

# 巢湖沉积物不同形态氮季节性赋存特征

王书航<sup>1,2</sup>, 姜霞<sup>2\*</sup>, 钟立香<sup>2</sup>, 金相灿<sup>2</sup>, 孙世群<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学资源与环境学院, 合肥 230009; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要** 采用连续分级提取法研究了巢湖表层沉积物中游离态氮(FN)、可交换态氮(EN)、酸解态氮(HN)及残渣态氮(RN)的季节性赋存特征,同时结合表层沉积物中总氮(TN)及可矿化态氮(MN)含量的季节性变化,探讨各组分氮之间及其与TN、MN的相关关系。结果表明,除RN含量的季节性变化不明显外,TN及其他各组分N都存在季节性变化,表现为夏季低而冬季高的分布趋势。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是FN、EN的主要组成部分。TN平均含量呈西高东低的分布特点,最大值出现在西半湖湖心,平均含量为2 280.47 mg/kg;有效氮的形态在不同季节表现不同,春季为酸解氨基酸态氮(AAN),夏季、秋季为可交换态氮(EN),冬季为游离态氮(FN)。沉积物氮形态季节变化特征的研究为湖泊水环境生态安全评估及氮营养盐释放评价提供基础数据。

**关键词** 连续提取;氮形态;沉积物;季节变化;巢湖

中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)04-0946-08

## Seasonal Occurrence Characteristics of Different Forms of Nitrogen in the Sediments of Chaohu Lake

WANG Shu-hang<sup>1,2</sup>, JIANG Xia<sup>2</sup>, ZHONG Li-xiang<sup>2</sup>, JIN Xiang-can<sup>2</sup>, SUN Shi-qun<sup>1</sup>

(1. School of Resource and Environment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract** Seasonal characteristics of the free nitrogen (FN), the exchangeable nitrogen (EN), the acid hydrolysable nitrogen (HN) and the residual nitrogen (RN) in the surface sediment of Chaohu Lake were analyzed by sequential extraction method. The correlations among the nitrogen fractions with the total nitrogen (TN) and the mineralizable nitrogen (MN) were discussed considering the seasonal variations of the TN and MN. The results show that the concentrations of FN, EN and TN are lower in summer and higher in autumn and winter,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  is the main fraction of FN and EN. TN concentrations are much higher in West Chaohu Lake with the maximum concentration of 2 280.47 mg/kg in the west lake center than in the East Chaohu Lake. The seasonal order of mineralizable nitrogen (MN) content is winter > spring > autumn > summer. The bio-available nitrogen fraction varies with different seasons, which is the amino acid nitrogen (AAN) in spring, EN in summer and autumn, FN in winter. The study about seasonal occurrence characteristics of nitrogen fractions in sediment provided foundational data for lake ecological security evaluation and nitrogen release evaluation.

**Key words** sequential extraction methods; nitrogen speciation; sediment; seasonal changes; Chaohu Lake

沉积物作为湖泊最主要的内源对上覆水体营养水平及初级生产力有着重要作用<sup>[1]</sup>。而氮作为水生生态系统新陈代谢作用中关键的元素之一,其循环过程更为复杂<sup>[2]</sup>,同时研究表明,不同形态氮源对水华藻类生长、竞争、光合活性及产毒影响不同<sup>[3,4]</sup>。

沉积物中氮形态研究始于20世纪60~70年代,Kemp等<sup>[5,6]</sup>首先研究了安大略湖沉积物中氮的形态及分布发现其表层沉积物中90%的氮是以有机形式存在的,其中28%~46%为氨基酸态氮,4%~7%为己糖胺态氮,21%~31%为不可水解形式的氮,无机氮的主要形态则是固定态的氨氮,硝态氮和亚硝态氮的含量很低。De Lange<sup>[7]</sup>将沉积物分为可交换态氮、固定和有机氮,并指出沉积物中可交换态氮和沉积物中有机碳相关,与间隙水中氨态氮不相

关,而且沉积物中的有机氮和有机碳相关性较好。国内沉积物中氮形态的研究主要针对总氮(TN)、无机氮(IN)、氮的矿化作用、硝化、反硝化作用及通量研究等方面<sup>[8-12]</sup>,而使用连续提取法研究湖泊沉积物中氮的结合形态鲜有报道。

氮的赋存形态和含量直接影响其参与生物地球化学循环的进程、途径以及对氮循环的贡献大小<sup>[13]</sup>。沉积物及上覆水体物理化学和生物特性的季节性差异,导致沉积物中氮形态的变化。因此,本研究首次采用连续提取法对巢湖沉积物中各氮形态的季节性变化做了深入考察,旨在为进一步揭示湖泊沉积物氮循

收稿日期:2009-06-06;修订日期:2009-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(200507017);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2009KYYW15)

作者简介:王书航(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊水环境,E-mail:shuhang125126@163.com

\* 通讯联系人,E-mail:jiangxia@craes.org.cn

环机制及富营养化治理提供科学依据。

## 1 材料与方

### 1.1 研究区域

巢湖位于安徽省中部,江淮分水岭南侧,东经  $116^{\circ}24'30'' \sim 118^{\circ}00'00''$ ,北纬  $30^{\circ}58'40'' \sim 32^{\circ}06'00''$  之间,湖面面积  $769 \text{ km}^2$ ,正常水文年平均水深  $2.69 \text{ m}$ ,主要出入河流有 9 条,以姥山岛为界,将巢湖分为东、西两湖区,是一个半封闭的湖泊。

### 1.2 样品采集及处理

用柱状采样器(04.23 BEEKER, Eijkkamp, NL,  $\phi = 12 \text{ cm}$ )于 2008 年春季(4 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月)、冬季(12 月)分别在巢湖东、西半湖 8 个点采集表层  $2 \text{ cm}$  沉积物样品,每个采样点采集 8 个平行样并现场混匀,  $4^{\circ}\text{C}$  保存。所有点位用 GPS 进行定位导航,具体位置见图 1。取  $250 \text{ g}$  新鲜沉积物样品于  $10\,000 \text{ r/min}$  离心  $10 \text{ min}$  获得间隙水,过  $0.45 \mu\text{m}$  混合纤维滤膜,滤液冷藏保存,待测;离心后的沉积物经  $-40^{\circ}\text{C}$  冷冻干燥、研磨、过 100 目筛后保存于封口袋中备用;另取  $10 \text{ g}$  新鲜沉积物样品测定含水率。

### 1.3 样品分析

根据沉积物表面各形态氮解吸作用的强弱,参

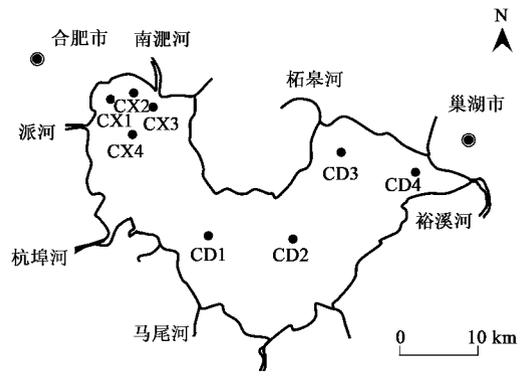


图 1 巢湖采样点示意

Fig. 1 Map of Chaohu Lake showing the sampling stations

照并改进国内其它氮形态分级提取方法<sup>[8,14,15]</sup>,将氮形态分为:游离态氮(FN),即动态释放的氮形态,是水-沉积界面氮释放的主要形态;可交换态氮(EN),即结合能力较弱和易被释放的氮形态,是沉积物氮营养盐比较活跃的一部分;酸解态氮(HN),在矿化作用可被转化而释放的氮形态,主要以有机氮形式存在;残渣态氮(RN),是最不容易释放的氮形态,也称不可转化态氮。TN 采用半微量开氏法。沉积物中各指标测定方法参照文献[16,17],具体步骤参见文献[18]和表 1。

表 1 沉积物氮形态测定方法

Table 1 Measurement methods of nitrogen speciation in sediments

步骤	氮形态	方法	指标及测定方法
第一步	游离态氮(FN)	取鲜沉积物 $5\,000 \text{ r/min}$ 离心 $15 \text{ min}$ , 过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜	$\text{NH}_4^+-\text{N}$ (游离态氨氮): 纳氏试剂比色法测定
			$\text{NO}_3^--\text{N}$ (游离态硝氮): 紫外分光光度法测定
			DTN(游离态总氮): 碱性过硫酸钾氧化法测定
			DON(游离态有机氮): $Q_{(\text{DON})} = Q_{(\text{DTN})} - Q_{(\text{NH}_4^+-\text{N})} - Q_{(\text{NO}_3^--\text{N})}$
第二步	可交换态氮(EN)	取第一步残渣,用 $2 \text{ mol/L KCl}$ 振荡 $2 \text{ h}$ , 过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜	$\text{NH}_4^+-\text{N}$ (可交换态氨氮): 纳氏试剂比色法测定
			$\text{NO}_3^--\text{N}$ (可交换态硝氮): 紫外分光光度法测定
			STN(可交换态总氮): 碱性过硫酸钾氧化法测定
			SON(可交换态有机氮): $Q_{(\text{SON})} = Q_{(\text{STN})} - Q_{(\text{NH}_4^+-\text{N})} - Q_{(\text{NO}_3^--\text{N})}$
第三步	酸解态氮(HN)	取第二步残渣,用 $6 \text{ mol/L HCl}$ $120^{\circ}\text{C}$ 封管水解 $24 \text{ h}$ , 调 pH 到 $6.5 \pm 0.2$	AN(酸解铵态氮): 纳氏试剂比色法测定
			AAN(酸解氨基酸态氮): 茚三酮比色法测定
			ASN(酸解氨基糖态氮): Elson-Morgen 法测定
			THAN(酸解总氮): 碱性过硫酸钾氧化法测定
			UN(酸解未鉴定态氮): $\text{HUN} = \text{THAN} - \text{AN} - \text{AAN} - \text{ASN}$
第四步	残渣氮(RN)	取第三步残渣,用浓硫酸加速剂催化测定	RN(残渣态氮): 开氏定氮法测定

### 1.4 数据处理

游离态氮含量计算公式:

$$Q = c \frac{\varphi}{1 - \varphi}$$

式中,  $Q$  为沉积物中各游离态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、DON)的含量,  $\text{mg/kg}$ ;  $c$  为间隙水中各形态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、DON)含量,  $\text{mg/L}$ ;  $\varphi$  为含水率。

所有样品分析均做 3 次平行,试验结果均以 3

次样品分析的平均值表示(3次分析结果的误差范围 < 5% ),试验数据采用 Excel 2003、Origin 8.0 以及 SPSS 16.0 软件进行统计检验、相关性及多元回归分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积物中总氮(TN)的季节性赋存特征

巢湖表层沉积物中总氮(TN)呈季节性变化,各采样点(除 CD4)TN 含量在夏季低而秋冬季节较高,见图 2. 采样点 CD4 的表层沉积物中 TN 含量的季节性变化不明显,主要是因为其处于巢湖市自来水厂取水区域,严格的污染源控制和定期的底泥环保疏浚保障该区域底泥的相对清洁.

从空间上分布看,表层沉积物中 TN 呈西高东低分布趋势,西半湖湖心处 CX4 含量最高,年均值为 2 208.47 mg/kg. 据美国 EPA<sup>[19]</sup>中沉积物 TN 污染的评价标准, < 1 000 mg/kg 时,为清洁; 1 000 ~ 2 000 mg/kg 时为轻污染; > 2 000 mg/kg 时为重污染. 全湖超过重污染水平的为 CX4 点,而 CD4 为清洁,其余为轻污染. 这主要因为西半湖接纳了城市合肥排出的大部分污染物,而西半湖地势为四周高中间低,从而导致大量悬浮污染物沉积到湖心,使 TN 明显高于其它采样点.

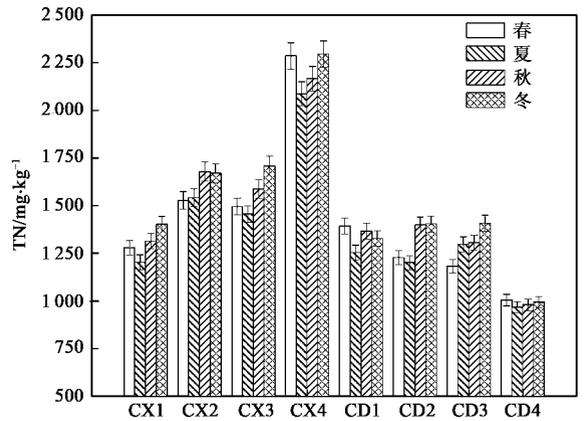


图 2 巢湖沉积物总氮(TN)的季节性变化

Fig. 2 Seasonal variations of TN concentrations in Chaohu Lake

### 2.2 沉积物中游离态氮(FN)的季节性赋存特征

间隙水中营养盐浓度对上覆水水质起到不可忽视的作用. 本研究将间隙水中营养盐浓度(mg/L)换算成沉积物中营养盐浓度(mg/kg),称为游离态氮(FN),以便比较沉积物中不同结合态氮含量高低及对氮循环贡献大小.

从图 3 可以看出,游离态  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在西半湖基本上呈夏季低而秋、冬季节高的分布趋势,而在东半湖季节性变化不明显[图 3(a)];  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、DON 在全湖季节性变化不明显[图 3(b)、3(c)]; DTN 在秋、冬

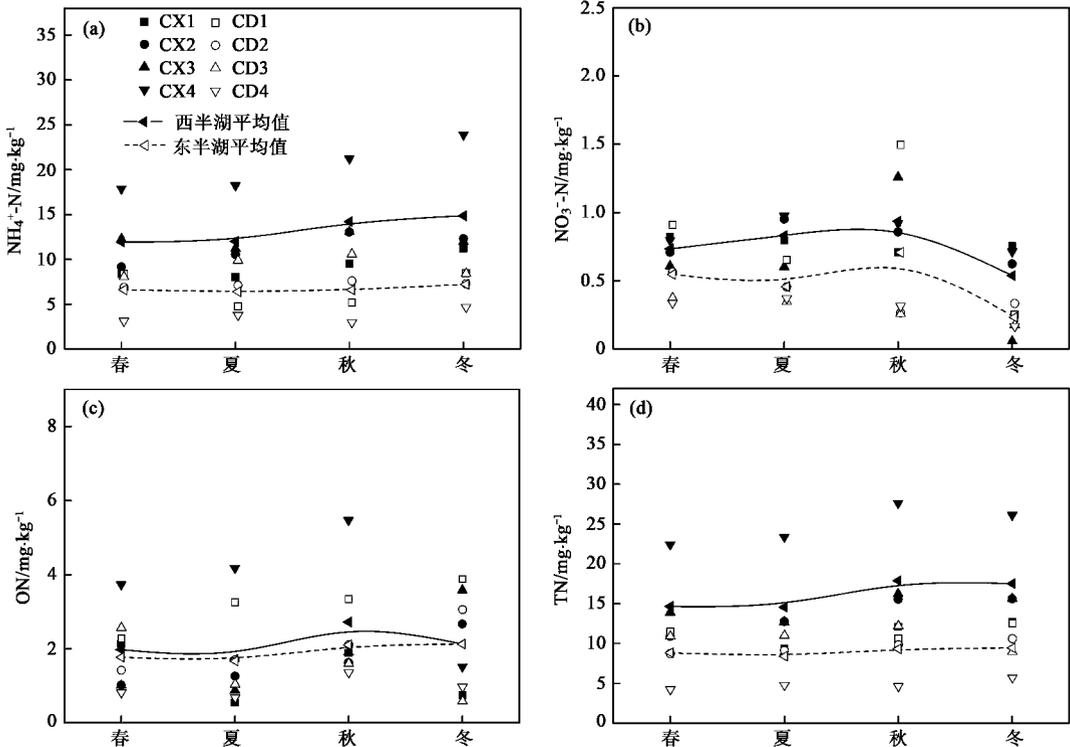


图 3 巢湖沉积物中游离态氮(FN)季节性变化

Fig. 3 Seasonal variations of free N concentrations in Chaohu Lake

季节含量较高,而春、夏季节含量较低[图 3(d)].  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  是 FN 的主要组成部分,占游离态 TN 的比例在 61.99% ~ 91.93% 之间;其次是 DON,占游离态 TN 的比例在 5.79% ~ 39.26% 之间,最后是  $\text{NO}_3^--\text{N}$ .

### 2.3 沉积物中可交换态氮(EN)的季节性赋存特征

沉积物中 EN 主要包括离子交换态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、DON,是沉积物氮素中较“活跃”的部分,也是沉积物-水界面交换最频繁形态。

从图 4 可以看出,全湖可交换态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量季节性变化为秋季 > 冬季 > 夏季 > 春季[图 4(a)],西半湖可交换态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量的变化范围是 62.31 ~ 295.62  $\text{mg/kg}$ ,东半湖为 62.53 ~ 162.52  $\text{mg/kg}$ . 可交换态  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量季节性变化为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季[图 4(b)],西半湖可交换态  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量的变化范围是 5.14 ~ 22.57  $\text{mg/kg}$ ,东半湖为 2.18 ~ 15.14  $\text{mg/kg}$ . 可交换态 ON 含量大小的季节性排序为夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季[图 4(d)],西半湖可交换态 ON 含量的变化范围是 15.76 ~ 109.53  $\text{mg/kg}$ ,东半湖为 4.72 ~ 66.21  $\text{mg/kg}$ . 从组成比例来看, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  是表层沉积物中可交换态氮的主要组成部分。

### 2.4 沉积物中酸解态氮(HN)及残渣态氮(RN)的季节性赋存特征

参照 Bremner<sup>[14]</sup>对土壤中酸解有机氮形态分类的研究,将土壤中能被酸分解的氮素称为酸解态氮,其中主要可鉴别的有机化合物是酸解铵态氮(AN)、氨基酸态氮(AAN)、氨基糖态氮(ASN)、总酸解氮(THAN)以及未鉴定态氮(HUN)。

表层沉积物中 AN 含量的季节性变化顺序为冬季 > 夏季 > 秋季 > 春季[图 5(a)],西半湖平均含量为 24.77 ~ 687.82  $\text{mg/kg}$  之间,东半湖在 167.53 ~ 497.42  $\text{mg/kg}$  之间. AN 的主要来源于:沉积物中固定态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$  被镶嵌在 2:1 型黏土矿物晶层中)的释放;水解过程中蛋白质的降解作用;某些氨基酸,特别是天门冬氨酸、谷氨酸、含硫氨基酸及氨基糖的脱氨基作用;酰胺类化合物的分解<sup>[14]</sup>.

表层沉积物中 AAN 含量的季节性变化顺序为夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季[图 5(b)],西半湖 AAN 的含量在 391.67 ~ 569.15  $\text{mg/kg}$  之间,东半湖平均含量在 319.59 ~ 529.20  $\text{mg/kg}$  之间. AAN 是可交换态氮的重要来源之一,作为主要可鉴别的含氮有机化合物之一,大部分存在于有机物质中的蛋白质和多肽中<sup>[20,21]</sup>.

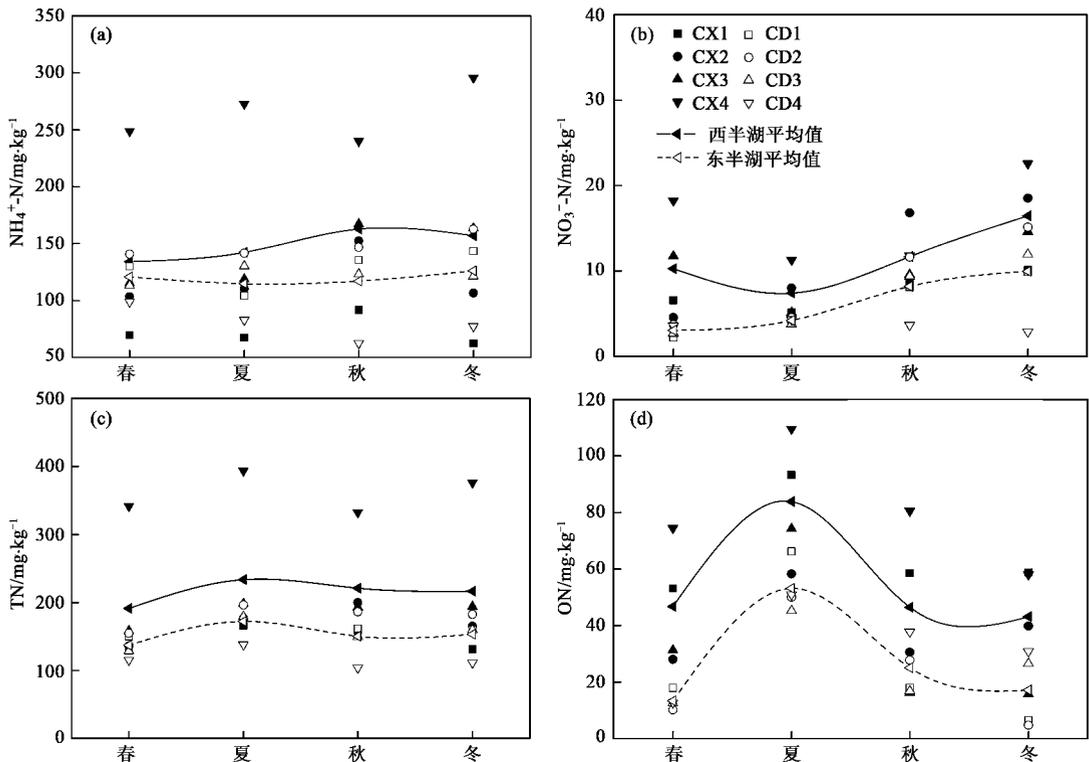


图 4 巢湖沉积物可交换态氮(EN)季节性变化

Fig. 4 Seasonal variations of exchanged N concentrations in Chaohu Lake

表层沉积物中 ASN 含量的均值来看,秋季明显高于其他季节的含量,夏季次之,冬季和春季较小[图 5(c)].西半湖 ASN 的平均含量在 92.72 ~ 152.51 mg/kg 之间,东半湖在 71.79 ~ 177.31 mg/kg 之间. ASN 主要组成是葡萄糖胺,其次是乳糖胺,这 2 种胺之和接近于氨基糖氮量,研究认为氨基糖很少在高等植物中发现,而微生物细胞物质是 ASN 的

主要来源<sup>[22]</sup>.

表层沉积物中 HUN 平均含量的季节性变化顺序为春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季[图 5(d)],西半湖 HUN 含量在 133.72 ~ 322.00 mg/kg 之间,东半湖含量在 61.84 ~ 270.11 mg/kg 之间. HUN 的结构组成相对较为复杂,主要由非  $\alpha$ -氨基酸、*N*-苯氧氨基酸态氮和嘧啶、嘌呤等杂环氮组成<sup>[23]</sup>.

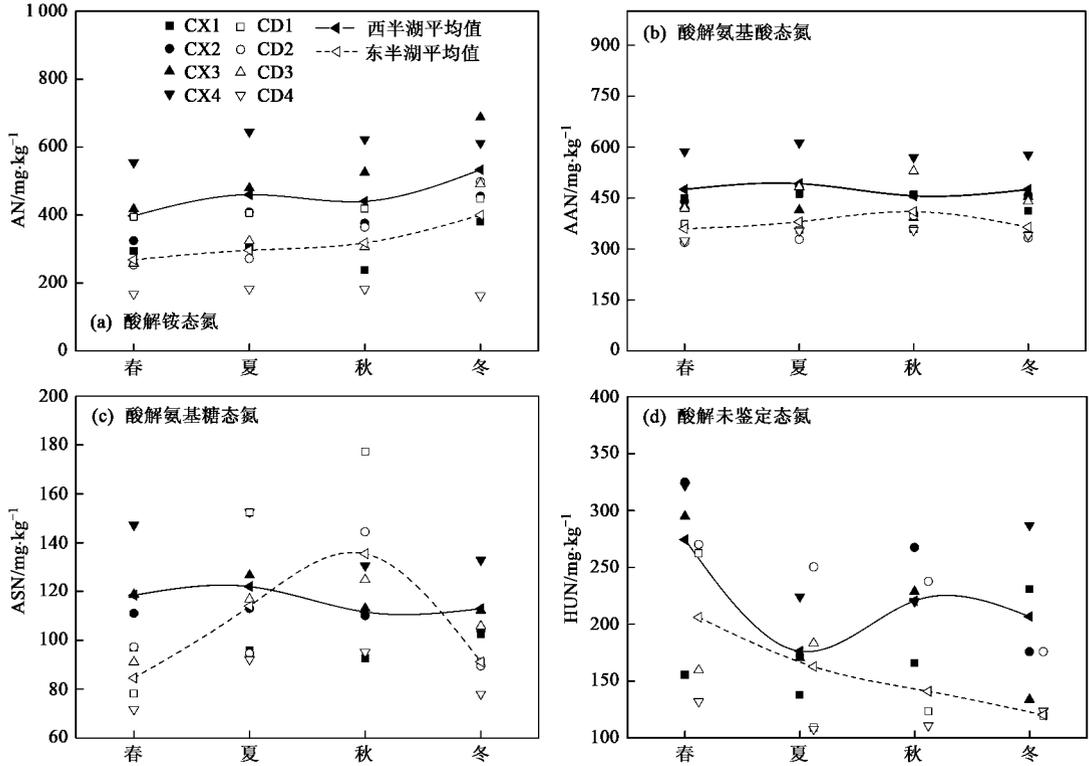


图 5 巢湖沉积物中 AN、AAN、ASN 及 HUN 含量的季节性变化

Fig. 5 Seasonal variations of AN, AAN, ASN and HUN concentrations in Chaohu Lake

表层沉积物中 THAN 含量的季节性变化顺序为冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季,西半湖 THAN 的含量在 957.25 ~ 1 633.87 mg/kg 之间,东半湖沉积物中

THAN 的含量在 695.52 ~ 1 144.23 mg/kg 之间.从空间分布上来看,西半湖沉积物中含量明显高于东半湖,见图 6(a).

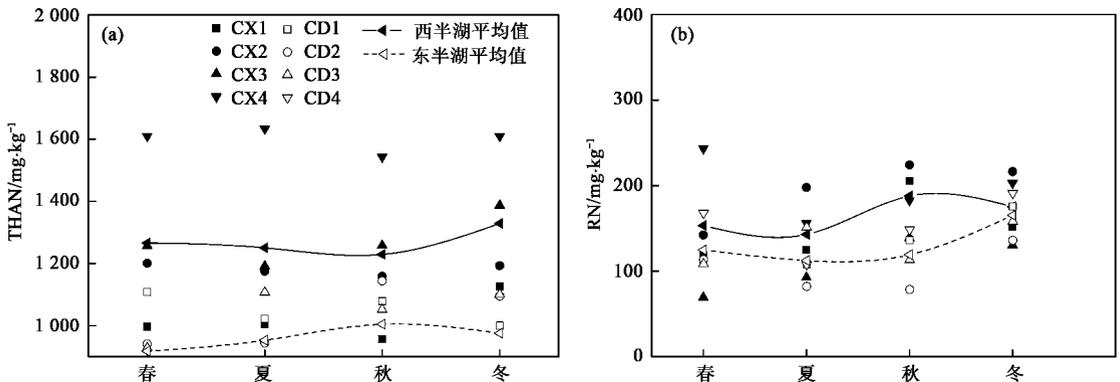


图 6 巢湖沉积物中 THAN 及 RN 含量的季节性变化

Fig. 6 Seasonal variations of THAN and RN concentrations in Chaohu Lake

巢湖东、西半湖沉积物中 RN 含量的时空分布见图 6(b)。RN 主要以杂环态存在,或者与杂环或芳香环键结合在一起,这部分氮主要来源于缩合程度较高的腐殖质结构成分中<sup>[21,24]</sup>。全湖残渣态氮的平均含量在夏季最低,为 90.07 mg/kg。西半湖残渣态氮的含量在 79.73 ~ 334.06 mg/kg 之间,东半湖在 67.72 ~ 193.64 mg/kg 之间。

## 2.5 沉积物可矿化态氮(MN)的季节性赋存特征

沉积物向上覆水提供氮的能力主要受起始矿质氮和 MN 控制,MN 含量主要反映沉积物提供氮的潜在能力。巢湖表层沉积物 MN 的季节性变化见图 7。

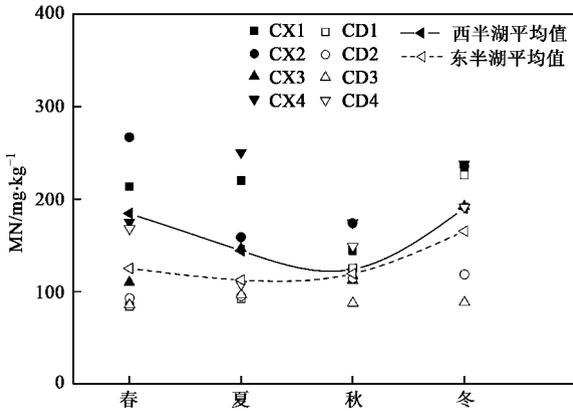


图 7 巢湖沉积物中可矿化态氮(MN)的季节性变化

Fig.7 Seasonal variations of MN concentrations in Chaohu Lake

表层沉积物中可 MN 含量的季节性变化顺序为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,西半湖 MN 的含量在 109.88 ~ 250.25 mg/kg 之间,东半湖沉积物中 MN 的含量在 83.70 ~ 225.72 mg/kg 之间。矿化作用实质是微生物通过酶所促使的一种化学反应,因此,在环境条件适宜的情况下,沉积物中可矿化态氮含量主要受总 TN 浓度、起始矿质态氮( $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N)浓度的影响。巢湖表层沉积物中 EN 在秋季最高,高浓度的矿质态氮抑制了酶促反应的进一步进行,导致沉积物中可矿化态氮在夏、秋季较低。

## 3 讨论

用连续提取法测得沉积物总提取态氮(TSEN = FN + EN + HN + RN)在 962 ~ 2295 mg/kg 之间,平均值为 1445 mg/kg,同时发现,用连续提取法测得 TSEN 含量都比用凯氏半微量法测得 TN 含量略小,TSEN 与 TN 的比值平均为 0.86 ~ 0.98,损失可能是由 FN 和 EN 提取步骤中过膜造成的。沉积物中各形

态氮差异性明显:从平均含量上看,HN 平均含量最高;其次是 EN,再次是 RN;FN 最小;从组成成分上看,FN、EN 以无机氮为主;HN、RN 除少量被固定在 2:1 型黏土矿物晶层中的  $\text{NH}_4^+$ -N,基本上是有有机氮。

沉积物中营养盐含量、形态及其物理化学条件是影响营养盐潜在释放的条件,为了探讨巢湖表层沉积物中各形态氮是否存在必然联系,采用统计分析的方法对沉积物中各形态氮的含量进行了正态分布检验和相关性研究。

从表 2 可以看出,沉积物中 FN 的含量主要受 EN、HN 含量的控制,呈显著相关。有机氮(主要是 HN)经矿化作用形成大量  $\text{NH}_4^+$ -N,然后在 FN 和 EN 之间分配,因此,FN 与 EN、HN 极显著相关。但也有研究表明,FN 含量与其它因素有关,如上覆水营养盐浓度、营养盐在水-沉积物界面的交换通量等<sup>[25]</sup>。EN 与 HN 呈极显著相关性,主要与沉积物中 EN 的来源有关,EN 除少量来源于沉积物中有机、无机组分对  $\text{NH}_4^+$ -N 的吸附作用,大部分来源于沉积物中有机质的矿化作用,即来源于 HN 的矿化作用。TN 与 EN、HN 呈极显著相关,结合 EN、HN 占 TN 的比重可以看出,EN、HN 是支配 TN 分布的主要因素。RN 与其它形态氮相关性较差,可能是因为该形态氮生物可利用性较差。MN 仅在夏季与 FN 呈显著相关,但在其季节相关性系数都是正值,它说明 FN 含量的高低受沉积物矿化作用的影响,尤其在夏季;EN (作为矿化作用的生成物)含量的增加导致矿化作用的减弱,因此 MN 与 EN 呈不显著相关;MN 与 HN 显著相关,主要是因为 HN 是可矿化氮的主要来源;MN 与 TN 显著相关说明 TN 含量的高低在一定程度上反映沉积物生物潜在可利用态氮的大小。

沉积物中生物可利用性氮主要由 2 个来源:沉积物中无机氮( $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N)和可矿化态氮(主要为酸解态氮和溶解态有机氮)。为了表明沉积物各种氮形态的生物可利用性,对巢湖沉积物进行了 40℃ 水淹 1 周矿化培养,把矿化后无机氮与 FN 之和称为有效氮,然后用有效态氮对各个形态氮(FN、EN、AAN、AN、ASN、HUN、RN)做多元回归分析,找出不同季节对有效氮起主要贡献作用和极相关性的氮形态。在多元回归分析中,各自变量之间往往存在多重共线性,直接建立因变量与自变量的线性回归模型,可能给偏回归系数带来不合理的解释,因此,本研究采用多元逐步回归分析法,以期建立不同季节表层沉积物中各形态氮对有效氮的“最优”回归方程,结果见表 3。

表 2 不同形态氮之间的相关系数(  $n = 8$  )<sup>1)</sup>Table 2 Correlation coefficients between different nitrogen speciation (  $n = 8$  )

氮形态	采样季节	FN	EN	HN	RN	TN	MN
FN	春	1					
	夏	1					
	秋	1					
	冬	1					
EN	春	0.888 **	1				
	夏	0.922 **	1				
	秋	0.888 **	1				
	冬	0.898 **	1				
HN	春	0.957 **	0.840 **	1			
	夏	0.988 **	0.904 **	1			
	秋	0.915 **	0.844 **	1			
	冬	0.919 **	0.845 **	1			
RN	春	0.557	0.812 *	0.504	1		
	夏	-0.302	-0.592	-0.291	1		
	秋	0.507	0.433	0.395	1		
	冬	0.614	0.521	0.369	1		
TN	春	0.953 **	0.936 **	0.967 **	0.704	1	
	夏	0.991 **	0.903 **	0.997 **	0.250	1	
	秋	0.931 **	0.865 **	0.962 **	0.627	1	
	冬	0.970 **	0.921 **	0.967 **	0.572	1	
MN	春	0.333	0.128	0.447	0.195	0.601	1
	夏	0.724 *	0.695	0.752 *	-0.225	0.752 *	1
	秋	0.685	0.578	0.666	0.830 *	0.808 *	1
	冬	0.694	0.471	0.662	0.335	0.758 *	1

1) \* 表示显著相关  $p < 0.05$  ; \*\* 表示极显著相关  $p < 0.01$

表 3 不同形态氮与有效氮的多元逐步回归方程<sup>1)</sup>

Table 3 Multiple stepwise regressions between different nitrogen speciation and effective nitrogen

季节	逐步回归方程
春	$y = 1.121\text{AAN} - 140.809$
夏	$y = 1.567\text{EN} + 48.571$
秋	$y = 1.446\text{AAN} + 62.305$
冬	$y = 19.085\text{FN} + 134.926$

1) 酸解态氮(HN)为沉积物中含量最大的氮形态,且成分较为复杂,故在回归分析中将其分解为 AAN、AN、ASN、HUN,  $y$  为沉积物有效氮, mg/kg; AAN 为酸解氨基酸态氮, mg/kg; EN 为可交换态氮, mg/kg; FN 为游离态氮, mg/kg

从表 3 可以看出,不同季节对有效氮起主要作用的氮形态不同.春季为酸解氨基酸态氮(AAN),其在很大程度上决定了沉积物潜在可矿化态氮含量的高低;夏季、秋季为可交换态氮(EN),此时水-沉积物界面营养盐浓度梯度较大,EN 作为沉积物中主要生物可利用态氮,为间隙水向上覆水扩散提供氮源;冬季为游离态氮(FN),此时水柱中水华藻类已明显减少,因需求较小而导致水-沉积物界面营养盐浓度差梯度较小,秋季矿化出来的无机氮在间隙水中不断积累,从而使 FN 成为有效氮最密切的贡献者.

## 4 结论

(1)利用连续提取法对巢湖沉积物中氮形态进行了分级提取,将巢湖沉积物中氮形态分为游离态氮、可交换态氮、酸解态氮和残渣态氮,各形态氮含量大小为酸解态氮 > 可交换态氮 > 残渣态氮 > 游离态氮.

(2)表层沉积物中总氮在夏季较低而秋冬季节较高,游离态氮在秋、冬季节含量较高,而春、夏季节含量较低;总酸解氮的季节性变化顺序为冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季;残渣态氮季节性变化不明显;可矿化态氮含量的季节性变化顺序为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季.

(3)不同季节对有效氮起主要作用的氮形态不同,春季为酸解氨基酸态氮,夏、秋季节为可交换态氮,冬季为游离态氮.

## 参考文献:

- [1] Van Raaphorst W, Kloosterhuis H. Phosphorous sorption in superficial intertidal sediments [J]. Marine Chemistry, 1994, 48: 1-16.
- [2] Cartaxana P, Cacador I, Vale C, et al. Seasonal variation of inorganic nitrogen and net mineralization in a salt marsh

- ecosystem [ J ]. *Mangroves and Salt Marshes* ,1999 , **3** :127-134.
- [ 3 ] 张清春,于仁诚,周名江,等. 不同氮源对微小亚历山大藻生长和毒素产生的影响[ J ]. *海洋学报* ,2005 , **27**( 6 ) :148-143.
- [ 4 ] Berman T , Chava S. Algal growth on organic compounds as nitrogen sources [ J ]. *Journal of Plankton Research* ,1999 , **21** ( 8 ) :1423-1437.
- [ 5 ] Kemp A L W , Mudrochova A. Distribution and forms of nitrogen in a lake Ontario sediment core [ J ]. *Limnology and Oceanography* ,1972 , **17**( 6 ) 855-867.
- [ 6 ] Kemp A L W. Organic carbon and nitrogen in the surface sediments of Lake Ontario , Erie and Huron [ J ]. *Journal of Sedimentary Petrology* ,1970 , **41** 537-548.
- [ 7 ] De Lange G J. Distribution of exchangeable , fixed , organic and total nitrogen in interbedded turbiditic/pelagic sediments of the Madeira Abyssal plain , eastern North Atlantic [ J ]. *Marine Geology* ,1992 , **109** :95-114.
- [ 8 ] 吴丰昌,万国江,蔡玉蓉. 沉积物-水界面的生物地球化学作用[ J ]. *地球科学进展* ,1996 , **11**( 2 ) :191-197.
- [ 9 ] 刘冬梅,姜霞,金相灿,等. 太湖藻对水-沉积物界面磷交换过程的影响[ J ]. *环境科学研究* ,2006 , **19**( 4 ) 8-13.
- [ 10 ] 金相灿,姜霞,王琦,等. 太湖梅梁湾沉积物中磷吸附/解吸平衡特征的季节性变化[ J ]. *环境科学学报* ,2006 , **28**( 1 ) :24-30.
- [ 11 ] 刘素美,张经,于志刚,等. 渤海莱州湾沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量[ J ]. *环境科学* ,1999 , **20**( 2 ) :12-16.
- [ 12 ] 李宝,丁士明,范成新,等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[ J ]. *环境科学* ,2009 , **29**( 1 ) :114-120.
- [ 13 ] 邓建才,陈桥,翟水晶,等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[ J ]. *环境科学* ,2008 , **29**( 12 ) 3382-3386.
- [ 14 ] Bremner J M. Organic forms of soil nitrogen [ A ]. In : Bremner J M , Black C A ( eds ). *Methods of Soil Analysis* [ C ]. USA : Madison , American Society of Agronomy , 1965. 1148-1178.
- [ 15 ] Stevenson F J. Organic forms of soil nitrogen [ M ]. *Humus Chemistry* , Wiley , New York , 1997. 55-119.
- [ 16 ] 金相灿,屠清英. 湖泊富营养化调查规范 [ M ]. 北京 : 中国环境科学出版社 ,1990.
- [ 17 ] 许光辉,郑洪元. 土壤微生物分析方法手册 [ M ]. 北京 : 中国农业出版社 ,1986.
- [ 18 ] 钟立香,王书航,姜霞,等. 采用连续分级提取法研究春季巢湖沉积物中不同结合态氮的赋存特征 [ J ]. *农业环境科学学报* ,2009 , **28**( 10 ) 2132-2137.
- [ 19 ] A Guidance Manual to support the assessment of Contaminated Sediments in Freshwater ecosystems [ S ]. US EPA ,2002.
- [ 20 ] Griffiths S M , Wowden F J , Schnitzer M. The alkaline hydrolysis of acid-resistant soil and humic residues [ J ]. *Soil Bio Chem* , 1976 , **8** 529-531.
- [ 21 ] Sowden F J , Chen Y , Schnitzer M. The nitrogen distribution in soils formed under widely differing climatic conditions [ J ]. *Geochim Cosmochim Acta* , 1997 , **41** :1524-1526.
- [ 22 ] Stevenson F J. *Humus chemistry* [ M ]. Wiley , New York , 1994. 496.
- [ 23 ] Schulten H R. The three-dimensional structure of humic substances and soil organic matter studied by computational analytical chemistry [ J ]. *Fresenius J Anal Chem* , 1995 , **351** : 62-73.
- [ 24 ] Sulce S , Palma-Lopez D , Jaquin F , *et al.* Study of immobilization and remobilization of nitrogen fertilizer in cultivated soils by hydrolytic fractionation [ J ]. *Eur J Soil Sci* , 1996 , **47** :249-255.
- [ 25 ] 何桐,谢健,余汉生,等. 大亚湾表层沉积物间隙水与上覆水中营养盐分布特征 [ J ]. *环境科学学报* ,2009 , **28**( 11 ) :2361-2368.