

疏浚深度和光照对海河表层沉积物氮磷释放的实验研究

吴 敏, 汪 雯, 黄岁樑

(水环境数值模拟研究室, 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘 要:采用混合均匀的海河表层底泥并以自来水为上覆水进行室内沉积物氮、磷静态释放模拟实验,研究了疏浚深度和光照对沉积物总磷和氨氮释放的影响。结果表明,实验期间(2007年7月20日至2008年1月8日),无论光照与否,与未疏浚相比,完全疏浚能使上覆水总磷平均浓度从 $0.27\sim 0.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 显著降低至 $0.02\sim 0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P<0.05$),但疏浚深度对上覆水氨氮浓度无显著性影响($P>0.05$)。与避光组相比,光照可使部分疏浚组和未疏浚组上覆水总磷平均浓度分别降低 0.05 和 $0.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但对沉积物氨氮释放的影响不明显(光照组氨氮浓度略高于避光组)。其余水质指标监测结果表明,光照组的水温、电导率均值比避光组分别高约 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20\text{ }\mu\text{S}$,光照组和避光组的pH值无显著差别。此外无论光照与否,电导率均随疏浚深度的增加逐渐降低,pH值变化与疏浚深度关系不大。

关键词:海河;表层沉积物;氮;磷;影响因素

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1458-06

Effect of Dredging Depth and Light on Nitrogen and Phosphorus Release from the Surface Sediment of Haihe River

WU Min, WANG Wen, HUANG Sui-liang

(Numerical Simulation Group for Water Environment, Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria of Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Fully mixed Haihe surface sediments and tap water were used to conduct the indoor static nutrient (mainly ammonia and total phosphorus) release experiment, and to evaluate the effect of dredging depth and light on the release process. During the whole running period (from July 20th 2007 to January 8th 2008), regardless of the light or dark conditions, completely dredging of sediment could significantly reduce the average water column total phosphorus concentration from $0.27\sim 0.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $0.02\sim 0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ when compare to that without dredging ($P<0.05$). However, insignificant effect of dredging depth on ammonia was observed. Moreover, light resulted in $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ decrease of average phosphorus concentrations in the partly and completely dredging rigs while negligible impact of light on ammonia release was noticed. In addition to above nutrient variables, results of other water quality parameters such as pH, electronic conductivity (EC) and water temperature measurements indicated that water temperature and EC were $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $20\text{ }\mu\text{S}$ higher in the experimental rigs under light conditions than those under dark conditions, but no obvious effect of light on pH values was recorded. In despite of light or dark, EC was increased with decreasing dredging depth while pH values was weak linked with the sediment dredging depth.

Keywords: Haihe River; surface sediment; nitrogen; phosphorus; impacting factors

海河是中国七大水系之一,其污染程度远远超过国内其他河流,大部分监测断面的水质常年处于劣V

类,污染物以氮、磷等的营养盐为主^[1]。海河干流沉积物污染同样严重,与国内其他河流湖泊相比,表层沉积物有机质、磷的含量已属较高水平,氮和磷污染具有一定的生态风险效应^[2]。

河流在外源污染受到控制以后,沉积物内源释放便成为影响水质的重要因素^[2-3],对维持水体的污染状态有很大贡献^[2]。目前国内外学者围绕河流、湖泊沉积

收稿日期:2008-11-27

基金项目:天津市科技支撑计划重点项目(09YFSZSF02100);水利部公益性行业科研专项(200801135)

作者简介:吴 敏(1985—),女,安徽铜陵人,博士研究生,主要从事水污染控制方面的研究。E-mail: wumin@mail.nankai.edu.cn

联系作者:黄岁樑 E-mail: slhuang@nankai.edu.cn

物营养盐的释放开展了大量研究工作^[4-10],但关于海河沉积物营养盐释放的研究还不多见。针对海河河道淤积、沉积物污染严重的状况,文威、安敏和孙淑娟等对海河沉积物有机质含量、氮、磷形态进行深入分析并开展室外柱状模拟实验,研究海河表层底泥营养盐释放过程及相关影响因素^[11,3]。然而室外模拟释放实验干扰因素较多,如降雨、蒸发和植物生长等,此外他们的实验周期较短且没有模拟光照的影响,缺乏对污染物长期释放效果的考察。基于此,本文在室内采用海河表层底泥并以自来水为上覆水进行疏浚深度、光照对沉积物释放营养盐的影响研究,以期在实际清淤工程提供必要科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2006年6月在海河泥窝渡口用蚌式采泥装置采集表层沉积物样品。将采集的沉积物自然风干后,分别过20、60、100、200目金属筛,测定沉积物粒径分布、有机质、总磷、总氮含量。结果表明海河沉积物主要组成成分是沙砾(粒径为0.075~0.15 mm,含量为49.32%),其次是粗中砂(粒径为0.246~0.84 mm,含量为18%),其余粒径成分含量较为平均,均在10%左右。海河沉积物有机质含量、总氮和总磷含量分别为6.79%~8.13%、0.63~1.28 mgN·g⁻¹干泥、1.14~1.20 mgP·g⁻¹干泥,这些数据与安敏等的测定结果较为接近^[13],说明沉积物中氮、磷和有机质污染严重,具有一定的生态风险效应。

1.2 实验设计与运行

取内径10 cm、高50 cm,容积为2 L的量筒6根(装置见图1),分别加入0、5、10 cm混合均匀的海河表层沉积物,模拟完全疏浚、部分疏浚以及未疏浚情况,每个深度设计两个平行,同时设置6个避光组进行对比(量筒外壁用铝箔纸覆盖以避光)。沉积物填充完毕后,沿量筒壁缓缓加入自来水至液面距量筒口约2~3 cm。实验从2007年7月21至2008年1月5日,共6个月。实验初期取样频率2 d·次⁻¹(7月20至8月20日),此后根据监测分析结果,采样频率分别降至5、7、14 d·次⁻¹等。为使采集的水样具有代表性及减小取样对沉积物扰动的影响,在距离沉积物上表面10 cm处采用虹吸法取样,每次取样80 mL,取样结束后及时补入同体积的自来水。

1.3 水样分析

采集的水样分别主要监测氨氮(纳氏试剂分光光

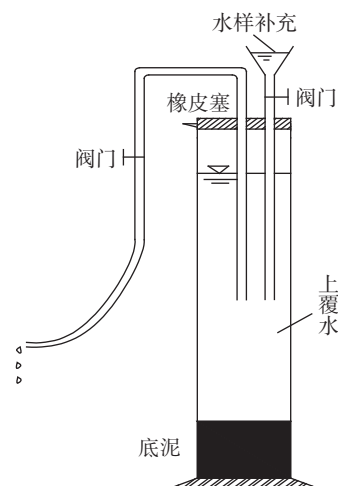


图1 实验装置

Figure 1 Experimental rigs

度法)、总磷(钼酸铵分光光度法)、pH、T(温度)和EC(电导率)(便携式测定仪)等。pH、T和EC采用HANNA便携式测定仪分析,其他指标测定参照《水和废水监测分析》第四版^[11]。

2 结果与讨论

2.1 疏浚深度对氨氮释放的影响

氨氮是水体生物尤其是浮游植物较为容易利用的氮素形态^[12],研究沉积物中氨氮的释放对控制水体富营养化有重要意义。疏浚深度对上覆水氨氮浓度随时间变化的影响见图2。无论光照与否,实验初期上覆水氨氮浓度较高,受挥发、硝化等因素影响,随实验进行各组氨氮浓度总体呈下降趋势,完全疏浚组30 d后趋于稳定并保持在0.2 mg·L⁻¹左右的较低水平。未疏浚组在实验进行到115 d左右时氨氮浓度出现小幅上升,此后又逐渐降低。

疏浚深度对上覆水氨氮浓度影响不显著(表1),整个实验期间,无论光照与否,完全疏浚和部分疏浚组上覆水氨氮浓度均低于未疏浚组。一般认为,表层0~5 cm是底泥含氮化合物释放作用最强的区域^[13],实验初期,进入上覆水的氨氮主要来自表层沉积物的释放,随着实验进行,当表层间隙水与上覆水之间的氨氮浓度达到平衡之后,部分底层沉积物中的氨氮也通过浓度差扩散至上覆水。进入11月份(大约115 d后),室内暖气的开通促进了微生物扰动,未疏浚组氨氮浓度出现小幅增加,但室温上升也加快了微生物硝化-反硝化作用对氨氮的消耗,二者综合作用下,实验后期未疏浚组上覆水氨氮浓度呈现先上升再下降的现象。

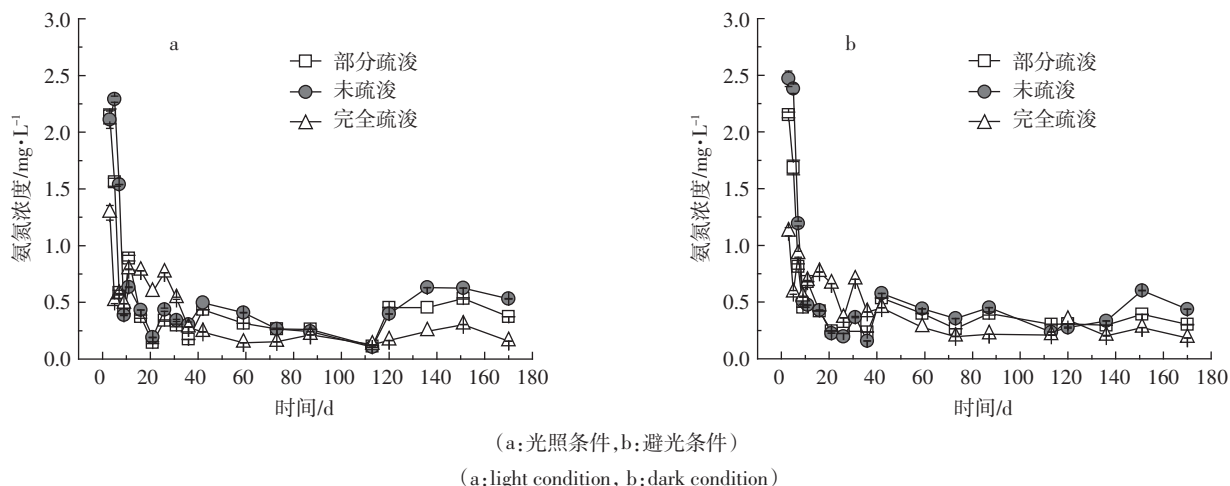


图 2 疏浚深度对上覆水氨氮浓度变化的影响

Figure 2 Effects of dredging depth on the concentration of ammonia in the overlying water

2.2 疏浚深度对总磷释放的影响

磷是造成水体富营养化的重要限制性因子^[1]。不同疏浚深度条件下上覆水总磷浓度变化见图 3。从图可看出,疏浚深度显著影响上覆水总磷浓度,无论光照与否,实验期间完全疏浚组总磷浓度一直保持在较低浓度水平,部分疏浚组总磷浓度维持在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 且波动幅度很小,未疏浚组总磷随时间变化大致呈上升趋势,在避光条件下趋势表现更为明显。

由表 1 可知,疏浚深度对上覆水总磷平均浓度影响显著 ($P < 0.05$),总磷浓度从大到小依次为未疏浚组、部分疏浚组、完全疏浚组。一般来说,沉积物磷的释放在实验初期仅与上覆水和间隙水之间浓度差有关,且释放区域限于表层沉积物,此时沉积物深度对上覆水总磷浓度的影响不大。进入实验后期(115 d

后),室温的维持(约 20°C)有利于微生物及底栖生物活动。通过定期观察,笔者发现泥水界面出现大量的颤蚓不停地扰动表层沉积物。颤蚓的出现是沉积物及水体有机污染严重的表现^[14],此条件下微生物对有机污染物的分解消耗大量的溶解氧,其产生的厌氧环境有利于沉积物磷释放^[15-17],这可能是实验后期上覆水总磷维持较高浓度水平的重要原因。

2.3 光照对氨氮释放的影响

光照对上覆水氨氮浓度随时间变化的影响见表 2。整个实验期间,完全疏浚组氨氮浓度变化受光照影响较小。光照对部分疏浚和未疏浚组氨氮释放的影响分为 3 个阶段:光照组与对应避光组氨氮浓度相差不大(前 40 d);避光组氨氮浓度显著高于光照组 ($P < 0.05$, 40~120 d) 和光照组氨氮浓度显著高于避光组

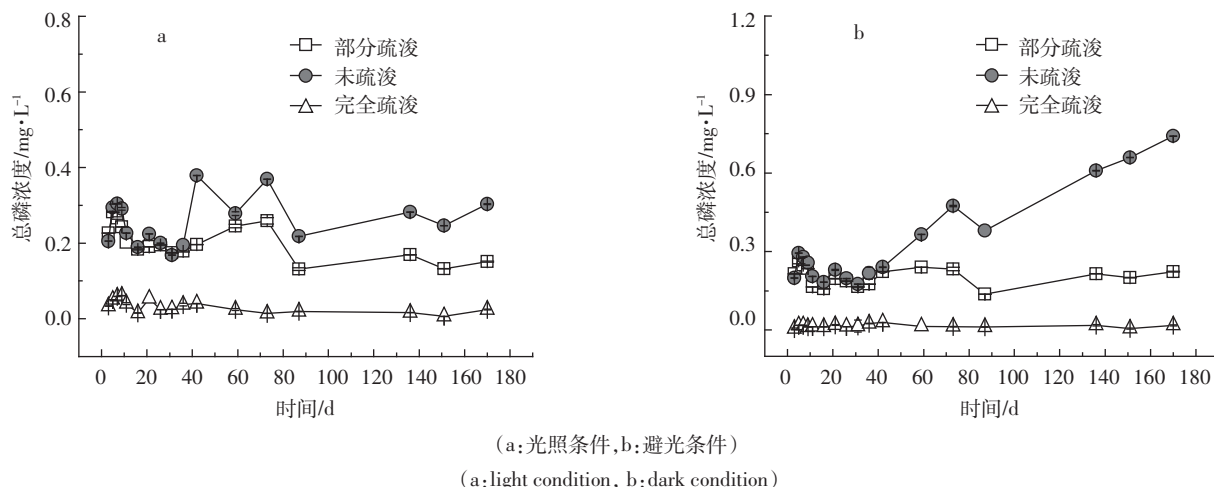


图 3 疏浚深度对上覆水总磷浓度变化的影响

Figure 3 Effects of dredging depth on the concentration of total phosphorus in the overlying water

表 1 Duncan 多重比较检验疏浚深度对氨氮和总磷浓度的影响($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 1 Results of Duncan multiply comparison for ammonia and total phosphorus at different dredging depth($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

参数	光照			避光		
	完全疏浚	部分疏浚	未疏浚	完全疏浚	部分疏浚	未疏浚
NH_4^+-N	0.48 ± 0.27	0.55 ± 0.51	0.66 ± 0.66	0.44 ± 0.31	0.53 ± 0.51	0.64 ± 0.63
TP	0.02 ± 0.01^a	0.20 ± 0.05^b	0.27 ± 0.07^c	0.03 ± 0.02^a	0.21 ± 0.04^b	0.41 ± 0.27^c

注: $P<0.05$, 不同上标字母表示存在显著性差异, 下同。

表 2 Duncan 多重比较检验光照对氨氮释放的影响($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 2 Results of Duncan multiply comparison for ammonia release with or without light($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

时间	完全疏浚		部分疏浚		未疏浚	
	光照	避光	光照	避光	光照	避光
0~40 d	0.68 ± 0.23	0.66 ± 0.27	0.69 ± 0.66	0.72 ± 0.67	0.87 ± 0.79	0.84 ± 0.80
40~120 d	0.28 ± 0.09	0.27 ± 0.09	0.30 ± 0.12^a	0.37 ± 0.09^b	0.32 ± 0.14^a	0.39 ± 0.12^b
120~170 d	0.22 ± 0.05	0.23 ± 0.07	0.45 ± 0.08^b	0.33 ± 0.05^a	0.60 ± 0.06^b	0.46 ± 0.14^a

($P<0.05$, 120 d 至实验结束)。

实验初期,光照对氨氮释放影响不显著,沉积物间隙水与上覆水之间的浓度差可能是氨氮迁移转化的主要驱动力。海河透光性较差,沉积物及上覆水中的部分微生物适宜在弱光环境中生存,且对沉积物的扰动干扰作用较强,因此 40~120 d 期间避光条件下氨氮浓度高于光照条件。此后随着实验进行,光照组底栖动物适应光照条件且数量增加较大并通过对底泥的扰动促进了氨氮释放,导致实验后期光照条件下上覆水氨氮浓度高于避光条件。

2.4 光照对沉积物磷释放的影响

光照对上覆水中总磷浓度随时间变化的影响见表 3。从表可看出,光照对上覆水总磷浓度的影响因疏浚深度而异。无论光照与否,完全疏浚组总磷浓度一直处于很低浓度水平,光照条件对其变化影响较小(表 3)。实验初期(0~40 d),光照对部分疏浚组和未疏浚组上覆水总磷浓度影响不明显,光照和避光条件下总磷浓度相差较小,此后它们之间的浓度差逐渐扩大,特别是未疏浚组,避光条件几乎是光照条件下浓度的 2 倍(表 3)。

研究表明沉积物磷释放与照度呈负相关,而与底

栖藻类的生长量呈正相关^[14]。实验期间光照装置中有藻类等浮游植物存在,藻类在生长过程中需要吸收大量营养盐,当上覆水营养盐浓度较低时,沉积物向上覆水释放的营养盐是藻类生长的主要营养源。底栖藻类间接成为阻挡沉积物磷释放的一个生物“屏障”^[18],导致光照条件下上覆水总磷浓度低于避光对照。实验后期,暖气使室内温度升高,微生物以及底栖动物(如颤蚓)对沉积物的扰动作用较实验前期明显,微生物活动促进了沉积物磷释放。范成新等^[19-20]的研究也表明在生物促进环境下,有机磷的矿化作用明显增强。

2.5 其他水质指标变化状况

疏浚深度、光照不仅影响上覆水中氮、磷营养盐的浓度分布,而且对其他的水质指标也产生一定影响。除氮磷营养盐外,本实验还定期监测上覆水水温、pH 及电导率等水质指标,具体见表 4。

从表 4 可看出,疏浚深度越大,电导率越小,相应上覆水中氨氮、总磷浓度越低,这和付春平等^[21]的研究结果类似。电导率越高,上覆水中离子浓度越高,正负离子容易和 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 竞争沉积物颗粒表面上的吸附点位,促使更多的氮、磷通过离子交换作用进入上覆水体^[5]。光照条件造成了一定的温度差异,光照组

表 3 Duncan 多重比较检验光照对总磷释放的影响($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 3 Results of Duncan multiply comparison for total phosphorus release with or without light($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

时间	完全疏浚		部分疏浚		未疏浚	
	光照	避光	光照	避光	光照	避光
0~40 d	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.21 ± 0.04	0.20 ± 0.04	0.24 ± 0.06	0.23 ± 0.04
40~170 d	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.17 ± 0.05^a	0.22 ± 0.03^b	0.28 ± 0.05^a	0.54 ± 0.15^b

表 4 实验期间各装置水质参数

Table 4 Water quality parameters in the rigs during the experimental period

参数	光照			避光		
	完全疏浚	部分疏浚	未疏浚	完全疏浚	部分疏浚	未疏浚
T /℃	27.28±1.25	27.29±1.23	27.29±1.26	26.97±1.35	26.98±1.39	26.98±1.34
EC/μs	290±90	515±139	622±152	293±85	496±124	599±146
pH	7.96±0.11	7.80±0.11	7.80±0.15	7.97±0.09	7.77±0.15	7.81±0.18

比避光组的水温普遍高 0.3 ℃左右,从表 1 和表 3 可看出,水温较高时,对应上覆水体的氨氮浓度也较高,磷则不同,较高的水温对应相对较低的营养盐浓度,这一现象可能与氮、磷的迁移转化机制不同有关,氮的迁移主要依靠微生物的活动,而磷受众多因素影响,温度可能不是决定因子^[22-25]。pH 影响上覆水总磷浓度分布,磷在中性条件下释放量最小,减小或增大 pH 值都可以使磷的释放量增大^[26]。从表 4 可看出,上覆水处于中性偏弱碱性的环境,pH 对氮、磷浓度分布影响较小,可忽略不计。除此之外,沉积物中的氮磷形态、有机质含量及微生物种类数量均能影响底泥营养盐释放,这些因素将在后续的实验中进行进一步研究。

3 结论

疏浚对于改善上覆水氨氮污染效果不显著,但疏浚沉积物可以大幅降低上覆水总磷浓度。光照可有效降低上覆水总磷浓度,但光照对氨氮的影响较小,同一疏浚深度条件下,光照组的氨氮浓度略高于避光组。

温度、pH 和电导率等因光照条件和疏浚深度不同而有所差异。光照组的水温、电导率均值分别比避光组高,但它们的 pH 值无显著差别。此外无论光照与否,电导率随疏浚深度的增加逐渐降低,pH 值变化与疏浚深度关系不大。除疏浚深度和光照外,实验过程中发现温度和微生物包括底栖动物对海河沉积物氮磷释放具有一定影响,这些释放因子的作用将在下一步的实验中继续探讨和分析。

参考文献:

- [1] 孙淑娟,黄岁樑. 海河沉积物中磷释放的模拟研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 126-131.
SUN Shu-juan, HUANG Sui-liang. Simulated experiment of phosphorus release from Haihe River sediment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4): 126-131.
- [2] 安 敏,黄岁樑. 海河干流表层沉积物总磷、总铁和有机质的含量及相关性分析[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 63-67.
AN Min, HUANG Sui-liang. Distribution and correlation between total

content of phosphorus, iron and organic matter of surface sediment in Haihe River mainstream[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(3): 63-67.

- [3] 文 威,孙学明,孙淑娟,等. 海河底泥氮磷营养物静态释放模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 295-300.
WEN Wei, SUN Xue-ming, SUN Shu-juan, et al. Release of phosphorus and nitrogen from Haihe River sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 295-300.
- [4] 付春平,钟成华,邓春光. pH 与三峡库区底泥氮磷释放关系的实验[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(10): 125-127.
FU Chun-ping, ZHONG Cheng-hua, DENG Chun-guang. Relationship between pH value of the water and release silt bottom of nitrogen & phosphate in the Three Gorges[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2004, 27(10): 125-127.
- [5] 刘培芳,陈振楼,刘 杰. 盐度和 pH 对崇明东滩沉积物中 NH_4^+ 释放的影响研究[J]. 上海环境科学, 2002, 21(5): 271-273.
LIU Pei-fang, CHEN Zhen-lou, LIU Jie. Study on effects of salinity and pH on NH_4^+ release in east Chongming tidal flat sediment[J]. *Shanghai Environmental Science*, 2002, 21(5): 271-273.
- [6] 王 冬,张进忠. 水体沉积物中磷释放的影响因素[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(1): 47-50.
WANG Dong, ZHANG Jin-zhong. The influencing factors of phosphorus release in the sediment of water body[J]. *Inner Mongolian Environment Sciences*, 2008, 20(1): 47-50.
- [7] 潘成荣,张之源,叶琳琳,等. 环境条件变化对瓦埠湖沉积物磷释放的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 148-152.
PAN Cheng-rong, ZHANG Zhi-yuan, YE Lin-lin, et al. Effects of environmental factor on phosphorus release from sediments in Wabuhu Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 148-152.
- [8] 孙晓杭,张 昱,张斌亮,等. 微生物作用对太湖沉积物磷释放影响的模拟实验研究[J]. 环境化学, 2006, 25(1): 24-27.
SUN Xiao-hang, ZHANG Yu, ZHANG Bin-liang, et al. Microbial effects on phosphorus release in Taihu Lake sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 25(1): 24-27.
- [9] 张 路,范成新,秦伯强. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 35-42.
ZHANG Lu, FAN Cheng-xin, QIN Bo-qiang, et al. Phosphorus release and absorption of surficial sediments in Taihu Lake under simulative disturbing conditions[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(1): 35-42.
- [10] 高 丽,杨 浩,周健民. 环境条件变化对滇池沉积物磷释放的影响[J]. 土壤, 2005, 37(2): 216-219.
GAO Li, YANG Hao, ZHOU Jian-min. Phosphorus release from sedi-

- ments in Dianchi Lake under different environmental conditions[J]. *Soils*, 2005, 37(2):216-219.
- [11] 中国国家环境保护总局. 水和废水监测分析 [M]. 第四版, 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 89-283.
- State Environmental Protection Administration of China. Water and wastewater monitoring analysis[M]. Version 4. Beijing: Environmental Science Publication of China. 2002: 89-283.
- [12] 马红波, 宋金明. 海洋沉积物中的氮循环[J]. 海洋科学集刊, 2001, 43: 96-107.
- MA Hong-bo, SONG Jin-ming. Nitrogen cycling in marine sediments[J]. *Studia Marina Sinica*, 2001, 43: 96-107.
- [13] 邢雅囡, 软晓红, 赵振华. 城市河道底泥疏浚深度对氮磷释放的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 378-382.
- XING Ya-nan, RUAN Xiao-hong, ZHAO Zhen-hua. Effects of depth of sediment dredging in urban rivers on release of nitrogen and phosphorus[J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 2006, 34(4): 378-382.
- [14] 朱慧君. 用浮游及底栖动物评价饮马河水水质[J]. 江苏环境科技, 2003, 16(1): 18-20.
- ZHU Hui-jun. Assessment Yinmahe River water quality by plankton and benton[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2003, 16(1): 18-20.
- [15] Hu W F, Lo W, Chua H, et al. Nutrient release and sediments oxygen demand in a eutrophic landlocked embayment in Hong Kong[J]. *Environment International*, 2001, 26: 369-375.
- [16] 曹海艳, 冯启言. 环境因子对南四湖底泥磷释放的影响实验研究[J]. 水科学与工程, 2006(6): 36-38.
- CAO Hai-yan, FENG Qi-yan. Study on the experiment of the phosphorus release from the bottom silt of Nansi Lake[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2006(6): 36-38.
- [17] Xia J, Xiang C J, Yang Y, et al. Effects of oxygen on the release and distribution of phosphorus in the sediments under the light condition[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 482-487.
- [18] 姚 扬, 金相灿, 江 霞, 等. 光照对湖泊沉积物磷释放及磷形态变化的影响研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 30-33.
- YAO Yang, JIN Xiang-can, JIANG Xia, et al. Study on effects of light on phosphorus release and phosphorus form change in lake sediments[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(suppl): 30-33.
- [19] 范成新, 张 路, 杨龙元, 等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 370-378.
- FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, YANG Long-yuan, et al. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in lake[J]. *Oceanologia & Limnologia Sinica*, 2002, 33(4): 370-378.
- [20] 范成新, 张 路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. 中国科学, D 辑, 2003, 33(8): 760-780.
- FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, QING Bo-qiang, et al. Evaluation of dynamic release of phosphorus from suspended particles in Lake Taihu affected by wind[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(8): 760-780.
- [21] 付春平, 钟成华, 邓春光. 水溶液电导率与山峡库区底泥氮磷释放关系研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(4): 76-78.
- FU Chun-ping, ZHONG Cheng-hua, DENG Chun-guang. Experimental study on the relationship between nitrogen and phosphorus release of the Three Gorges bottom silt and the electrical conductivity of water solution[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2006, 28(4): 76-78.
- [22] Holdren G C, David E Asrmstrong. Factor affecting phosphorus release from intact lake sediments cores[J]. *Environmental Science Technology*, 1980, 14(1): 79-87.
- [23] 黎颖治, 夏北成, 谢小茜, 等. 沉积物-水界面磷交换模拟研究中环境因子的动态规律分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007(46): 117-136.
- LI Ying-zhi, XIA Bei-cheng, XIE Xiao-xi, et al. Dynamic rules for some environmental factors in the simulative experiment of phosphorus exchange at sediment-water interface[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007(46): 117-136.
- [24] 王晓蓉, 华兆哲, 徐 菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响的模拟实验研究[J]. 环境化学, 1996, 15(1): 15-19.
- WANG Xiao-rong, HUA Zhao-zhe, XU Ling, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 1996, 15(1): 15-19.
- [25] 汪加权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6): 738-742.
- WANG Jia-quan, SUN Ya-min, QIAN Jia-zhong, et al. Simulated study on phosphorus release of Chao Lake sediment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(6): 738-742.
- [26] 金相灿, 王圣瑞, 庞 燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 707-711.
- JIN Xiang can, WANG Shen rui, PANG Yan. The influence of phosphorus forms and pH on release of phosphorus from sediments in Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(6): 707-711.