

水丝蚓生物扰动对东洞庭湖沉积物氮释放的影响*

吴方同¹, 陈锦秀², 闫艳红¹, 胡旭跃¹, 谭万春¹, 孙士权¹

(1: 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114)

(2: 浙江天蓝环保技术有限公司, 杭州 311215)

摘要: 研究了不同投放密度和不同环境条件下水丝蚓的生物扰动对东洞庭湖沉积物氮释放的影响. 研究表明: 水丝蚓的生物扰动作用对沉积物氮释放有明显的促进作用, 水丝蚓生物扰动促进下的 NH_4^+ -N 释放构成沉积物氮释放的主要动因. 与未投放水丝蚓的空白组相比, 当水丝蚓密度为 1 和 2 ind./ cm^2 时, 上覆水中总氮的浓度分别增加了 15% 和 32%. 温度的升高, 会加大水丝蚓生物扰动对氮释放的影响, 与 5 °C 相比, 15 和 25 °C 下总氮释放增量分别提高了 23% 和 69%. 在酸性或碱性环境下, 水丝蚓的生物扰动加强, 会提高对氮释放的促进作用, 当 pH 为 5 和 9 时, 总氮释放增量比 pH 为 7 时分别提高 32% 和 41%. 水丝蚓对缺氧环境有良好的适应能力, 在缺氧环境下, 水丝蚓的生物扰动会增强, 总氮释放的增量是好氧状态下的 1.52 倍.

关键词: 霍甫水丝蚓; 沉积物; 氮释放; 生物扰动; 洞庭湖

The influence of *Limnodrilus hoffmeisteri* bioturbation on nitrogen release from sediments in the East Lake Dongting

WU Fangtong¹, CHEN Jinxiu², YAN Yanhong¹, HU Xuyue¹, TAN Wanchun¹ & SUN Shiquan¹

(1: College of Water Conservancy, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China)

(2: Zhejiang Tianlan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hangzhou 311215, P. R. China)

Abstract: The effects of *Limnodrilus hoffmeisteri* bioturbation on nitrogen releasing from sediments of the East Lake Dongting, with the different densities and environments were studied in this paper. The results showed that bioturbation of *L. hoffmeisteri* had a good accelerating effect on nitrogen release from sediments, which was caused mainly by ammonium release. When the density of *L. hoffmeisteri* was at 1 and 2 ind./ cm^2 , the concentrations of total nitrogen in overlying water were increased by 15% and 32% respectively comparing to the control test. Appropriate increasing of temperature was helpful for vital movement of *L. hoffmeisteri*, which caused that total nitrogen release increment were increased by 23% and 69% respectively when temperatures were 15 °C and 25 °C compared to the controlling 5 °C. Adversity stress on *L. hoffmeisteri*, induced by acidic and alkali environments, enhanced its bioturbation effect and also accelerated nitrogen releasing. In comparison with a condition of pH 7, total nitrogen release increment were increased by 32% and 41% when pH values were 5 and 9, respectively. Total nitrogen release increment in hypoxia was 1.52 fold compared to the aerobic environment, which indicated that *L. hoffmeisteri* had good adaptability and survivability to hypoxia environment in which bioturbation was stronger than in aerobic environment.

Keywords: *Limnodrilus hoffmeisteri*; sediments; nitrogen release; bioturbation; Lake Dongting

霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*) (以下简称水丝蚓) 属环节动物门(Annelida)、寡毛纲(Oligochaeta)、颤蚓科(Tubificidae)、水丝蚓属(*Limnodrilus*), 为淡水中常见的底栖动物, 广泛分布于世界各地. 在意大利的一个富营养湖泊 Ledro 中, 水丝蚓广泛分布, 最高密度达 5984 ind./ m^2 ^[1]; Finogenova 报道在俄罗斯圣彼得堡的涅瓦河, 水体富营养化严重, 部分区域的水丝蚓的密度达 46600 ind./ m^2 ^[2]. 甚至在加拿大多伦多港口

* 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金项目(2010SS04)、湖南省科学技术厅科技计划项目(2010SK3022)和湖南省教育厅科学研究重点项目(09A004)联合资助. 2010-11-01 收稿; 2011-04-01 收修稿. 吴方同, 男, 1974 年生, 硕士, 讲师; E-mail: david_wft@sohu.com.

的局部地区,因大量污水排入,水丝蚓密度超过 60000 ind./m²[3]。水丝蚓在我国主要分布在黑龙江、吉林、河南、陕西、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、四川、贵州、广西、广东、新疆等地的淡水水域。其中在一些水质较差的水库、湖泊、河流,水丝蚓为底栖动物的优势种属,分布密度为 100-10000 ind./m²[4-9]。

底栖动物的生物扰动,如沉积物再构造、生物冲灌等,通过促进同步硝化反硝化或促进利用上覆水中硝酸盐直接进行的反硝化作用,对沉积物的氮循环产生重要影响[10-11]。由于对富含金属氧化物沉积物的持续再悬浮和混合,生物扰动实际上已成为氮、金属氧化物等进行氧化还原反应的重要影响因素[12]。但生物扰动本身涉及的层面较多,如不同种属的差别、不同种属的相互作用、底栖动物的密度、底栖动物的掘穴、沉积物再构造、生物冲灌、再悬浮、摄食、排粪、排泄、分泌等活动对沉积物的物理、化学、生物特性的影响等。生物扰动对沉积物与上覆水间的氮交换的促进机理比较复杂。因此,底栖动物生物扰动对沉积物与上覆水间氮交换的影响和作用途径有待深入研究。关于颤蚓类的生物扰动研究目前主要集中于正颤蚓,而水丝蚓作为污染水体典型优势种属,对其研究却较少。本文研究在不同的水丝蚓密度及温度、pH 和溶解氧(DO)条件下,水丝蚓生物扰动对东洞庭湖沉积物氮释放的影响,旨在为研究湖泊的内源污染、营养盐的循环机理和水生态动力学、水体修复等提供参量和依据。

1 材料与方法

1.1 材料

水丝蚓采自野外,实验室驯化培养 15 d。培养箱为 50 cm × 50 cm × 75 cm PVC 水箱,箱底铺大粒石英砂,上部用脱脂棉制成松软基质,加入曝气自来水,并隔天换水。水丝蚓用麦麸和捣碎莴苣喂食。试验前挑选长 2.0-3.0 cm、健康、成熟度一致的个体进行试验。

试验沉积物取自东洞庭湖藕池河东支入湖口的舵杆洲(112°49'57"E, 29°28'36"N),取样深度为沉积物表层 20 cm。将所取样品剔除植物和砾石后装入洁净的聚乙烯袋中,密封后带回实验室。置于阴凉通风处风干,过 100 目标准筛后备用。

1.2 试验方法

将泥样均匀放入 1 L 烧杯中,厚度为 2 cm,将水丝蚓放入其中,静置片刻,待水丝蚓钻入底泥后极其缓慢地用注射器在底泥不冲悬浮的情况下,沿杯壁加入纯净水,水深为 10 cm,泥水比为 1:5。释放试验于 SPX-250BZ 型生化培养箱(控温范围 0-50 °C)中进行。密度试验中放入烧杯的水丝蚓数为 87 和 174 条,相对应的水丝蚓密度为 1 和 2 ind./cm²。试验温度由生化培养箱调控,上覆水 pH 由 NaOH 和 HCl 调节,好氧组试验烧杯敞开进行自然复氧,DO ≥ 5.0 mg/L,缺氧组试验采用充氮水作为上覆水,烧杯密封,DO ≤ 0.5 mg/L。

试验中用注射器在距离泥面 5 cm 处缓慢抽取所需水样,然后补充注入同体积初始上覆水。消除补充上覆水与取样水目标物浓度差,上覆水目标物浓度按下式进行计算:

$$C_i^* = C_i + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n (C_{i-1} - C_0) V_{i-1}$$

式中, V 为上覆水的体积(ml); C_i 、 C_{i-1} 、 C_0 分别为第 i 次取样、第 $i-1$ 次取样和初始上覆水中目标物浓度(mg/L); C_0 为补充上覆水中目标物浓度(mg/L); V_{i-1} 为第 $i-1$ 次取样体积(ml)。

除空白组试验外,每组试验设 3 个平行,数据取平均值。

1.3 分析项目及方法

上覆水中的 TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,铵态氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂分光光度法,硝态氮(NO₃⁻-N)采用酚二磺酸分光光度法,分光光度计为岛津 UV2450 紫外分光光度计。pH 测定采用雷磁 PHSJ-3F 型 pH 计,DO 测定采用 WTW-F/SET-3 便携式多功能溶解氧仪。

2 结果与分析

2.1 水丝蚓密度对氮释放的影响

在 pH 为 7,水温(T)为 25 °C,好氧,水丝蚓密度(ρ)分别为 0、1、2 ind./cm²的条件下,水丝蚓密度对氮释放的影响如图 1 所示。

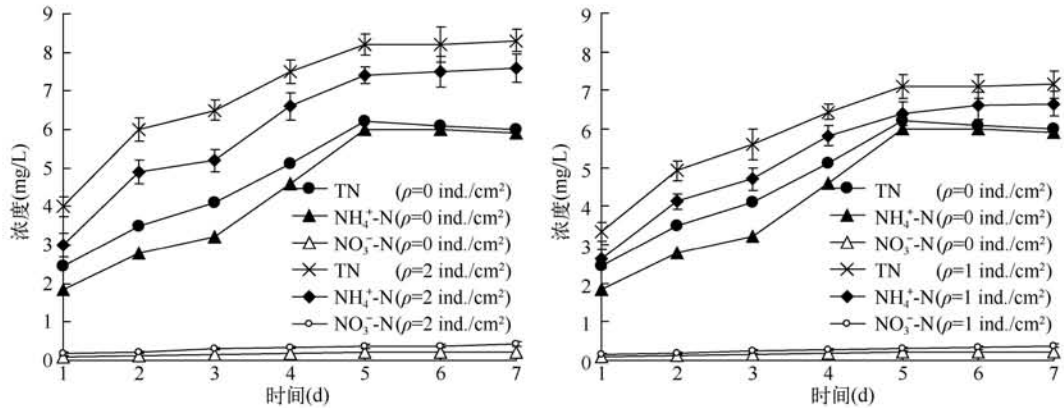


图1 水丝蚓密度对氮释放的影响

Fig. 1 Release of nitrogen affected by densities of *Limnodrilus hoffmeisteri*

由图1可知,水丝蚓对氮释放有明显的促进作用,且投放密度越大,促进作用越明显.与空白试验($\rho=0 \text{ ind./cm}^2$)相比,密度为 1 ind./cm^2 时总氮释放增量平均为 1.2 mg/L ,密度为 2 ind./cm^2 时则为 2.2 mg/L .从释放过程来看,氮释放集中在前5 d,自第5 d后,上覆水总氮浓度基本保持不变.释放第5 d末,水丝蚓密度为1和 2 ind./cm^2 时,上覆水中总氮的浓度分别为 7.1 和 8.2 mg/L ,比空白试验提高了15%和32%.

底栖动物的生物扰动主要是通过掘穴、沉积物再构造^[13-14]、生物冲灌^[15-16]、生物搬运^[17]、再悬浮^[18]、摄食^[19]、排粪^[20-21]、排泄^[22]、分泌^[23]等生命活动引起一系列物理、化学和微生物过程,从而增加泥水界面面积和沉积物中溶解氧的消耗^[24-25];促进电子受体(如 NO_3^-)向沉积物深层转输^[26];创造适宜异养菌生活的小环境^[27];增加沉积物表层的有机物负荷^[26].生物扰动的最终结果是提高沉积物中微生物的矿化活动,提高营养物的再生效率,促进氮化合物的交换.

底栖动物的生物扰动作用会同时促进反硝化和硝化反应.寡毛类的“生物搬运工”从沉积物深层摄食后会将矿化后的有机物排泄到沉积物的表层^[17],这种生物搬运(bioconveying)作用会增加沉积物表层的有机物负荷,从而给硝化菌提供氨氮而促进硝化反应.此外这类动物的掘穴活动增加了沉积物—水之间的氨氮交换,会进一步促进硝化作用.另一方面,通过掘穴底栖动物不仅增加泥水界面的面积,还间歇地将上覆水抽入到这些坑道中^[16].正是因为这些生物冲灌作用(bioirrigation),上覆水中的硝酸盐被转移到沉积物的下层,从而缩短了硝酸盐向沉积物底层的缺氧反硝化区的扩散距离.比起沉积物的表层,这些坑道存在数量更多的细菌进行新陈代谢等生命活动,因而生物扰动作用对反硝化反应的促进作用还会进一步增强.生物扰动作用促进硝化反应,会增加沉积物向上覆水释放硝酸盐的量;促进反硝化反应,则会促使硝酸盐从上覆水向沉积物迁移.Svensson等^[26]的研究表明,当水丝蚓/正颤蚓总密度为 2.7 ind./cm^2 ,上覆水中硝酸盐为 2.05 mg/L 和 16.62 mg/L 时,生物扰动下的硝化反应分别提高73%和80%.本研究中,水丝蚓对硝酸盐释放表现出净促进,在水丝蚓密度为1和 2 ind./cm^2 时,上覆水的硝酸盐浓度平均比空白组增加54%和87%.试验中底泥厚度仅为2 cm,且在好氧条件下进行,另外水丝蚓迁移钻行和在泥水界面的颤动会提高间隙水和泥水界面处溶解氧浓度,加之释放初期上覆水中硝酸盐的浓度很低,这在很大程度上降低水丝蚓对反硝化反应的促进作用,而水丝蚓的生物冲灌、生物搬运以及生物扩散作用会加快含氮化合物向上覆水的释放,总体上水丝蚓的生物扰动是增加硝酸盐的释放量.但从图1中可见,沉积物向上覆水中释放的主要是 NH_4^+-N , $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 所占比例很小.释放前,沉积物中 NH_4^+-N 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 浓度分别为 309 和 4.5 mg/L ,这说明空白组释放试验中,浓度梯度是氮释放过程中的主要推动力.在水丝蚓生物扰动下,沉积物向上覆水中 NH_4^+-N 释放和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 释放都会增强,但沉积物中 NH_4^+-N 浓度与 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 浓度显著差别,水丝蚓生物扰动促进下的 NH_4^+-N 释放构成沉积物氮释放的主要动因.

2.2 不同温度下生物扰动对氮释放的影响

在水丝蚓密度 $\rho = 2 \text{ ind./cm}^2$ (空白组 $\rho = 0 \text{ ind./cm}^2$), pH 为 7, 好氧条件下, 不同环境温度对生物扰动下的氮释放影响如图 2 所示。

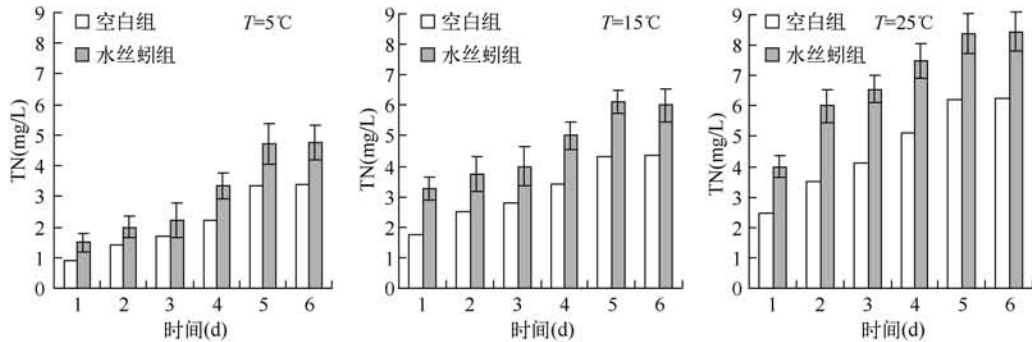


图 2 不同水温时水丝蚓对氮释放的影响

Fig. 2 Release of nitrogen affected by *Limnodrilus hoffmeisteri* under different temperatures

在试验温度下(5、15 和 25 °C), 水丝蚓组总氮浓度在整个释放过程中均要高于空白组(图 2), 表明在试验温度下水丝蚓的生物扰动都能得到体现, 且均对氮释放有促进作用. 但各个温度下水丝蚓生物扰动对沉积物中氮释放的促进效果不尽相同, 温度越高, 促进效果越明显. 在 5、15 和 25 °C 下, 与空白组相比, 释放平衡时水丝蚓组总氮释放增量分别为 1.3、1.6 和 2.2 mg/L. 与 5 °C 相比, 15 和 25 °C 下总氮释放增量分别提高 23% 和 69%. 不同温度下水丝蚓对氮释放促进效果的不同, 主要与不同温度下水丝蚓的生活状态有关. 水丝蚓喜温, 适宜水温为 15–28 °C, 当水温 12 °C 以上, 成熟个体即可繁殖, 水温低于 1–4 °C 或高于 30 °C, 发育会延迟. 从图 2 可以看出, 水丝蚓最适宜的环境温度为 25 °C, 这与 Nascimento^[28]、诸晖^[29] 等的研究结论是一致的. 此温度下水丝蚓的生长繁殖最为旺盛, 水丝蚓会加强摄食活动和提高颤动频率获得更多的溶解氧, 故其生物扰动最明显, 总氮释放增量也最大, 与 5 和 15 °C 相比, 25 °C 下总氮释放增量提高 69% 和 38%.

2.3 不同 pH 下生物扰动对氮释放的影响

在 ρ 为 2 ind./cm² (空白组 $\rho = 0 \text{ ind./cm}^2$), T 为 25 °C, 好氧的条件下, 环境 pH 值对生物扰动下的氮释放影响如图 3 所示。

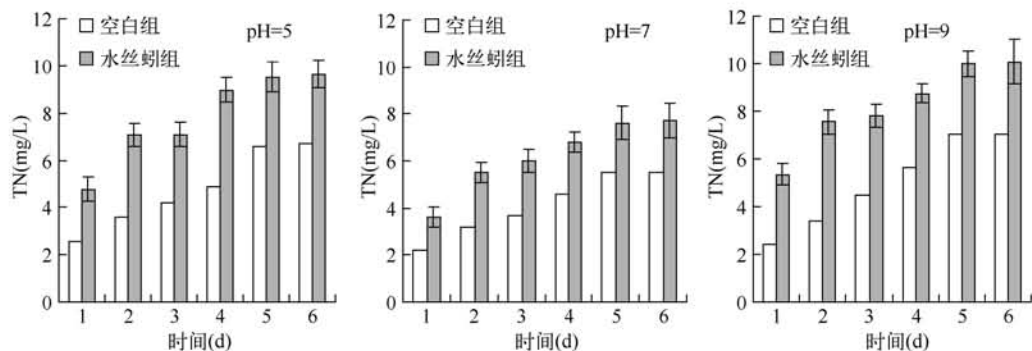


图 3 不同 pH 值时水丝蚓对氮释放的影响

Fig. 3 Release of nitrogen affected by *Limnodrilus hoffmeisteri* in conditions of different pH values

对于空白组, 酸性或碱性条件下, 氮释放强度均高于中性条件, pH 为 5、7 和 9 时, 释放平衡时上覆水中总氮的浓度分别为 6.7、5.5 和 7.0 mg/L, 表明酸性或碱性条件均能促进氮的释放。

与空白组相比, 在试验 pH 条件下, 水丝蚓组中上覆水的总氮浓度均有明显的提高, 表明各 pH 条件下水

丝蚓生物扰动作用均能促进沉积物中氮的释放. 水丝蚓的生物扰动作用受 pH 等环境条件的影响. Fisher 等发现, 当水丝蚓面临不利的生存环境时, 因逆境胁迫效应, 会加剧掘穴等活动^[30]. 聂小保等研究表明, 在偏酸和偏碱的逆境胁迫下, 正颤蚓加强迁移的应激行为客观上起到了促进其生物扰动效应的效果^[31]. 水丝蚓适宜的 pH 值范围为 4.0–8.0, pH 过高或过低亦会对水丝蚓产生逆境胁迫作用, 为躲避和适应逆境, 水丝蚓会进行大规模主动迁移, 因此在底泥中可以产生更多的过水通道, 从而会加强生物扰动对氮释放的促进作用. 试验中, 在酸性或碱性条件下, 水丝蚓生物扰动引起的总氮释放增量均要高于中性条件, pH 为 5、7 和 9 时, 释放平衡时的总氮增量分别为 2.9、2.2 和 3.1 mg/L. pH 为 5 和 9 时, 总氮增量比 pH 为 7 时分别提高了 32% 和 41%.

2.4 不同 DO 下生物扰动对氮释放的影响

在 ρ 为 2 ind./cm² (空白组 $\rho = 0$ ind./cm²), pH 为 7, T 为 25 °C 条件下, 好氧环境和缺氧环境对生物扰动下的氮释放影响如图 4 所示.

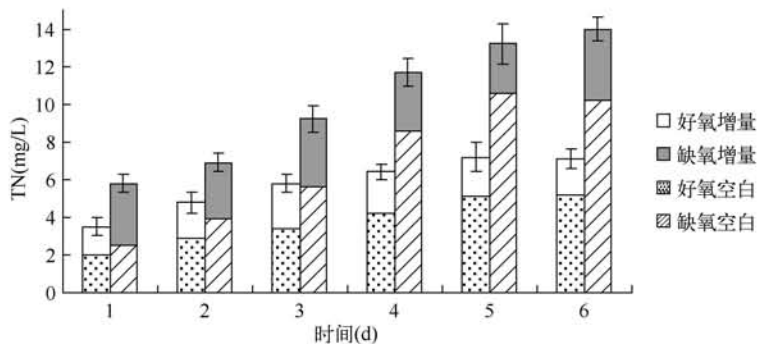


图 4 不同 DO 下水丝蚓对氮释放的影响

Fig. 4 Release of nitrogen affected by *Limnodrilus hoffmeisteri* under different DO conditions

在空白试验中, 在缺氧条件下, 上覆水中总氮浓度明显高于好氧条件, 总氮释放峰值是好氧条件下的 2 倍(图 4), 表明溶解氧降低能显著促进沉积物中氮的释放, 这与朱健^[32]、袁文权^[33]等的研究结论相符. 在水丝蚓组试验中, 水丝蚓扰动下的缺氧释放总氮增量也明显大于好氧释放, 好氧条件下的总氮增量平均值为 2.1 mg/L, 而缺氧条件下则增至 3.2 mg/L, 相比好氧条件提高了 52%. 这说明缺氧环境下, 水丝蚓的生物扰动对氮释放的促进作用明显高于好氧环境, 这与水丝蚓的特殊生活习性相关. 水丝蚓对环境中的溶解氧比较敏感, 正常生活时, 会从底泥中伸出大部分身体, 作左右蛇形摆动, 以此促进水流形成, 以利虫体进行气体交换, 水中氧气越少, 则摆动越快. 若环境缺氧, 则会群聚成一团停留在沉积物表层的泥水界面处, 或钻入沉积物底层. 环境溶解氧浓度的改变, 能够显著影响颤蚓类底栖动物在沉积物中的迁移方式和迁移规模^[34-35], 进而会改变其对沉积物的生物扰动作用. Fisher 等研究表明, 随环境中溶解氧浓度的降低, 由富氧至缺氧, 沉积物中水丝蚓钻行沟渠深度是增加的^[30]. 缺氧释放试验中也观察到, 在试验的第 1–3 天, 水丝蚓会钻入底泥的底部, 至释放的后半段(第 4–6 天), 水丝蚓又会重新回到底泥表层. 这说明, 在缺氧条件下, 水丝蚓迁移率会提高, 会增加沉积物中的过水通道, 从而对沉积物的扰动作用会增强, 继而促进氮释放.

3 参考文献

- [1] Casellato S, Caneva F. Composition and distribution of bottom oligochaete fauna of a north Italian eutrophic lake (Lake Ledro). *Hydrobiologia*, 1994, **278**: 87-92.
- [2] Finogenova NP. Oligochaete communities at the mouth of the Neva and their relationship to anthropogenic impact. *Hydrobiologia*, 1996, **334**: 185-191.
- [3] Wavre M, Brinkhurst RO. Interactions between some tubificid oligochaetes and bacteria found in the sediments of Toronto Harbour, Ontario. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1971, **28**(3): 335-341.

- [4] 胡德良, 杨华南. 热排放对湘江大型底栖无脊椎动物的影响. 环境污染治理技术与设备, 2001, **2**(1): 25-27.
- [5] 邵美玲, 谢志才, 叶麟等. 三峡水库蓄水后香溪河库湾底栖动物群落结构的变化. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 64-69.
- [6] 邬红娟, 崔博, 吕晋等. 武汉湖泊底栖动物群落结构及水质生态评价. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, **33**(10): 96-98.
- [7] 劳建国. 鸭绿江水丝蚓生态结构及毒性实验分析[学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [8] 胡忠军, 孙月娟, 刘其根等. 浙江千岛湖深水区大型底栖动物时空变化格局. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 265-271.
- [9] 龚志军, 谢平, 唐汇涓等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. 水生生物学报, 2001, **25**(3): 210-216.
- [10] Michaud E, Desrosiers G, Mermillod-Blondin F *et al.* The functional group approach to bioturbation: II. The effects of the *Macoma balthica* community on fluxes of nutrients and dissolved organic carbon across the sediment-water interface. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, **337**: 178-189.
- [11] Gilbert F, Aller RC, Hulth S. The influence of macrofaunal burrow spacing and diffusive scaling on sedimentary nitrification and denitrification: an experimental and model approach. *Journal of Marine Research*, 2003, **61**: 101-125.
- [12] Hulth S, Aller RC, Canfield DE *et al.* Nitrogen removal in marine environments: recent findings and future research challenges. *Marine Chemistry*, 2005, **94**(1-4): 125-145.
- [13] Lohrer AM, Thrush SF, Gibbs MM. Bioturbators enhance ecosystem function through complex biogeochemical interactions. *Nature*, 2004, **431**(7012): 1092-1095.
- [14] Maire O, Lacroart P, Meysman F *et al.* Quantification of sediment reworking rates in bioturbation research: a review. *Aquatic Biology*, 2008, **2**(3): 219-238.
- [15] Webb AP, Eyre BD. Effect of natural populations of burrowing *Thalassinidean shrimp* on sediment irrigation, benthic metabolism, nutrient fluxes and denitrification. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, **268**(3): 205-220.
- [16] Quintana CO, Tang M, Kristensen E. Simultaneous study of particle reworking, irrigation transport and reaction rates in sediment bioturbated by the polychaetes *Heteromastus* and *Marenzelleria*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **352**(2): 392-406.
- [17] Lagazère S, Boyer P, Stora G *et al.* Effects of uranium-contaminated sediments on the bioturbation activity of *Chironomus riparius* larvae (Insecta, Diptera) and *Tubifex tubifex* worms (Annelida, Tubificidae). *Chemosphere*, 2009, **76**: 324-334.
- [18] Mermillod-Blondin F, Nogaro G, Detry T *et al.* Do tubificid worms influence the fate of organic matter and pollutants in stormwater sediments? *Environmental Pollution*, 2005, **134**(1): 57-69.
- [19] Graf G, Rosenberg R. Bioresuspension and biodeposition: a review. *Journal of Marine Systems*, 1997, **11**(3-4): 269-278.
- [20] Frouz J, Lobinske RJ, Ali A. Influence of Chironomidae (Diptera) faecal pellet accumulation on lake sediment quality and larval abundance of pestiferous midge *Glyptotendipes paripes*. *Hydrobiologia*, 2004, **518**(1-3): 169-177.
- [21] Schmidt S, Gonzalez JL, Lacroart P *et al.* Bioturbation at the water-sediment interface of the Thau Lagoon: impact of shellfish farming. *Aquatic Living Resources*, 2007, **20**(2): 163-169.
- [22] Datta S, Jana BB. Influence of chironomid larvae, *Chironomus* sp., on phosphorus release from rock phosphate fertilized soil-water system. *Journal of Applied Aquaculture*, 1997, **7**(2): 31-40.
- [23] Aller RC, Aller JY. The effect of biogenic irrigation intensity and solute exchange on diagenetic reaction rates in marine sediments. *Journal of Marine Research*, 1998, **56**(4): 905-936.
- [24] Lewandowski J, Hupfer M. Effect of macrozoobenthos on two-dimensional small-scale heterogeneity of porewater phosphorus concentrations in lake sediments: a laboratory study. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(4): 1106-1118.
- [25] Nogaro G, Mermillod-Blondin F, Montuelle B *et al.* Chironomid larvae stimulate biogeochemical and microbial processes in a riverbed covered with fine sediment. *Aquatic Sciences Research Across Boundaries*, 2008, **70**(2): 156-168.
- [26] Svensson JM, Enrich-Prast A, Leonardson L. Nitrification and denitrification in a eutrophic lake sediment bioturbated by oligochaetes. *Aquatic Microbial Ecology*, 2001, **23**: 177-186.
- [27] Cuny P, Miralles G, Cornet-barthaux V *et al.* Influence of bioturbation by the polychaete *Nereis diversicolor* on the structure of bacterial communities in oil contaminated coastal sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, **54**(4): 452-459.
- [28] Nascimento HLS, Alves RG. The effect of temperature on the reproduction of *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta; Tubifi-

- cidae). *Zoologia*, 2009, **26**(1): 191-193.
- [29] 诸 晖, 魏源送, 刘俊新. 颤蚓在活性污泥中的生长研究. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1342-1347.
- [30] Fisher JA, Beeton AM. The Effect of Dissolved Oxygen on the Burrowing Behavior of *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta). *Hydrobiologia*, 1975, **47**(2): 273-290.
- [31] 聂小保, 吴淑娟, 吴方同等. 颤蚓生物扰动对沉积物氮释放的影响. *环境科学学报*, 2011, **31**(1): 107-113.
- [32] 朱 健, 李捍东, 王 平. 环境因子对底泥释放 COD、TN 和 TP 的影响研究. *水处理技术*, 2009, **35**(8): 44-49.
- [33] 袁文权, 张锡辉, 张丽萍. 不同供氧方式对水库底泥氮磷释放的影响. *湖泊科学*, 2004, **16**(1): 28-34.
- [34] Merle C, Danielopol DL, Watanamahart P. Impact of environmental conditions on the habitat selection of interstitial-dwelling Tubificids (Oligochaeta). An experimental study. *Geobios*, 1997, **30**(2): 91-99.
- [35] Famme P, Knudsen J. Aerotaxis by the freshwater oligochaete *Tubifex* sp. *Oecologia*, 1985, **65**(4): 599-601.