

# 香溪河沉积物中碳·氮元素分布特征

胡俊, 沈强, 李嗣新, 胡菊香

(水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北武汉 430079)

**摘要** [目的]研究靠近三峡大坝的第一大支流香溪河沉积物中碳氮元素分布特征。[方法]以三峡水库典型支流香溪河入河口河段为对象,于2015年春季开展了柱状沉积物采样调查,初步研究了该区域碳、氮等生源要素的分布特征。[结果]调查河段沉积物总碳含量为1.74%~3.52%,总氮含量为0.10%~0.30%。总碳含量的沿程变化表现为靠近河口的沉积物中总碳平均含量低于上游,深度变化是靠近河口采样点的表层沉积物中总碳含量显著高于底层。而总氮含量的沿程变化和深度变化没有总碳变化明显。 $\delta^{13}\text{C}$ 值随深度的增加而增加,靠近河口的沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于上游采样点。[结论]该研究为认识香溪河沉积物中生源要素的分布特征及水生生态系统的演变过程提供了科学依据。

**关键词** 沉积物;碳;氮;同位素;香溪河

中图分类号 S181 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)25-087-03

## Distribution Characteristics of Carbon and Nitrogen Elements in the Sediments of Xiangxi River

HU Jun, SHEN Qiang, LI Si-xin, HU Ju-xiang (Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430079)

**Abstract** [Objective] To research the distribution characteristics of carbon and nitrogen elements in the sediments of Xiangxi River, which was the biggest tributary near the Three Gorges Dam. [Method] With estuary stream segment of Xiangxi River as the research object, sampling survey of core sediments was carried out in the spring of 2015. Distribution characteristics of biogenic elements of carbon and nitrogen were preliminarily researched in this region. [Result] Total carbon content (TC) in sediments varied between 1.74% and 3.52%, and the total nitrogen content (TN) varied between 0.1% and 0.3%. The mean concentration of TC near the estuary was lower than the upstream sediments. The concentrations of TC in the sediments close to the estuary gradually decreased from the surface to the bottom. The variation of TN along the river from the estuary to the upstream WAS not significant compared with the total carbon. The isotopic analysis showed the  $\delta^{13}\text{C}$  value increased with the enhancement of the depth. The overall  $\delta^{13}\text{C}$  in the sample sites near the estuary was lower than the sampling point in upstream. [Conclusion] This research provides scientific references for the distribution characteristics of biogenic elements in sediments of Xiangxi River and the evolution process of aquatic ecosystem.

**Key words** Sediment; Carbon; Nitrogen; Isotope; Xiangxi River

香溪河作为三峡水库靠近三峡大坝的第一大支流,其生态环境状况对三峡水库水质有着直接影响。由于三峡成库后库区水位提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、库湾和支流污染物的滞留时间延长,致使回水区库湾污染加重,局部水域出现富营养化现象。自三峡水库蓄水以来,香溪河几乎每年春季都不同程度地暴发甲藻和硅藻水华,夏季也时常暴发蓝绿藻水华<sup>[1-2]</sup>。除了外源性污染须进一步加强管理控制外,内源性负荷更值得关注。研究表明,湖泊沉积物中碳、氮、磷等生源要素的分布特征与湖泊内源负荷有着直接关系<sup>[3-4]</sup>。因而,研究沉积物中碳、氮等生源要素的含量对阐明水体生源要素的循环、转移和积累的过程,评估水体内源二次污染风险及控制“内负荷”方面都具有重要意义。

在沉积物研究中,表层沉积物与水体直接交换,是沉积物中最为敏感的部分,而研究沉积物中生源要素的垂向分布更有助于深入分析水体污染来源特征。此外,随着稳定同位素技术的发展,碳、氮稳定同位素技术已广泛用于水生环境<sup>[5-6]</sup>,尤其是有机质碳、氮同位素记录在湖泊环境演化及富营养化过程示踪方面具有重要作用<sup>[7-8]</sup>。目前,我国针对湖泊和水库沉积物生源要素的调查研究较多,而在河

流等流水水体中,更多研究关注河流悬浮物中的生源要素输移等过程,针对河流沉积物的研究较少。考虑到香溪河下游河段尤其是回水区域由于受到水库调度的影响,水体处于湖泊-河流两种状态交替之中,开展香溪河沉积物中生源要素的调查,有助于了解该区域的碳、氮元素分布特征过程,从而可以更好地认识香溪河口水体富营养化。笔者以香溪河入库河口河段为研究对象,调查和研究该河段沉积物的碳氮等生源要素分布特征,以期为该河段的水体治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

**1.1 样品的采集与分析** 样品采集于2015年5月,从香溪河峡口大桥至入库河口沿程布设峡口镇(采样点 $S_3$ ,110.79°E,31.12°N)、官庄坪(采样点 $S_2$ ,110.76°E,31.02°N)、尹家湾(采样点 $S_1$ ,110.77°E,30.97°N)3个采样点采集沉积物(图1)。采用定制的柱状采样器采集沉积物柱状样品。沉积物样品现场按2cm间距分层,共分为8层。样品采集后立即密封、冷冻,带回实验室进行真空冷冻干燥并研磨过60目筛后保存备用。

碳、氮含量采用Cotech公司ES4024元素分析仪同步测定,每个样品重复3次,结果采用质量百分比表示。碳同位素比率则采用Cotech ES4024与Picarro公司的G2201联用进行测定。

**1.2 数据统计** 采用单因素分析(Univariate Analysis)方法

**基金项目** 水利部“948”项目(201408)。

**作者简介** 胡俊(1977-),男,湖北武汉人,副研究员,博士,从事生源要素的生物地球化学循环、同位素示踪等研究。

**收稿日期** 2016-07-07

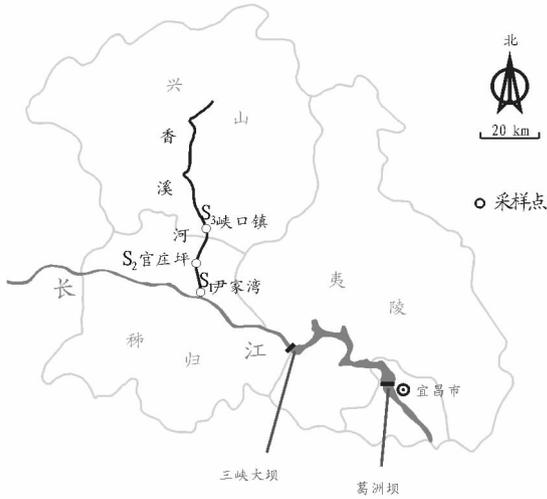


图1 采样点示意

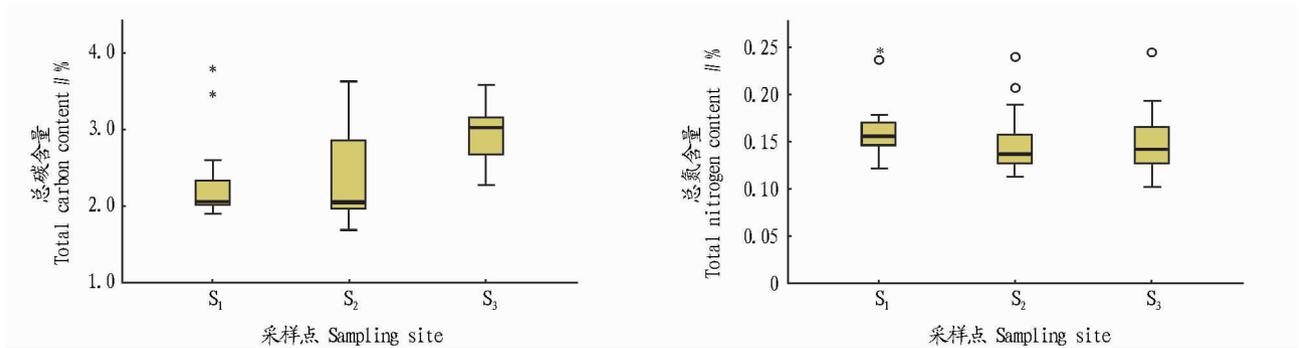
Fig.1 Schematic diagram of sampling sites

分析数据之间的差异性,  $P < 0.05$  为显著性差异。所有统计分析及统计均采用统计软件 SPSS 22 完成。

## 2 结果与分析

**2.1 沉积物中碳、氮元素的空间分布** 从图2可以看出,  $S_3$  的总碳平均含量为 2.94%, 高于  $S_2$  的 2.29% 和  $S_1$  的 2.29%。 $S_1$  的总氮平均含量为 0.16%,  $S_2$  的总氮平均含量为 0.15%,  $S_3$  的总氮平均含量为 0.15%, 三者差异较小。单因素方差分析表明, 3 个采样点的总碳含量、总氮含量之间均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

**2.2 沉积物中碳、氮含量的垂向分布** 从图3可见,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  的总碳含量范围分别为 1.98% ~ 3.52%、1.74% ~ 3.47%、2.36% ~ 3.50%,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  的总氮含量范围分别为 0.14% ~ 0.24%、0.13% ~ 0.18%、0.12% ~ 0.19%。单因素方差分析表明, 不同深度之间的总碳含量存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 而总氮含量在  $S_1$  和  $S_3$  的不同深度存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ),  $S_2$  的总氮垂向分布相对均匀 ( $P > 0.05$ )。 $S_1$  和  $S_2$  的表层沉积物 (0 ~ 4 cm) 中总碳含量明显高于底层,  $S_3$  的总碳含量的垂向变化没有  $S_1$ 、 $S_2$  明显, 而不同深度之间沉积物中总氮含量的差异较小。此外, 6 cm 以下沉积物中总碳、总磷含量变化不明显。



注: \* 为极端值; o 为异常值。

Note: \* was extremum value; o was abnormal value.

图2 各采样点沉积物中碳氮元素含量的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of carbon and nitrogen contents in the sediments of sampling sites

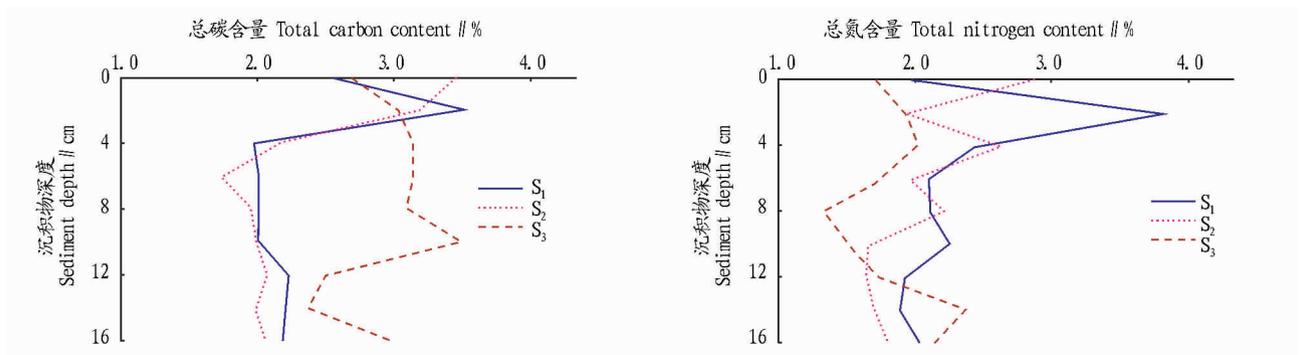


图3 各采样点沉积物中碳氮元素含量的垂向分布

Fig.3 Vertical distribution of carbon and nitrogen contents in sediments of sampling sites

**2.3 沉积物中  $\delta^{13}\text{C}$  的分布变化** 沉积物中的总碳分为有机碳和以碳酸盐体系为主的无机碳, 其具有外源、内生和自生 3 种来源。表层沉积物中有机质通过同位素示踪手段得到的值可以反映有机质的生物群来源。该调查测定了采样点不同深度的碳同位素比率变化。从图4可以看出,  $S_1$  的

$\delta^{13}\text{C}$  含量变化范围为  $-9.98\text{‰} \sim -3.94\text{‰}$ ,  $S_2$  的变化范围为  $-9.13\text{‰} \sim -0.89\text{‰}$ ,  $S_3$  的变化范围为  $-8.92\text{‰} \sim -1.13\text{‰}$ 。虽然 3 个采样点  $\delta^{13}\text{C}$  含量的垂向分布存在波动, 但是其随着深度的增加呈逐渐减小趋势, 且  $S_1$  和  $S_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  含量要小于  $S_3$ , 且深度变化明显不如  $S_3$  变化大。相对于  $S_1$  和  $S_2$ ,  $S_3$  的

位置更靠近香溪河上游,属于河流水体扰动过程,变化更为剧烈。而  $S_1$  和  $S_2$  更靠近香溪河库湾,处于湖泊水体干扰状态,变化相对较小。

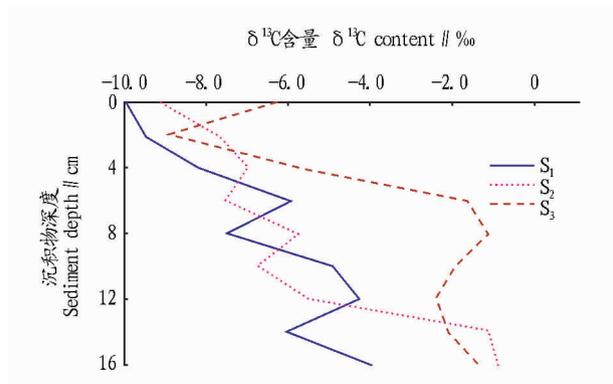


图4 各采样点沉积物中  $\delta^{13}\text{C}$  含量的垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution changes of  $\delta^{13}\text{C}$  content in the sediments of sampling sites

### 3 讨论

**3.1 沉积物碳、氮含量的对比分析** 河流是一个复杂的水文系统,其沉积物中不仅有大量的外源物质输入,还有大量的内源物质供给。沉积物的碳氮生源要素相对于湖泊受到上游来水、其他陆源因素的影响。在该调查中,沉积物总碳含量为 1.68% ~ 3.71%,平均含量 2.53%;总氮含量为 0.10% ~ 0.30%,平均含量为 0.15%,这与香溪河全流域沉积物中 TN 的平均值一致<sup>[9]</sup>。与我国典型的 2 个富营养湖泊东湖和太湖的沉积物相比,该调查河段沉积物总碳平均含量与东湖沉积物总碳平均含量(0.79% ~ 5.29%,平均含量 2.72%)接近,但是总氮含量低于东湖沉积物(0.16% ~ 0.63%,平均含量 0.34%)<sup>[10]</sup>。与太湖相比,总碳平均含量低于太湖五里湖沉积物中总碳含量(平均含量 > 3.41%),总氮平均含量也低于五里湖总氮平均含量(0.17% ~ 0.49%,平均含量 0.37%),但与梅梁湖接近(0.06% ~ 0.18%)接近<sup>[5,11]</sup>。

该研究中 3 个采样点的总碳和总氮的垂向分布也存在显著变化。靠近河口采样点的  $S_1$ 、 $S_2$  表层沉积物中总碳含量明显高于底层。李军等研究表明,湖泊随着富营养化进程的发展,总有机碳含量会升高,且由于光合作用  $\delta^{13}\text{C}$  值开始下降<sup>[11-12]</sup>。因此,采样点  $S_1$  和  $S_2$  表层总碳含量较高,可能与回水区水华暴发有关。不过沉积物的碳除自生外,与外源也有密切关系,这还需进一步研究。3 个采样点之间的氮含量变化与碳含量变化类似,即表层氮含量稍高,但变化趋势相对而言并不明显。其原因可能在于:一方面,沉积物中有机氮一般占 70% ~ 90%,而有机氮在沉积物中的形态转变主要是通过细菌硝化和反硝化作用实现。沉积物多处于厌氧条件,进行反硝化过程,但是藻类的加入使反硝化作用减弱<sup>[13]</sup>,且河口区域水流状态近似于湖泊,因而有机氮降解缓慢。此外,氮元素的生物地球化学循环是涉及多种化学形态的氮元素变化。自然水体常见的过程是大气中的氮通过蓝绿藻等固氮生物固定,转化为有机氮进入

生物体,经过矿化(氨化)作用成铵态氮,再经亚硝化、硝化、反硝化及氨挥发等生物过程返回大气。另一方面,水体中氮循环过程受到面源污染、上游来水及降雨等多种过程的影响,更为复杂多变。因此,总氮的垂向变化规律不够明显。

**3.2 沉积物的碳同位素分析** 沉积物中碳同位素分析采用同位素示踪手段,可以反映沉积物中有机质的生物群落来源,且湖泊沉积物碳酸盐体系的碳同位素组成也能反映湖区环境、生产力及生物活性的变化。目前,湖泊沉积物有机质碳、氮同位素在湖泊环境演化及富营养化过程示踪方面的应用日益深入<sup>[14]</sup>。但是区分 3 种来源的碳酸盐并从中提取环境信息存在着相当大的难度<sup>[15-16]</sup>。笔者测定了总碳含量和总碳同位素比率,该同位素比值反映了碳酸盐及其有机质碳同位素组合特征。

通常水环境中碳从无机态到有机态(包括陆生植物源、水生植物源、浮游植物), $\delta^{13}\text{C}$  值逐渐降低<sup>[17]</sup>。不同有机质来源决定了湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  变化范围较大,其波动范围为 -7‰ ~ -38‰,变幅接近 30‰<sup>[18]</sup>。陆生脉管植物和水生高等植物  $\delta^{13}\text{C}$  的分布范围较宽(平均值为 -14‰),与湖泊自生藻类(平均值为 -28‰)之间存在部分重叠<sup>[11]</sup>。研究表明,沉积物中碳同位素组成会随浮游植物生物量或物种的变化而变化<sup>[5]</sup>。而对于碳酸盐,许多研究表明,当水体向藻型湖泊或草-藻混合型湖泊转变时,沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  呈快速下降<sup>[5,12]</sup>。该调查中 3 个采样点  $\delta^{13}\text{C}$  从表层往下逐渐升高,体现了香溪河水体近年来富营养化趋势<sup>[2,19]</sup>,且可以进一步推测从表层至底层有机碳的比例逐渐降低。这也与香溪河藻类水华暴发后,藻类沉降于表层将导致表层沉积物中有机碳含量较高、 $\delta^{13}\text{C}$  值较低的情况相符。该研究中,采样点  $S_1$  和  $S_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  小于  $S_3$ ,这也符合靠近河口水华更严重的规律。

### 4 结论

笔者对香溪河河口河段的生源要素碳、氮的分布开展了初步研究,结果表明:香溪河沉积物总碳含量为 1.74% ~ 3.52%,总氮含量为 0.13% ~ 0.24%,靠近河口的沉积物中总碳平均含量要低于支流上游。此外,靠近河口采样点的表层沉积物中总碳含量显著高于底层。氮含量的变化规律没有总碳明显,3 个采样点同位素比率随深度的增加而增加,而且靠近河口的采样点尹家湾和官庄坪的  $\delta^{13}\text{C}$  要小于采样点  $S_3$ ,进一步分析表明从表层至底层有机碳的比例呈逐渐降低趋势。并且表层碳含量较高,同时  $\delta^{13}\text{C}$  比例呈降低趋势,也反映了河口已经开始并正处于持续富营养化过程,富营养化风险增大,值得关注。

由于研究时段、研究范围等客观条件所限,该研究亦存在一些不足。下一步研究有必要将调查范围扩展到流水区,并且增加有机碳、氮的同位素比率和生源要素磷的含量,以期更好地认识香溪河沉积物中生源要素的分布特征及水生生态系统的演变过程。

而,经济的高增长带来的突出问题就是局部生态环境的恶化,生产建设等活动造成的裸露面增加、局部地区植被数量的锐减,使生物多样性降低,生态系统脆弱。水土保持可以增加林草植被覆盖,提升生态系统稳定性,增强水源涵养能力,保持水土,对改善生态系统具有积极作用。

水土保持以小流域为单元,因地制宜,因害设防,建立水土流失综合防治体系。经过治理,将降水资源最大限度地拦截,有效补充当地的生态用水;通过控制水土流失,使良好的光、热、水资源与宝贵的土地资源实现优化配置,促进区域生态的恢复和改善。

对于皖东南低山丘陵地区,应加强预防保护,实行封山禁牧,退耕还林还草,划定生态红线,加强对区域内生产建设项目的监管;因地制宜实施自然修复和局部水土流失综合治理,恢复生态维护功能。

**3.4 推动农村地区发展** 推动农村地区发展要求强化农田防护和土壤保持,合理保护和开发水土资源。水土保持对于农村生产生活条件的改善,具体表现在改善耕地质量、避免土地退化及改善生活条件。

山区耕作土层普遍较薄,一旦流失,生产、生态基础就会遭到破坏,造成土地退化。丘陵岗地区是安徽省坡耕地面积最多及水土流失需要重点治理的区域。因此,水土流失防治的需求集中在林地区域预防保护、生态修复和低丘缓坡的水土流失综合治理,巩固提高退耕还林成果。

淮北平原是安徽省粮食主产区,虽然水土流失不严重,但在局部地区由于过度开垦、不合理耕种以及大面积采煤塌陷,农村面污染量大而广,造成河湖淤积,防洪除涝难度加大,地表水和地下水污染问题严重,生态环境恶化。迫切需要退田还河、还湖,禁止堤坡、河滩地开垦,加大面源污染防治,加大生态防护林建设,改善生态环境。

**3.5 加强政府社会管理和公共服务能力** 随着经济社会的

迅速发展,社会主义市场经济体制的不断完善和依法治国进程的加快,要求水土保持进一步加强法制建设,全面落实政府目标责任制;依法建立和完善水土保持监督管理、监测评价制度,增强社会管理和公共服务功能;不断完善水土保持政策、技术标准、规划、科技支撑、机构和队伍五大体系,强化行业能力建设,以水土保持信息化推动水土保持现代化;深化改革,不断建立和完善统筹协调、水土保持补偿、公众监督和参与、投融资、重点工程建设和管理机制,推动水土保持事业新发展。

#### 4 结语

综合上述需求分析,根据安徽省水土流失特点,考虑到水土保持综合防治任务的长期性、反复性和艰巨性,未来一段时期安徽省水土流失综合防治任务是对存在水土流失潜在危险的区域全面实施预防保护,重点是林草覆盖率较高的皖西大别山和沿江江南重要江河源区、江淮分水岭中东部水源涵养区和重要湖库水源地保护区;对全省现状适宜治理的水土流失区域进行系统全面治理,重点是对以水质维护、生态维护、人居环境改善为主导的基础功能区域进行综合治理;加强政府的社会管理和公共服务能力,全面提升综合监管能力。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 全国水土保持规划(2015—2030年)[R]. 2015.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水土保持规划编制规范:SL335—2014[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [3] 安徽省人民政府关于印发安徽省主体功能区规划的通知:皖政[2013]82号[A]. 2013.
- [4] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准:SL190—2007[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [5] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队. 安徽省2015年国民经济和社会发展统计公报[R]. 2016.
- [6] 安徽省水利水电勘测设计院,安徽省水文局. 安徽省城市饮用水水源地及应急备用水源地规划报告[R]. 2014.
- [7] 周广杰,况琪军,胡征宇,等. 香溪河库湾浮游藻类种类演替及水华发生趋势分析[J]. 水生生物学报,2006,30(1):42—46.
- [8] 王岚,蔡庆华,张敏,等. 三峡水库香溪河库湾夏季藻类水华的时空动态及其影响因素[J]. 应用生态学报,2009,20(8):1940—1946.
- [9] 范成新,张路,杨龙元. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. 海洋与湖沼,2002(4):370—378.
- [10] 黎颖治,夏北成. 湖泊沉积物内部因素对沉积物—水界面磷交换的影响[J]. 土壤通报,2006(5):1017—1021.
- [11] 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.
- [12] 邹君宇,韩贵琳. 河流中碳、硫稳定同位素的研究进展[J]. 地球与环境,2015,43(1):111—122.
- [13] BIRD M I,GRÖCKE D R. Determination of the abundance and carbon isotope composition of elemental carbon in sediments[J]. Geochimica et cosmochimica acta,1997,61(16):3413—3423.
- [14] GREY J,JONES R I,SLEEP D. Stable isotope analysis of the origins of zooplankton carbon in lakes of differing trophic state[J]. Oecologia,2000,123(2):232—240.
- [15] 孙婷婷,唐涛,申恒伦,等. 香溪河流域不同介质中碳、氮、磷的分布特征及相关性研究[J]. 长江流域资源与环境,2015(5):853—859.
- [16] 杨洪,易朝路,谢平,等. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究[J]. 地球化学,2004,33(5):507—514.
- [17] 李军,肖化云,朱兆洲,等. 太湖五里湖富营养化的碳同位素记录[J]. 生态学杂志,2009,28(11):2245—2249.
- [18] 吴敬禄,林琳,刘建军,等. 太湖沉积物碳氮同位素组成特征与环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,2005,25(2):25—30.
- [19] 刘峰,高云芳,王立欣,等. 水域沉积物氮磷赋存形态和分布的研究进展[J]. 水生态学杂志,2011(4):137—144.
- [20] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. Chemical geology,1994,114(3):289—302.
- [21] 万国江,唐德贵,吴丰昌,等. 湖泊水—沉积物碳系统研究新进展[J]. 地质地球化学,1996(2):1—4.
- [22] 曾承. 湖泊自生碳酸盐碳同位素在环境变化中的应用[J]. 盐湖研究,2010(2):1—6.
- [23] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2013:498.
- [24] 王秋良,谢远云,梅惠. 湖泊沉积物中有机碳同位素特征及其古气候环境意义[J]. 安全与环境工程,2003,10(4):17—21.
- [25] 易仲强,刘德富,杨正健,等. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响[J]. 水生态学杂志,2009,2(5):6—11.

(上接第89页)

#### 参考文献