

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

|                            |                                  |
|----------------------------|----------------------------------|
| 序                          | 陈卫平 (4069)                       |
| 再生水灌溉利用的生态风险研究进展           | 陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)         |
| 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究     | 潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081) |
| 绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析         | 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)    |
| 再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响      | 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)        |
| 模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响        | 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)             |
| 模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响 | 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)             |
| 再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究         | 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)        |
| 再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟        | 王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)             |
| 城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究      | 王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)    |
| 北京市再生水的公众认知度评估             | 张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)             |

研究报告

|                                  |                                                           |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究              | 陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)                              |
| 世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究       | 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151) |
| 贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究               | 张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)                                  |
| 区域大气环境风险源识别与危险性评估                | 张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)                             |
| 稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素              | 刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)                                   |
| 汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性            | 胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)                                  |
| 城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应        | 隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)                                   |
| 闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征          | 杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)                                   |
| 模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响           | 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)                             |
| 广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异             | 孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)                                  |
| 松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究           | 马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)                    |
| 温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源             | 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)                        |
| 温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源       | 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)                         |
| 辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估         | 武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)                                  |
| 某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究         | 裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)                                  |
| 某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征       | 刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)                         |
| 太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析            | 廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)                             |
| 上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价         | 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)                            |
| 近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价 | 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)                                  |
| 北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究           | 张伟, 张洪, 单保庆 (4284)                                        |
| 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征            | 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)                                   |
| 典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征             | 朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)                   |
| 螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究             | 周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)                       |
| 固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究                | 沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)                             |
| 采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为       | 肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)                      |
| 水体中甲基汞光化学降解特征研究                  | 孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)                               |
| 土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究              | 李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)                            |
| 酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究             | 陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)                                    |
| 利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究              | 王夏琳, 李睿华 (4346)                                           |
| 地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究             | 郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)                             |
| 表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究          | 谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)                                   |
| 抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测            | 季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)                                       |
| 废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究               | 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)                          |
| 基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理              | 庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)                              |
| 硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究    | 钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)                             |
| 水平电场作用下活性污泥的脱水研究                 | 季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)                                       |
| 多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响             | 宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)                         |
| 碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究             | 陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)                             |
| 含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为       | 王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)                                       |
| 国家大气污染物排放标准体系研究                  | 江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)                          |
| 环境基准向环境标准转化的机制探讨                 | 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)                                      |
| 对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析      | 傅国伟 (4428)                                                |
| 《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录          | (4434)                                                    |
| 《环境科学》征订启事(4099)                 | 《环境科学》征稿简则(4166)                                          |
| 信息(4180, 4219, 4225, 4275)       | 编辑征稿通知(4172)                                              |

# 螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究

周露洪<sup>1,2</sup>, 谷孝鸿<sup>1\*</sup>, 曾庆飞<sup>1</sup>, 毛志刚<sup>1,2</sup>, 高华梅<sup>3</sup>, 孙明波<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京市淡水水产研究所, 南京 210017)

**摘要:** 通过构建螺-草模拟系统并利用稳定同位素示踪技术研究池塘螺-草水质净化系统中氮素的环境归趋, 结果表明, 以底泥为基质的螺-草系统中, 实验结束后苦草湿重增加了 580%, 分株数增加了 6.6 株, 苦草根部吸收储存了 1.07% 的<sup>15</sup>N, 苦草茎叶吸收储存了 7.74% 的<sup>15</sup>N, 环棱螺吸收储存较少, 只占 0.06%, 底泥滞留了 5.73% 的<sup>15</sup>N. 结果分析表明: 螺-草水质净化系统中苦草对水体中溶解态氮的吸收较少, 沉积物是苦草生长的主要营养源; 水体中氨氮主要通过沉积物-水界面进行迁移转化, 大部分被苦草根吸收利用转化为生物体, 少部分通过硝化/反硝化作用去除, 其余则滞留于沉积物; 苦草是系统中氮素去除的最终载体, 环棱螺的存在通过促进苦草生长及加强泥-水界面硝化和反硝化作用来加快系统中氮素的去除. 因此, 在养殖的不同阶段合理配置螺-草结构是整个养殖过程中水质调控的关键.

**关键词:** 环棱螺; 苦草; 营养盐; 环境归趋; 稳定同位素示踪

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4307-09

## Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification

ZHOU Lu-hong<sup>1,2</sup>, GU Xiao-hong<sup>1</sup>, ZENG Qing-fei<sup>1</sup>, MAO Zhi-gang<sup>1,2</sup>, GAO Hua-mei<sup>3</sup>, SUN Ming-bo<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nanjing Institute of Aquatic Sciences, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** A snail-macrophyte simulation system was built and isotope tracer technique was adopted to study the environmental fate of nitrogen in snail-macrophyte purification system, the results showed that: *Vallisneria spiralis* increased its wet weight by 580% and its number by 6.6 ramets, moreover, *Vallisneria spiralis* absorbed 1.07% <sup>15</sup>N by the roots and 7.74% by stems and leaves, while *Bellamya* only absorbed 0.06%. And 5.73% <sup>15</sup>N was retained in the sediment. Through analyzing of the results, it indicated that: in such simulation system, sediment was the main nutrition source for the growth of *Vallisneria spiralis*, which absorbed only few dissolved nitrogen from water; ammonium nitrogen in water was transformed mainly in the sediment-water interface, most of which was absorbed by *Vallisneria spiralis*, a small amount was removed through nitrification and denitrification, and the rest was kept by sediment; *Vallisneria spiralis* was final vector for removing nitrogen in the system, and *Bellamya* could also boost the growth of *Vallisneria spiralis* and strengthen the processes of nitrification and denitrification, thus promoting the nitrogen removal from the system indirectly. So, during the period of culture, rational allocation of snail-macrophyte structure in different stages plays an important role in controlling water quality in ponds.

**Key words:** *Bellamya*; *Vallisneria spiralis*; nutrition; environmental fate; stable isotopic tracing

池塘河蟹养殖, 为调控水质一般在池塘中种植一定面积的沉水植物并配养一定量的大型底栖动物如螺类等. 螺类与沉水植物既是河蟹的天然饵料更是重要的水质调控生物<sup>[1,2]</sup>, 研究表明: 螺类在底层的摄食、掘穴及爬动行为促进了底泥中有机碎屑的分解, 加速了泥水界面的物质交换; 环棱螺的存在会影响水体中氮形态及藻类的转化<sup>[3]</sup>; 沉水植物能有效吸收和利用水体中的营养盐<sup>[4]</sup>. 另一方面, 环棱螺与沉水植物具有明显的互利关系<sup>[5]</sup>, 螺-草(沉水植物)系统对于退化水环境及生态系统的修复具有重要的生态调控功能<sup>[6]</sup>, 且具有良好的水质净化效能<sup>[7]</sup>.

根据笔者对固城湖围垦区池塘河蟹养殖投饲利用情况调查估算, 每日投放的未被摄食利用饵料相当于每平方米水面日投入 25 mg 氮和 5 mg 磷, 按池塘平均水深 1 m 计, 水体氮磷浓度每日将分别增加 0.025 mg·L<sup>-1</sup> 和 0.005 mg·L<sup>-1</sup>. 由此累积, 池塘水体氮磷浓度将会达到很高的水平. 同时池塘中螺类

收稿日期: 2012-02-13; 修订日期: 2012-06-24

基金项目: 江苏省自然科学基金重点项目(BK2010096); 环境保护公益性行业科研专项(2010467014); 江苏省水产三项工程项目(PJ2011-55); 中国科学院院地合作项目(Y1YD11031)

作者简介: 周露洪(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊生态环境工程, E-mail: zhouluhong1986@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: xhgu@niglas.ac.cn

代谢也将排出大量的氨氮及磷酸盐<sup>[8~11]</sup>. 而水质的跟踪监测表明,池塘水体的氮磷浓度平均约为 1.5 mg·L<sup>-1</sup>和 0.05 mg·L<sup>-1</sup>,可见未被摄食饵料的氮磷及水生动物代谢产物的氮磷主要归宿不是水体,而是沉积至底泥或被沉水植物、浮游植物、微生物等转化利用. 笔者的研究表明投螺种草的河蟹养殖池塘中水草(沉水植物)收割是氮磷营养盐输出的主要途径,然而池塘螺-草净化系统中水体氮磷营养盐的归宿是否与此结论一致还不得而知.

稳定同位素示踪是一种用同位素或其标记化合物指示和追踪相应元素或化合物在生物体及其环境介质中迁移、转化和积累的方法.<sup>15</sup>N同位素添加技术已经广泛应用到水生态系统中用于示踪氮素的吸收、迁移、转化规律和消费者食物来源的分析中<sup>[12,13]</sup>. 其中,定量添加<sup>15</sup>N同位素,通过测定目标组分中<sup>15</sup>N原子丰度,从而得出水生态系统中各生物<sup>15</sup>N的利用量和转移效率越来越受到重视. Dodds等<sup>[14]</sup>将<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>Cl添加到河流生态系统中,研究了外源氮在食物网各营养级生物的分配量和转移效率. 通过原位标记实验,Barrón等<sup>[15]</sup>发现地中海有海草(*Posidonia oceanica*)的沉积物比无海草的沉积物更能有效地滞留藻类来源的氮. Zhang等<sup>[16]</sup>将<sup>15</sup>N标记的微囊藻注射到沉积物,研究不同大型植物吸收N的能力,结果表明苦草系统滞留了47.9%的氮,大于伊乐藻滞留的31.6%,从而揭示了沉积在太湖岸边沉积物中的蓝藻微囊藻碎屑是大型沉水植物生长所需要的一个重要的营养来源.

因此本实验构建模拟池塘的螺-草净化系统,利

用生物分析手段和稳定同位素示踪技术研究河蟹养殖池塘螺-草系统中环棱螺和苦草自身的生长及其作用下氮素环境的归趋,以揭示螺-草系统改善池塘水质的机制,并为该系统优化提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验基地高淳县阳江镇狮树水产项目渔场为固城湖围垦区. 实验容器为直径25 cm、容积15 L的塑料桶,塑料桶均匀放置在露天场地上,保证受光均匀. 选用养殖池塘最常见的苦草(*Vallisneria spiralis*)和环棱螺(*Bellamya*)分别作为实验的沉水植物和底栖动物. 苦草颜色鲜绿,叶片数4~6片,植株长20~25 cm,环棱螺个体大小均匀,清洗表面附着物,吸干、称重,相关指标见表1和表2. 实验自2010-07-07~2010-08-14,持续38 d.

实验用水为经500目筛绢网过筛后的池塘水,每个实验桶注入14 L,然后添加浓度为10 mg·L<sup>-1</sup>的<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>Cl(99% <sup>15</sup>N)溶液5 mL,搅拌均匀,添加的<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>Cl量很小,不会对水体的氨氮浓度造成影响. 沉积物底泥为池塘底泥,露天晒干后,研磨过60目的不锈钢筛网. 沉积物沙子为江滩中的细沙,自来水冲洗干净,露天晒干后,过60目不锈钢筛网.

表1 螺的初始质量(湿重)和个数

| Table 1 Initial mass(wet weight) and amount of experimental snails |       |      |       |    |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|----|-------|-------|
| 项目                                                                 | A1    | A2   | A3    | D1 | D2    | D3    |
| 质量(湿重)/g                                                           | 25.86 | 26.5 | 26.25 | 26 | 26.37 | 26.04 |
| 数量/个                                                               | 14    | 14   | 14    | 14 | 14    | 14    |

表2 苦草初始质量(湿重)

| Table 2 Initial mass(wet weight) of <i>V. spiralis</i> |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |       |       |
|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 项目                                                     | A1    | A2    | A3    | B1    | B2    | B3    | D1    | D2   | D3   | E1   | E2    | E3    |
| 质量(湿重)/g                                               | 13.41 | 13.37 | 13.33 | 13.36 | 13.49 | 13.34 | 13.27 | 13.5 | 13.6 | 13.4 | 13.35 | 13.48 |

1.2 实验设计

实验设置以底泥和沙子为基质的两组实验,每组实验设置2个处理组1个对照组,每组设置3个重复. 两个处理组为苦草和苦草+螺,对照组为无草无螺. 为方便描述,将底泥组的苦草+螺处理组简称为A,苦草处理组为B,对照组为C,沙子组分别为D、E和F.

按实验设计(表1和表2)放入苦草和螺,每个实验桶里分别加入预处理过的质量(干重)为1.5 kg的池塘底泥和沙子,缓慢注水,尽量不对底泥造成扰动,减少底泥悬浮及营养盐的释放.

1.3 样品采集及分析方法

桶内水体静置3 h后采集原水样,以后定期采集水样,每次在实验桶水下10 cm处用导管虹吸采集样品200 mL,其中将50 mL水样经过GF/C醋酸纤维膜过滤. 同时采集初始苦草、环棱螺、底泥样品,用塑封袋包装好待预处理及分析. 实验结束后采集底泥组的各个处理及对照组的表层底泥(约2 cm),用塑封袋包装. 同时测量各处理组的苦草及环棱螺物理指标,并采集样品测定其氮磷含量及稳定同位素分析.

水质指标测定:未经过滤水样测其总氮(TN)和

总磷(TP),经 GF/C 滤膜过滤的水样,测其氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )。TN、TP 采用过硫酸钾消解法同时测定, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 采用纳氏试剂法测定。测定方法参照文献[17]。

样品氮磷含量测定:采集的苦草(洗净表层的附着物及根部的底泥或沙子)、螺(取螺肉部分)及底泥样品放烘箱中于  $40^\circ\text{C}$  下烘 48 h,烘干后测定苦草的地上部分及地下部分的质量(干重),然后将全部样品用玛瑙碾磨磨碎,经 100 目筛过筛,用样品袋装好后待测。TN 含量分析方法为过氧化氢-硫酸消化-凯氏定氮法,TP 含量分析方法为过氧化氢-硫酸溶-钼锑抗比色法。测定方法参照文献[18]。

样品氮稳定同位素测定:采集的苦草及螺肉样品清洗干净,洗去表层粘附的  $^{15}\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,然后放冷冻干燥机干燥 48 h,干燥后放玛瑙碾磨中磨碎装入塑料管中。然后称取一定质量的样品放入同位素质谱仪测定氮稳定同位素值。样品的氮稳定同位素成分用 Thermoelectron Flash 1112 元素分析仪连接一个 Thermoelectron Delta V 质谱仪分析(EA-IRMS)。 $\delta^{15}\text{N}$  的测定误差小于 0.3‰。

#### 1.4 过量 $^{15}\text{N}$ 计算

$^{15}\text{N}$  数据是指每 g 干物质  $^{15}\text{N}$  的  $\mu\text{mol}$ ,根据文献[16]中所阐述的公式进行计算:

$$\text{过量}^{15}\text{N}(\mu\text{mol/g}) = \left\{ \left[ \frac{(\text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{样品}} - \text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{参照}})}{100} \right] \times [\text{样品中氮含量}] \right\} / [\text{样品的质量(干重)}] \quad (1)$$

$$\text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{样品}} = \frac{100 \times R_{\text{大气}} \times [(\delta^{15}\text{N}_{\text{样品}}/1000) + 1]}{[1 + R_{\text{大气}} + R_{\text{空气}}(\delta^{15}\text{N}_{\text{样品}}/1000)]} \quad (2)$$

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{大气}}) - 1] \times 1000 \quad (3)$$

其中,  $\text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{参照}}$  代表第 0 天原子丰度值;  $R_{\text{样品}} = ^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  (样品的比率);  $\delta^{15}\text{N}$  相对于大气氮比率的过量的值,  $R_{\text{大气}} = 0.0036765$ 。

#### 1.5 数据分析方法

利用 SPSS 16.0 进行数据统计分析,用一元方差分析不同处理组的实验数据差异性,并用 Duncan 方法进行组间差异分析。利用 Sigmaplot 10.0 进行作图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体营养盐变化

由图 1 可知,底泥组和沙子组的各个处理总氮、总磷和氨氮浓度随时间的变化趋势均基本一致,底

泥组呈现先降后增再降的波动,而沙子组基本为逐渐下降,最终均稳定在较低水平。2 组均在前 5 d 下降最快,底泥组的总氮、总磷的下降幅度为 53% 和 63%,均分别大于沙子组的 49% 和 55%,而氨氮的下降幅度为 61%,小于沙子组的 71%。实验结束后,底泥组各个处理的总氮、总磷和氨氮均值为  $1.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.052 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,均分别高于沙子组的  $0.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.035 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而 2 组的 3 个处理间总氮、总磷的差异均不显著( $P > 0.05$ ),沙子组的 D、E 处理氨氮浓度却显著高于对照组( $P < 0.05$ )。

### 2.2 苦草生长指标的比较

由图 2 可知,实验结束后苦草的质量(湿重)较初始值显著增加,底泥组的苦草处理及螺-草处理的质量(湿重)均显著高于沙子组,A、B、D、E 这 4 个处理间均差异显著( $P < 0.05$ ),A 处理最高,增加了 580%,E 处理最低,增加了 66%。苦草的株数也显著增加,其中 A 处理平均增加了 6.6 株,显著高于 B 处理的 3.6 株,而 D 处理和 E 处理间差异则不显著( $P > 0.05$ )。由图 3 可知,A、D 处理的地上部分与地下部分质量(干重)均高于 B、E 处理,其中 A 和 B 处理间差异显著( $P < 0.05$ ),而 D 和 E 处理间差异不显著( $P > 0.05$ ),且底泥组的 2 个处理地上部分质量(干重)均显著高于沙子组相应处理( $P < 0.05$ ),而地下部分质量(干重)则不受基质类型的影响。A 处理的苦草地上部分与地下部分质量(干重)比显著低于 B 处理( $P < 0.05$ ),而 D 和 E 处理间差异不显著( $P > 0.05$ )。基质类型对苦草的含水率有较显著的影响,A 和 B 处理的苦草含水率均分别显著高于 D 和 E 处理( $P < 0.05$ )。

### 2.3 各要素氮磷含量的比较

由图 4 可知,实验结束后 4 个处理的苦草地上部分及地下部分氮磷含量均较初始有所下降,且地上与地下部分下降幅度基本一致,其中沙子组的 D、E 处理的苦草地上部分总氮和地下部分总磷含量降幅最大,平均分别下降了 62%、67%、72% 和 66%,且 D、E 处理的苦草地下部分总磷含量降幅均显著大于 A、B 处理( $P < 0.05$ )。

由图 5 可知,螺肉的总氮总磷含量变化较小,A、D 处理间无显著差异,与初始值差异也不显著( $P > 0.05$ )。A、B、C(对照)处理间底泥的有机质、总氮、总磷含量差异均不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.4 $^{15}\text{N}$ 丰度及收支平衡分析

由图 6 可知,实验结束后苦草、环棱螺和底泥

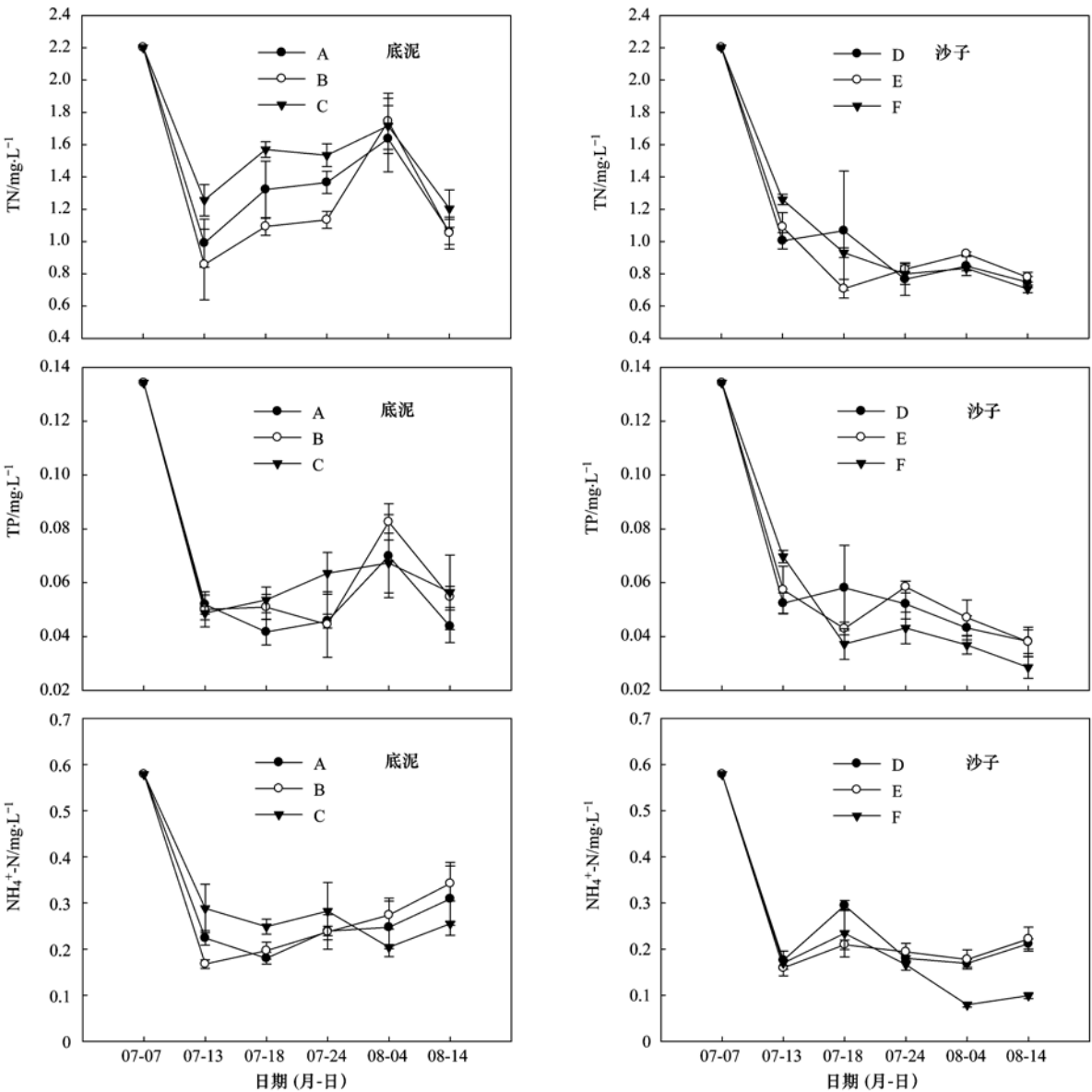


图 1 底泥组和沙子组水体营养盐的变化

Fig. 1 Changes of nutrient in water of sediment groups and sand groups

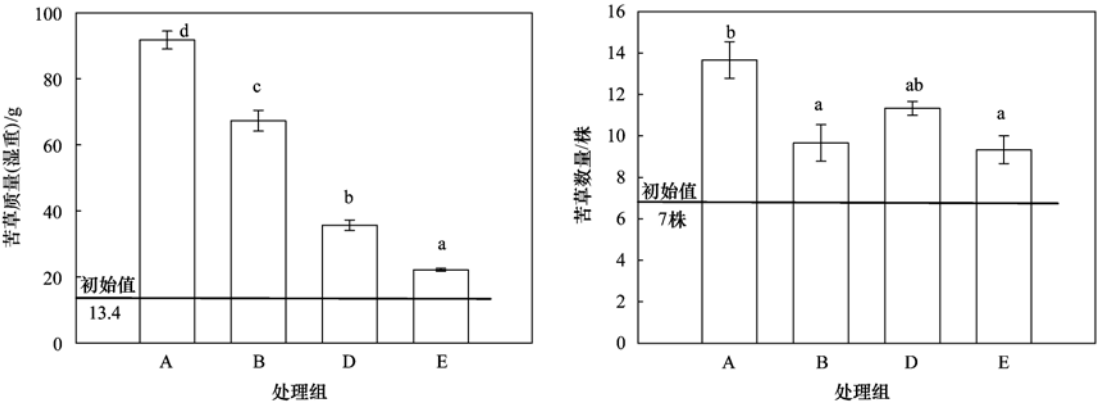


图 2 各处理苦草的总湿重和总株数

Fig. 2 Total wet weight and ramet amount of *V. spiralis* in different treatments

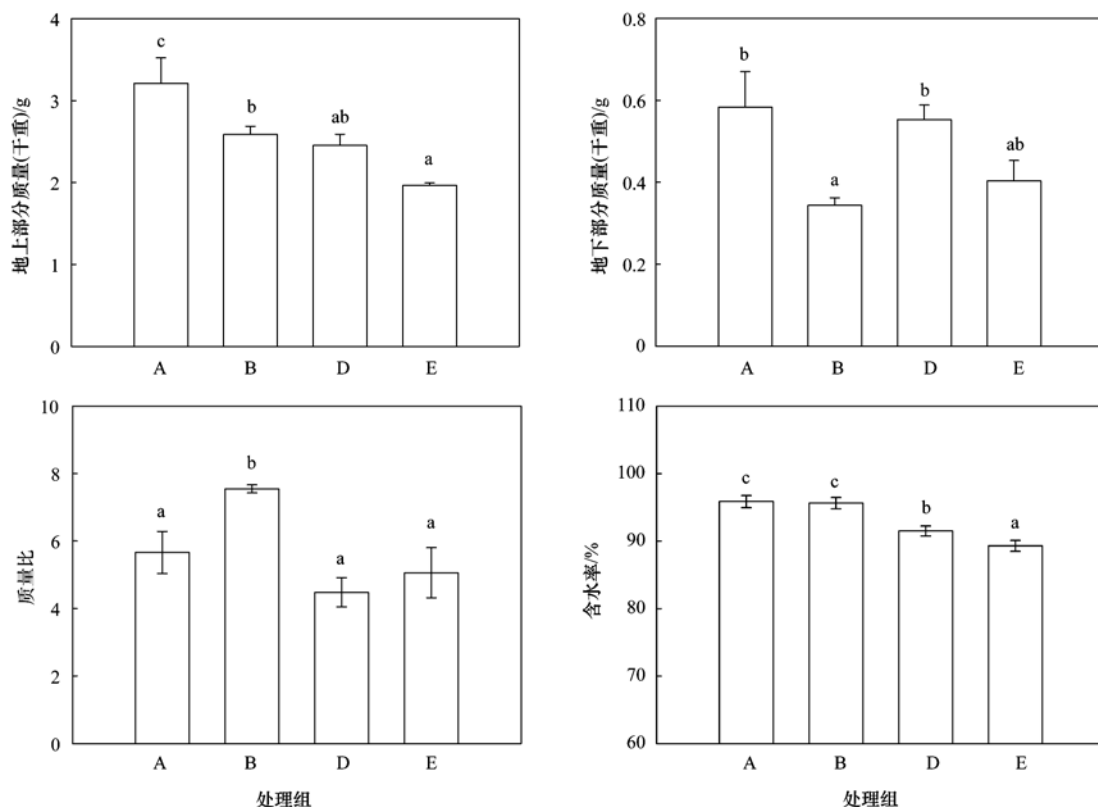


图3 各处理苦草的地上与地下部分质量(干重)、质量比和含水率

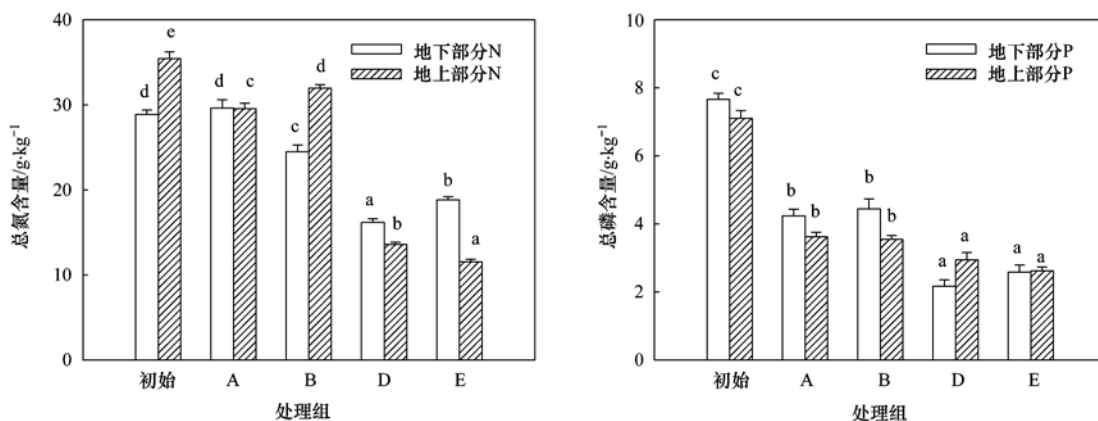
Fig. 3 Dry weight, mass ratio and moisture content of aboveground and underground parts of *V. spiralis* in different treatments

图4 各处理苦草地上部分和地下部分的氮磷含量

Fig. 4 Nitrogen and phosphorus content of aboveground and underground parts of *V. spiralis* in different treatments

均对氮有所吸收和累积,<sup>15</sup>N丰度显著高于初始值,其中A、D处理的苦草地上部分<sup>15</sup>N丰度分别显著低于B、C处理( $P < 0.05$ ),C处理(对照)的底泥<sup>15</sup>N丰度低于B处理、高于A处理,且处理间差异显著( $P < 0.05$ ).由图7可知,在实验结束时A处理的苦草根部分吸收储存了1.07%的<sup>15</sup>N,苦草茎叶吸收储存了7.74%的<sup>15</sup>N,环棱螺吸收较少,只占0.06%,底泥滞留了5.73%的<sup>15</sup>N;B处理的苦草根部分吸收储存了0.45%的<sup>15</sup>N,苦草茎叶吸收储存了17.44%的<sup>15</sup>N,底

泥滞留了38.77%的<sup>15</sup>N. D处理苦草根部分吸收储存了1.84%的<sup>15</sup>N,苦草茎叶吸收储存了0.11%的<sup>15</sup>N,环棱螺吸收也较少,只占0.14%;E处理的苦草根部分吸收储存了0.94%的<sup>15</sup>N,苦草茎叶吸收储存了0.17%的<sup>15</sup>N.

### 3 讨论

水体中悬浮颗粒物的自然沉降及沉积物短时间内的吸附现象较为明显<sup>[19,20]</sup>.实验前5 d内底泥组

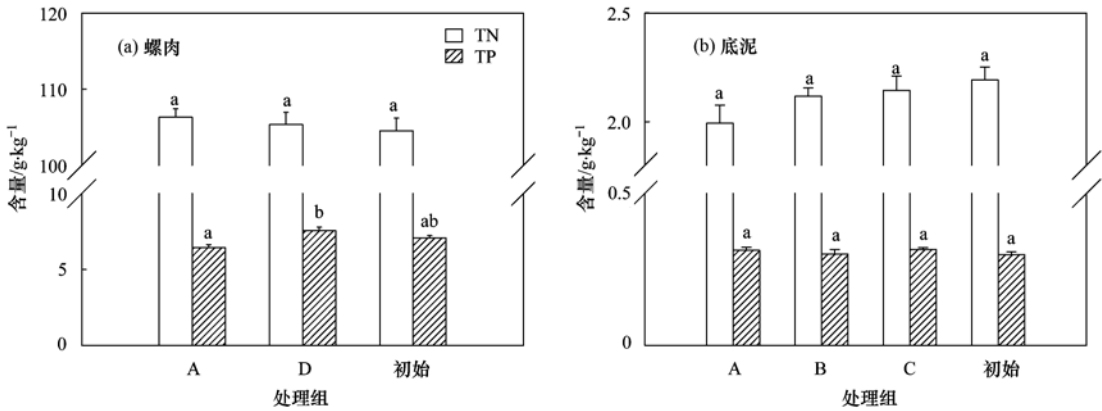


图 5 各处理螺肉和底泥的氮磷含量

Fig. 5 Nitrogen and phosphorus content of snail muscle and sediment

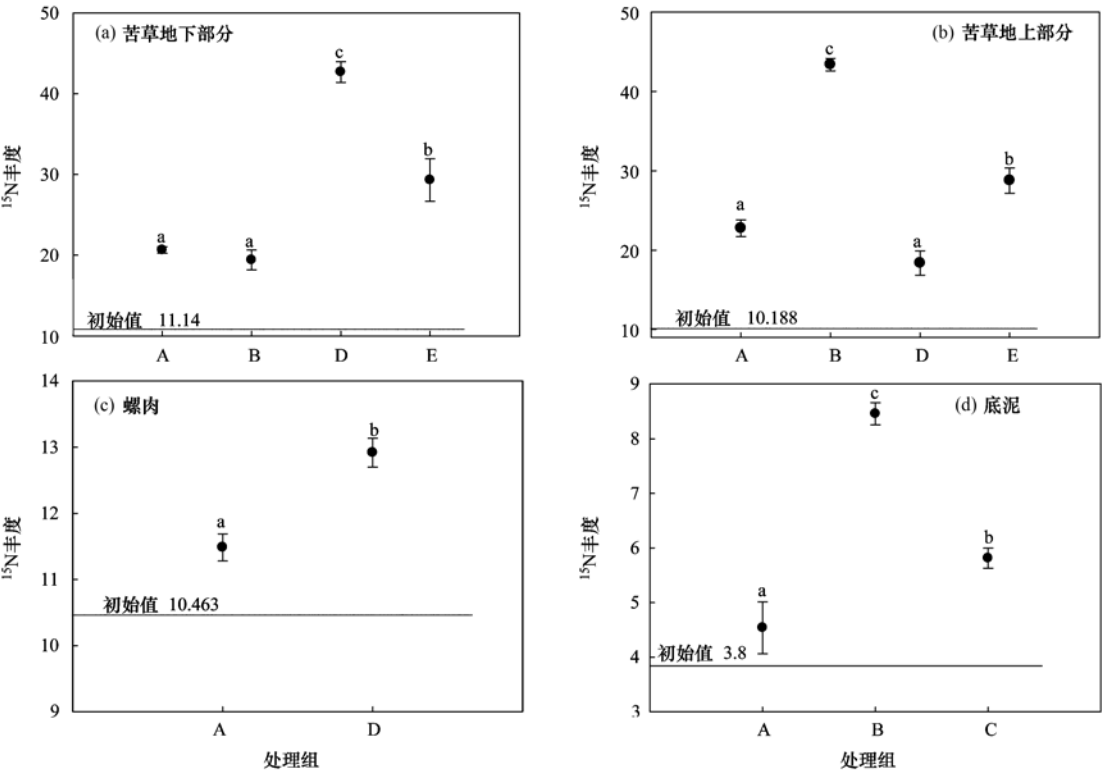
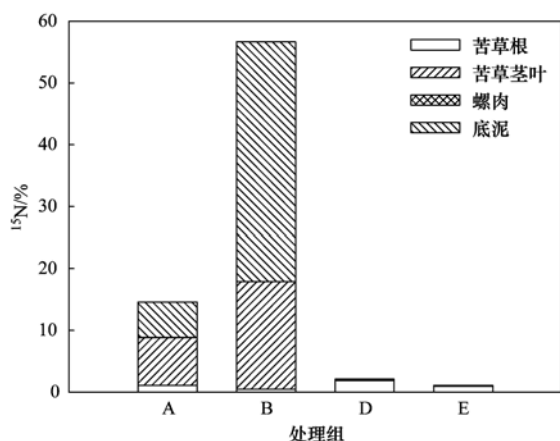


图 6 苦草、环棱螺和底泥<sup>15</sup>N丰度

Fig. 6 <sup>15</sup>N richness of *V. spiralis*, *Bellamyia* and sediment

和沙子组的各处理水体颗粒态氮磷自然沉降及沉积物对溶解态氮磷的吸附,使水体的总氮、总磷和氨氮浓度均有大幅度下降,而实验结束后底泥组各处理的氮磷含量均显著高于沙子组,可能与底泥中氮磷的少量释放有关. 沉水植物对水体中氮磷的净化作用主要表现在同化吸收<sup>[21]</sup>、改善根系微生态环境从而增进微生物的生化作用<sup>[22,23]</sup>并降低沉积物中氨氮和硝态氮的扩散通量<sup>[24]</sup>、促进沉积物对上覆水中磷的吸附<sup>[25]</sup>、抑制沉积物-水界面氮磷的释放<sup>[24,26]</sup>等. 环棱螺主要通过呼吸、摄食作用促进悬

浮颗粒物沉降<sup>[27]</sup>,同时其爬动行为对沉积物-水界面有较大的影响,提高了沉积物中底泥硝化及反硝化速率,加快沉积物中的氮循环<sup>[28,29]</sup>. 而本研究的苦草和环棱螺的净化作用不明显,实验结束后2个基质组的3个处理间总氮、总磷的差异均不显著( $P > 0.05$ ),主要因为实验水体溶解态氮磷浓度较低,随着颗粒态氮磷沉降后,水体氮磷已达到较低水平,环棱螺与苦草存在净化阈值,且高温时少量苦草浮叶腐败分解以及环棱螺自身代谢释放氮磷,因此水体氮磷稳定在较低的水平,处理组与对照组差异

图7 各个处理各要素过量 $^{15}\text{N}$ 比例Fig. 7 Proportion of excess  $^{15}\text{N}$  of each element in different treatments

不显著。

螺类对水生植物茎叶的牧食减少了植物的光照限制及其附着生物的营养盐竞争等影响,促进了水生植物的生长<sup>[9]</sup>,水生植物也为螺类提供了牧食产卵的基质条件及躲避捕食者的栖息场所<sup>[30]</sup>。不同密度的环棱螺均显著促进受附植物苦草的生长,螺-草的互利关系成立<sup>[5]</sup>。本实验结果同样也表明环棱螺的存在显著促进了苦草分株和根系、茎叶的生长,而实验环棱螺密度较低,通过实验中观察可知环棱螺大多爬行于底泥表层或钻入底泥,对苦草叶片表层的附着生物的刮食较少,因此本研究环棱螺促进苦草生长的主要机制不是通过牧食苦草茎叶的附着物,而是环棱螺爬行、钻孔等运动增大了沉积物含水率、孔隙度,提高了沉积物中总微生物活性<sup>[31]</sup>,改善了根系生境,促进根系向深层扩展,从而吸收更多的营养物质,然后转移到茎叶,促进苦草的分株、新芽的萌发及茎叶的生长,且在营养盐丰富的基质中此种促进效应更显著,同时环棱螺自身代谢释放也为苦草生长提供了营养<sup>[11]</sup>。沉积物是很大的氮磷库,根系系统是沉水植物吸收氮磷营养盐的主要部位<sup>[32]</sup>,因此有机质含量丰富的底泥组苦草的生长速率和含水率均显著高于沙子组,陈开宁等<sup>[33]</sup>的研究也有相似的结论,但基质类型不会显著影响苦草的分株。A、B处理的苦草地上和地下部分的总氮含量与初始值差异较小,但分别显著高于D、E处理,而A、B、D和E处理的苦草地上和地下部分的总磷含量都显著低于初始值,可能由于根系主要从沉积物中吸收氮,对磷的吸收相对较少,根系中的氮磷输送到茎叶中,以提供茎叶萌发分株所需

要的营养,同时氮通过叶片的渗透压力向水体释放以保证植物系统的物质浓度平衡<sup>[21]</sup>,特别是水体营养盐较低时,会继续分泌氮磷以与水体达到平衡<sup>[34]</sup>。

沙子组苦草只能从水体中吸收利用溶解态氮,稳定同位素示踪结果显示,D、E处理的苦草地上与地下部分吸收储存少量的 $^{15}\text{N}$ ,最大仅为1.84%,这也证实了苦草对水体中溶解态氮的吸收较少,最大只有10%<sup>[22]</sup>。D处理的苦草地下部分 $^{15}\text{N}$ 丰度显著高于E处理,表明环棱螺能促进苦草根系吸收水体中的氨氮。B处理底泥的 $^{15}\text{N}$ 丰度显著高于C处理,且B处理的底泥滞留了38.77%的 $^{15}\text{N}$ ,苦草茎叶吸收储存了17.44%的 $^{15}\text{N}$ ,表明静态水体中的大部分溶解态氮通过表层渗透及底泥吸附进入底泥,且同时苦草有较高的从底泥富集营养盐的能力<sup>[32,35]</sup>,一方面根系从底泥中吸收生物可利用的氨氮,并随生物量增加间隙水中游离的氨氮含量减少,另一方面,苦草生长光合作用可增加上覆水体溶解氧,氧可部分向沉积物-水界面下扩散,并通过茎、叶和根系向沉积物输送,使沉积物氧化还原电位升高<sup>[25]</sup>,促进氮的硝化、抑制下层沉积物氨化,使间隙水中的氨氮浓度逐渐降低<sup>[36]</sup>,因此泥-水界面存在浓度梯度,使上覆水中氨氮逐渐向底泥中渗透,从而提高了底泥滞留氨氮的能力。环棱螺通过改变沉积物表层的结构、增加沉积物表层的含氧量和含水率以及增强总微生物活性<sup>[31,37]</sup>,促进沉积物氨氮的释放(包含自身代谢释放)和对上覆水 $\text{NO}_3^-$ 的吸收,提高了硝化和反硝化速率,并增加了沉积物铁结合态磷含量,从而促进系统中氮磷的循环。因此环棱螺的存在反而使A处理的底泥仅滞留了5.73%的 $^{15}\text{N}$ ,苦草茎叶吸收储存了7.74%的 $^{15}\text{N}$ ,均远小于B处理。综上分析可得,螺-草系统中氮素的环境归趋模式为:水体外源性氨氮及环棱螺自身代谢释放的氨氮少量由沉水植物直接同化吸收,主要通过泥-水界面进行迁移转化,大部分被沉水植物根系吸收,少部分通过硝化/反硝化作用去除,其余则沉积在底泥;系统中的大部分氮素以沉水植物的途径输出,环棱螺的存在通过增强泥-水界面硝化反硝化过程及促进沉水植物的生长而加快水体及底泥中氮素的输出。笔者对河蟹养殖池塘的污染负荷输出研究表明,底泥中氮、磷的平均累积量分别占总输入的29%和41%,沉水植物从池塘携带的氮、磷总量分别占总输出的86%和88%,这也佐证了以上的归趋模式。本实验进行预处理已排除其它底栖动物的干扰,且实验中观察

发现浮游藻类和浮游动物生物量较小,因此水体中其它生物对实验结果的影响较小。由于实验条件的限制未测定水体 $^{15}\text{N}$ 的值,无法计算硝化-反硝化过程去除的氮,因此有待进一步深入研究,以了解系统中氮素的迁移转化过程。同时池塘中未被摄食的饵料是池塘系统中很大的营养源,研究其对水体营养盐的贡献及其在系统中迁移转化对池塘水质调控具有重要的意义。

池塘生态养殖系统中通过苦草和环棱螺的相互作用减少了外源性氮磷在水体和底泥中的累积,从而使养殖水体营养盐保持在较低的水平。然而实际养殖中也发现,螺-草系统的构建需要根据不同时期控制一定的比例,养殖初期如投放过多环棱螺牧食会对幼嫩植物造成危害而不利生长,养殖中后期过高则会因其代谢释放造成水体营养盐升高,而促进附着生物<sup>[38,39]</sup>和浮游藻类<sup>[3]</sup>的生长,造成水体溶解氧下降,导致环棱螺及沉水植物生长限制甚至死亡<sup>[40]</sup>,使水体恶化。因此在养殖的不同阶段合理配置螺-草结构是整个养殖过程中水质调控的关键。

#### 4 结论

(1)环棱螺主要通过改善泥水界面促进了苦草根系扩展、叶片分株及茎叶生长,其中以底泥为基质表现更显著,实验结束后苦草总湿重和分株数较初始增加了580%和6.6株。

(2)苦草对水体中溶解态氮的同化吸收较少,底泥是苦草生长的主要营养源,水体中氨氮通过泥-水界面进入底泥,其大部分被沉水植物根系吸收,少部分通过硝化/反硝化作用去除,其余则沉积于底泥,同时苦草能增强底泥对氨氮的滞留能力。

(3)螺-草净化系统中,苦草是氮素去除的最终载体,环棱螺的存在通过促进苦草生长及加强泥-水界面硝化和反硝化作用来加快系统中氮素的去除。

(4)利用稳定同位素示踪技术研究池塘氮素环境归趋模式,能深入揭示螺-草系统的水质净化机制,并为养殖池塘螺-草水质净化系统优化及养殖过程污染控制提供理论依据。

致谢:在野外实验中得到了高淳县阳江镇狮树水产项目渔场的支持;在实验设计方面,承蒙中国科学院南京地理与湖泊研究所陈伟民研究员的指导;在底泥理化分析上得到了隋桂荣老师的帮助,在此谨致谢忱!

#### 参考文献:

[1] 谷孝鸿,陈开宁,胡耀辉. 东太湖伊乐藻的营养繁殖及对污

业污水的净化[J]. 上海环境科学, 2002, 21(1): 43-45.

[2] Dhote S, Dixit S. Water quality improvement through macrophytes-a review [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 152(1-4): 149-153.

[3] Han S Q, Yan S H, Chen K N, et al.  $^{15}\text{N}$  isotope fractionation in an aquatic food chain: *Bellamyia aeruginosa* (Reeve) as an algal control agent[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(2): 242-247.

[4] Qiu D R, Wu Z B, Liu B Y, et al. The restoration of aquatic macrophytes for improving water quality in a hypertrophic shallow lake in Hubei Province, China [J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 147-156.

[5] 李宽意,文明章,杨宏伟,等. “螺-草”的互利关系[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5427-5432.

[6] Wang G X, Zhang L M, Chua H, et al. A mosaic community of macrophytes for the ecological remediation of eutrophic shallow lakes[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 582-590.

[7] 周露洪,谷孝鸿,曾庆飞,等. 不同密度螺-草结构对养殖尾水净化效果的比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(2): 173-178.

[8] Li K Y, Liu Z W, Hu Y H, et al. Snail herbivory on submerged macrophytes and nutrient release: Implications for macrophyte management[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(11): 1664-1667.

[9] Pinowska A. Effects of snail grazing and nutrient release on growth of the macrophytes *Ceratophyllum demersum* and *Elodea canadensis* and the filamentous green alga *Cladophora* sp. [J]. Hydrobiologia, 2002, 479(1-3): 83-94.

[10] Underwood G J C. Growth enhancement of the macrophyte *Ceratophyllum demersum* in the presence of the snail *Planorbis planorbis*: the effect of grazing and chemical conditioning[J]. Freshwater Biology, 1991, 26(2): 325-334.

[11] 白秀玲,谷孝鸿,何俊. 太湖环棱螺(*Bellamyia* sp.)及其与沉水植物的相互作用[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 1032-1037.

[12] Gribsholt B, Boschker H T S, Struyf E, et al. Nitrogen processing in a tidal freshwater marsh: a whole-ecosystem  $^{15}\text{N}$  labeling study[J]. Limnology and Oceanography, 2005, 50(6): 1945-1959.

[13] Mulholland P J, Helton A M, Poole G C, et al. Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading[J]. Nature, 2008, 452(7184): 202-205.

[14] Dodds W K, Evans-White M A, Gerlance N M, et al. Quantification of the nitrogen cycle in a Prairie Stream [J]. Ecosystems, 2000, 3(6): 574-589.

[15] Barrón C, Middelburg J J, Duarte C M. Phytoplankton trapped within seagrass (*Posidonia oceanica*) sediments are a nitrogen source: an in situ isotope labeling experiment[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51(4): 1648-1653.

[16] Zhang L Y, Li K Y, Liu Z W, et al. Sedimented cyanobacterial detritus as a source of nutrient for submerged macrophytes (*Vallisneria spiralis* and *Elodea nuttallii*): an isotope labeling experiment using  $^{15}\text{N}$ [J]. Limnology and Oceanography, 2010,

- 55(5): 1912-1917.
- [17] 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. 160-188.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. 44-79.
- [19] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 38-43.
- [20] 王娟, 王圣瑞, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊表层沉积物对氨氮的吸附特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1224-1229.
- [21] 王沛芳, 王超, 王晓蓉, 等. 苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 890-895.
- [22] Schulz M, Kozerski H P, Pluntke T, *et al.* The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the Lower River Spree (Germany) [J]. Water Research, 2003, **37**(3): 569-578.
- [23] Carignan R. Nutrient dynamics in a littoral sediment colonized by the submersed macrophyte *Myriophyllum spicatum* [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1985, **42**(7): 1303-1311.
- [24] 王圣瑞, 金相灿, 崔哲, 等. 沉水植物对水-沉积物界面各形态氮含量的影响[J]. 环境化学, 2006, **25**(5): 533-538.
- [25] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 385-392.
- [26] 蔡景波, 丁学锋, 彭红云, 等. 环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(2): 151-154.
- [27] 白秀玲, 谷孝鸿, 张钰. 太湖螺类的实验生态学研究——以环棱螺为例[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(6): 649-654.
- [28] 孙思志, 郑忠明, 陆开宏, 等. 铜锈环棱螺对藻华水体沉积物-水界面营养盐通量的影响[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(4): 730-734.
- [29] 商景阁. 底栖生物扰动对太湖沉积物水界面氮迁移转化影响研究[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2010. 34-44.
- [30] Stephen R C, David M L. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes[J]. Aquatic Botany, 1986, **26**: 341-370.
- [31] 张雷. 生物扰动下湖泊沉积物-水界面特征变化与磷的迁移转化[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2010. 27-43.
- [32] Rattray M R, Howard-Williams C, Brown J M A. Sediment and water as sources of nitrogen and phosphorus for submerged rooted aquatic macrophytes[J]. Aquatic Botany, 1991, **40**(3): 225-237.
- [33] 陈开宁, 陈小峰, 陈伟民, 等. 不同基质对四种沉水植物生长的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(8): 1511-1516.
- [34] Smith C S, Adams M S. Phosphorus transfer from sediments by *Myriophyllum spicatum* [J]. Limnology and Oceanography, 1986, **31**(6): 1312-1321.
- [35] Mcroy C P, Barsdate R J, Nebert M. Phosphorus cycling in an eelgrass (*Zostera marina* L.) ecosystem [J]. Limnology and Oceanography, 1972, **17**(1): 58-67.
- [36] 包先明, 陈开宁, 范成新. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 515-522.
- [37] 张雷, 古小治, 邵世光, 等. 河蚬(*Corbicula fluminea*)扰动对湖泊沉积物性质及磷迁移的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 88-95.
- [38] Hann B J, Mundy C J, Goldsborough L G. Snail-periphyton interactions in a prairie lacustrine wetland [J]. Hydrobiologia, 2001, **457**(1-3): 167-175.
- [39] McCormick P V, Stevenson R J. Grazer control of nutrient availability in the periphyton [J]. Oecologia, 1991, **86**(2): 287-291.
- [40] 宋玉芝, 杨美玖, 秦伯强. 苦草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2569-2575.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                  |                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Preface .....                                                                                                                                                    | CHEN Wei-ping ( 4069 )                                                |
| Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review .....                                                                                                   | CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> ( 4070 )       |
| Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water .....                                                   | PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> ( 4081 )          |
| Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment .....                                                                              | PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> ( 4088 )         |
| Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal .....                                                           | ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> ( 4094 )  |
| Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model .....                                                    | LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e ( 4100 )                         |
| Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model .....                        | LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e ( 4108 )                         |
| Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water .....                                                                           | ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> ( 4115 )  |
| Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation .....                  | WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao ( 4121 )                      |
| Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality .....                                                                                 | WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> ( 4127 )   |
| Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing .....                                                                                                      | ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao ( 4133 )                  |
| Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing .....                                                                 | CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> ( 4141 )    |
| Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO .....                                                      | WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> ( 4151 ) |
| Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station .....                                                                                                  | ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> ( 4159 )        |
| Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment .....                                                                                 | ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> ( 4167 )       |
| Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw .....                                  | LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> ( 4173 )               |
| Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car .....                                                              | HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> ( 4181 )             |
| Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai .....                                                                               | LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> ( 4188 )             |
| Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary .....                                       | YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> ( 4194 )            |
| Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation .....                                                         | LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 4205 )           |
| Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China .....                                   | KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> ( 4212 )        |
| Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season .....                                   | MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> ( 4220 )                |
| Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City .....                                                  | ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> ( 4226 )   |
| Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City .....                             | ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> ( 4237 )   |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River .....                                  | WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> ( 4244 )      |
| Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site .....                                                                              | PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> ( 4251 )           |
| Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China .....                                                                 | LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> ( 4256 )              |
| Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City .....                                             | LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> ( 4263 )      |
| Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai .....                   | LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> ( 4270 )      |
| Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China .....  | LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> ( 4276 )           |
| Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River .....                                   | ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing ( 4284 )                         |
| Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake .....                                                                     | QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> ( 4291 )        |
| Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1 ..... | ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> ( 4300 )            |
| Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification .....                                              | ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> ( 4307 )     |
| Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....                                                                         | SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> ( 4316 )      |
| A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process .....                                       | XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> ( 4322 )           |
| Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body .....                                                                                        | SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> ( 4329 )                |
| Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent .....                                                                                       | LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> ( 4335 )         |
| Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors .....                                                                        | CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> ( 4340 )                 |
| Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide ( FeS ) .....                                                                                              | WANG Xia-lin, LI Rui-hua ( 4346 )                                     |
| Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage .....                                                            | GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> ( 4352 )           |
| Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites .....                                                                                             | XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> ( 4361 )                   |
| Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters .....                                                          | JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping ( 4367 )                        |
| Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks .....                                                                   | WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> ( 4373 )         |
| Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation .....                                                                    | QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> ( 4380 )        |
| Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge .....                              | ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> ( 4387 )            |
| Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field .....                                                                                       | JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing ( 4393 )                           |
| Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils .....                                                                  | SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> ( 4400 )      |
| Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i> .....                                                     | CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> ( 4406 )   |
| Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste .....                            | WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi ( 4412 )                           |
| Study on Emission Standard System of Air Pollutants .....                                                                                                        | JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> ( 4417 )     |
| Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China .....                                                               | BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long ( 4422 )                        |
| Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals .....                                                                           | FU Guo-wei ( 4428 )                                                   |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                               | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                             |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                       | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                             |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                               |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                            | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行