

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.006

里下河地区代表性浅水湖泊表层沉积物 可转化态氮的赋存特征

燕文明^{1,2}, 刘凌^{1,2}, 周利³, 梁朝荣², 黄列², 张志浩²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 3. 盐城市水利勘测设计研究院, 江苏盐城 224002)

摘要:以受人类活动影响剧烈的小型富营养化湖泊为研究对象,研究湖泊表层沉积物可转化态氮的赋存特征,探索环境因子与各形态可转化态氮之间的关系。结果表明:①4个湖泊表层沉积物中各形态可转化态氮质量比次序为强氧化剂可提取态氮(SOEF-N)>离子交换态氮(IEF-N)>弱酸提取态氮(WAEF-N)>强碱可浸取态氮(SAEF-N);② $w(\text{IEF-N})$ 与黏粒、壤粒、砂粒、 $w(\text{Ca})$ 呈显著的相关性; $w(\text{WAEF-N})$ 与含水率、 $w(\text{有机质})$ 、 $w(\text{TP})$ 、 $w(\text{Ca})$ 、 $w(\text{Zn})$ 呈显著相关性; $w(\text{SOEF-N})$ 与黏粒、 $w(\text{有机质})$ 、 $w(\text{TOC})$ 、 $w(\text{NH}_4^+)$ 、 $w(\text{Mn})$ 呈显著的相关性; $w(\text{SAEF-N})$ 仅与 $w(\text{TP})$ 和 $w(\text{Ca})$ 存在一定的相关性。③受人类活动影响较大的湖泊 $w(\text{IEF-N})$ 和所占TN百分比最高;表层沉积物中的 $w(\text{WAEF-N})$ 与 $w(\text{有机质})$ 多寡一致。

关键词:里下河地区;浅水湖泊;表层沉积物;可转化态氮;赋存特征

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)05-0030-05

Occurrence characteristic of transferable nitrogen forms in sediments on surface of representative shallow lakes of Lixiahe Region

YAN Wenming^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, ZHOU Li³, LIANG Chaorong², HUANG Lie², ZHANG Zhihao²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Water Conservancy Survey and Design Institute of Yancheng City, Yancheng 224002, China)

Abstract: Taking the small eutrophic lake, which is seriously affected by human activities, as the research object, the occurrence characteristic of transferable nitrogen forms in the sediments on the surface of the lake is studied and the relationship between environmental factors and various forms of transferable nitrogen is explored. The results indicate that: (1) the distribution order of various nitrogen in the four sediments samples from the lake surface was SOEF-N> IEF-N> WAEF-N> SAEF-N; (2) There is obvious relevance between $w(\text{IEF-N})$ and clay, soil, sand and $w(\text{Ca})$; There is obvious relevance between $w(\text{WAEF-N})$ and moisture content, organic matter, $w(\text{TP})$, $w(\text{Ca})$ and $w(\text{Zn})$; There is obvious relevance between $w(\text{SOEF-N})$ and clay, organic matter, $w(\text{TOC})$, $w(\text{NH}_4^+)$ and $w(\text{Mn})$; There is only certain relevance between $w(\text{SAEF-N})$ and $w(\text{TP})$ and $w(\text{Ca})$. (3) $w(\text{IEF-N})$ hold the dominance percentage in TN in big lakes significantly affected by human activity; while the content of WAEF-N is consistent with the amount of organic matter content in the surface sediments.

Key words: Lixiahe region; shallow lake; surface sediment; transferable nitrogen; occurrence characteristic

氮是湖泊生态系统中初级生产力的限制性生源要素之一。氮肥的广泛和过量施用、生活污水和动

物粪便的大量排放以及长期的围网养殖,导致湖泊沉积物表面富含氮污染物,引起湖泊生态系统水体

功能减退^[1-3]。沉积物中的氮可以分为可转化态氮和非可转化态氮2种形态,其中,可转化态氮较为活跃,易在沉积物-水界面间发生迁移转化。马红波等^[4]和王圣瑞等^[5]将改进的 Ruttensberg 法应用于可转化态氮的连续分级浸取中。不同湖泊各形态可转化态氮的质量比、分布以及对富营养化的贡献不同^[2, 6-7]。马红波等^[4]的研究指出,各形态可转化态氮对界面循环的贡献大小为强氧化剂可提取态氮(SOEF-N)>离子交换态氮(IEF-N)>强碱可浸取态氮(SAEF-N)>弱酸提取态氮(WAEF-N)。李辉^[8]指出,滇池沉积物中4种可转化态氮的质量比大小顺序依次为 SOEF-N>WAEF-N>SAEF-N>IEF-N;WAEF-N是TN中对富营养化贡献最大的形态。东昌湖表层沉积物不同形态可转化态氮的释放顺序为:IEF-N>WAEF-N>SAEF-N>SOEF-N^[9]。沉积物中各形态可转化态氮的质量比和分布受到了底质物理性状、粒径大小、氧化还原条件等环境因素的影响,需要进一步的详细研究。

1 研究区概况与试验方法

1.1 研究区概况

研究区域地处里下河腹部区,位于淮河中下游,区内沟、河、湖荡面积众多。由于围湖造田、围湖养殖,湖荡面积大举缩小,50年间里下河地区的湖荡面积缩小了近20倍。本文选择该地区的蜈蚣湖、得胜湖、九龙口和大纵湖4个不同污染物来源的典型湖泊为研究对象(图1)。得胜湖和蜈蚣湖为河道型湖泊,湖泊环境主要受周边生活污染、畜禽养殖污染的影响;大纵湖为草型湖泊,存在围网养殖现象;九龙口为景观性湖泊,采样前该湖泊刚经过疏浚。

1.2 采样点布设

在4个湖泊中共布设8个采样点(图1),原位采集沉积物柱状样。由于蜈蚣湖和得胜湖为河道型湖泊,水面面积较小,分别在2个湖泊的湖心区布设1个采样点WG和DS。WG水深约2m,有较多近似腐烂的沉水植物的茎叶;DS水深约3.5m,湖面被围隔养殖,周边有味精厂、化肥厂、采沙场等,潜在污染源较多。在九龙口布设3个采样点,JLK1位于南部入湖口,水深1.5m,上游区域主要为渔业养殖和家畜类养殖;JLK3位于北部入湖口,水深2.5m;JLK4位于湖心,水深约3m,底泥较硬。在大纵湖布设了3个采样点,DZ位于北部的蟒蛇河出口,水深约2.1m,围网养殖严重;DZ3位于南部中庄河入口,水深约1.2m,挖螺作业严重;DZ5位于湖心区,水深约1m,水体清澈,浮萍、菱角类植物密布,表层底泥中黑色物质层较厚。

1.3 样品采集与试验方法

将沉积物样放入-80℃超低温冰箱(DW-HL388,中国中科美菱)预冷3h后,置于冻干机(ALPHA 1-2,德国CHRIST)中冻干,碾磨过100目筛,然后4℃保存。沉积物分析参照《土壤农业化学分析方法》^[10],含水率、烧失量、孔隙度、颗粒粒径以及 NH_4^+ 和 NO_3^- 的测定用新鲜土样,其他指标用冻干过筛后的土样。含水率、孔隙度、烧失量(LOI)采用烘干法^[11]测定,总有机碳(TOC)采用元素分析仪(EA 4000, Jena, Germany)测定,土壤粒径采用激光粒度仪(LS13320, Beckman Coulter, USA)测定, TN采用半微量-开氏消煮、流动注射分析法(Skalar SAN⁺⁺, SKALAR, Netherlands)测定, NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、TP、 PO_4^{3-} 采用流动注射分析法(Skalar SAN⁺⁺, SKALAR, Netherlands)测定。沉积物中部分重金属

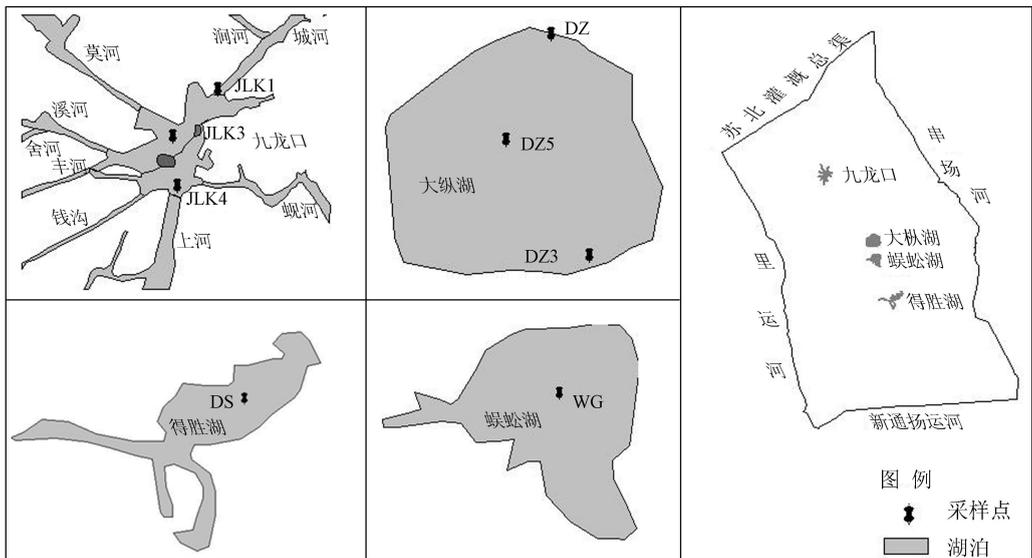


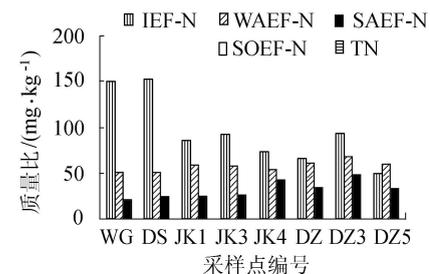
图1 研究区典型湖泊位置与采样点布设示意图

采用消解后的滤液用 ICP (ICP6300, ThermoFisher, USA) 测定^[12], 可转化态氮采用王圣瑞^[13] 改进的 Ruttenberg 法测定。

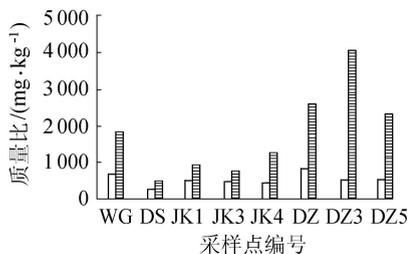
2 结果与讨论

2.1 沉积物中可转化态氮的分布特征

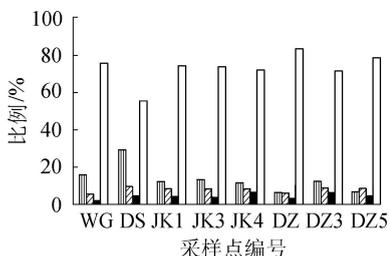
沉积物中可转化态氮的质量比可以反映沉积物中能参与沉积物-水界面氮循环的最大量值。8 个采样点处表层沉积物的各形态可转化态氮质量比及其所占比例如图 2 所示。各形态可转化态氮中 IEF-N 和 SOEF-N 是总可转化态氮的主要组成部分, 其在沉积物中的质量比分别在 49.4 ~ 152.8 mg/kg (平均值为 95.2 mg/kg) 和 289.6 ~ 840.9 mg/kg (平均值为 545.0 mg/kg) 之间变化, 分别占总量的 6.62% ~ 29.44% (平均值为 13.8%) 和 55.83% ~ 83.75% (平均值为 73.4%)。而沉积物中 WAEF-N 和 SAEF-N 的质量比分别在 51.3 ~ 68.2 mg/kg (平均值为 58.2 mg/kg) 和 22.2 ~ 49.1 mg/kg (平均值为 32.7 mg/kg) 之间变化, 分别占总量的 5.63% ~ 9.89% (平均值为 8.2%) 和 2.41% ~ 6.91% (平均值为 4.6%)。沉积物中各形态可转化态氮的质量比分布次序为 SOEF-N > IEF-N > WAEF-N > SAEF-N。



(a) IEF-N、WAEF-N、SAEF-N 质量比



(b) SOEF-N、TN 质量比



(c) 各形态可转化态氮占总氮的比例

图 2 表层沉积物中各形态可转化态氮的分布特征

由图 2 可知, DS 采样点的 IEF-N 质量比最高, 达到 152.8 mg/kg, 该采样点位于得胜湖的主航道上, 虽然采样点附近围网较少, 但其养殖污染、农业面源污染、工业污染较为严重, 人为扰动强烈, 进而加快了 IEF-N 在沉积物-水界面间的交换, 而使其质量比较高。WG 采样点沉积物中的 $w(\text{IEF-N})$ 仅次于采样点 DS, 达到 150.1 mg/kg, 采样时发现该采样点沉积物表层有较多的沉水植物茎叶, 有机质质量比较高, 而有机质质量比高的沉积物中存在较多的可吸附点位^[12], 因此有较多的 IEF-N 被吸附。DZ3 采样点的 $w(\text{IEF-N})$ 也较高, 为 93.2 mg/kg, 这是因为该采样点具有较大的水生生物量, 生物的腐烂增加了 TN, 挖螺作业的扰动增加了 IEF-N。IEF-N 百分比最高值出现在 TN 质量比最小的 DS 采样点, DS 采样点周边含氮的工厂废水、养殖废水和生活污水的注入, 使得氮污染物吸附在沉积物的表层, 加上采样点位于得胜湖的主航道, 人为扰动强烈, 加快了 IEF-N 在沉积物-水界面的迁移转化, 增加了表层沉积物中的 IEF-N 质量比。而 WAEF-N、SAEF-N 和 SOEF-N 这 3 种形态的可转化态氮较为稳定, 其中, SOEF-N 主要为有机结合形式的氮, 是可转化态氮的主要赋存形式, 是表层沉积物可转化态氮中质量比最高的部分。由图 2(c) 可见, 各采样点的 SOEF-N 质量比均较高, 占总可转化态氮的 50% 以上。

2.2 沉积物中可转化态氮与环境因子相关性分析

不同的沉积环境, 各形态可转化态氮的质量比和分布不同, 各形态可转化态氮之间的相关关系见表 1。

表 1 沉积物中可转化态氮之间的相关关系 ($n=8$)

	IEF-N	WAEF-N	SAEF-N	SOEF-N	TN
IEF-N	1				
WAEF-N	-0.597 *	1			
SAEF-N	-0.537 *	0.667 **	1		
SOEF-N	-0.281	0.3	0.052	1	
TN	-0.334	0.764 **	0.716 **	0.506 *	1

注: * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$ 。

不同形态可转化态氮之间存在一定的相关性, 影响着不同形态氮的分布。由表 1 可知, 各形态的可转化态氮与 TN 之间存在着相关性, 尤其是 WAEF-N、SAEF-N 均与 TN 间呈显著的正相关, 表明它们可能具有相似的来源。SOEF-N 与 TN 之间存在着正相关关系, 表明沉积物中的氮主要是以有机形态存在。王梅等^[7] 对城市内河表层沉积物氮形态的研究表明, IEF-N 与 TN 呈极显著相关。本文研究发现, IEF-N 与 TN 之间的相关性较差, 这是因为 IEF-N 除了受沉积物中有机质和 pH 的影响外, 还受到了上覆水环境因素的影响, 8 个采样点表层

沉积物中的有机质质量比差别较大,使得不同沉积物中的沉积物氮的吸附点位不同,引起了吸附能力和吸附容量差异,进而导致了对 IEF-N 吸附的差异。这也说明了沉积物中 TN 质量比高的区域对上覆水体存在的污染潜力不一定大。IEF-N 与 WAEF-N、SAEF-N 呈负相关。IEF-N 与 SOEF-N 不存在相关性,这是因为污染较严重的湖泊其沉积物的营养水平也会较高,而 IEF-N 在沉积物-水界面交换过程中起着重要的作用;同时,WAEF-N、SAEF-N 和 SOEF-N 这 3 种形态可转化态氮之间存在相互转化。王梅等^[7]指出较强的矿化作用和微生物作用使得 WAEF-N 转化为 SOEF-N 的趋势变得明显。

为了研究沉积物中各形态可转化态氮与环境条件之间的相互关系,应用 SPSS 17 分析了 8 个采样点表层沉积物中各形态可转化态氮与粒径分布、有机质、可交换态氮、金属质量比之间的相关性,见表 2。

8 个采样点表层沉积物中 $w(\text{TN})$ 与黏粒呈显著的负相关,与孔隙度、含水率、 $w(\text{有机质})$ 、 $w(\text{TOC})$ 、 $w(\text{TP})$ 、 $w(\text{PO}_4^{3-})$ 、 $w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Mg})$ 、 $w(\text{Mn})$ 呈显著正相关。沉积物中的氮释放量大小直接影响着上覆水中氮素质量比,而不同形态的可转化态氮对上覆水中的氮素贡献不同,其释放量与形态和质量比有关。在 4 种形态可转化态氮中,IEF-N 吸附能力最弱,最容易释放,同样的物理化学条件下,IEF-N 容易在外界扰动的情况下释放出来参与湖泊的生物地球化学循环中的氮循环过程^[5],在此过程中受到多种因素的影响。从表 2 可以看出, $w(\text{IEF-N})$ 与黏粒、壤粒呈现显著的正相关关系,与砂粒呈现显著的负相关

关系,粒径越小其吸附的表面积越大,对 IEF-N 的吸附量越大。IEF-N 在沉积物-水界面交换过程中起着主要作用,受到 $w(\text{Ca})$ 影响较大, $w(\text{Ca})$ 越大,表层沉积物中的 $w(\text{IEF-N})$ 越低。沉积物中 IEF-N 通过扩散作用进入水体,影响水质环境。因此,在控制外源氮输入的同时,也要重视沉积物内源可转化态氮的释放及其对水体环境的影响。

从表 2 可以看出,WAEF-N 是可转化态氮中质量比较低的形态,其结合能力较弱,相当于碳酸盐的结合能力,稍高于 IEF-N。 $w(\text{WAEF-N})$ 与表层沉积物中含水率、 $w(\text{有机质})$ 、 $w(\text{TP})$ 、 $w(\text{Ca})$ 、 $w(\text{Zn})$ 呈显著相关关系。另外,由于有机质的矿化过程会生成酸性物质,导致可交换态氮与碳酸盐结合形成 WAEF-N^[14],增加了表层沉积物中的 WAEF-N。

SAEF-N 主要为铁锰氧化物吸附的氮,结合能力的大小与铁锰氧化物的结合能力相近,比 WAEF-N 的结合能力略高。从表 2 可以看出 $w(\text{SAEF-N})$ 与 $w(\text{Fe})$ 、 $w(\text{Mn})$ 之间并不存在明显的相关关系,这可能是因为随着有机质质量比的增加,竞争绑定位点相应增加,进而导致沉积物 $w(\text{SAEF-N})$ 降低。SAEF-N 与环境因子的相关性较差,在 19 个环境因子中,仅与 $w(\text{TP})$ 和 $w(\text{Ca})$ 存在一定的相关性,说明 SAEF-N 的形成与自然条件、人类活动、污染源的远近和多寡等多种因素有关。因此,所采集的沉积物中 SAEF-N 的质量比不稳定,质量比变化并无规律,有待进一步研究。

SOEF-N 是有机氮和硫化物相结合态氮, $w(\text{SOEF-N})$ 与粒径分布、 $w(\text{有机质})$ 、 $w(\text{TOC})$ 、

表 2 沉积物中可转化态氮与环境条件相关性

	$w(\text{TN})/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{IEF-N})/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{WAEF-N})/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{SAEF-N})/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{SOEF-N})/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
黏粒	-0.710 **	0.794 **	-0.788 **	-0.462	-0.607 **
壤粒	-0.372	0.897 **	-0.682 **	-0.448	-0.113
砂粒	0.460	-0.904 **	0.729 **	0.467	0.227
孔隙度	0.714 **	0.020	0.409	0.183	0.256
含水率	0.820 **	-0.011	0.505 *	0.241	0.536 *
$w(\text{有机质})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.916 **	-0.172	0.553 *	0.474	0.677 **
$w(\text{TOC})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.893 **	-0.336	0.595 *	0.464	0.703 **
$w(\text{NO}_3^-)/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.342	0.606 **	-0.255	-0.326	-0.597 *
$w(\text{NO}_2^-)/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.115	0.571 *	-0.179	-0.415	-0.161
$w(\text{NH}_4^+)/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.587 *	0	0.135	0.062	0.759 **
$w(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.874 **	0.025	0.550 *	0.492 *	0.261
$w(\text{PO}_4^{3-})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.743 **	0.252	0.484	0.359	0.182
$w(\text{Al})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.622 **	0.358	0.042	0.186	0.252
$w(\text{Ca})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.226	-0.998 **	0.995 **	0.706 **	0.003
$w(\text{Cu})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.144	0.832 **	-0.305	-0.373	0.140
$w(\text{Fe})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.387	0.643 **	-0.173	-0.111	0.203
$w(\text{Mg})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.604 **	0.392	0.163	0.122	0.147
$w(\text{Mn})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.738 **	0.366	0.253	0.272	0.614 **
$w(\text{Zn})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.140	0.875 **	-0.638 **	-0.552 *	0.199

注: * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$ 。

$w(\text{NH}_4^+)$ 、 $w(\text{Mn})$ 呈显著的相关关系。粒径越小, $w(\text{SOEF-N})$ 越小, 这与吕晓霞等^[15]对海洋沉积物中的研究结果相反, 可能是因为盐度的差异导致了黏粒对 SOEF-N 的吸附能力的差异。

3 结 论

4 个湖泊表层沉积物各形态可转化态氮质量比分布次序为 SOEF-N > IEF-N > WAEF-N > SAEF-N。 $w(\text{WAEF-N})$ 与表层沉积物中含水率、 $w(\text{有机质})$ 、 $w(\text{TP})$ 、 $w(\text{Ca})$ 、 $w(\text{Zn})$ 呈显著相关。 $w(\text{SOEF-N})$ 与沉积物的粒径分布、 $w(\text{有机质})$ 、 $w(\text{TOC})$ 、 $w(\text{NH}_4^+)$ 、 $w(\text{Mn})$ 呈显著相关关系。 $w(\text{IEF-N})$ 与沉积物的粒径分布、 $w(\text{Ca})$ 呈显著相关, 粒径越小, 对 IEF-N 的吸附量越大; $w(\text{Ca})$ 越大, $w(\text{IEF-N})$ 越低。 $w(\text{SAEF-N})$ 与环境因子的相关性较差, 说明 SAEF-N 的形成与自然条件、人类活动、污染源的远近和多寡等多种因素有关。污染较为严重的表层底泥 $w(\text{IEF-N})$ 最高, IEF-N 所占 TN 比例的最高值则出现在 $w(\text{TN})$ 最小的采样点处; $w(\text{有机质})$ 较高的采样点表层沉积物中的 $w(\text{WAEF-N})$ 也较高; 沉积物中 SAEF-N 的质量比变化并无规律。

参考文献:

[1] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 2010 年洱海全湖氮负荷时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 389-395. (ZHAO Haichao, WANG Shengrui, JIAO Lixin, et al. Characteristics of temporal and special distribution of nitrogen loading in Erhai Lake in 2010[J]. Research of Environment Sciences, 2013, 26(4): 389-395. (in Chinese))

[2] 沙茜, 何君, 张维昊, 等. 不同类型湖泊沉积物中氮释放规律研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(4): 89-91. (SHA Qian, HE Jun, ZHANG Weihao, et al. Nitrogen release from sediments in different types of urban lakes[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(4): 89-91. (in Chinese))

[3] 杨洪美. 南四湖表层沉积物中氮形态及吸附释放研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.

[4] 马红波, 宋金明, 吕晓霞, 等. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 48-54. (MA Hongbo, SONG Jinming, LYU Xiaoxia, et al. Nitrogen forms and their functions in recycling of the Bohai Sea sediments[J]. Geochimica, 2003, 32(1): 48-54. (in Chinese))

[5] 王圣瑞, 金相灿, 焦立新. 不同污染程度湖泊沉积物中不同粒级可转化态氮分布[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 52-57. (WANG Shengrui, JIN Xiangcan, JIAO Lixin. Distribution of transferable nitrogen in different

grain size from the different trophic leve lake sediments [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(3): 52-57. (in Chinese))

[6] 马久远, 王国祥, 李振国, 等. 太滷南运河入湖河口沉积物氮素分布特征[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 577-584. (MA Jiuyuan, WANG Guoxiang, LI Zhenguo, et al. Distribution of nitrogen in the sediment of Tame South River Estuary[J]. Environmental Science. 2014, 35(2): 577-584. (in Chinese))

[7] 王梅, 刘琰, 郑丙辉, 等. 城市内河表层沉积物氮形态及影响因素: 以许昌清潨河为例[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 720-726. (WANG Mei, LIU Yan, ZHENG Binghui, et al. Nitrogen forms in surface sediments of urban river and their influence factors: a case study of Qingyi River in Xuchang City[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 720-726. (in Chinese))

[8] 李辉. 滇池柱状沉积物中氮赋存形态及其分布特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.

[9] 张亚楠, 马启敏, 岳宗恺, 等. 东昌湖表层沉积物中氮的赋存形态[J]. 环境化学, 2013, 32(3): 459-465. (ZHANG Yanan, MA Qimin, YUE Zongkai, et al. Study of nitrogen forms in the sediments from Dongchang Lake [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(3): 459-465. (in Chinese))

[10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[11] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 34-38. (QIAN Bao, LIU Ling, XIAO Xiao. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(1): 34-38. (in Chinese))

[12] 赵大勇, 马婷, 曾巾, 等. 南京玄武湖富营养化及重金属污染现状[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 83-87. (ZHAO Dayong, MA Ting, ZENG Jin, et al. Study on eutrophication and heavy metal pollution of Xuanwu Lake [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(1): 83-87. (in Chinese))

[13] 王圣瑞. 湖泊沉积物-水界面过程氮磷生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[14] KEMP A L W. Organic carbon and nitrogen in the surface sediments of Lakes Ontario [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1971, 41(2): 537-548.

[15] 吕晓霞, 宋金明, 袁华茂, 等. 南黄海表层不同粒级沉积物中氮的地球化学特征[J]. 海洋学报: 中文版, 2005, 27(1): 64-69. (LYU Xiaoxia, SONG Jinming, YUAN Huamao, et al. Geochemical characteristics of nitrogen in different grain size sediment from the southern Huanghai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(1): 64-69. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-12-19 编辑: 刘晓艳)