

## 南四湖沉积物营养盐释放特性\*

张志斌<sup>1\*\*</sup> 魏垒垒<sup>1,2</sup> 高宝玉<sup>3</sup> 李 艺<sup>1</sup> 吕育锋<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学市政与环境学院, 济南, 250101; 2. 光大水务(济南)有限公司, 济南, 250032;  
3. 山东大学环境科学与工程学院, 济南, 250100)

**摘 要** 通过营养盐静态释放模拟试验,研究了南四湖沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N、TP 和有机质(OM)的释放能力;针对微山湖区(WS)沉积物氮含量较高、释放较强的特点,为明晰 WS 湖区的氮释放潜力,考察了该湖区 16 个点位沉积物对  $\text{NH}_4^+$ -N 的等温吸附特性. 静态释放试验表明,沉积物 TP 和 OM 释放能力较弱,对南四湖上覆水水质影响不明显;而 WS 湖区的  $\text{NH}_4^+$ -N 释放能力较强. WS 湖区沉积物的  $\text{NH}_4^+$ -N 等温吸附试验表明,湖心区沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 释放能力最强,吸附/解吸平衡浓度( $C_{\text{EAC}}$ )高于  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的区域面积约占微山湖的 1/5,该区域沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 释放将会对南水北调东线调水水质产生不利影响.

**关键词** 沉积物, 营养盐, 释放, 南四湖, 微山湖区.

沉积物是营养物质的重要蓄积库,在外界环境条件改变的情况下,营养盐将有可能从沉积物中释放出来,进入上覆水体,对水质造成威胁,引起水体富营养化<sup>[1-5]</sup>. 南四湖历史上曾遭受严重污染,其沉积物中蓄积了大量营养物质,存在释放风险,因此,有必要对南四湖沉积物营养盐的释放强度进行研究. 关于南四湖沉积物的前期研究主要集中于 P 的释放特性,而对于 N 和有机质(OM)的释放研究较少<sup>[6-9]</sup>.

本文采用静态释放模拟试验,考察了南四湖沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N、TP 和 OM 的释放强度. 针对微山湖区沉积物氮含量较高、释放较强的特点,为详细了解微山湖的氮释放潜力,进行了该湖区多点位沉积层对  $\text{NH}_4^+$ -N 的吸附等温特性研究,以期对南四湖污染控制提供技术参考.

## 1 材料方法

### 1.1 采样区域概况及样品采集

南四湖位于山东省西南部,由南阳(NY)、昭阳(ZY)、独山(DS)和微山(WS)4 个无明显分界的湖泊串联而成,平均水深 1.5 m,是我国十大淡水湖之一,也是南水北调东线工程重要水源调蓄地<sup>[10]</sup>.

2010 年 7 月,分别在 NY、DS、ZY 和 WS 4 个湖区进行现场观测与样品采集. 利用带有有机玻璃管(直径 9 cm,长 80 cm)的无扰动柱状沉积物采样器,采集表层 20 cm 沉积物柱状样品,连同上覆水一起带回实验室,用于沉积物静态释放试验. 同时采集表层 20 cm 沉积物样品,带回实验室经风干、研磨、过 100 目筛后,用于沉积物本底营养盐含量检测. 每个湖区各设置 4 个采样点位,具体采样点位详见图 1.

2010 年 8 月,在南四湖的 WS 湖区设置 16 个采样点位(A、B、C……O、P),分别采集表层 5 cm 沉积物样品,带回实验室经风干、研磨、过 100 目筛后,用于  $\text{NH}_4^+$ -N 等温吸附试验,具体采样点位详见图 1.

### 1.2 实验方法

**沉积物组分** 沉积物 TP 采用  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HClO}_4$  消解-钼蓝比色法,OM 采用重铬酸钾氧化法,TN 采用开氏法,粒径采用库尔特激光粒度分析仪测试.

**静态释放** 用虹吸的方法将玻璃柱内上覆水抽出,置换为纯净水(水/沉积物的体积比为 4:1),25 °C 恒温,进行为期 1 个月的释放试验,每个点位设 3 个平行样. 分别于第 3、10、17、24 d 抽取释放柱上覆水,分析测试其  $\text{NH}_4^+$ -N(纳氏分光光度法)、TP(过硫酸钾消解-钼锑抗比色法)和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ (高锰酸钾法)<sup>[11]</sup>,静态释放试验装置见图 2.

2011 年 6 月 7 日收稿.

\* 国家重大科技专项(2009ZX07210-009);山东省环保厅项目(2060403)资助.

\*\* 通讯联系人, Tel:15866614511; E-mail:zhazhb@163.com

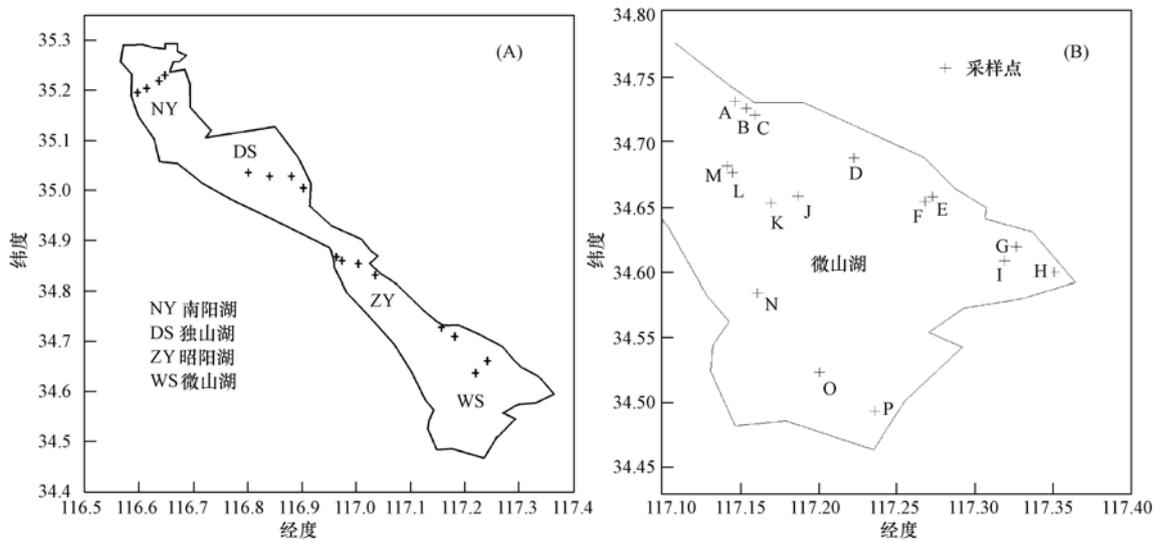


图 1 (A)南四湖采样点分布图;(B)微山湖区采样点位分布图

Fig. 1 (A) Sampling sites in Nansi Lake; (B) Sampling sites in Weishanhu area

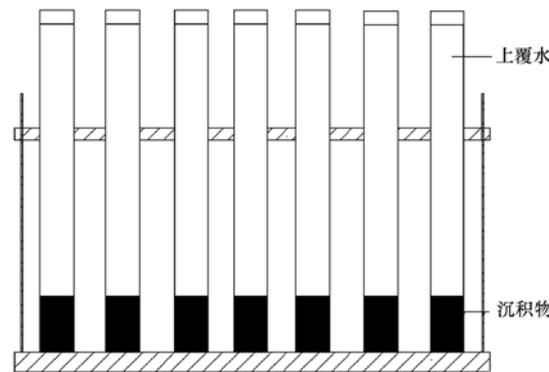


图 2 沉积物营养盐释放试验装置

Fig. 2 Test device for sediment nutrient release

吸附等温 称取 2g 沉积物样品,加入 11 个 250 mL 具塞三角瓶中,分别加入 0、0.5、1、2、5、10、20、30、60、90 和 120  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的氯化铵标准溶液 200 mL. 用  $0.01\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  HCl 调节 pH 值在 7—8. 将三角瓶置于  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$  恒温振荡器,以  $250\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  振荡 2 h 至吸附平衡,再以  $5000\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 15 min,上清液经  $0.45\ \mu\text{m}$  GF/C 滤膜过滤后检测  $\text{NH}_4^+$ -N 含量. 通过溶液初始浓度和平衡浓度差计算沉积物对  $\text{NH}_4^+$ -N 的吸附量.

在低浓度  $\text{NH}_4^+$ -N 范围内 ( $0\text{—}2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附等温曲线用公式(1)进行拟合.

$$Q = m C_{\text{eq}} - \omega_{\text{NAA}} \quad (1)$$

式中,  $C_{\text{eq}}$  是振荡 2 h 后溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 的浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $Q$  是沉积物吸附的  $\text{NH}_4^+$ -N 量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $m$  为斜率,  $\omega_{\text{NAA}}$  为本底吸附态  $\text{NH}_4^+$ -N 量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附-释放平衡浓度 ( $C_{\text{EAC}}$ ) 是用来判断沉积物吸附或释放  $\text{NH}_4^+$ -N 的重要参数. 当上覆水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度低于  $C_{\text{EAC}}$  时,本底吸附态  $\text{NH}_4^+$ -N 将从沉积物释放进入上覆水体;反之,沉积物会吸附上覆水体  $\text{NH}_4^+$ -N. 当  $Q$  趋于 0 时的  $C_{\text{eq}}$  即为  $C_{\text{EAC}}$ ,  $C_{\text{EAC}}$  可以通过回归曲线计算.

在高浓度  $\text{NH}_4^+$ -N 范围内 ( $5\text{—}120\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附等温曲线用公式 2 进行拟合.

$$C/Q = 1/(Q_{\text{max}}K) + C/Q_{\text{max}} \quad (2)$$

式中,  $C$  为振荡 2 h 后溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 平衡浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $Q$  是沉积物吸附的  $\text{NH}_4^+$ -N 量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $K$  是与结合能有关的常数,  $Q_{\text{max}}$  为  $\text{NH}_4^+$ -N 最大吸附容量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物组成及性状

南四湖沉积物主要理化性能指标如表 1 所示. 南四湖沉积物 TP、OM 和 TN 平均含量分别为  $670 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $48000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $3100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 沉积物粒径以粉粒为主, 其中昭阳湖沙粒含量相对较高, 并呈现黄褐色.

表 1 南四湖不同湖区沉积物主要理化特性

Table 1 Physio-chemical characteristics of sediments in Nansi Lake

	TP $/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	OM $/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	TN $/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	黏粒 $/\%$	粉粒 $/\%$	沙粒 $/\%$	颜色
NY	860	44800	3090	21	75	2	灰黑
DS	670	51600	3610	18	75	4	灰黑
ZY	670	35100	1550	15	71	12	黄褐
WS	550	58700	4090	18	75	5	灰黑
均值	670	48000	3100	—*	—*	—*	—*

注: \* 表示不便于用均值表示

### 2.2 沉积物 TP 释放

南四湖沉积物 TP 释放过程曲线如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 由于样品采集及运输过程中的动力扰动, 起初 3 d 内沉积物 TP 释放能力较强, 随后沉积物 TP 释放逐渐趋稳, 且其上覆水 TP 浓度总体上维持在  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右. 按照南水北调东线规划要求, 南四湖水质应满足地表水 III 类要求, 即 TP 小于  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 这说明南四湖底泥 TP 释放能力较弱, 将来对南水北调东线水质影响较小.

### 2.3 沉积物 OM 释放

南四湖沉积物 OM 释放过程曲线如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 各柱状样品的上覆水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  含量均呈现出先增加、后逐渐降低的趋势, 这可能是由于柱状样品柱内水环境相对封闭, 随着时间的延长, 上覆水中微生物数量增多, 其对上覆水体中有机物的分解氧化能力逐渐增强. 整个释放试验过程中, 各湖区沉积物柱状样的上覆水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度均小于  $6.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (地表水 III 类), 这表明南四湖底泥有机物释放对南水北调调水水质影响较小.

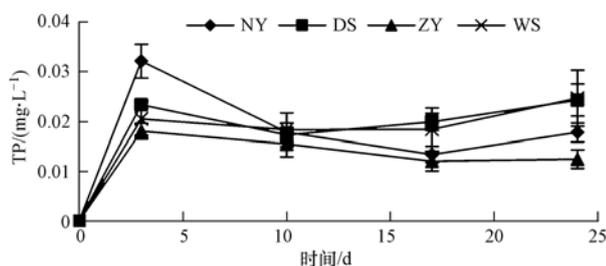


图 3 南四湖柱状沉积物上覆水 TP 含量变化

Fig. 3 Variations of TP in the overlying water at the core sediments of Nansi Lake

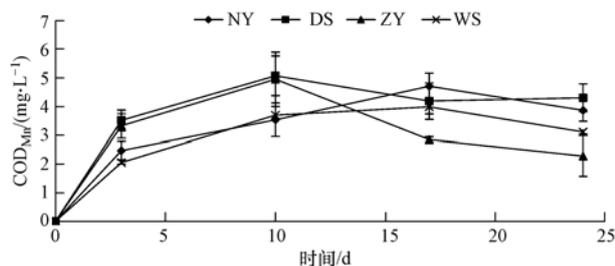


图 4 南四湖柱状沉积物上覆水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  含量变化

Fig. 4 Variations of organic matter in the overlying water at the core sediments of Nansi Lake

### 2.4 沉积物 $\text{NH}_4^+$ -N 释放

#### 2.4.1 各湖区 $\text{NH}_4^+$ -N 释放比较

南四湖各湖区沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 释放过程曲线如图 5 所示. 从图 5 中可以看出, NY、DS 和 ZY 湖区沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 释放在第 3 天达到峰值, 随后  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度逐渐下降至较低水平, 这可能是由于沉积物释放的  $\text{NH}_4^+$ -N 在微生物作用下逐渐被氧化成  $\text{NO}_3^-$ -N 所致. 与其它 3 个湖区相比, WS 湖区沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 释放能力较强, 上覆水  $\text{NH}_4^+$ -N 接近或超过  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (地表水 III 类), 这可能将对南水北调调水水质产生不利影响, 应引起足够重视.

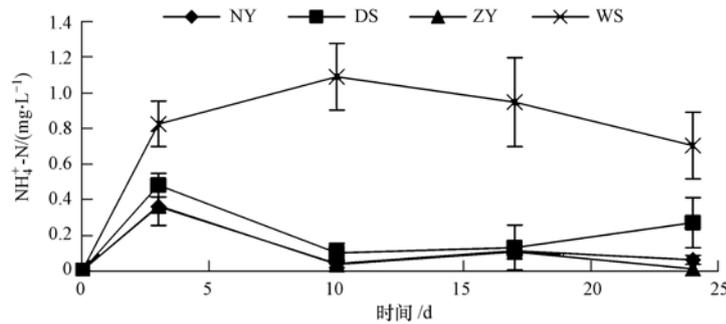


图5 南四湖柱状沉积物上覆水  $\text{NH}_4^+$ -N 含量变化

Fig. 5 Variations of  $\text{NH}_4^+$ -N in the overlying water at the core sediments of Nansi Lake

#### 2.4.2 微山湖区 $\text{NH}_4^+$ -N 释放能力

为深入了解 WS 湖区沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 释放对上覆水水质的影响,在该湖区采集了 16 个点位的沉积物,分析其  $\text{NH}_4^+$ -N 等温吸附性能,研究结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,WS 湖区不同区域的沉积物  $C_{\text{EAC}}$  差异较大( $0.41\text{--}2.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),均值为  $0.83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,这与王娟等人<sup>[12]</sup>对长江中下游浅水湖泊沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附特性研究结果比较相近(其  $C_{\text{EAC}}$  为  $0.60\text{--}2.77\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。当上覆水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度低于  $C_{\text{EAC}}$  时,本底吸附态  $\text{NH}_4^+$ -N 将从沉积物释放进入上覆水体;反之,沉积物会吸附上覆水体  $\text{NH}_4^+$ -N。

WS 湖区沉积物  $C_{\text{EAC}}$  呈现从湖岸至湖心逐渐增加的趋势,不同区域沉积物的  $\text{NH}_4^+$ -N 最大吸附容量 ( $Q_{\text{max}}$ ) 呈现从湖岸至湖心逐渐递减的趋势(图 7),这均表明,靠近微山湖湖心区的底泥  $\text{NH}_4^+$ -N 释放能力较强。根据南水北调东线规划要求,南四湖水体  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度应小于  $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (地表水 III 类),据此计算,靠近 WS 湖区中心位置约 1/5 区域的沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 释放能力较强,将对南水北调调水水质产生不利影响。

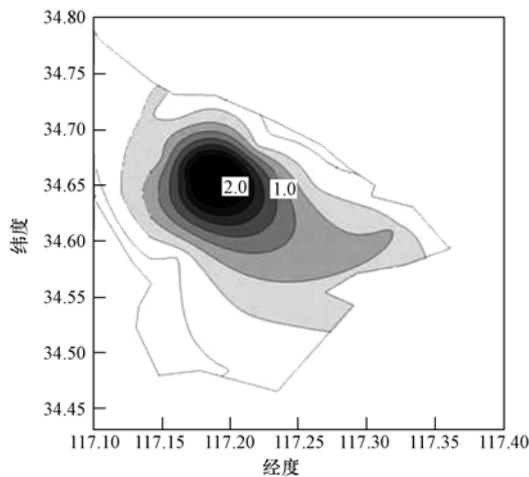


图6 微山湖区表层沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附/解吸平衡浓度 ( $C_{\text{EAC}}$ ,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 分布

Fig. 6 Distributions of sedimentary  $\text{NH}_4^+$ -N adsorption/desorption concentrations ( $C_{\text{EAC}}$ ,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) in Weishan Lake

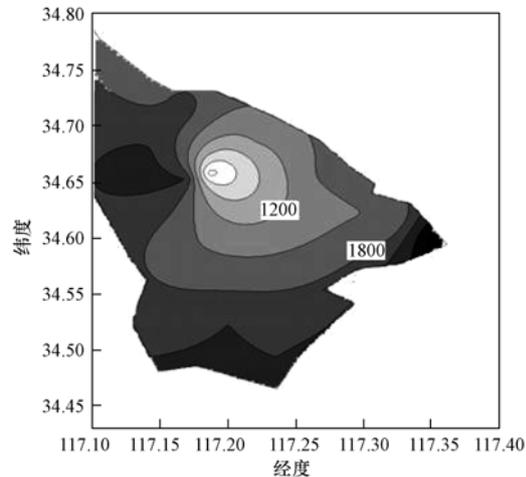


图7 微山湖区表层沉积物  $\text{NH}_4^+$ -N 最大吸附容量 ( $Q_{\text{max}}$ ,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 分布图

Fig. 7 Distributions of sedimentary  $\text{NH}_4^+$ -N maximum adsorption capacity ( $Q_{\text{max}}$ ,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) in Weishan Lake

### 3 结论

(1) 南四湖沉积物静态释放试验表明,沉积物 TP 和 OM 释放基本不会对南水北调东线调水水质产生不利影响;NY、DS 和 ZY 湖区的底泥  $\text{NH}_4^+$ -N 释放较弱,而 WS 湖区  $\text{NH}_4^+$ -N 释放能力较强。

(2) WS 湖区  $\text{NH}_4^+$ -N 等温吸附试验表明,湖心区  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附/解吸平衡浓度高于  $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (调水

后水质)的区域约占 1/5 的 WS 湖区面积,该区域的底泥  $\text{NH}_4^+$ -N 释放将对调水水质产生不利影响,应引起重视.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Mark F, Geoffrey E, Michael R. Desorption kinetics of ammonium and methylamines from estuarine sediments; Consequences for the cycling of nitrogen[J]. *Marine Chemistry*, 2006, 101:12-26
- [ 2 ] Jiang X, Jin X C, Yao Y. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China[J]. *Water Research*, 2008, 42(8/9): 2251-2259
- [ 3 ] Ahlgren J, Reitzel K, Brabandere H De. Release of organic P forms from lake sediments[J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 565-572
- [ 4 ] Fan J Y, Wang D Z, Zhang K. Experimental study on a dynamic contaminant release into overlying water-body across sediment-water interface[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2010, 22(5): 354-357
- [ 5 ] Yumee N, Sookyun W, Seok S P. A mathematical model to estimate nitrate release from ocher pellets applied to anaerobic benthic sediment [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 199(3): 324-335
- [ 6 ] An W C, Li X M. Phosphate adsorption characteristics at the sediment-water interface and phosphorus fractions in Nansi Lake, China, and its main inflow rivers[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 148: 173-184
- [ 7 ] 周来, 冯启言, 王华. 南四湖表层底泥磷的化学形态及其释放规律[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(6): 37-39
- [ 8 ] 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]. *水科学与工程学报*, 2006, 6: 36-38
- [ 9 ] 李高金, 周杰. 环境因子对南四湖沉积物中磷释放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 653-656
- [ 10 ] 刘恩峰, 沈吉, 杨丽原. 南四湖及主要入湖河流沉积物中磷的赋存形态研究[J]. *地球化学*, 2008, 37(3): 290-296
- [ 11 ] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002: 210-284
- [ 12 ] 王娟, 王圣瑞, 金相灿. 长江中下游浅水湖泊表层沉积物对氨氮的吸附特征[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1224-1229

## Nutrient release characteristics from the sediments in Nansi Lake

ZHANG Zhibin<sup>1</sup> WEI Leilei<sup>1,2</sup> GAO Baoyu<sup>3</sup> LI Yi<sup>1</sup> LU Yufeng<sup>1</sup>

(1. College of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101, China; 2. Guangda Waterworks (Jinan) Co., Ltd., Jinan, 250032, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan, 250100, China)

### ABSTRACT

This paper aimed to study the release of  $\text{NH}_4^+$ -N, TP and organic matter(OM) from sediments in Nansi Lake. The adsorption characteristics of nitrogen onto the sediments from 16 sampling sites in Weishanhu area was also investigated in order to further evaluate the  $\text{NH}_4^+$ -N release potential. The experimental results showed that the potential of TP and OM release was not significant, and would not influence the overlying water quality in Nansi Lake. Samples from Weishanhu area showed strong  $\text{NH}_4^+$ -N release potential from sediment, and about 1/5 of the whole Weishanhu area sediment might have adverse effect on South-to-North Water Diversion Project(east route). In these areas, the  $\text{NH}_4^+$ -N adsorption/desorption equilibrium concentration is more than  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , which is the water quality standard for the South-to-North Water Diversion Project(east route).

**Keywords:** sediment, nutrient, release, Nansi Lake, Weishanhu district.