

模拟再清淤对南淝河底泥氮磷释放的影响研究

傅 扬^{1,3}, 鲁 屹^{1,3}, 陈松松², 杨书运^{1,3}, 王凤文^{1,3*}, 杨长明^{2*}

(1.安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2.同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 3.农业部合肥农业环境科学观测实验站, 合肥 230036)

摘 要:为掌握南淝河清淤效果和进一步改善南淝河水污染现状,利用柱状采样器采集南淝河清淤后的底泥,并在室内柱状反应器中对采集的原状底泥进行模拟再清淤后污染物释放的试验研究,通过定期检测上覆水中氮、磷污染物浓度随时间的变化,来反映清淤及模拟再清淤后底泥中氮、磷污染物的释放状况。结果表明,模拟再清淤后的底泥和实际清淤后的底泥对氮、磷污染物均表现为以7 d为周期的释放与吸附的交替变化,且一个月后污染物释放量与沉降量达到平衡。对南淝河位于合作化路桥至长丰路桥段实际清淤后的底泥进行模拟再清淤试验,清淤深度在5.9 cm时,短期内可有效降低底泥中氮、磷污染物的释放。

关键词:南淝河;底泥;模拟再清淤;氮磷释放

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)06-1181-06 doi:10.11654/jaes.2015.06.023

Releases of Nitrogen and Phosphorus from Sediments from Nanfei River After Simulated Follow-up Dredging

FU Yang^{1,3}, LU Yi^{1,3}, CHEN Song-song², YANG Shu-yun^{1,3}, WANG Feng-wen^{1,3*}, YANG Chang-ming^{2*}

(1.School of Resources and Environment, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3.Hefei Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Hefei 230036, China)

Abstract: Water quality monitoring has shown that nitrogen and phosphorus pollution is still severe in Nanfei River even if dredging has been conducted. Here a simulation experiment was carried out to examine the effect of follow-up dredging on the releases of nitrogen and phosphorus from the sediments using intact columns of the sediments that were previously in situ dredged. In the simulated dredging experiment, nitrogen and phosphorus in in situ dredged sediments showed alternative release and adsorption pattern with an interval of 7 d, and reached stability after one month. Our results indicate that follow-up dredging at a depth of 5.9 cm could restrain the releases of nitrogen and phosphorus from the sediments during the short term.

Keywords: Nanfei River; sediment; follow-up dredging; nitrogen release; phosphorus release

南淝河是入巢湖的主要河流之一,是合肥市典型的城市纳污型河流,呈东西走向,全长约70 km。近年来,随着城市化的发展,南淝河水质受氮、磷污染严重^[1-3]。相关部门对南淝河展开了一系列的清淤工作。然而,经对清淤后的河段进行实际观察和监测发现,水污染状况并未取得长期显著效果,水体氮、磷污染

依然十分严重。相关研究表明,对富营养化的河道进行清淤或置换上覆水未取得预期的改善效果,往往是由于底泥中氮、磷污染物的释放^[4]以及排污口高强度持续排污^[5]等因素造成的。另外,河道清淤深度^[6]或清淤方式的不合理^[7]也会影响清淤效果,李慧等^[8]的研究表明,南淝河清淤深度控制在10~15 cm内可有效降低磷释放风险,如果超过这个范围则会促使底泥中磷的释放。目前,就南淝河清淤效果量化及模拟再清淤方面的研究鲜有报道。

本文对实际清淤后的底泥进行模拟再清淤试验。在避免干湿沉降和其他外源污染的情况下,研究底泥中氮、磷污染物的释放状况,从而为河道再清淤和南淝河水质的进一步改善提供参考。

收稿日期:2014-12-25

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07303-002);中国清洁发展机制赠款项目《安徽省农业、生态领域适应气候变化对策分析》

作者简介:傅 扬(1991—),男,安徽宣城人,硕士研究生,从事水污染综合防治与应用气象研究。E-mail:991428com@sina.com

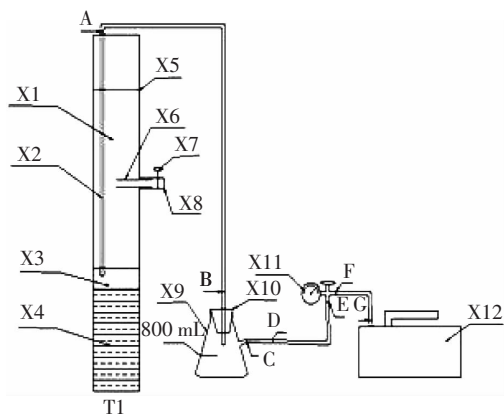
* 通信作者:王凤文 E-mail:wfw2008@ahau.edu.cn;
杨长明 E-mail:cmyang@tongji.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验设计与装置

1.1.1 试验装置与原理

模拟清淤试验装置如图 1 所示。其中 T1 为底泥的采集和培养装置,由长 2 m、内径 5 cm 且不透明的 PVC 管制成。在管底至管顶 1.7 m 处钻一小孔,大小使装满的水能自然流出即可。距小孔下方 0.5 m 处为取水口。



X1 为底泥上覆水;X2 为玻璃管;X3 为试验时抽出泥层;X4 为剩余底泥;X5 为 1.7 m 处小孔;X6 为玻璃管;X7 为阀门;X8 为橡胶管;X9 为抽滤瓶;X10 为橡胶塞;X11 为压力表;X12 为抽滤真空泵。AB 段、CD 段、DE 段和 FG 段为橡胶管,其余为玻璃管

图 1 模拟清淤装置图

Figure 1 Diagram of simulated dredging device

在进行模拟清淤试验时,通过 X12 抽滤真空泵使 X9 抽滤瓶产生真空,由外界大气压力作用迫使底泥经 X2 玻璃管吸入并进入抽滤瓶中,从而达到抽泥的目的。通过控制玻璃管下潜深度可抽取特定深度的淤泥。

1.1.2 采样点的选取与样品采集

研究区域位于南淝河中游城区段。该区域具有地势平缓,河流流速低,易于污染物沉积等特点。自清淤工程实施后,污染排放源显著减少。四里河是南淝河

的主要支流之一,呈南北走向,流速低,且上游工业发达,是当前造成南淝河污染的可能来源。因此,选取代表性的分别位于靠近合作化路桥的河流断面上 A 点(合作化路桥北岸,简称合北,记为 HB)、B 点(合作化路桥南岸,简称合南,记为 HN)和靠近肥西路桥的河流断面上 C 点(肥西路桥北岸,简称肥北,记为 FB)、D 点(肥西路桥南岸,简称肥南,记为 FN)共四处采样点进行采样。每个点采集两组底泥样。编号 1 为对照样,编号 2 为模拟清淤样。采样点选取与分布状况如表 1 所示。

由于对实际清淤后的效果进行了一段时间的观测以及水位对原状底泥采集的影响。泥样于 2014 年 8 月 15 日(实际清淤约 7 个月后)采集,为使泥样的采集深度达到或接近目的泥深,标记深度超过总深度 10 cm。将 PVC 管垂直插入泥中,取出后用 PVC 管封头将底端封死,以防渗漏,立即运回室内进行试验研究。试验用原状水对应于底泥采样点,采集深度为 0.5 m,利用取样器采集,用密闭塑料桶盛装。

1.2 模拟清淤试验

将装有泥样的 PVC 管缓慢加入原状水至设定深度,以避免对泥样造成大的扰动。加水后静置 3 d,使悬浮的底泥完全沉淀后测定上覆水中总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)和化学需氧量(COD_{Cr})的质量浓度,作为初始浓度。然后对编号为 2 的样管(HB2、HN2、FB2 和 FN2,共 4 根样管)进行模拟清淤试验,抽泥装置见图 1。打开抽滤真空泵,调节压力表和通气阀门,并通过控制玻璃管下潜深度来抽取特定深度的泥。为使抽出部分的底泥均匀,玻璃管缓慢旋转地进行下潜。由于国内外对此类方法进行的试验报道很少,没有固定的标准,在模拟清淤过程中,为了使抽出泥水后编号为 2 的样管补充水的体积一致,便于比较,规定抽出特定深度底泥后保持抽出的泥水总体积为 800 mL。模拟清淤的结果如表 2 所示。抽出的泥水置于 1000 mL 烧杯中,用保鲜膜进行封口,于暗处静

表 1 采样点分布状况

Table 1 Distribution of sampling points

采样点	经纬度	位置描述	污染状况	清淤情况
A(HB)	31°52'34.94" N 117°14'49.18" E	距四里河与南淝河交汇口的南淝河上游约 100 m 北岸	无点排放源污染,主要受上游给水影响	2013 年 12 月至 2014 年 2 月期间施行清淤
B(HN)	31°52'33.82" N 117°14'47.93" E	距四里河与南淝河交汇口的南淝河上游约 100 m 南岸		
C(FB)	31°52'27.48" N 117°15'02.83" E	距四里河与南淝河交汇口的南淝河下游约 100 m 北岸	无点排放源污染,受上游给水影响,且受四里河汇流影响	
D(FN)	31°52'26.49" N 117°15'02.69" E	距四里河与南淝河交汇口的南淝河下游约 100 m 南岸		

表 2 抽出泥体积和泥深

Table 2 Volume and depth of extracted sediments

项目	HB1	HB2	HN1	HN2	FB1	FB2	FN1	FN2
抽出泥体积 cm^3		103		115		40		157
抽出泥深 cm		5.2		5.9		2.0		8.0

置 12 h。用原状水对每个试验柱补充至设定深度(每次取水后均用原状水补充)。将泥水样静置 12 h 后,用 100 mL 移液管移取上层液 200 mL 并测定其中 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_Cr 的质量浓度,同时做两组重复。利用 50 mL 离心管对每组整体沉淀泥样于 $3500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 5 min,然后测定离心管中上清液的 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_Cr 的质量浓度。

模拟装置置于室内,试验期间控制室温为 $25\pm 2^\circ\text{C}$,避光。每隔 7 d 检测一次上覆水和原状水中 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_Cr 的质量浓度,试验进行 28 d。

1.3 样品分析方法

TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)测定;TP 采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法(GB 7479—1987)测定。分光光度计为北京普析通用有限责任公司生产的 T6 新世纪紫外-可见分光光度计。 COD_Cr 采用上海仪电科学仪器股份有限公司生产的雷磁 COD-571-1 型消解装置消解和雷磁 COD-571 型化学需氧量分析仪测定。

1.4 数据处理

底泥中氮、磷等污染物的释放量计算公式^[9]如下:

$$\Delta m_T = V_i(C_{i+1} - C_i) + V_c(D_i - C_i) \quad (1)$$

$$V_i = \pi d^2 h / 4 \quad (2)$$

$$h = H - h_0 \quad (3)$$

式中: Δm_T 为上覆水中污染物质量在第 T 周($T=1、2、3、4$)的变化值,即底泥对上覆水的污染物释放量,mg; V_i 为第 i ($i=1、2、3、4$) 次采样时装置中水的体积,L; C_i 为第 i 次采样时污染物质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V_c 为取出的水或泥水的体积,L; D_i 为第 i 次采样时所补充的原水中污染物质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; d 为 PVC 管内径,m; h 为装置中水柱的高度,m; H 为 PVC 管内泥水柱的高度,m; h_0 为 PVC 管内底泥的高度,m。

采用 Excel 和 Origin 8.0 软件进行数据统计和分析,并绘图。

2 结果与讨论

2.1 底泥离心液与原上层液中氮、磷污染物的分布情况

图 2 为抽出泥水静置后上层液与底泥离心液中

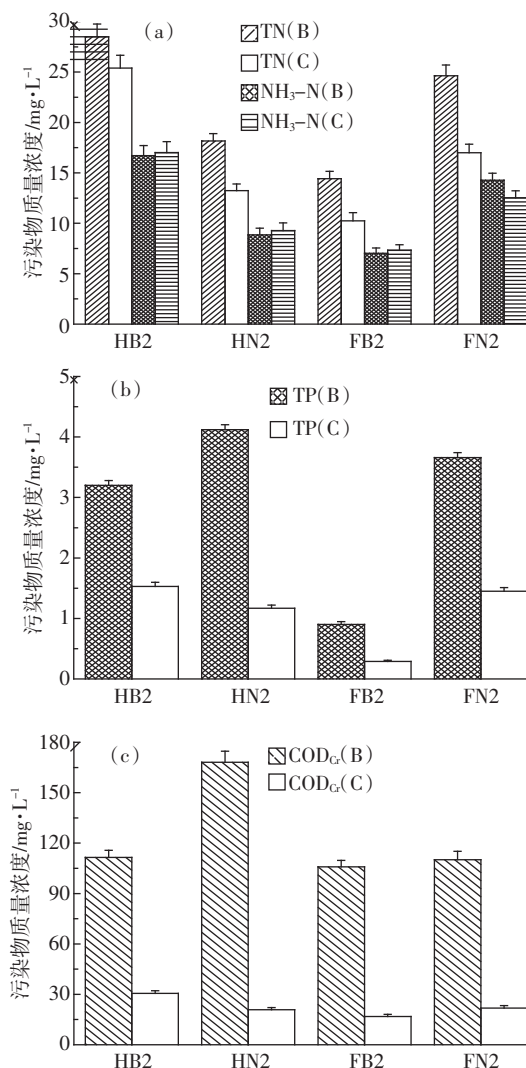


图 2 抽出泥水静置后上层液(C)与底泥离心液(B)中污染物质量浓度比较

Figure 2 Mass concentrations of nitrogen and phosphorus in overlying(C) and interstitial(B) water of extracted sediments after standing still

污染物质量浓度对照。可以看出,抽出底泥经离心后,离心液中 COD_Cr 的质量浓度明显高于原上层液,为原上层液的 3.6~8.1 倍;离心液中 TP 的质量浓度也较原上层液高,为原上层液的 2.1~3.5 倍。但 TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度在离心液和原上层液之间的变化差异并不明显。因此,底泥中高浓度的 COD_Cr 和 TP 向上层水体的迁移是造成水体 COD_Cr 和 TP 质量浓度升高的重要原因之一,与司马小峰等^[10]研究的疏浚结果相似。从试验结果可以看出,受污染的底泥中含有高浓度的 TN($\geq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_Cr 和 TP($\geq 0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。这表明,对清出的底泥进行离心式机械脱水后,若不进行妥善处理,脱去的水直接排放会

造成严重的污染。

2.2 各采样点模拟再清淤后短期内底泥中氮、磷污染物的释放情况

室内静态条件下,在避免了水流搅动、温度、光照、风等影响因素后,覆有原状水的底泥中,影响氮、磷污染物释放的因素有:底泥间隙水与上覆水中营养盐的浓度差^[11],底泥中氮、磷污染物的存在形态^[12]及来源,微生物的扰动作用,底泥颗粒大小分布^[13-14]等,其中底泥间隙水与上覆水中营养盐的浓度差是决定氮、磷污染物释放的主要因素之一^[11]。因此,室内模拟试验可以很好地反映底泥中氮、磷污染物的释放情况。

图3为HB底泥污染物释放量变化曲线。可以看出,模拟清淤5.2 cm后的底泥在第1周TN和 COD_G 的释放量明显低于对照样底泥,且在4周后释放量与沉降量达到平衡。模拟清淤后的底泥和对照底泥中TP的释放量在试验期间均大于0,且模拟清淤后的底泥中TP在同一时期内的释放量均大于对照部分。这恰好验证了底泥间隙液中高浓度TP对增加上层水受污染风险的可能性。与底泥中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放情况对照,两者表现为相同的变化趋势,且相差0.05~1.15 mg。说明对HB底泥进行模拟清淤5.2 cm会促进底泥中磷的释放,但对底泥中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放并无影响。

图4为HN底泥污染物释放量变化曲线。模拟清淤5.9 cm后的底泥和对照底泥对TN的释放量变化趋势相同,但模拟清淤后的底泥对TN的释放量在前2周明显低于对照底泥,分别减少3.17 mg和1.72 mg,并在4周后释放量与沉降量达到平衡。试验第1周,两者的底泥对 COD_G 均表现为吸附状态,但模拟清淤后的底泥比对照底泥的吸附量低56 mg;在第2周时,

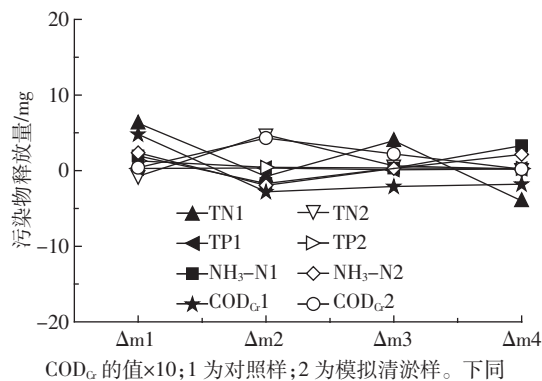


图3 HB底泥污染物释放量对比

Figure 3 Releases of pollutants from sediments from sampling point A after different depth dredging

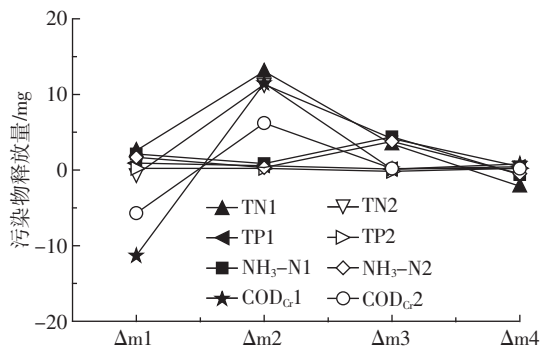


图4 HN底泥污染物释放量对比

Figure 4 Release of pollutants from sediments from sampling point B after different depth dredging

模拟清淤后的底泥和对照底泥又以1周前的吸附量释放出来,之后的释放量和沉降量趋于平衡。模拟清淤后的底泥在试验期间对TP的释放量均小于对照底泥,且两者差值由0.70 mg向0.21 mg逐渐降低。底泥对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放情况表现为,模拟清淤后的底泥在前3周均小于对照底泥;当试验至第4周时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放量和沉降量也开始趋于平衡。这表明对HN底泥模拟清淤5.9 cm,在1周内即可降低底泥中氮、磷污染物的释放,且对磷释放的改善效果更好。

图5为FB底泥污染物释放量的变化曲线。可以看出,模拟清淤2.0 cm后的底泥和对照底泥对TN的释放量呈现相同的变化趋势。但在第2周时,由于模拟清淤对底泥的扰动作用,使2.0 cm以下的底泥中含氮污染物释放,模拟清淤后的底泥对TN的释放量比对照底泥增加了3.46 mg,之后又因沉降作用,两者的污染物差距逐渐减小。底泥中 COD_G 的释放也呈现相同的变化趋势。试验第1周,模拟清淤后的底泥对 COD_G 的释放量较对照底泥高109 mg,第2周模拟清淤后的底泥和对照底泥又以接近1周前的吸附量释

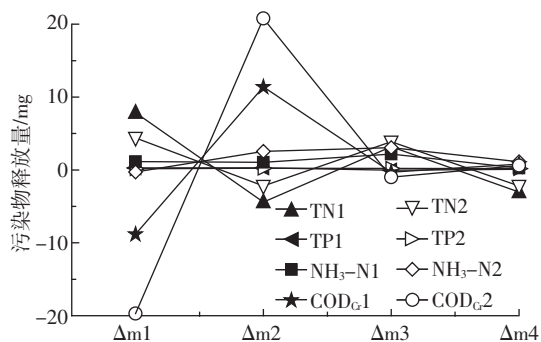


图5 FB底泥污染物释放量对比

Figure 5 Releases of pollutants from sediments from sampling point C after different depths dredging

放出来,之后 COD_{Cr} 的释放量与沉降量均趋于平衡,与图 4 中模拟清淤 5.9 cm 后的结果相似。模拟清淤后的底泥对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放量在试验第 1 周较对照底泥低 1.43 mg,之后一直较对照底泥高,且高出部分为 0.07~1.96 mg。而 TP 的释放情况表现为,前 2 周模拟清淤后的底泥对 TP 的释放量均较对照底泥低,减少 0.12 mg 或 0.04 mg,之后的释放量与沉降量也趋于平衡。可以看出,对 FB 底泥模拟清淤 2.0 cm 后,底泥中氮、磷污染物的释放状况并没有发生多大改变。

图 6 为 FN 底泥污染物释放量的变化曲线。模拟清淤 8.0 cm 后的底泥和对照底泥中 TN 的释放呈现相同的变化趋势,且模拟清淤后的底泥 TN 释放量一直比对照底泥高,平均增加 3.68 mg。底泥中 COD_{Cr} 的释放量也呈现相同的变化趋势,但模拟清淤与对照的差值并不大,为 3~9 mg。此外,模拟清淤后的底泥中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 的释放量始终较对照底泥高,高出部分分别为 0.19~0.98 mg 和 0.11~0.41 mg。在试验第 1 周,模拟清淤后的底泥中 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Cr} 的释放量均较对照底泥高,分别高出 9.68、0.11、0.98、3 mg,说明对 FN 底泥模拟清淤 8.0 cm 会导致氮、磷等污染物在 1 周后爆发性释放。

试验发现,不论是模拟清淤后还是对照,在室内试验一个月,底泥中氮、磷污染物释放量的波动幅度均逐渐减小,最终都趋向 0。这表明,底泥中可交换的氮、磷污染物浓度在一个月后与其上层水中氮、磷污染物的浓度都达到稳定。

表 3 为培养前后底泥氮、磷污染物的净释放量。根据表 3 数据可以得出,整个试验阶段,在保持上覆水不被置换和室内控温避光培养的情况下,已清淤河段的底泥(对照样)和模拟清淤后的底泥总体上都呈氮、磷等污染物释放的状态。结合表 2 数据可以得出,

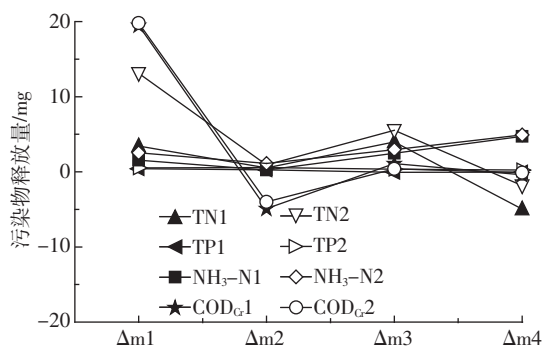


图 6 FN 底泥污染物释放量对比

Figure 6 Releases of pollutants from sediments from sampling D after different depth dredging

表 3 底泥中氮、磷污染物的净释放量(mg)

Table 3 Net releases of nitrogen and phosphorus pollutants from sediments(mg)

项目	TN1	TN2	TP1	TP2	$\text{NH}_3\text{-N1}$	$\text{NH}_3\text{-N2}$	$\text{COD}_{\text{Cr}1}$	$\text{COD}_{\text{Cr}2}$
HB	5.47	4.81	0.97	2.34	3.86	2.84	-19	71
HN	16.92	15.33	2.06	0.49	6.77	5.32	11	9
FB	3.63	3.87	0.62	0.82	4.63	6.44	31	7
FN	2.98	17.71	0.55	1.65	8.98	11.5	153	161

注:编号 1 为对照样;编号 2 为模拟清淤样。

Note: 1:Control sediments; 2:simulatedly dredged sediments.

模拟再清淤 2.0、5.2、5.9 cm 或 8.0 cm,一个月内会明显改变底泥中氮、磷等污染物的释放状态。模拟再清淤 5.2 cm 或 8.0 cm 促进了底泥中磷的释放,与对照样相比,净释放量分别增加了 1.37、1.10 mg;而模拟再清淤 5.9 cm 则相反,与对照样相比,TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Cr} 的净释放量分别减少了 1.59、1.57、1.45、2 mg。与以上模拟再清淤深度不同的是,当模拟再清淤 2.0 cm 时,与对照样相比,则几乎没有改变底泥中氮、磷污染物的释放作用。另外,模拟再清淤 8.0 cm 也促进了底泥中氮的释放,与对照样相比,总氮和氨氮的净释放量分别增加了 14.73、2.52 mg。梁止水等^[15]的研究表明,南淝河底泥中氮、磷的含量总体上是随着深度增加而减少的,但局部也存在转折(氮、磷的含量随深度增加而增加)的现象。吴永红等^[16]研究滇池的海东湾和马村湾两处的氮、磷在底泥中的空间分布时也出现了类似的现象。

3 结论

(1)模拟再清淤后的底泥和实际清淤后的底泥对氮、磷污染物均表现为以 7 d 为周期的释放与吸附交替的变化,且在一个月后污染物释放量与沉降量达到平衡。

(2)对南淝河位于合作化路桥至长丰路桥段实际清淤后的底泥进行模拟再清淤试验,结果表明:清淤深度在 5.9 cm 时,短期内可有效降低底泥中氮、磷污染物的释放;而模拟再清淤 2.0 cm,短期内几乎不影响底泥中氮、磷污染物的释放状况;当模拟再清淤深度为 5.2 cm 或 8.0 cm 时,短期内会增加底泥上层水受氮、磷污染的风险。

参考文献:

[1] 刘 姝,孔繁翔,蔡元锋,等.巢湖四条入湖河流硝态氮污染来源的氮稳定同位素解析[J].湖泊科学,2012,24(6):952-956.

LIU Shu, KONG Fan-xiang, CAI Yuan-feng, et al. Nitrogen stable iso-

- tope study on nitrate nitrogen pollution of four inflowing rivers of Lake Chaohu[J]. *J Lake Sci*, 2012, 24(6):952-956.
- [2] 李 强, 尹俊华, 席北斗, 等. 巢湖入湖河流沉积物中有机磷的形态分级研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(2):441-447.
- LI Qiang, YIN Jun-hua, XI Bei-dou, et al. Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of inflow rivers of Lake Chaohu, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(2):441-447.
- [3] 李如忠, 刘科峰, 钱 靖, 等. 合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J]. 环境科学, 2014, 35(5):1718-1726.
- LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, et al. Nitrogen and phosphate pollution characteristics and eutrophication evaluation for typical urban landscape waters in Hefei City[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5):1718-1726.
- [4] Wu M, Huang S L, Wen W, et al. Nutrient distribution within and release from the contaminated sediment of Haihe River[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(7):1086-1094.
- [5] 沈 烁, 杨长明, 杨殿海. 合肥市南淝河不同排口表层沉积物磷形态分布特征[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9):3704-3710.
- SHEN Shuo, YANG Chang-ming, YANG Dian-hai. Distribution characteristics of phosphorus forms in the surface sediment from different discharging points along the Nanfei River in Hefei City, Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(9):3704-3710.
- [6] Zhang R, Zeng F X, Liu W J, et al. Precise and economical dredging model of sediments and its field application: Case study of a river heavily polluted by organic matter, nitrogen, and phosphorus[J]. *Environmental Management*, 2014, 53:1119-1131.
- [7] 李文红, 陈英旭, 孙建平. 疏浚对影响底泥向上覆水体释放污染物的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4):446-448.
- LI Wen-hong, CHEN Ying-xu, SUN Jian-ping. Influence of dredging on releasing pollutants from sediment to overlying water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(4):446-448.
- [8] 李 慧, 曹秀云, 宋春雷, 等. 巢湖及其入湖河流(南淝河)沉积物磷形态与吸附行为的垂直变化[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(Z2):3-9.
- LI Hui, CAO Xiu-yun, SONG Chun-lei, et al. Vertical variations fractionations and sorption behaviors of phosphorus in sediments of lake Chaohu and a river(the Nanfei river) entering it[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(Z2):3-9.
- [9] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 曝气复氧对富营养化水体底泥氮磷释放的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(6):812-815.
- LIN Jian-wei, ZHU Zhi-liang, ZHAO Jian-fu. Effect aeration on release of nitrogen and phosphorus from sediments in eutrophic waterbody[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6):812-815.
- [10] 司马小峰, 朱文涛, 方 涛. 疏浚对巢湖双桥河水环境容量的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(7):2207-2214.
- SIMA Xiao-feng, ZHU Wen-tao, FANG Tao. Effect of dredging engineering on water environmental capacity of Shuangqiao River, Chaohu Lake[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(7):2207-2214.
- [11] 范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4):337-342.
- FAN Cheng-xin, Morihiro Aizaki. Effects of aerobic and anaerobic conditions on exchange of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in lake Kasumigaura[J]. *J Lake Sci*, 1997, 9(4):337-342.
- [12] Xu Y, Xu T Y. Influence of incity river sediment dredging to endogenous release[M]. The 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering(iCBBE2009).
- [13] Gil K I, Kim L H, Cho G C, et al. Evaluation of sediment contamination and effectiveness of dredging in Mid-to-lower Han River[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2010, 206:263-272.
- [14] Natalia J, Magdalena B. Nutrient leaching from reservoir bottom sediments[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, 35:1141-1146.
- [15] 梁止水, 邓 琳, 高海鹰, 等. 南淝河底泥中氮磷空间分布规律及污染评价[J]. 环境工程, 2013, 31(增刊):124-127.
- LIANG Zhi-shui, DENG Lin, GAO Hai-ying, et al. Nitrogen and phosphorus spatial distribution patterns in the sediments of Nanfei river and pollution assessment[J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(Suppl):124-127.
- [16] 吴永红, 胡 俊, 金向东, 等. 滇池典型湖湾沉积物氮磷化学特性及疏浚层推算[J]. 环境科学, 2005, 26(4):77-82.
- WU Yong-hong, HU Jun, JIN Xiang-dong, et al. Chemical characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediments of the typical bays in Dianchi Lake and calculation of their dredging layers[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(4):77-82.