

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.02.009

# 宜兴三沱沉积物氮形态分布及其影响因素

邹民虎, 连斌, 王晓昌, 贺拓

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了解宜兴三沱(西沱、东沱和团沱)沉积物氮形态分布及其影响因素,采用连续分级提取法对三沱12个采样点表层沉积物样品中各种形态氮含量进行测定,探讨了不同形态氮的空间分布特征及影响因素。结果表明:总氮的空间分布与沉积物有机质分布存在明显的一致性,团沱含量较高,东、西沱含量较低且基本持平;可转化态氮含量占总氮的59.5%,对水体潜在危害较大,空间分布呈现出西沱最大、东沱次之、团沱最低的趋势;可转化态氮中4种形态氮含量大小顺序为弱酸可提取态氮、离子交换态氮、强碱可提取态氮、强氧化剂可提取态氮,弱酸可提取态氮为可转化态氮的优势形态;沉积物有机质与总氮和强氧化剂可提取态氮呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),pH值与总氮呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );上覆水总氮与离子交换态氮呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与可转化态氮呈显著正相关关系( $P < 0.05$ )。

**关键词:** 沉积物;氮形态;有机质;西沱;东沱;团沱;宜兴

**中图分类号:** X524      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2019)02-0054-06

**Nitrogen forms in sediments and their influence factors of Sanjiu Lakes in Yixing City** // ZOU Minhu, LIAN Bin, WANG Xiaochang, HE Tuo (*School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*)

**Abstract:** In order to gain a clear idea of the distribution and influencing factors of nitrogen forms in sediments of Xijiu, Dongjiu and Tuanjiu in Yixin, the sequential extraction technique is adopted to determine the contents of various forms of nitrogen in surface sediment samples of 12 sampling points in Sanjiu. The results show that the spatial distribution of total nitrogen is obviously consistent with that of organic matter in sediments. The contents of total nitrogen in Tuanjiu is higher than that in Dongjiu and Xijiu, where the contents of total nitrogen is basically the same. The content of transformable nitrogen accounts for 59.5% of the total nitrogen, which has great potential harm to the water body. The spatial distribution of transformable nitrogen shows the trend of the largest in Xijiu, the second in the Dongjiu and the lowest in Tuanjiu. The order from big to small of contents of four forms of nitrogen in transformable nitrogen is as follows: weak acid extractable nitrogen, ion exchange nitrogen, strong alkali extractable nitrogen, strong oxidant extractable nitrogen. Weak acid extractable nitrogen is the dominant form of transformable nitrogen. The organic matter in sediments has a very significant positive correlation with total nitrogen and extractable nitrogen of strong oxidant ( $P < 0.01$ ). There was a significant negative correlation between pH value and total nitrogen. The total nitrogen in overlying water has a very significant positive correlation with the ion-exchanged nitrogen ( $P < 0.01$ ), while having a significant positive correlation with transformable nitrogen ( $P < 0.05$ ).

**Key words:** sediments; nitrogen forms; organic matter; Xijiu; Dongjiu; Tuanjiu; Yixing City

氮是水体中藻类生长的限制性因子<sup>[1]</sup>,氮素的增加是引起水体富营养化的主要因素之一。沉积物是水体氮重要的来源与归宿,水体中的氮素不仅可以进行硝化反硝化反应,还可以通过沉降、扩散等物

理过程储存在沉积物中,成为湖泊内源性氮,在沉积物中发生一系列氧化还原过程,当水体环境条件发生改变时又会向水体中释放<sup>[2-4]</sup>。然而,并非所有形态的氮都能参与沉积物-水界面的循环,能够参与循

基金项目:国家水污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07315002)

作者简介:邹民虎(1992—),男,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。E-mail:295681183@qq.com

通信作者:王晓昌,教授。E-mail:xewang@xauat.edu.cn

环的生物可利用氮的含量取决于氮的赋存形态<sup>[5]</sup>。以往关于氮赋存形态的研究往往集中在总氮(TN),然而这并不能深入阐明沉积物氮的生物和生态学机理<sup>[6]</sup>。沉积物氮可分成可转化态氮(TTN)和非转化态氮(NTN)两大类,只有附着于沉积物颗粒表面或结合能力较弱的 TTN 才能参与沉积物-水界面的循环<sup>[7-8]</sup>。连续分级提取法是利用不同提取剂分离测定沉积物不同结合强度 TTN 的常用分析方法,利用此方法定量研究沉积物的 TTN,探讨其分布规律及其与环境因子的相关关系是研究沉积物-水界面循环的有效途径。

太湖是我国长期以来重点治理的大型内陆湖泊,以往关于太湖上游沉积物氮形态的相关研究较为欠缺,实际上,上游汇水区水系沉积物氮的理化性质、赋存形态和空间分布对分析太湖水体氮素的来源、河流水系输送氮素的过程和能力具有重要的指示作用<sup>[9]</sup>。宜兴三汊(西汊、团汊、东汊)位于太湖上游,是太湖流域西部河流入太湖的汇水区,其沉积物氮形态的研究对于太湖入湖污染负荷减排具有重要的价值。基于此,本文利用沉积物氮的连续分级提取法对宜兴三汊 12 个采样点表层沉积物中各种形态氮进行分析测定,探讨沉积物中各种形态氮的空间分布特征及其影响因素,以期为宜兴市及太湖的水体治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

根据现场条件和研究需要,在宜兴三汊的重要水质断面以及重点污染源汇入口处共设置 12 个采样点,西汊、团汊、东汊各 4 个采样点,如图 1 所示。

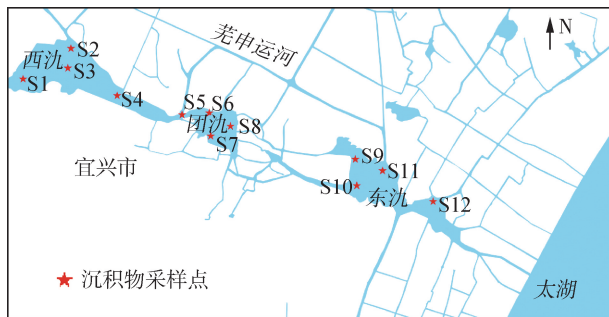


图 1 宜兴三汊沉积物采样点示意图

于 2016 年 12 月分别在 12 个采样点用沉积物柱状采样器采集 0~5 cm 的表层沉积物,现场用黑色聚乙烯袋密封,并置于冷冻箱中。同时,在相同取样点水底以上 50 cm 采集上覆水水样。运回实验室后,样品于阴凉通风处自然风干,用研钵轻轻捣碎并过筛(100 目),然后置于棕色玻璃瓶中(4℃)保存备用。水样在 24 h 内用于各项指标的测定。

### 1.2 样品测定与分析

水样测定指标包括 TN、总磷(TP)、pH 值、溶解氧(DO)、电导率、水温、悬浮物,均参照《水和废水监测方法》(第四版)<sup>[10]</sup>测定。沉积物测定指标包括 TN、各形态氮、TP、pH 值和有机质。沉积物 TP 采用过硫酸钾消解法测定<sup>[11]</sup>,沉积物 TN 采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度计法测定<sup>[12]</sup>。沉积物各形态氮采用连续分级提取法<sup>[13]</sup>,利用不同提取液,将沉积物样品中不同形态的 TTN 逐步提取出来,按顺序分别得到离子交换态氮(IEF-N)、弱酸可提取态氮(WAEF-N)、强碱可提取态氮(SAEF-N)和强氧化剂可提取态氮(SOEF-N)。pH 值采用 pH 计法测定,有机质采用 TOC 分析仪测定。

### 1.3 数据处理方法

采用 SPSS 19.0 对试验数据进行统计和相关性分析,采用 Origin8.0、Coreldraw X6 等软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 基本理化性质

宜兴三汊沉积物的 pH 值介于 7.42~8.3 之间,平均值为 7.78,整体偏碱性。宜兴三汊沉积物中有机质的质量比变化范围为 5.18~20.41 g/kg,均值为 9.30 g/kg,远低于城市内河<sup>[14]</sup>沉积物中有机质质量比(47.3 g/kg),说明宜兴三汊沉积物中有机污染较轻。沉积物中有机质质量比最小值出现在 S8 采样点,最大值出现在 S5 采样点,且 S5 采样点明显高于其他采样点(图 2)。由图 2 可知,有机质空间分布存在明显差异,表现为团汊(11.6 g/kg)最高,东汊(8.8 g/kg)次之、西汊(7.5 g/kg)最低。研究<sup>[15-16]</sup>表明,沉积物所含的有机质一般来自水生生物死亡残体长期积累和城市生活污水,团汊位于宜兴市中心地带,周围入湖河流众多,受雨天污水溢流及面源污染影响较大,而西汊和东汊远离市区,受生活污水影响较小,因此团汊沉积物中的有机质含量明显高于东、西汊。

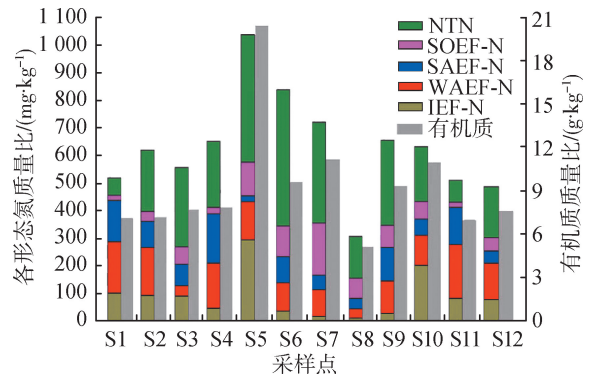


图 2 宜兴三汊表层沉积物各形态氮和有机质质量比

## 2.2 TN 含量及分布特征

宜兴三泖沉积物中 TN 质量比变化范围为 306 ~ 1035 mg/kg, 均值为 626.8 mg/kg, 最高值约为最低值的 3 倍, 空间分布差异明显。TN 质量比最大值出现在 S5 采样点, 最小值出现在 S8 采样点(图 2), 与有机质的分布规律一致。S5 采样点位于西泖、团泖与芜申运河交汇口下游, 一方面有来自西泖和芜申运河所携带的氮素汇入, 另一方面, 河口处水流突然变缓, 更有利于污染物在此处的淤积, 导致 S5 采样点 TN 含量偏高; S8 采样点位于团泖东部区域, 靠近沿岸的滨湖绿地广场, 是当地著名的风景区, 氮素来源较少, 所以该采样点 TN 含量较低。西泖、团泖、东泖 TN 平均质量比分别为 585.8 mg/kg、724.5 mg/kg 和 570.3 mg/kg, 整体上呈现出团泖较高, 东、西泖基本持平的趋势, 且团泖各采样点差异明显大于东、西泖。

三泖接受溧阳、金坛和长荡湖、滆湖来水, 一部分由西泖经团泖汇入大溪河再入东泖, 另一部分由西泖入团泖再经芜申运河绕城段汇入东泖, 是具有上下水系(宜溧河)相连关系的调节性河道型湖泊。团泖作为连接东、西泖的枢纽, 承接西泖及上游来水, 较慢的水流速度和较小的水体扰动使上游来水中的氮素在此处迅速沉积, 同时团泖位于中心城区, 受雨天污水溢流及面源污染影响较大。相对而言, 东、西泖湖泊面积大, 纳污能力强, 且采样点大多位于航道上, 较大的水体扰动会加速沉积物中污染物质的释放, 有利于氮素在各区域的交换<sup>[17]</sup>, 沉积条件较差。此外, 东、西泖远离城镇, 污染物主要来源于畜禽、水产养殖和农村生活污水。近年来, 政府加大了相关污染源的管控力度, 逐步取消围网和个体畜禽养殖, 农村生活污水排放也得到有效控制, 使得东、西泖沉积物 TN 含量明显低于团泖。

## 2.3 各形态氮含量及分布特征

表层沉积物中氮形态主要包括 IEF-N、WAEF-N、SAEF-N 和 SOEF-N 这 4 种, 其释放能力由强到弱顺序为 IEF-N、WAEF-N、SAEF-N、SOEF-N, 其中 IEF-N 和 WAEF-N 较活跃, 与水体中氮含量关系密切, 而 SAEF-N 和 SOEF-N 则更加稳定, 难以参与氮循环。三泖沉积物中 4 种形态氮的平均质量比由大到小依次为 WAEF-N (124 mg/kg)、IEF-N (90 mg/kg)、SAEF-N (88 mg/kg)、SOEF-N (70 mg/kg)。WAEF-N 为 TTN 的优势形态, SOEF-N 含量较低, 占 TTN 的 18.89%, 远远低于洱海 (81%) 和滇池 (68% ~ 79%)<sup>[18]</sup>, TTN 多以另外 3 种形态存在。由表 1 可知, 西泖、团泖和东泖 IEF-N 含量基本持平,

东泖略高于西泖和团泖, 但结合图 2 进一步观察可以发现, 除 S5 采样点外, 东、西泖 IEF-N 的含量都大于团泖。WAEF-N 在位于西泖的 S1、S2、S4 采样点和位于东泖的 S9、S11、S12 采样点为 TTN 的优势形态, 说明东、西泖沉积物中 IEF-N 和 WAEF-N 为氮素的主要赋存形态, 外界环境发生变化时, 内源释放风险高。相对而言, 团泖以 SOEF-N 为主, 内源释放风险较小。

表 1 宜兴三泖表层沉积物各形态氮质量比

氮形态	质量比/(mg · kg <sup>-1</sup> )		
	西泖	团泖	东泖
TN	585.8	724.5	570.3
IEF-N	83.2	89.6	97.8
WAEF-N	140.6	93.0	138.1
SAEF-N	124.4	51.3	89.6
SOEF-N	35.5	123.1	52.7

Tengberg 等<sup>[19]</sup> 改变水体扰动强度的试验结果表明, 沉积物对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的吸附量随扰动强度的增大而增大, 西泖和东泖大多数采样点位于运河航线上, 水体扰动较大, 有利于沉积物对水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的吸附, 从而导致这两个区域 IEF-N 含量较高。另外, 王圣瑞等<sup>[20]</sup> 也指出, 随着沉积物中有机质含量的增加, SOEF-N 含量急剧升高, IEF-N 含量急剧减小, 当有机质被氧化时, 有机质中有机态的 SOEF-N 会转化成其他形态。由图 2 和表 1 可知, 团泖有机质和 SOEF-N 含量高, 其他形态氮含量较低, 与上述观点吻合。此外, 有机质含量还会影响 WAEF-N 的分布, 有机质含量高的区域, 表层沉积物的矿化作用较强, 由此导致的 pH 值变化大, 有利于碳酸盐的溶解, WAEF-N 含量也随之减小<sup>[21]</sup>, 这也是团泖中该形态氮含量不高的原因之一。从各采样点来看, S5 和 S10 采样点沉积物中 IEF-N 含量和比例均远远高于其他采样点, 分别达到 TN 含量的 28% 和 32%, 内源释放风险较大。S5 和 S10 采样点均位于河口, 河口处水流突然变缓, 上游来水中较为“活跃”的氮素不断汇入并沉积, 导致该区域 IEF-N 含量明显高于其他采样点。

在自然粒度下, TTN 为 IEF-N、WAEF-N、SAEF-N、SOEF-N 之和, 是沉积物可参与循环的最大值, 当外部环境发生剧烈变化时, 可以释放并重新参与循环。而 NTN 则为稳定存在的氮形态, 几乎不参与氮循环<sup>[22]</sup>。宜兴三泖沉积物 TTN 的质量比范围为 156 ~ 574 mg/kg, 最大值为最小值的 3.7 倍, 说明三泖沉积物中 TTN 空间分布的差异很大, 这可能是由于各采样点外源污染输入不同、水体扰动强弱差异、水体生态环境和沉积条件的变化所致。TTN 的平均质量比为 372.9 mg/kg, 占 TN 的 41.1% ~ 88.0%,

平均为 59.5%, 显著高于渤海 (30.85%)<sup>[5]</sup>、滇池 (33.7% ~ 53.8%)<sup>[22]</sup> 和水源水库 (28.80% ~ 49.34%)<sup>[23]</sup>, 说明宜兴三汊沉积物中可参与再循环氮含量的比例比上述区域高很多, 释放风险大。整体来看, 三汊沉积物中 TTN 空间分布呈现出西汊 (383 mg/kg) 最高、东汊 (378 mg/kg) 次之、团汊 (357 mg/kg) 最低的趋势, 从各采样点来看, S1、S5、S10 和 S11 采样点 TTN 含量明显高于其他采样点。团汊水流速度缓慢, 水力扰动小, 更好的沉积条件使得氮素逐渐沉积并趋向更稳定的形态转化, 因此团汊沉积物中 TN 含量偏高而 TTN 含量偏低; 而西汊和东汊大多数采样点位于运河航道上, 水力扰动较大, 更有利于沉积物对水中氮素的吸附<sup>[19]</sup>, 从而导致这两个区域 TTN 含量较高。S1、S5、S10 和 S11 采样点均位于河口, 既有大量“活跃”氮素的汇入, 又有利于悬浮物的沉积, TTN 含量较高不难理解。

## 2.4 各形态氮的影响因素

### 2.4.1 沉积物理化性质的影响

为了研究宜兴三汊沉积物中不同形态氮分布的影响因素, 对各形态氮及各形态氮与沉积物 pH 值、有机质、TP 进行相关性分析, 结果如表 2 所示。由表 2 可以看出, 不同形态氮之间都有一定的相关性, 相互间呈显著相关的情形较多, 一定程度上揭示了不同形态氮的转化规律。除 SAEF-N 外, IEF-N 与其他形态氮都存在明显的相关性, 与 WAEF-N 显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与 TTN 极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 说明 IEF-N 和 WAEF-N 之间可能有相似的

来源。IEF-N 是 TTN 中最活跃的形态, 与 TTN 有极显著正相关关系不难理解。此外, WAEF-N 与其他可转化态氮均有显著相关关系, 说明它们可能受同一外界环境的制约。

沉积物中氮形态的分布还会受沉积物环境因子的影响, 包括沉积物的有机质、pH 值和 TP。由表 2 可知, 沉积物中有机质与 TN 存在极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 宜兴三汊沉积物中有机质与 TN 含量的空间分布具有明显的一致性。沉积物中有机质和 TN 的来源相似, 都是通过水生植物残体的沉积过程进入底泥<sup>[24-25]</sup>。此外, 有机质对沉积物中氮的转化存在两种相反的作用<sup>[14]</sup>, 一方面有机质含量高的区域, 沉积物结合能力更强, TN 含量也会随之变高; 另一方面, 有机质对于有机氮向氨氮的转化有一定的促进作用, 降低 TN 含量。本研究结果表明, 有机质对 TN 的促进作用更明显, 有机质的富集是 TN 的主要来源。有机质与 SOEF-N 之间也呈现出极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 在有机质含量高的团汊区域, SOEF-N 的含量也恰好高于其他采样点, 这表明沉积物中有机质对沉积物的氮形态分布有重要影响。沉积物 TP 虽与各形态氮都有一定相关性, 但相关性不显著。pH 值对 TN 含量的影响也比较大, 两者之间存在显著负相关关系 ( $P < 0.05$ ), 随着 pH 值的降低, TN 含量会升高。

### 2.4.2 上覆水理化性质的影响

将各采样点沉积物中的各形态氮含量与该处上覆水理化性质进行相关性分析, 结果如表 3 所示。上覆水 pH 值与沉积物 WAEF-N 之间存在显著负相

表 2 宜兴三汊表层沉积物各形态氮与沉积物理化性质相关性

项目	IEF-N	WAEF-N	SOEF-N	SAEF-N	TTN	TN	pH 值	有机质	TP
IEF-N	1								
WAEF-N	0.50*	1							
SOEF-N	-0.30	-0.69**	1						
SAEF-N	-0.01	0.55*	-0.62**	1					
TTN	0.71**	0.70**	-0.21	0.25	1				
TN	0.09	-0.08	0.64*	-0.01	0.35	1			
pH 值	0.37	0.26	-0.48	0.03	0.17	-0.59*	1		
有机质	0.15	-0.22	0.71**	-0.25	0.30	0.87**	-0.56*	1	
TP	0.36	0.18	0.23	-0.25	0.39	0.39	-0.04	0.63**	1

注: \* 表示在置信度为 0.05 时, 相关性显著; \*\* 表示在置信度为 0.01 时, 相关性显著。表 3 同。

表 3 宜兴三汊表层沉积物各形态氮与上覆水理化性质相关性

上覆水理化指标	TN	IEF-N	WAEF-N	SOEF-N	SAEF-N	TTN
水温	0.534	0.408	-0.108	-0.368	0.491	0.327
pH 值	0.064	-0.206	-0.566*	-0.132	0.203	-0.409
DO	0.285	0.119	0.411	0.074	0.319	0.483
电导率	0.235	0.297	0.321	0.131	0.655*	0.144
悬浮物	-0.125	-0.101	0.385	0.276	-0.260	0.116
TN	0.359	0.852**	0.408	-0.283	-0.196	0.647*
TP	-0.242	-0.181	0.338	0.367	-0.356	0.027

关关系。上覆水 pH 值可能会影响沉积物中碳酸盐的含量,从而影响 WAEF-N 的释放。上覆水电导率与各形态氮都存在一定的正相关关系,其中与 SAEF-N 的相关性最显著。上覆水电导率会影响沉积物的吸附点位,从而对沉积物氮形态的分布产生影响<sup>[26]</sup>,本文结果表明,上覆水电导率会显著促进沉积物与 SOEF-N 的结合,与上述观点一致。此外,上覆水 TN 与 IEF-N 极显著正相关,与 TTN 显著正相关。IEF-N 是可转化态释放能力最强的氮形态,一定条件下最易释放进入水体,TTN 是沉积物中可参与循环的氮形态总量,这两种形态氮与上覆水 TN 之间的显著相关关系进一步验证了沉积物是水体氮重要来源的观点。因此,在开展宜兴市和太湖水质改善工作时,必须考虑到水体与沉积物之间的相互影响,进行综合治理。

### 3 结 论

a. 宜兴三沉沉积物整体偏碱性,有机质污染较轻。TN 的空间分布与有机质含量存在明显一致性,即呈现出团泥含量最高,东、西泥含量较低且基本持平的特点。与之相反,TTN 含量空间分布呈现出西泥最高、东泥次之、团泥最低的趋势,且 TTN 占 TN 比例偏高,释放风险大。

b. 在 4 种可转化态氮中,WAEF-N 为可转化态氮优势形态,特别是东、西泥沉积物中 IEF-N 和 WAEF-N 为氮素的两种主要赋存状态,存在较大内源释放风险,且河口处(S5 和 S10 采样点)附近其 TN、TTN 和 IEF-N 含量显著高于其他采样点。

c. 沉积物各形态氮之间在一定条件下可以相互转化,且其含量分布受沉积物理化性质及上覆水 pH 值、电导率及 TN 共同作用影响。除 SAEF-N 外,IEF-N 与其他形态氮联系紧密,均有明显相关性,为最容易参与氮循环的形态氮。沉积物有机质与 TN 和 SOEF-N 呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ );水体 pH 值与沉积物 TN 及 WAEF-N 呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ),而电导率与 SAEF-N 呈显著正相关关系( $P < 0.05$ )。因此,沉积物有机质和水体 pH 值对沉积物氮形态有着不可忽视的影响,而沉积物中氮的形态不仅受到上覆水理化性质影响,同时沉积物也是水体氮污染的重要来源。

### 参考文献:

[ 1 ] SCHINDLER D W, HECKY R, FINDLA Y, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37 years whole ecosystem experiment [ J ]. Proceedings of the National Academy

Sciences USA, 2008 ( 5 ): 11254-11258.

[ 2 ] 邢雅因,阮晓红,赵振华. 城市重污染河道环境因子对底质氮释放影响[ J ]. 水科学进展, 2010, 21 ( 1 ): 120-126. ( XING Yanan, RUAN Xiaohong, ZHAO Zhenhua. Effect of environmental changes on nitrogen release from sediments in polluted urban river [ J ]. Advance in Water Science, 2010, 21 ( 1 ): 120-126. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 回进,张凤君,李亚东,等. 水库底泥污染物释放模拟研究[ J ]. 辽宁科技大学学报, 2011, 34 ( 5 ): 486-489. ( HUI Jin, ZHANG Fengjun, LI Yadong, et al. Simulative reasearch on pollutants release from sediments of reservoir [ J ]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2011, 34 ( 5 ): 486-489. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 杨柳燕,王楚楚,孙旭,等. 淡水湖泊微生物硝化反硝化过程与影响因素研究[ J ]. 水资源保护, 2016, 32 ( 1 ): 13-14. ( YANG Liuyan, WANG Chuchu, SUN Xu, et al. Study on microbial nitrification and denitrification processes and influence factors in freshwater lakes [ J ]. Water Resources Protection, 2016, 32 ( 1 ): 13-14. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 马红波,宋金明,吕晓霞,等. 渤海南部海域柱状沉积物中氮的形态与有机碳的分解[ J ]. 海洋学报, 2002, 24 ( 5 ): 64-70. ( MA Hongbo, SONG Jinming, LU Xiaoxia, et al. Nitrogen forms and decomposition of organic carbon in the Southern Bohai Sea core sediments [ J ]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24 ( 5 ): 64-70. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 刘波,周锋,王国祥,等. 沉积物氮形态与测定方法研究进展[ J ]. 生态学报, 2011, 31 ( 22 ): 6947-6958. ( LIU Bo, ZHOU Feng, WANG Guoxiang, et al. Research progress on forms of nitrogen and determination in the sediments [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 ( 22 ): 6947-6958. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 吕晓霞,宋金明,李学刚,等. 北黄海沉积物中氮的地球化学特征及其早期成岩作用[ J ]. 地质学报, 2005, 79 ( 1 ): 114-123. ( LU Xiaoxia, SONG Jinming, LI Xuegang, et al. Geochemical characteristics and early diagenesis of nitrogen in the Northern Yellow Sea sediments [ J ]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79 ( 1 ): 114-123. ( in Chinese ) )

[ 8 ] BRODRICK S, CULLEN P, MAHER W. Determination of exchangeable inorganic nitrogen species in wetland soils [ J ]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 1987, 38 ( 3 ): 377-380.

[ 9 ] 刘芸,易齐涛,陈求稳,等. 太湖西部河网中沉积物氮的空间分布特征[ J ]. 环境科学学报, 2015, 35 ( 12 ): 3890-3897. ( LIU Yun, YI Qitao, CHEN Qiuwen, et al. The spatial distribution of nitrogen species in surface sediment in the west river networks of the Taihu Lake Basin, China [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35 ( 12 ): 3890-3897. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 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[ M ]. 4 版. 北京: 中国环境科

- 学出版社,2002.
- [11] 董平,矫健,张鑫. 过硫酸钾消解-钼锑抗光度法测定脱水污泥中的总磷[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 67-71. (DONG Ping, JIAO Jian, ZHANG Xin. The measurement of total phosphorus in dewatered sludge with the method of molybdenum-antimony resolved by potassium persulfate and anti-spectrophotometry[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2010, 29(1): 67-71. (in Chinese))
- [12] SMART M M, RADA R G, DONNERMAYER G N. Determination of total nitrogen in sediments and plants using persulfate digestion[J]. Water Research, 1983, 17(9): 1207-1211.
- [13] RUTTENBERG K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(7): 1460-1482.
- [14] 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:以许昌清潞河为例[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))
- [15] 谭镇. 广东城市湖泊沉积物营养盐垂直变化特征研究[D]. 广州:暨南大学, 2005.
- [16] 李文朝. 东太湖沉积物中氮的积累与水生植物沉积[J]. 中国环境科学, 1997, 17(5): 418-421. (LI Wenchao. Nitrogen accumulation in the sediment of East Taihu Lake and biological sedimentation of aquatic plants[J]. China Environmental Science, 1997, 17(5): 418-421. (in Chinese))
- [17] 徐瑞忠,陆雪林,盛根明,等. 风浪对浅水湖泊水质的影响机制[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 117-119. (XU Ruizhong, LU Xuelin, SHENG Genming, et al. Influencing mechanism of wind waves on water quality in shallow lake[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 117-119. (in Chinese))
- [18] 颜海波. 龙景湖沉积物氮形态分布特征及源-汇关系[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
- [19] TENGBERG A, ALMROTH E, HALL P. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediments; in situ measurements using new experimental technology[J]. Experimental Marine Biology and Ecology, 2003, 285/286(2): 119-142.
- [20] 王圣瑞,赵海超,王娟,等. 有机质对湖泊沉积物不同形态氮释放动力学影响研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 332-340. (WANG Shengrui, ZHAO Haichao, WANG Juan, et al. The effects of organic matter on the release kinetics of nitrogen with different forms in the lake sediments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(2): 332-340. (in Chinese))
- [21] KEMP A L W. Organic carbon and nitrogen in the surface sediments of Lake Ontario, Erie and Huron[J]. Journal of Sedimentary, 1970, 41: 537-548.
- [22] 朱元荣,张润宇,吴丰昌. 滇池沉积物中氮的地球化学特征及其对水环境的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 978-983. (ZHU Yuanrong, ZHANG Runyu, WU Fengchang. Geochemical characteristics and influence to overlying water of nitrogen in the sediments from Dianchi Lake[J]. China Environmental Science, 2011, 31(6): 978-983. (in Chinese))
- [23] 王禄仕,柴蓓蓓,刘虹. 水源水库沉积物中氮的形态分布特征研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(5): 734-740. (WANG Lushi, CHAI Beibei, LIU Hong. Distributive characteristics of nitrogen forms in sediment of water source reservoir[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2010, 42(5): 734-740. (in Chinese))
- [24] 倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等. 太湖沉积物有机碳与氮的来源[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4661-4670. (NI Zhaokui, LI Yuejin, WANG Shengrui, et al. The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4661-4670. (in Chinese))
- [25] 袁旭音,陈骏,季峻峰,等. 太湖沉积物和湖岸土壤的污染元素特征及环境变化效应[J]. 沉积学报, 2002, 20(3): 427. (YUAN Xuyin, CHEN Jun, JI Junfeng, et al. Characteristics and environmental changes of pollution elements in Taihu sediments and soils near the lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(3): 427. (in Chinese))
- [26] 张台凡,宋进喜,杨小刚,等. 渭河陕西段沉积物中总磷、总氮时空分布特征及其影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1393-1399. (ZHANG Taifan, SONG Jinxi, YANG Xiaogang, et al. Study on the temporal-spatial distribution characteristics and influencing factors of TP and TN in river sediments for the Weihe River of Shaanxi Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5): 1393-1399. (in Chinese))

(收稿日期:2018-03-07 编辑:熊水斌)

