之间的分布特征,并对间隙水和上覆水中的污染物浓度进行了相关性分析;结果表明上覆水污染的空间分布趋势为:天赐温泉>童善桥>土主镇;表层底泥间隙水中大部分 COD_{cr}与氮盐浓度高于上覆水,磷盐刚好相反;相关性分析表明,表层底泥间隙水和上覆水中的 COD_{cr}、TN、DTP 浓度显著相关,说明间隙水中 COD_{cr}、TN、DTP 的浓度是其上覆水中 COD_{cr}、TN、DTP 浓度的决定因素。

关键词:间隙水;上覆水;污染物;相关性

中图分类号: O631.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-058X(2015)01-0028-05

水-底泥界面的营养物质的地球化学行为对河流(尤其是浅水河流)的水环境质量与生态系统有着极为重要的影响^[1]。由于营养物质的过量输入,使底泥成为河流营养盐的重要蓄积库^[2]。蓄积在底泥中的营养物质在一定条件下通过形态变化、改变界面特性和释放等途径严重影响河流上覆水体的质量^[3]。即便外源污染物得到控制,由于河流底泥仍可释放出氮、磷等营养元素,河流富营养化状态还能维持较长时间,甚至出现水华^[4]。同时,国内外对上覆水营养盐和间隙水营养盐的研究,多集中在湖泊和水库方面,在河流方面相对较少,而且只是就上覆水和间隙水某一种形态去研究^[5-9]。没有总体上从 COD_{cr}、氮磷营养盐这三方面去研究。因此,河流底泥间隙水营养盐的研究尤为重要,它对生物地球化学循环、初级生产力研究等方面均具有重要的理论和实践意义。

梁滩河是嘉陵江下游右岸的一条主要支流,是重庆市一条重要的城市次级河流,也是三峡水库库尾流域面积最大的一条次级河流。由于长期受到城镇居民生活、工业、农业养殖等废水及固体废弃物排放影响,河水发黑发臭,梁滩河河床淤泥沉积。近年来,随着流域内人口增加,工业迅猛发展,梁滩河流域的生态环境遭到较大损害,仅 2009 年梁滩河九龙坡区段排放 COD 就达 3 227 t,总磷 125 t,分别超过最大允许排放量的 5 倍和 20 倍^[10],严重影响到了流域内居民的身体健康及工农业的正常发展。目前对梁滩河的关注主要集中在外源污染对水质的影响,而对梁滩河内源的研究还不多见。2010 年 10 月-2011 年 7 月,以梁滩河为研究对象,测定了具有代表性的 3 个断面间隙水和上覆水中 COD_{cr}、总氮(TN),总磷(TP)、氮盐及磷盐的浓度,探讨了表层底泥间隙水和上覆水中污染物浓度的空间分布特征及其相关性,为日后梁滩河的内源治理提供依据。

收稿日期:2014-05-20;修回日期:2014-06-16.

* 基金项目:重庆大学第四届国家大学生创新性实验项目(101061134).

作者简介:梅杰(1973-),男,重庆綦江人,高级工程师,硕士,从事水污染控制理论与技术研究.

1 材料与方法

1.1 研究区域

通过对梁滩河流域的水文状况和流域内人口、产业分布情况的初步调查,确定了 3 个采样断面,分别位于梁滩河右支上游的天赐温泉(N29°30'55.09",E106°21'58.88"),中游的童善桥(N29°33'01.00",E106°22'21.11"),下游的土主镇(N29°37'55.64",E106°22'13.07")。梁滩河天赐温泉段附近主要是居民区,童善桥段附近主要是工业区,土主镇段附近主要是农业区。

1.2 样品采集

样品采样时间为 2010 年 10 月、2011 年 2 月、2011 年 7 月,在 3 个采样断面采集 0~10 cm 表层底泥及相应断面 0.5 m 以上上覆水,上覆水取样后加硫酸至 pH 小于 2 后在 4 ℃ 条件下保存,底泥间隙水通过底泥离心(4 000 r·min⁻¹,30 min)制取,并于 24 h 内在实验室测定。

1.3 样品分析与测试

上覆水、间隙水水质的测试项目有化学需氧量(COD_{cr})、总氮(TN)、总磷(TP)、氮盐及磷盐。COD_{cr}采用重铬酸钾法,总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂光度法,硝氮(NO₃⁻-N)采用紫外分光光度法,亚硝氮(NO₂⁻-N)采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法,总磷(TP)及磷盐采用钼酸铵分光光度法^[11]。所有项目的测试均采用三平行样进行,误差控制在 10% 以内。

1.4 统计学方法

统计学方法所有数据均以 $\bar{X} \pm S$ 进行表示。采用 SPSS 17.0 软件进行统计学分析。各采样断面表层底泥间隙水与上覆水中污染物浓度进行相关分析。

2 实验结果

2.1 上覆水污染物空间分布特征

上覆水中 COD_{cr} 浓度为(194±11) mg/L。表 1 可见,上覆水中 COD_{cr} 空间变化趋势表现为天赐温泉>童善桥>土主镇,COD_{cr} 平均浓度变化范围为 95~263 mg/L,空间分布不均匀,浓度相差幅度较大。

表 1 梁滩河上覆水污染物浓度空间分布表 (n=3, $\bar{X} \pm S$, mg/L)

采样断面	COD _{cr}	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TP	DTP	PO ₄ ³⁻ -P
天赐温泉	263±16	34.00±0.15	29.63±0.22	1.69±0.08	0.32±0.04	3.00±0.09	0.96±0.03	0.46±0.03
童善桥	225±10	29.39±0.16	24.25±0.13	2.29±0.10	0.22±0.03	2.95±0.05	1.15±0.06	0.73±0.04
土主镇	95±7	24.22±0.12	15.97±0.08	1.88±0.07	0.15±0.05	1.92±0.04	1.24±0.06	0.60±0.03

上覆水中总氮空间分布均匀,各断面总氮浓度相差幅度较小,范围 24.22~34.00 mg/L 之间。其中氨氮浓度变化范围为 15.97~29.63 mg/L,其浓度占总氮的 66%~87% 之间;硝酸盐氮浓度范围为 1.69~2.29 mg/L,硝酸盐氮浓度占总氮的 4.97%~7.80% 之间;亚硝酸盐氮浓度范围为 0.15~0.32 mg/L,硝酸盐氮浓度占总氮的 0.60%~0.95% 之间。其中总氮、氨氮、亚硝酸盐氮的空间变化趋势一致为:天赐温泉>童善桥>土主镇。硝酸盐氮的空间变化趋势表现为:童善桥>土主镇>天赐温泉。

由表 1 可知,上覆水中总磷平均浓度变化范围 1.92~3.00 mg/L 之间,其以天赐温泉的浓度最高,土主镇最低;其中溶解性总磷浓度变化范围为 0.96~1.24 mg/L,磷酸盐的浓度变化范围为 0.46~0.73 mg/L;磷的各

形态空间变化趋势各不相同,总磷的变化趋势与 COD_{cr} 的变化趋势一致。

参照国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)标准,其 V 类水质 COD_{cr} 、TP 限值分别为 40、0.2 mg/L。基于此标准,上述 3 个采样断面均为劣 V 类水质。采用国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类标准, COD_{cr} 、TN、TP 限值分别为 20、20、0.1 mg/L。由上表可知, COD_{cr} 浓度超标 4.75~13.20 倍, TN 浓度超标 1.21~1.70 倍,TP 浓度超标 19.2~30.0 倍。其中天赐温泉超标最严重。

2.2 底泥间隙水污染物空间分布特征

梁滩河表层底泥间隙水中污染物浓度的空间分布见表 2。由表 2 可见,表层底泥间隙水中 COD_{cr} 浓度为 289 mg/L(范围为 158~380 mg/L),空间浓度分布相差幅度较大,其中天赐温泉浓度最高为 380 mg/L,土主镇最低为 158 mg/L。空间变化趋势为:天赐温泉>童善桥>土主镇。

表 2 梁滩河底泥间隙水污染物浓度空间分布表 ($n=3, \bar{X} \pm S$, mg/L)

采样断面	COD_{cr}	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	TP	DTP	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$
天赐温泉	380±20	40.43±0.25	29.24±0.22	1.62±0.08	0.20±0.04	2.53±0.13	2.28±0.11	0.35±0.03
童善桥	329±15	47.59±0.36	40.00±0.34	3.59±0.16	0.15±0.03	1.79±0.11	0.97±0.06	0.35±0.02
土主镇	159±13	28.76±0.16	20.74±0.18	2.11±0.12	0.10±0.02	1.45±0.09	0.87±0.06	0.43±0.03

表层底泥间隙水中总氮、氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮浓度中位数分别为 38.93 mg/L(范围为 28.76~47.59 mg/L), 30.00 mg/L(范围为 20.74~40.00 mg/L), 2.44 mg/L(范围为 1.62~3.59 mg/L)和 0.15 mg/L(范围为 0.10~0.20 mg/L)。表 2 可见,表层底泥间隙水中总氮、氨氮的空间变化趋势表现为:童善桥>天赐温泉>土主镇,且空间浓度分布相差幅度较大,其中,童善桥总氮、氨氮浓度最高,分别为 47.59、40.00 mg/L;土主镇浓度最低,分别为 28.76、20.74 mg/L。氨氮是总氮的主要存在形态,在总氮中所占比例在 72%~84%之间。表层底泥间隙水中硝酸盐氮、亚硝酸盐氮空间变化趋势不一致,分别表现为童善桥>土主镇>天赐温泉、天赐温泉>童善桥>土主镇。其中,硝酸盐氮浓度占总氮比例在 0.40%~7.54%之间;亚硝酸盐氮浓度较低,其在总氮中所占比例在 0.31%~0.50%之间。

由表 2 得间隙水 TP 含量为 1.45~2.53 mg/L,其中天赐温泉间隙水的 TP, DTP 浓度都是最高的,土主镇间隙水的 TP, DTP 浓度都是最低的。其中 DTP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 所占 TP 的比例分别为 46%~60%、14%~30%之间。

2.3 底泥间隙水污染物与上覆水污染物相关性分析结果

梁滩河表层底泥间隙水污染物与上覆水污染物浓度相关性分析结果见表 3。

表 3 上覆水与间隙水污染物之间的相关性

		上覆水污染物							
		COD_{cr}	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	TP	DTP	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$
间 隙 水 污 染 物	COD_{cr}	0.839**	0.664*	0.678*	-0.014	0.773**	0.435	-0.571	-0.485
	TN	0.674*	0.724**	0.691*	-0.144	0.504	0.594*	-0.141	-0.009
	NH_4^+-N	0.562	0.513	0.579*	0.050	0.470	0.608*	-0.030	0.098
	NO_3^--N	0.170	0.008	0.023	0.280	0.321	0.160	-0.016	0.080
	NO_2^--N	0.623*	0.465	0.675*	0.145	0.522	0.553	-0.304	-0.233
	TP	-0.283	0.173	0.272	-0.254	-0.321	0.362	0.485	0.603*
	DTP	-0.441	-0.030	0.109	-0.186	-0.330	0.294	0.806**	0.842**
	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	-0.125	0.266	0.150	-0.592*	0.409	0.131	0.659*	0.651*

注: * 在 0.05 水平上显著相关, ** 在 0.01 水平上显著相关(双尾检验);样本数均为 $n=12$

3 讨论分析

3.1 污染物空间分布特征的影响因素

生活污水污染、工业废水污染和水土流失污染是造成 COD、磷含量剧增的主要原因^[12]。由于天赐温泉周边主要是生活区,随着经济的发展、人口的增加,大量的生活污水未经处理就直接排入梁滩河,是使天赐温泉断面上覆水、间隙水 COD_{cr}、总磷跟溶解性浓度最高的主要原因;近年来童善桥周边工厂不断增加,大量工业废水直接排入河流,这是童善桥上覆水、间隙水 COD_{cr}、总磷及溶解性总磷浓度次之的原因。土主镇附件是农业区,现在植被较好,生态环境不断变好,且土主镇位于河流下游,流量大,河流有一定的自净作用,使此处 COD_{cr}、总磷及溶解性总磷浓度最低的原因。

从间隙水中氮浓度的结果可以看出,在 3 个采样断面中,童善桥的总氮、氨氮、硝酸盐氮浓度最高,污染最为严重,属重度富营养化;其次是天赐温泉,污染最小的是土主镇。底泥间隙水中营养盐的浓度受其生产和消耗之间的平衡所制约,前者取决于底泥中有机物的数量及其分解速率、陆源排污的影响程度等因素,后者取决于底栖生物尤其是掘穴动物的数量、界面的水动力条件、矿化作用的因素^[13]。就本研究而言,由于近年来童善桥工业发展,生活水平逐渐提高,人口不断增加,大量的工业废水和生活污水排入梁滩河童善桥断面处,排污口和垃圾区因长年累月的污水排放、垃圾堆积引起营养盐积淀,使得该断面底泥中有机质浓度丰富。这是造成区域底泥营养盐氮含量较高的主要原因。

从上覆水和间隙水中氮浓度的空间分布对比可以看出,表层底泥间隙水中氮浓度高于上覆水;上覆水与表层沉积物间隙水中同一形态营养盐浓度的空间分布也不一致。导致上述结果的原因相当复杂,营养盐在沉积物-水界面处的交换受到诸多因素的影响,如浓度扩散、吸附-解散、沉淀(矿化)-溶解、底栖生物活动以及湖水动力条件等^[14]。且一般来说,由于氨化作用、反硝化作用的存在,氮在沉积物中的形态转化行为相当复杂^[15]。

底泥不仅是上覆水环境的净化器,而且也在一定程度上发挥着营养源的作用。它不断向上覆水释放营养盐,对水体富营养化具有重要的贡献。梁滩河底泥间隙水中营养盐浓度丰富,这些积累在沉积物中的营养盐在底栖生物的作用下,当主要的控制因素发生变化时,就会从沉积物间隙水中释放到上覆水体中,并且各采样断面污染也相当严重。

3.2 间隙水与上覆水污染物浓度相关关系

在河流、湖泊体系中,底泥-水界面间营养盐的交换主要是通过间隙水来实现的。为了探讨梁滩河表层底泥间隙水与上覆水中污染物浓度是否存在联系,采用统计方法对污染物在二者间的浓度进行了相关分析,结果显示,表层底泥间隙水和上覆水中的 COD_{cr}、TN、DTP 浓度的相关系数分别是 0.839,0.724,0.806,二者之间显著相关,这说明上覆水中 COD_{cr}、TN 与 DTP 主要来自于底泥。其中表层底泥间隙水和上覆水中的 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 浓度的相关系数分别是 0.579、0.651,二者的相关性较好,说明上覆水中 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 除了受底泥的影响外,还受外源的影响。其中底泥间隙水 COD_{cr}与上覆水氮盐的相关性也较好,说明他们可能来源相同。

其余污染物之间的相关性较低,甚至可以说二者之间无相关性。但这只能说明在间隙水这些污染物浓度远高于上覆水的情况下,间隙水中这些污染物不是上覆水污染物浓度的决定因素;而并不能说明所测断面表层底泥间隙水中这些污染物的高低对其上覆水污染物浓度没有影响。产生这种现象的原因可能是由于梁滩河体系中底泥-水界面间营养盐的迁移并不是单纯由浓度梯度扩散来控制的,还与其他因素有关,如营养盐在水体中的水平迁移扩散、生物的扰动作用、风浪造成的紊流扩散、沉积物表面的直接释放等。

4 结 论

(1) 对梁滩河上覆水的调查结果说明,上覆水中污染物的浓度天赐温泉最高,污染最为严重,其次是童善桥,水质为劣 V 类水平。因此,加强对梁滩河的治理是至关重要的。

(2) 梁滩河底泥间隙水中 COD_{cr} 与氮盐的浓度高于上覆水。 COD_{cr} 与氮盐的相关性较好,他们之间的来源相同,其中氨氮是底泥-水界面间氮物质交换的主要组分。

(3) 梁滩河底泥间隙水中 COD_{cr} 、TN、DTP 的浓度与上覆水中的浓度显著相关。上覆水中 COD_{cr} 、TN、DTP 主要来源于底泥。TP 的相关性很低,上覆水磷的来源主要还是外源。

参考文献:

- [1] KIM L, CHOI E, STENSTROM M. Sediment Characteristics, Phosphorus Types and Phosphorus Release Rates Between River and Lake Sediments[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 53-61
- [2] 曲久辉. 我国水体复合污染与控制[J]. *科学对社会的影响*, 2000(1): 36-40
- [3] ZHOU Q, GIBSON C, ZHU Y. Evaluation of Phosphorus Bioavailability in Sediments of Three Contrasting Lakes in China and UK [J]. *Chemosphere*, 2001, 42: 221-225
- [4] ROSSI G, PREMAZZI G. Delay in lake recovery caused by internal loading[J]. *Water Res*, 1991, 25: 567-575
- [5] 高效江. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的环境地球化学特征[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 711-715
- [6] 高丽, 杨浩. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5): 776-781
- [7] 贾晓珊. 珠江流域河网底泥的氮磷污染特征及释放机理[J]. *中山大学学报*, 2005, 44(2): 107-110
- [8] 陈春华. 武汉东湖底质磷释放对水体的影响[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(10): 15-17
- [9] 黄小平. 南海北部沉积物间隙水中营养盐研究[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(5): 43-47
- [10] 林墨, 萧仁武. 还我清澈梁滩河[J]. *公民导刊*, 2009(9): 20-24
- [11] 王铁. 水和废水监测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [12] 常原飞, 贾振邦, 赵智杰. 辽河 COD 变化规律及其原因探讨[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2002, 38(4): 535-541
- [13] 蒋增杰, 崔毅, 陈碧鹃. 唐岛湾网箱养殖区沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量[J]. *环境科学*, 2007, 28(5): 1001-1005
- [14] 石峰, 王修林, 石晓勇, 等. 东海沉积物-海水界面营养盐交换通量的初步研究[J]. *海洋环境科学*, 2004, 23(1): 5-8
- [15] 胡俊, 刘永定, 刘剑彤. 滇池沉积物间隙水中氮、磷形态及相关性的研究[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(10): 1391-1396

The Distribution Feature of the Pollutants in Sediment Pore Water and Overlying Water of Liangtan River

MEI Jie¹, LIU Liang², ZHOU An-xing²

(1. CISDI Engineering Technology Co., Ltd, Chongqing 400013, China;

2. School of Urban Construction and Environment, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Through three times of sampling analysis of three sections of Liangtan River in October, 2010, in February, 2011 and in July, 2011, the distribution feature between the pollutants of sediment pore water at its surface level and overlying water was discussed, the correlation analysis of the concentration of the pollutants in the sediment pore water and overlying water was conducted, and the results show that the spatial distribution trends of the overlying water pollution are Tianci Spring>Tongshan Bridge>Tuzhu Town, that the majority of COD_{cr} and the concentration of the salt containing nitrogen in the water at the surface of the sediment pore is higher than that of overlying water, but the salt containing phosphorus is on the contrary. The correlation analysis shows that there is significant relation among COD_{cr} , TN concentration and DTP concentration in the water at the surface of the sediment pore and in overlying water, which demonstrates that COD_{cr} , TN and DTP concentration in the sediment pore water is the determinant factor of the COD_{cr} , TN and DTP concentration in its overlying water.

Key words: sediment pore water; overlying water; pollutant; correlation