

长江口潮滩生态系统氮微循环过程中 大型底栖动物效应实验模拟

刘 敏¹, 侯立军², 许世远¹, 余 婕¹, 欧冬妮¹, 刘巧梅¹

(1. 华东师范大学地理系, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 依据长江口滨岸潮滩大型底栖动物的自然分布特征, 选取了两段典型的研究区域——崇明东部潮滩和浒浦岸段边滩, 运用实验模拟和对比分析方法, 定量地研究了大型底栖动物谭氏泥蟹和河蚬对潮滩生态系统中氮营养盐的界面扩散及其早期成岩变化的影响。研究表明, 谭氏泥蟹主要通过掘穴活动增加沉积物-水-气三相接触界面, 促进沉积物中的无机氮(NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N) 向上覆水体中扩散, 并且也加快了沉积物中氮的氨化作用和硝化作用速率, 而河蚬则主要通过生理活动机制影响潮滩生态系统中氮素的迁移转化过程。研究结果深刻揭示了大型底栖动物通过生物扰动和生理活动作用机制, 促进了长江口潮滩生态系统中氮素的生物地球化学循环过程速率。

关键词: 潮滩; 生态系统; 生源要素氮; 底栖动物效应; 长江口

文章编号: 1000-0933(2005)05-1132-06 **中图分类号:** Q178, Q958 **文献标识码:** A

Experimental simulation of the effects of macrobenthos on the microcycling of nitrogen in the Yangtze estuarine and tidal flat ecosystem

LIU Min¹, HOU Li-Jun², XU Shi-Yuan¹, YU Jie¹, OU Dong-Ni¹, LIU Qiao-Mei¹ (1. Department of Geography, Key Laboratory of Geo-information Science of the Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Shanghai 200062, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1132~1137.

Abstract: Based on the natural distribution of macrobenthos, two sections typical of the eastern tidal flat of Chongming Island and Xupu tidal flats were chosen as the study area in the Yangtze estuarine and coastal zone. Using a comparative and simulative approach, this study quantitatively explored the effects of macrobenthos (*Ilyoplax deschampsin* and *Corbicula fluminea*) on the exchange of nitrogen across the sediment-water interface and the early diagenesis of nitrogen in tidal sediments from the Yangtze Estuary.

It was found that *Ilyoplax deschampsin* and *Corbicula fluminea* affected the exchange of nitrogen across the sediment-water interface by different biological mechanisms. *Ilyoplax deschampsin* enhanced the exposed area of sediment to water and air by its bioturbation. It therefore accelerated the exchange of nitrogen at the sediment-water interface. Compared with *Ilyoplax deschampsin*, *Corbicula fluminea*, however, influenced the exchange of nitrogen across the sediment-water interface mainly by the physiological mechanisms such as excretion.

Crabs such as *Ilyoplax deschampsin* changed the physical structure of the tidal sediments through intense bioturbation, and increased the content of dissolved oxygen in the sediments by increasing the exposure of these sediments to air. As a consequence, the processes of biogeochemical cycling of nitrogen (e. g. ammonification and nitrification) were markedly accelerated in the estuarine and tidal sediments.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40131020, 49801018); 教育部高等学校骨干教师计划资助项目; 上海市重点学科建设资助项目

收稿日期: 2004-02-14; **修订日期:** 2005-03-11

作者简介: 刘敏(1964~), 男, 内蒙古土左人, 博士, 教授, 主要从事区域环境质量演变与环境生物地球化学研究。E-mail: mliu@geo.ecnu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40131020, 49801018); Foundation for University Key Teacher by Ministry of Education; Shanghai Key Disciplinary Project

Received date: 2004-02-14; **Accepted date:** 2005-03-11

Biography: LIU Min, Ph. D., Professor, mainly engaged in regional environmental quality evolution and environmental biogeochemistry. E-mail: mliu@geo.ecnu.edu.cn

Corbicula fluminea is mainly found in tidal surface sediment. It affected nitrogen cycling in the surface sediments mainly by physiological activities such as the excretion. In addition, it was also found that the burrowing of *Corbicula fluminea*, to some extent, had a potential influence on the nitrogen cycling.

Key words: tidal flat; ecosystem; nitrogen nutrient; effect of macrobenthos; the Yangtze Estuary

河口及其滨岸带生源要素生物地球化学循环被列为国际地圈-生物圈计划(IGBP)和海岸带陆海交互作用(LOICZ)研究的重要内容,它对研究全球变化与区域响应具有重要的科学意义。河口滨岸地区作为海洋与陆地的交汇地带,是连接河流与海洋的通道,是淡水与海洋栖息地之间的生态交错区,是最富有生物多样性和生物量的区域之一。底栖动物是河口生态系统的次级生产者,构成了河口生态系统中底栖亚系统,在河口生态系统营养盐的生物地球化学循环过程中起着极其重要的作用^[1],底栖动物通过生物扰动(包括潜穴、爬行、觅食和避敌等)及对营养盐的吸收、转化、降解和排泄等生理活动影响着营养盐在潮滩沉积物-水-气三相界面之间的迁移、转化^[2]。Mortimer 等探讨了英国 Humber 河口潮滩沉积物中 3 类大型底栖动物对营养盐界面通量的干扰,发现这些生物的活动导致沉积物硅和磷的释放通量明显降低,而氨氮的释放通量和硝酸盐的吸收通量则显著上升^[3];Pelegri 和 Tuominen 等研究了穴居动物对潮滩沉积物中氮的硝化和反硝化作用的影响,发现穴居动物的活动可大大促进氮的硝化和反硝化作用之间的耦合^[4~6]。Yamada 在探讨底栖动物与沉积物中氮的迁移转化之间的关系时,发现底栖动物的排泄物对沉积物中氮的迁移转化也有重要的作用^[7]。

长江河口滨岸滩涂湿地发育广阔,底栖动物丰富,据调查资料表明,共有大型底栖动物 68 种,其中甲壳类动物和软体类动物占绝对优势^[8,9]。丰富的底栖动物在长江河口滨岸潮滩生态系统内氮的生物地球化学循环过程中所起的作用将不容忽视。基于此,本文在长江河口滨岸带选取了典型的两岸段潮滩——崇明东滩和浒浦岸段边滩,运用实验模拟对比方法,分别研究了甲壳动物优势种谭氏泥蟹和软体动物优势种河蚬对潮滩生态系统内氮的生物地球化学循环过程的影响。

1 研究区概况

崇明东滩是指长江河口崇明岛东端海堤外的一片广袤滩涂,是长江河口规模最大、发育最完善的河口型潮汐滩涂湿地,滩地面积广阔,潮滩最宽处有 13km,自陆向海依次可划分为高、中、低潮滩,其中高潮滩滩面长有芦苇,呈带状分布^[10,11],近年来还有人为外来物种——互花米草的入侵;中潮滩滩面上发育着蔗草、海三棱蔗草,呈片状分布;低潮滩为光滩,基本上没有植被发育。据调查资料表明,崇明东滩底栖动物共有 45 种,其中甲壳类动物占绝对优势,优势种为谭氏泥蟹(*Ilyoplax deschampsin*)、无齿相手蟹(*Sesarma dehauni*)、天津厚蟹(*Helice tridens tientsinensis*)。在野外实地考察时发现,高潮滩部位,除在大潮期间,平时基本上不能被海水浸没,而蟹类动物掘穴作用明显。基于这一现象,选择崇明东滩作为研究区域之一,利用甲壳动物优势种谭氏泥蟹,通过实验模拟来研究蟹类动物的掘穴作用对潮滩氮营养盐迁移转化过程的影响。

浒浦边滩位于江苏省常熟市常浒河与长江交汇处,也属河口型潮汐滩涂湿地,自陆向海依次可划分为中、低潮滩,其中中潮滩滩面上发育着蔗草,滩面物质组成成分为砂质粉砂;低潮滩为光滩,滩面组成物质为粉砂质砂,基本上没有植被发育。并且,此岸段边滩近低潮滩部位软体动物河蚬(*Corbicula fluminea*)种群密度和生物量极高,基于此,选择浒浦边滩作为研究区域,来探讨软体动物河蚬对潮滩氮营养盐迁移转化过程的影响。

2 样品采集与实验模拟方法

2.1 样品采集

2002 年 7 月,于崇明东滩高潮滩(31°28'N, 121°56'E)和浒浦边滩低潮滩(31°45'N, 120°54'E)各选取一块 2m×2 m 沉积物质地相对均一的样方。考虑到谭氏泥蟹和河蚬活动空间的差异,分别采集不同深度的柱状沉积物。在崇明东滩选取的样方内,用内径为 16 cm、长度为 25 cm 的 PVC 管采集 12 根沉积物柱样,并在此样方内采集谭氏泥蟹动物样。在浒浦边滩选取的样方内,用聚丙烯长方柱(12 cm×12 cm×5 cm)采集 6 根沉积物柱样,且在此样方内采集河蚬动物样。此外,在两采样点处还用聚乙烯塑料桶采集潮滩上覆水样。

2.2 实验模拟及化学分析方法

2.2.1 蟹类动物培养模拟实验 将在崇明东滩采集的 12 根沉积物柱样,分成 4 组,编号分别为 A1、A2 和 B1、B2 组,每组内有 3 根平行沉积物柱样。实验模拟方法如下:A1 和 A2 组不放入动物样,作为对照样培养,B1 和 B2 组中,依据潮滩蟹类动物的平均密度放入适量的谭氏泥蟹,分别进行为期 15d 的培养;15d 培养结束之后,分别向 A1 和 B1 组中小心地加入 12 cm 水深的原上覆水样(在加水样的过程中未发现沉积物有明显地扰动现象),此时开始模拟沉积物-水界面间营养盐的交换通量变化,培养 4h 之后用针筒各抽取 20 ml 的水样,将抽取的实验水样过 0.45 μm 的微孔滤膜后置入聚乙烯塑料瓶内,并加入 1 滴饱和 HgCl₂ 溶液固定。此外,将上述培养的 A2 和 B2 组柱状沉积物样,在 0~5 cm 之间以 1 cm 间距进行分割,5 cm 以下以 2 cm 间距进行分割,分层之后的沉积物样,进行可交换态无机氮分析测试。在化学分析测试之前,上覆水和沉积物样品放置于冰柜中冷冻

保存。

2.2.2 河蚬动物培养模拟实验 将在浒浦边滩采集的 6 根沉积物柱样,分成两组(每组内各 3 根平行柱样),其中一组作对照样培养,另外一组作实验样培养。然后将 6 根沉积物柱样放入玻璃箱内,缓慢地注满采样点上覆水,在通气条件下均衡 24h。沉积物柱样均衡后吸去多余的上覆水,保持水深 12cm,将对照样和实验样隔离。此时,依据采样点处河蚬的平均密度,在实验样中小心地放入适量河蚬,对照样中不放入河蚬动物样(在培养过程中对照样内未发现有动物样的扰动作用)。待河蚬驯化培养 12h 后,从实验样和对照样内用针筒各抽取 20 ml 的水样,将抽取的实验水样过 0.45 μm 的微孔滤膜后置入聚乙烯塑料瓶内,并加入 1 滴饱和 HgCl_2 溶液固定。之后,继续培养 15d,培养结束时,沉积物柱样以 1cm 间距进行分割,分层之后的沉积物样,进行可交换态无机氮分析测试,在化学分析测试之前,放置于冰柜中冷冻保存。

2.2.3 化学分析与测试方法 上覆水样中的氨氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)和亚硝态氮(NO_2^--N)分别用次溴酸氧化法、镉柱还原法和磺胺-盐酸奈乙二胺法测定^[12],实验分析结果的相对标准偏差均在 0~10%。

湿沉积物中可交换态无机氮用 2 mol/L KCl 提取(固液比为 1:10)^[13],提取液中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N 含量也采用上述各无机氮的化学分析方法测定,实验分析结果的相对标准偏差均在 0~10%。

3 结果和讨论

3.1 底栖动物对沉积物-水界面间营养盐交换的影响

在甲壳动物谭氏泥蟹培养模拟实验中,对照样和实验样上覆水体中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 含量变化如图 1 所示。单因子方差分析(ANOVA)表明,除 NO_2^--N 外,对照样和实验样上覆水中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量差异,均达到显著水平($p < 0.05$)。图 1 显示, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 在实验样上覆水体中的含量明显高于对照样上覆水体中的含量。蟹类动物掘穴活动不仅增加了沉积物与大气之间的接触面积,而且还促进了沉积物中氮的氨化作用和硝化作用,因此当沉积物再次被海水浸没时,沉积物中大量的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 向上覆水释放,这说明了甲壳动物蟹通过掘穴活动促进 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 由沉积物向上覆水体中扩散,反映了经蟹类动物掘穴活动过的沉积物是上覆水体中氮营养盐的一个有效释放源。

图 2 显示了软体动物河蚬对上覆水中无机氮(NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N)含量变化的影响。利用单因子方差分析(ANOVA)对对照样和实验样上覆水中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 含量变化分析发现,对照样和实验样中 NO_2^--N 和 NO_3^--N 的含量变化不显著,而上覆水中 NH_4^+-N 含量变化显著(显著水平 $p < 0.05$)。实验样上覆水中 NH_4^+-N 含量约是对照样的 2 倍,反映了实验培养阶段河蚬主要影响 NH_4^+-N 在潮滩沉积物-水界面之间的物质交换。河蚬是一种半运动食悬浮物的软体动物,它穴居于水底生活,以硅藻、绿藻或轮虫等浮游生物为食,携带食物和氧气的水就从进水管进入外套膜,最后又从出水管排出体外^[14]。培养实验期间,河蚬主体位于底泥与水接触界面,吸收近底层上覆水中悬浮物质,而将其新陈代谢的最终产物 NH_4^+-N 排入上覆水中。因此,认为河蚬的排泄活动,可能是引起上覆水中 NH_4^+-N 含量增加的主要原因。

图 1、图 2 揭示了,谭氏泥蟹和河蚬通过不同的生物机制影响着潮滩沉积物-水界面间氮营养盐的物质交换。相比较而言,谭氏泥蟹主要通过生物扰动如掘穴活动,增加沉积物-水-气三相界面之间的接触面积,促进沉积物界面附近氮营养盐的微循环作用过程;而软体动物河蚬则主要通过生理活动如分泌物的排泄等,影响潮滩沉积物中氮营养盐的微界面作用过程。

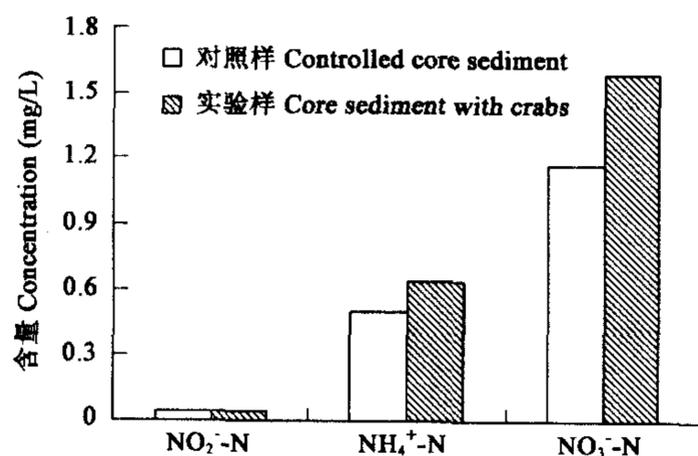


图 1 蟹类动物培养模拟实验中对对照样和实验样上覆水体中无机氮的含量变化

Fig. 1 The changes of inorganic nitrogen in the overlying waters in the incubation experiment with crabs

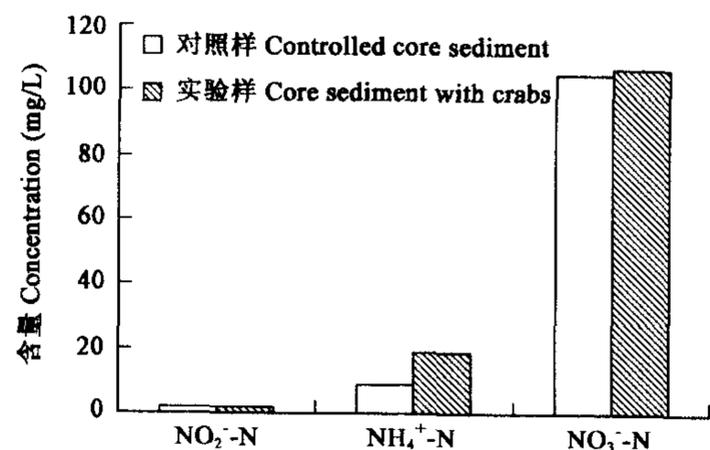


图 2 软体动物培养模拟实验中对对照样和实验样上覆水体中无机氮的含量变化

Fig. 2 The changes of inorganic nitrogen in the overlying waters in the incubation experiment with mollusks

3.2 底栖动物对沉积物中 N 的转化作用影响

3.2.1 谭氏泥蟹对沉积物中 N 的转化作用影响 图 3 给出了蟹类动物培养模拟实验对照样和实验样沉积物中可交换态

NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N 的剖面分布变化。利用单因子方差分析(ANOVA)表明,对照样和实验样中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N 含量的剖面变化均达到显著水平($p < 0.05$)。

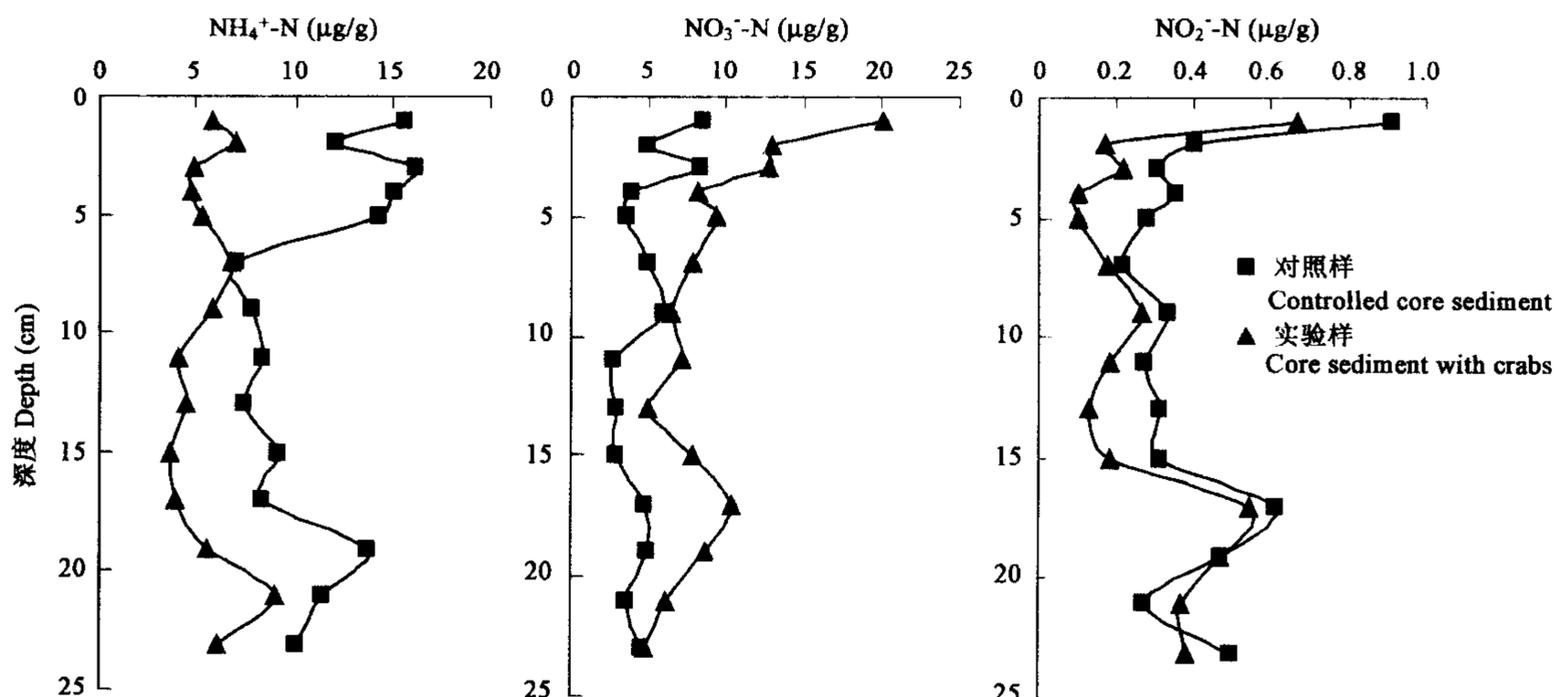


图 3 蟹类动物模拟实验对照样和实验样沉积物中无机氮的剖面分布

Fig. 3 The depth profile of inorganic nitrogen in the core sediments in the incubation experiment with crabs

对照样沉积物中 NH_4^+-N 含量处在 $7.54 \sim 15.06 \mu\text{g/g}$, 全剖面平均含量为 $10.75 \mu\text{g/g}$, 其剖面分布模式为: 表层 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 之间 NH_4^+-N 含量较高; 相比较而言, 5 cm 以下 NH_4^+-N 含量偏低, 但具有明显的随深度增加而增加的趋势。 NH_4^+-N 的这一剖面分布模式可能是因为在沉积物表层, 新沉积的具有较低 C/N 比值的有机物质含量较高, 且沉积物表层氧化性较强, 易于沉积物中的有机氮发生氨化作用, 造成表层沉积物中 NH_4^+-N 含量较高; 而深层沉积物尽管发生不同程度的早期成岩变化作用, 有机质具有较高的 C/N 比值, 但是沉积物的还原性逐渐增强, 有利于 NH_4^+-N 在沉积物中赋存累积, 因此在表层沉积物之下, 沉积物中 NH_4^+-N 含量出现随深度增加而逐渐递增的趋势。对照样中 NO_3^--N 含量处在 $2.77 \sim 8.42 \mu\text{g/g}$, 全剖面平均含量为 $4.70 \mu\text{g/g}$, 其剖面分布模式为自表层向下具有逐渐减小的趋势, 这与沉积物的氧化还原状况有关, 自表层向下沉积物的氧化性减弱, 还原性增强, 沉积物中 N 的硝化作用自表层向下逐渐减弱, 使表层沉积物中 NO_3^--N 含量较高, 深层沉积物中 NO_3^--N 含量较低。对照样中 NO_2^--N 含量处在 $0.22 \sim 0.61 \mu\text{g/g}$, 全剖面平均含量为 $0.33 \mu\text{g/g}$, NO_2^--N 的剖面分布受沉积物中 N 的硝化和反硝化作用的共同控制, 在一般情况下其剖面分布比较复杂。

实验样沉积物中 NH_4^+-N 含量处在 $3.65 \sim 9.01 \mu\text{g/g}$, 全剖面平均含量为 $5.10 \mu\text{g/g}$, 其剖面分布模式为 $0 \sim 17 \text{ cm}$ 之间, 沉积物中 NH_4^+-N 含量自表层向下具有明显的递减趋势, 而在 17 cm 以下沉积物中 NH_4^+-N 含量又有增加的趋势。实验样中 NO_3^--N 含量处在 $4.75 \sim 20.00 \mu\text{g/g}$, 全剖面平均含量为 $9.77 \mu\text{g/g}$, 其剖面分布自表层向下, 具有明显的递减趋势。实验样中 NO_2^--N 含量处在 $0.10 \sim 0.56 \mu\text{g/g}$, 全剖面平均含量为 $0.22 \mu\text{g/g}$, 其剖面分布具有自表层向下逐渐增大的趋势。

在实验培养期间, 谭氏泥蟹活动作用强烈, 蟹穴深度最深可达 20 cm 左右。蟹类动物的掘穴作用能够使氧气沿着蟹穴渗透到深层沉积物, 进而影响到氮在沉积物中的早期成岩变化。从图 3 可以看出, 对照样沉积物中 NH_4^+-N 含量明显高于实验样中 NH_4^+-N 含量, 而 NO_3^--N 在对照样中含量明显小于实验样中的含量; 对照样和实验样中 NH_4^+-N 的剖面分布模式也存在明显差异, 对照样中 NH_4^+-N 含量在 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 之间自表层向下具有递减的趋势, 而实验样中 NH_4^+-N 含量则从表层到 17 cm 深度之间具有明显的递减趋势, 17 cm 以下则呈现递增趋势, 这一分布模式可能与 $0 \sim 17 \text{ cm}$ 之间谭氏泥蟹作用较为强烈有关。对照样和实验样沉积物中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量及其剖面分布变化差异显示了蟹类动物对沉积物中营养盐的早期成岩变化具有明显的作用。蟹类动物通过掘穴活动, 增加了沉积物中氧气含量, 加剧了氮的氨化作用与硝化作用之间的耦合关系, 促进了沉积物中有机氮向 NH_4^+-N 的转化、 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化。

作者试图依据对照样和实验样沉积物中可交换态 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的剖面均值含量变化差值, 估算蟹类动物对沉积物中氮的氨化作用和硝化作用速率影响, 计算公式为:

$$\Delta V = \frac{|Q_c - Q_e|}{T}$$

式中, $\Delta V (\mu\text{g} / (\text{g} \cdot \text{d}))$ 表示由蟹类动物引起的氨化作用或硝化作用速率; $Q_c, Q_e (\mu\text{g} / \text{g})$ 表示对照样和实验样沉积物中可

交换态 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (包括 $\text{NO}_2^-\text{-N}$) 含量; $T(\text{d})$ 表示模拟实验培养所需时间。利用上式, 粗略地计算了在培养模拟时段内由蟹类动物引起氮的氨化作用和硝化作用速率, 其值分别为 0.38 和 $0.29 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 。计算结果显示, 由蟹类动物引起的氮氨化速率略大于硝化速率, 反映了蟹除了生物扰动影响氮的氨化作用和硝化作用外, 还说明了蟹是一种颚食碎屑动物, 其新陈代谢过程对促进沉积物中有机氮的氨化作用也有一定的贡献。

3.2.2 河蚬对沉积物中 N 的转化作用影响 图 4 给出了软体动物河蚬培养模拟实验对照样和实验样沉积物中可交换态 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的剖面分布变化。用单因子方差分析 (ANOVA) 表明, 在 $0\sim 2\text{cm}$ 之间对照样和实验样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量变化差异明显, 且达到显著水平 ($p < 0.05$), 而在 2cm 以下对照样和实验样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量变化差异不明显, 这可能与软体动物的生活习性有关, 在培养模拟实验中发现河蚬主要集中于 $0\sim 1\text{cm}$ 沉积物处, 个别栖于 2cm 深度处。

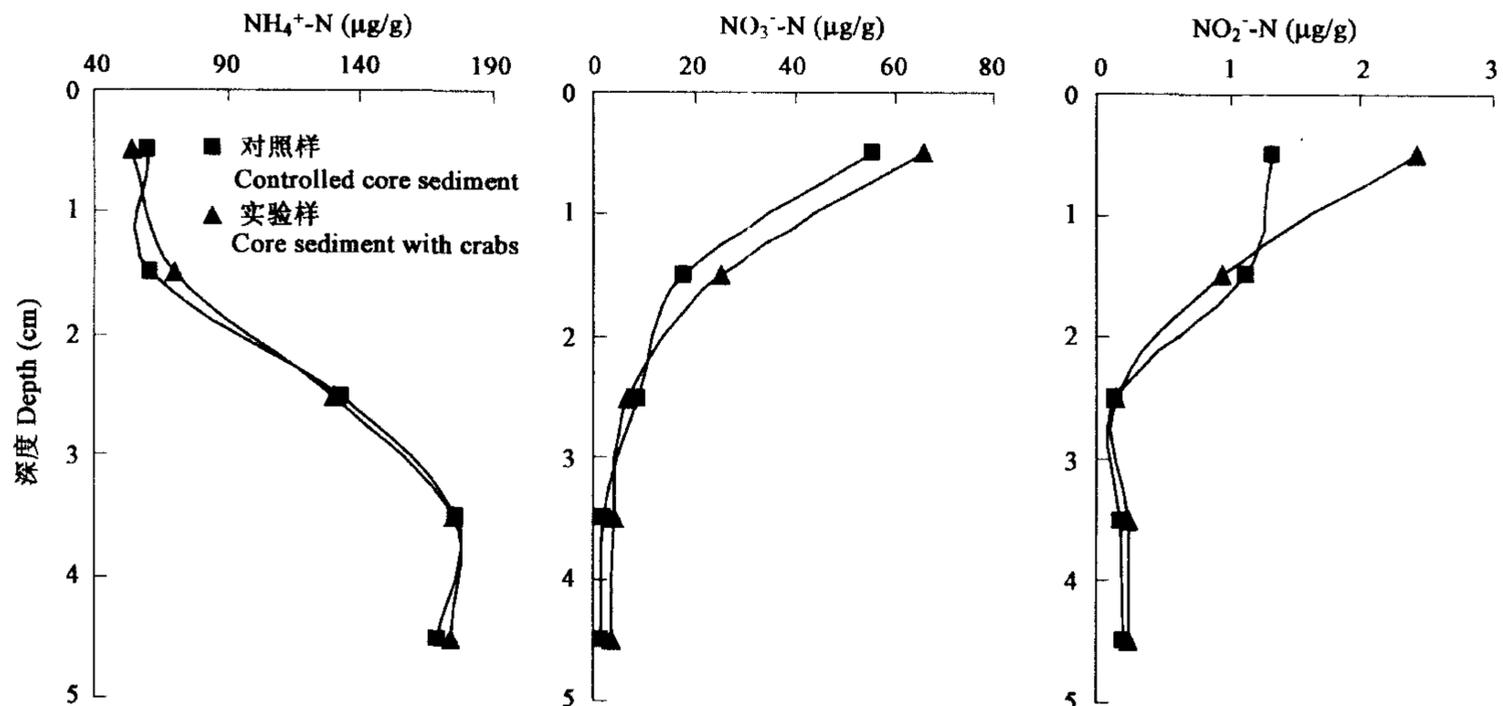


图 4 软体动物模拟实验对照样和实验样沉积物中无机氮的剖面分布

Fig. 4 The depth profile of inorganic nitrogen in the core sediments in the incubation experiment with mollusks

对照样 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在 $59.76\sim 175.60 \mu\text{g}/\text{g}$ 之间, 平均含量为 $119.81 \mu\text{g}/\text{g}$, 而实验样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在 $54.06\sim 174.58 \mu\text{g}/\text{g}$, 平均含量为 $120.56 \mu\text{g}/\text{g}$ 。对照样和实验样中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有相似的剖面分布, 从表层向下两者均具有逐渐增加的趋势, 但在 $0\sim 2\text{cm}$ 之间两者存在较大差异, 这可能因为河蚬的新陈代谢产物虽然会增加沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量, 然而河蚬作为一种半运动的软体动物, 其生物扰动作用也会促进微界面层 ($0\sim 1\text{cm}$) 沉积物中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向上覆水体扩散, 所以在 $0\sim 1\text{cm}$ 实验样沉积物中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量小于对照样, 而在 $1\sim 2\text{cm}$ 处相反。

对照样中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在 $1.59\sim 55.81 \mu\text{g}/\text{g}$, 平均含量为 $17.37 \mu\text{g}/\text{g}$ 。实验样中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在 $3.97\sim 65.66 \mu\text{g}/\text{g}$, 平均含量为 $21.20 \mu\text{g}/\text{g}$ 。无论对照样还是实验样, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均具有自表层向下逐渐降低的剖面分布模式, 但在近表层 ($0\sim 2\text{cm}$) 处实验样中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显高于对照样。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的这一剖面分布模式, 很可能与河蚬的引灌作用有关, 河蚬在运动过程中能够使富氧上覆水引灌到沉积物中, 加快了沉积物复氧速率, 进而将会促进表层沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 发生硝化作用。

$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的剖面分布与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 一致, 也呈现随深度增加而逐渐减少的趋势, 除 $0\sim 1\text{cm}$ 实验样沉积物中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量高于对照样外, $1\sim 5\text{cm}$ 之间对照样与实验样中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量没有明显差异。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 作为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之间的中间产物, 其含量和剖面分布变化具有不确定性, 受沉积物中氮循环的多种界面过程共同控制。

4 结论

谭氏泥蟹和河蚬通过不同的生物机制影响着潮滩沉积物-水界面间氮营养盐的物质交换。相比较而言, 谭氏泥蟹主要通过生物扰动如掘穴活动, 增加沉积物-水-气三相界面之间的接触面积, 促进沉积物界面附近氮营养盐物质交换过程; 而软体动物河蚬则主要通过生理活动如分泌物的排泄等, 影响潮滩沉积物中氮营养盐的界面扩散过程。

蟹类动物具有较强的生物扰动作用, 通过掘穴活动改变了沉积物物理结构, 增加了单位表面积下沉积物与大气之间的接触面积, 使沉积物氧含量大为增加, 加快了沉积物中有机氮向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化, 因此促进了潮滩沉积物中氮的生物地球化学循环过程速率。

由于生活习性不同, 软体动物河蚬主要栖息于潮滩沉积物表层, 它主要通过生理活动 (如分泌物排泄等) 影响近表层沉积物

中氮素的迁移转化,但研究表明河蚬的引灌作用对沉积物中氮素的迁移转化影响也不容忽视。

本文主要通过实验模拟的方法探讨了大型底栖动物在长江河口潮滩生态系统内氮素生物地球化学循环过程中作用。因此,今后应该利用实验模拟与野外现场实际观测相结合的方法与手段,进一步深入研究底栖动物在潮滩生态系统内氮素循环过程中的生物作用机制。

References:

- [1] Alongi D M. *Coastal ecosystem processes*. Boca Raton: CRC Press, 1997. 419.
- [2] Reise K. *Tidal flat ecology: An experiment approach to species interactions*. Berlin: Springer-Verlag, 1985.
- [3] Mortimer R J G, Davey J T, Krom M D, *et al.* The effect of macrofauna on porewater profiles and nutrient fluxes in the intertidal zone of the Humber estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, **48**: 683~699.
- [4] Pelegri S P. Bioturbation effects of the amphipod *Corophium volutator* on microbial nitrogen transformation in marine sediments. *Marine biology*, 1994, **121**: 253~258.
- [5] Pelegri S P. Denitrification in estuarine sediment stimulated by the irrigation activity of the amphipod *Corophium volutator*. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, **105**: 285~290.
- [6] Tuominen L, Makela K, Lehtonen K K, *et al.* Nutrient fluxes, porewater profiles and denitrification in sediment influenced by algal sedimentation and bioturbation by *Monoporeia affinis*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, **49**: 83~97.
- [7] Yamada H. Liberation of nitrogenous compounds from bottom sediments and effects of bioturbation by small bivalve, *Theora lata* (Hinds). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1987, **24**: 539~555.
- [8] Yuan X Z, Lu J J. Ecological characteristics of macrozoo benthic community. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, **11** (5): 415~420.
- [9] Yuan X Z, Lu J J. Influence of diking on the benthic macro-invertebrate community structure and diversity in the south bank of the Changjiang Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(10): 1642~1647.
- [10] GSICI (Group of Shanghai island comprehensive investigation). *Report of Shanghai Islands Comprehensive Investigation*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Publisher, 1995. 246~249.
- [11] Lu J J, Tang Y W. The distribution and movement of heavy metals in wetland ecosystem of East Chongming, Shanghai. In: Lang H Q, Lin P, Lu J J, eds. *Conservation & research of wetlands in China*. Shanghai: East China Normal University Press, 1998. 259~272.
- [12] Rong R G. Measurement of nitrite, ammonium and nitrate in seawater. In: Han W Y ed. *The investigation manual on chemical elements in seawater*. Beijing: China Ocean Press, 1986. 121~142.
- [13] Gao X J, Zhang N L, Chen Z L, *et al.* Seasonal variation of inorganic nitrogen in water and sediment on the Shanghai coast. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(4): 407~412.
- [14] Yuan X Z, Lu J J, Liu H. Distribution Pattern and Variation in the Functional Groups of Zoobenthos in the Changjiang Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(12): 2054~2062.

参考文献:

- [8] 袁兴中, 陆健健. 长江口潮滩湿地大型底栖动物群落的生态学特征. *长江流域资源与环境*, 2002, **11**(5): 415~420.
- [9] 袁兴中, 陆健健. 围垦对长江口南岸底栖动物群落结构及多样性的影响. *生态学报*, 2001, **21**(10): 1642~1647.
- [10] 上海市海岛资源综合调查报告编写组. *上海岛屿综合调查报告*. 上海: 上海科学技术出版社, 1995. 246~249.
- [11] 陆健健, 唐亚文. 崇明东滩湿地生态系统中重金属元素的分布和迁移. 见: 郎惠卿, 林鹏, 陆健健主编. *中国湿地研究与保护*. 上海: 华东师范大学出版社, 1998. 259~272.
- [12] 容荣贵. 海水中亚硝酸盐、氨氮、硝酸盐的测定. 见: 韩舞鹰主编. *海水化学要素调查手册*. 北京: 海洋出版社, 1996. 121~142.
- [13] 高效江, 张念礼, 陈振楼, 等. 上海滨岸潮滩水沉积物中无机氮的季节变化. *地理学报*, 2002, **57**(4): 407~412.
- [14] 袁兴中, 陆健健, 刘红. 长江口底栖动物功能群分布格局及其变化. *生态学报*, 2002, **22**(12): 2054~2062.