

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

**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

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO<sub>2</sub> 的来源 ..... 刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)

广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映 ..... 廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)

北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 ..... 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)

白马泉风景区夏季大气 PM<sub>2.5</sub> 中二次有机物的初步研究 ..... 代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)

机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性 ..... 乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)

法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究 ..... 王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)

胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨 ..... 薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)

基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价 ..... 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)

流域水质时空分布特征及其影响因素初析 ..... 黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)

潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究 ..... 崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)

春季盘溪河水质日变化规律及水质评价 ..... 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)

西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究 ..... 肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)

三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价 ..... 郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)

淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究 ..... 徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)

三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验 ..... 王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)

沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征 ..... 李振炜, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)

合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性 ..... 李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)

鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析 ..... 张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)

三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价 ..... 敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)

黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价 ..... 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)

竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算 ..... 姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)

雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析 ..... 赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)

中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究 ..... 潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)

三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征 ..... 邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)

海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究 ..... 田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)

新生态铁的混凝作用探索 ..... 杨雪, 张景成, 关小红 (1221)

饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究 ..... 岳婵媛, 缪恒锋, 任洪艳, 阮文权 (1227)

核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究 ..... 王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)

络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究 ..... 秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯奎 (1241)

赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物 ..... 张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)

掺氮 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究 ..... 赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)

O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解水中扑灭通效能研究 ..... 李绍峰, 孙楚 (1260)

Pr-N 共掺杂 TiO<sub>2</sub> 光电催化降解孔雀石绿动力学 ..... 沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)

铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究 ..... 张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)

聚合铝铁对 A<sup>2</sup>/O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响 ..... 温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)

温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响 ..... 张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)

温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响 ..... 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)

好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究 ..... 王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)

除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析 ..... 李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)

利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌 ..... 王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)

紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究 ..... 于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)

1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究 ..... 陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)

氨氮对稀有鮎鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究 ..... 王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)

多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响 ..... 孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)

生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响 ..... 王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)

水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究:<sup>14</sup>C连续标记法 ..... 聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)

油田污染土壤残留油组成与特征参数分析 ..... 王坚, 张旭, 李广贺 (1352)

挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究 ..... 孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)

田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究 ..... 黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)

中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响 ..... 马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)

基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究 ..... 袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)

填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式 ..... 兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)

生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化 ..... 方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)

岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析 ..... 杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)

《环境科学》征订启事(1062) 《环境科学》征稿简则(1107) 信息(1135, 1215, 1396)

# 三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验

王建超<sup>1,2</sup>, 朱波<sup>1\*</sup>, 汪涛<sup>1</sup>, 易礼军<sup>3</sup>

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 四川省农业厅成都土壤肥料测试中心, 成都 610041)

**摘要:** 三峡库区消落带植被淹水后腐烂分解, 可能成为影响库区水环境安全的重要营养源. 以三峡库区6种消落带优势草本植物茎叶为材料, 利用室内浸泡模拟实验, 测定上覆水中氮磷浓度的变化, 结合初始基质碳、氮、磷含量分析, 力图查明消落带草本植物淹水后氮磷养分释放特征. 结果表明: ① 消落带植物初始基质碳、氮含量差异显著, 而磷含量彼此相近. ② 消落带植物淹水分解造成上覆水 pH 升高, 氧化还原电位 (Eh) 降低, 氮磷养分快速释放和上覆水氮磷浓度增加, 总氮 (TN) 和总磷 (TP) 释放量分别为  $(3.85 \pm 2.53)$ 、 $(1.33 \pm 0.73) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . 消落带植物淹水 TN 和氨氮 ( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) 的释放过程呈抛物线状, TP 呈对数曲线状. TN、TP 的释放峰值时间平均 15 d,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  平均 33 d. 养分释放量和释放速率均呈  $\text{TN} > \text{TP} > \text{NH}_4^+ \text{-N}$  的特点, 消落带植被经过 3 个月的浸泡, TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和 TP 的释放负荷分别为: 22.4、8.9、4.5  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . ③ 植物初始基质的 C 含量越低, N、P 含量越高, 植物淹水后氮磷养分的释放量和释放速率就越大.

**关键词:** 三峡库区; 消落带; 草本植物; 浸泡; 氮磷养分; 释放

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1144-08

## Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area

WANG Jian-chao<sup>1,2</sup>, ZHU Bo<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, YI Li-jun<sup>3</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Soil & Fertilizer Testing Center of Sichuan Provincial Agricultural Department, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Nitrogen and phosphorus release from herbaceous vegetation of water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir (TGR) area could become a crucial source which may deteriorate water quality of TGR. Stems and leaves of the dominant herbaceous plants from water-level fluctuation zone were collected and inundated in the laboratory for measuring nitrogen and phosphorus release along with decay process. Results show that: ① The differences of initial carbon and nitrogen content among herbaceous plants of water-level fluctuation zone are remarkable, except initial phosphorus content. ② The decomposition of vegetation under inundation causes the increase of pH, the decrease of Eh of the overlying water and the release of nitrogen and phosphorus. The release amount of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) are  $(3.85 \pm 2.53)$ ,  $(1.33 \pm 0.73) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  respectively. The release process of TN and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) shows a parabolic curve, whereas TP releases fits in a logarithmic curve. The average peak time of TN and TP concentration is in the 15<sup>th</sup> day of inundation, while  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  is in the 33<sup>th</sup> day. The release amount and rate of nutrients follow the sequence in  $\text{TN} > \text{TP} > \text{NH}_4^+ \text{-N}$ . The average loads of TN, TP and  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  release from vegetation decay in three months' inundation are 22.4, 8.9 and 4.5  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  respectively. ③ The lower initial C and higher initial N and P content of plant, make an advantage for nitrogen and phosphorus release when plants are inundated in flooding period of TGR.

**Key words:** Three Gorges Reservoir area; water-level fluctuation zone; herbaceous plant; inundation; nitrogen and phosphorus; release

水库消落带 (water-level fluctuation zone) 又称消落区或涨落带, 是指因水库水位调度而在库区形成的周期性水位涨落的特殊区域<sup>[1]</sup>. 根据“蓄清排浑”的水库调度方案, 三峡水库每年汛期 (6~9) 月保持低水位 145 m, 冬季 (10~12) 月蓄水至高水位 175 m, 在库区形成了冬水夏陆落差达 30 m 的巨大消落带, 总面积 349  $\text{km}^2$ <sup>[2]</sup>. 消落带春夏季出露成陆, 草本植被恢复, 生长旺盛. 九月份蓄水, 大量植被淹没

进入水库, 浸泡分解, 造成氮磷养分释放和水体营养物质浓度升高, 可能加剧库区水环境压力. 因此, 研究消落带植被淹水后的氮磷养分释放特征对于认识

收稿日期: 2011-05-23; 修订日期: 2011-08-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07104-002); 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-07)

作者简介: 王建超 (1984~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体非点源污染控制与治理, E-mail: lion03@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: bzhu@imde.ac.cn

三峡库区水环境变化机制和消落带管理具有重要意义。

20 世纪 70 年代 McLachlan<sup>[3]</sup> 和 Gaudet<sup>[4]</sup> 等就意识到湖滨带植物淹水后的养分释放问题, 80 年代我国学者 Chang 等<sup>[5]</sup> 研究发现消落带草本植物腐烂后的养分释放是造成水库建成初期营养元素升高的主要原因。但一直以来, 国内外对植物养分释放的研究主要集中在森林、草地和湿地生态系统凋落物的分解方面, 涉及养分的分解过程<sup>[6]</sup>、分解速率<sup>[7~9]</sup>、C/N 比、C/P 比、纤维素等含量的变化<sup>[10,11]</sup> 以及相关影响因素等<sup>[12~14]</sup>。对于植物养分淹水释放问题尚研究不足, 初步研究主要涉及湖泊水生植物的分解<sup>[15~17]</sup>、养分释放及其所引起的环境问题<sup>[18,19]</sup>, 还有河流枯枝落叶的分解等<sup>[20,21]</sup>。国内外对于植物养分淹水释放的研究多采用分解袋法<sup>[22]</sup>, 测定植物样品的养分残留率, 但取回样品清洗时容易造成样品流失, 产生误差<sup>[23]</sup>。实验拟通过测定上覆水中的氮磷浓度变化来对氮磷养分的淹水释放特征进行研究。

三峡水库消落带初成, 国内研究主要集中在消落带土壤养分淹水释放方面<sup>[1,24~26]</sup>, 对于消落带植被淹水后的养分释放机制和特征还未见有报道。本研究通过室内浸泡模拟实验初步分析了典型消落带优势植物氮磷养分淹水释放过程, 希望获取消落带植物淹水后氮磷养分释放通量的可靠数据, 弥补消落带植被生态重建风险评估的不足, 以期对三峡水库的营养盐源解析和三峡工程后续环境效应评估提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

三峡水库库区范围东经 106°14' ~ 111°28', 北纬 28°56' ~ 31°44', 总面积 5.8 万 km<sup>2</sup><sup>[27]</sup>。水库淹没区涉及湖北省宜昌、秭归、兴山、巴东和重庆市巫山、巫溪、奉节、云阳、万州、开县、忠县、丰都、石柱、涪陵、武隆、长寿、渝北、巴南、重庆市区和江津市共 21 个县(市、区)。其中, 重庆段消落带面积 306.3 km<sup>2</sup>, 占库区消落带总面积的 87.8%; 湖北段较少 42.7 km<sup>2</sup>, 占 12.2%<sup>[28]</sup>。三峡库区地处亚热带季风气候区, 气候温和湿润, 空气湿度可达 60% ~ 80%。年平均气温河谷区 16.7 ~ 18.7℃, 极端最高气温多超过 41℃。由于人为清库和多年水淹, 目前消落带自然植被主要为次生草本植物。

### 1.2 浸泡植物选择

分别于 2009、2010 年 9 月在三峡水库蓄水前对库区腹心区云阳至涪陵段典型干流消落带和库湾消落带植被生长情况进行了调查, 调查样方 254 个。调查结果表明<sup>[29]</sup>, 空心莲子草 [ *Alternanthera philoxeroides* ( Mart. ) Girseb. ]、狗牙根 [ *Cynodon dactylon* ( Linn. ) Pers. ]、稗草 [ *Echinochloa crusgalli* ( L. ) Beauv ]、苍耳 ( *Xanthium sibiricum* Patr. )、鬼针草 ( *Bidens bipinnata* L. )、马唐 [ *Digitaria sanguinalis* ( Linn. ) Scop. ] 等 6 种植物为三峡库区消落带优势草本植物, 因此选择上述 6 种草本植物进行浸泡模拟实验。

### 1.3 实验设计

野外采集植物鲜样, 用去离子水清洗掉表面灰尘, 每种植物称取 10.0 g 茎叶鲜样(用剪除法调配茎叶比例相当)。室内静水条件下用去离子水在 1 000 mL 烧杯中(敞口开放系统)进行模拟淹水浸泡培养实验, 培养水 pH 值中性, 培养温度 25℃ ± 2℃(蓄水初期水温 20 ~ 27℃)。每种植物 2 个平行, 设空白对照。鉴于三峡水库蓄水后水力停留时间 1 个月左右, 浸泡实验每月换水 1 次, 其他时间用去离子水适时补水, 保持杯内水位 1 000 mL。

### 1.4 数据采集与处理

#### (1) 植株生物量、碳(C)、氮(N)、磷(P)含量测定

齐地刈割样方内所有植物地上部分, 称量鲜重, 带回实验室 70℃ 下烘干至恒重, 测定水份, 计算生物量。将植株粉碎过 100 目筛, 用湿烧法即重铬酸钾-硫酸氧化法(170 ~ 180℃ 油浴消煮 5 min)测定碳含量; 浓硫酸消煮后, 用蒸馏法(加氢氧化钠碱化)测定氮含量; 硝酸-高氯酸混合液消煮后, 用钼锑抗比色法测定磷含量。

#### (2) 浸泡植物氮磷养分释放量测定

植物样品浸入水中后第 2 d, 开始测定上覆水中氮磷浓度, 每次抽取 10 mL 水样测定 TN、TP 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 这 3 个指标。平均每隔 10 d 取样测定 1 次, 适时加测。TN 和 TP 经碱性过硫酸钾和过硫酸钾高温(120℃)消解后用紫外分光光度法及钼锑抗分光光度法测定, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 用靛酚蓝分光光度法测定。同时, 用 Handylab multi12 多参数水质仪测定上覆水的温度、pH 值和 Eh 值。

计算公式:

植物氮磷养分累积释放量(只考虑上覆水中实际测得的氮磷量): 用上覆水测得的氮磷浓度与烧杯内上覆水总体积的乘积再除以浸泡植物的初始质量表示, 公式如下:

$$T_i = (c_i V_i + \sum_{i'=1}^n c_{i'} V_{i'}) / m$$

式中,  $T_i$  为植物养分的累积释放量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $c_i$ 、 $V_i$  分别为第  $i$  次取样时上覆水的养分浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和体积 (L);  $n$  为换水次数;  $c_{i'}$ 、 $V_{i'}$  分别为第  $i'$  次换水时上覆水的养分浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和换水体积 (L);  $m$  为浸泡植物的初始质量 (g).

$$\text{氮磷养分释放速率}: R = \frac{T_{\max}}{t}$$

式中,  $R$  为养分的释放速率 [ $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ];  $T_{\max}$  为养分的最大累积释放量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ );  $t$  为植物的浸泡时间 (即养分释放浓度峰值时间, d).

(3) 用 Excel 2007、Origin 8.1 和 SPSS 16.0 进行

数据的统计与分析. 采用 One way-ANOVA 方法对数据进行显著性分析, 最小显著极差法 (LSD) 进行多重比较.

## 2 结果与分析

### 2.1 消落带植物的地上生物量及其养分含量

几种消落带优势草本植物地上生物量差异显著 ( $P < 0.01$ ), 平均 ( $0.65 \pm 0.23$ )  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 范围  $0.53 \sim 0.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ . 鬼针草地上生物量最大, 苍耳次之, 狗牙根最小 (表 1). 几种消落带优势植物碳氮含量差异显著 ( $P_C < 0.05$ ,  $P_N < 0.01$ ), 而磷含量没有明显差异, 消落带植被倾向于磷素限制型.

表 1 消落带草本植物地上部分生物量和养分含量<sup>1)</sup>

Table 1 Biomass and nutrient content of herbaceous plant in the water-level fluctuation zone

植物种类	生物量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	养分含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$			C/N	C/P	N/P
		全碳(C)	全氮(N)	全磷(P)			
空心莲子草	$0.31 \pm 0.16c$	$345.6 \pm 14.3b$	$27.2 \pm 0.6a$	$3.15 \pm 0.08a$	12.7	109.7	8.6
狗牙根	$0.53 \pm 0.24bc$	$418.8 \pm 15.0ab$	$15.8 \pm 1.1b$	$2.11 \pm 0.07a$	26.5	198.5	7.5
稗草	$0.65 \pm 0.20b$	$402.9 \pm 33.7ab$	$12.4 \pm 3.1c$	$2.56 \pm 0.02a$	32.5	157.4	4.8
苍耳	$0.77 \pm 0.53ab$	$386.7 \pm 11.5b$	$28.5 \pm 0.5a$	$3.47 \pm 0.06a$	13.6	111.4	8.2
鬼针草	$0.98 \pm 0.09a$	$438.7 \pm 0.0a$	$9.9 \pm 1.1c$	$2.59 \pm 0.03a$	44.3	169.4	3.8
马唐	$0.67 \pm 0.50b$	$413.1 \pm 26.9ab$	$14.8 \pm 0.2bc$	$2.84 \pm 0.01a$	27.9	145.5	5.2

1) 同一列字母相同或者含有相同字母表示差异不显著, 字母不同表示差异显著

### 2.2 上覆水 pH 和 Eh 值变化

几种消落带优势草本植物上覆水 pH、Eh 变化趋势一致 (图 1). 浸泡初期, 上覆水 pH 迅速降低, 而后又迅速升高, 直到第 20 d 左右, 上升速率减缓. 浸泡结束时上覆水 pH 值呈鬼针草 > 苍耳 > 空心莲子草 > 马唐 > 稗草 > 狗牙根 > 空白. 所有植物上覆水 pH 值与空白对照差异显著 ( $P < 0.01$ ), 表明植物的淹水浸泡造成上覆水 pH 的显著升高.

Eh 与 pH 值变化趋势相反, 在整个过程中先降低, 后略有升高, 20 d 左右时间又逐渐降低. 浸泡结束时上覆水 Eh 值大小顺序与 pH 恰好相反, 呈鬼针草 < 苍耳 < 空心莲子草 < 马唐 < 稗草 < 狗牙根 < 空白. 方差分析表明, 在整个浸泡过程中各种植物上覆水 Eh 值存在显著差异 ( $P < 0.01$ ). 而且, 所有植物与空白对照差异显著 ( $P < 0.01$ ), 植物的淹水浸泡造成上覆水 Eh 的显著降低.

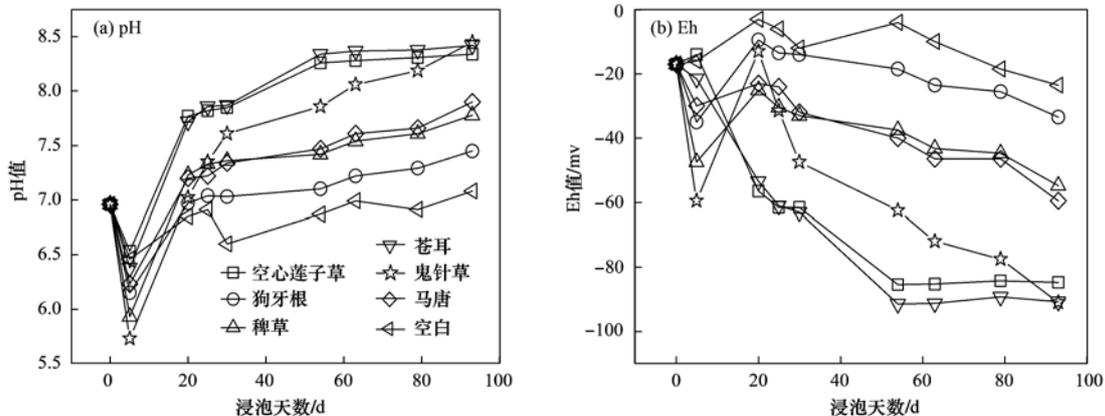


图 1 浸泡植物上覆水的 pH 和 Eh 变化

Fig. 1 Variation of pH and Eh in the overlying water with soaked plants

### 2.3 消落带植物氮磷养分浸泡释放过程

浸泡过程中,几种消落带优势草本植物上覆水的 TN 浓度均呈峰值偏左的抛物线状变化[图 2(a)]. TN 浓度平均在培养第 15 d 时达到最大值,之前各种植物上覆水 TN 浓度变化差异明显,之后上覆水 TN 浓度均迅速减小,至第 50 d 左右时速率变缓,逐渐趋于稳定. 即浸泡 15 d 时,植物体氮素(有机氮)的释放速度开始小于水体氮素的消耗速度(脱氮作用),出现净减少. 研究表明,植物分解前期主要是易溶物质的迅速洗脱过程,此时 TN 的释放主要受浸泡植物初始基质性质决定,而后期分解一般受微生物分解者的生物化学过程控制<sup>[20]</sup>. 实验选择去离子水为浸泡水源,生物化学作用微小,故浸泡后期上覆水 TN 浓度变化更加缓慢,但由于后期外界作用条件一致,故各种植物后期 TN 浓度曲线变化一致.

上覆水中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度大体呈先增大后减小抛物线状变化[图 2(b)],平均在培养第 33 d 时达到最大值,但曲线波动明显,因为  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  易被氧化成硝态氮或者转化成游离氨挥发,很不稳定. 稗草和狗牙根在整个浸泡过程中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度曲线波动较小,

其他浸泡植物波动明显. 空心莲子草和苍耳上覆水中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  增长最快,20 d 左右达到峰值,鬼针草和马唐增长缓慢,1 个月时间才出现明显增加,43 d 时达到最大.

各种植物 TP 的释放浓度在浸泡初期迅速升高,平均第 15 d 时达到最大值,而后保持平稳,略有下降,释放过程呈对数曲线状[图 2(c)],即 15 d 左右时间植物体 TP 释放已经基本结束. 狗牙根和稗草后期下降明显,其他植物均保持平稳. 磷素不能通过蒸发损失,而且受环境因素影响小,故 TP 的释放过程曲线波动很小. 在释放过程后期 TP 浓度有所降低,可能由于容器器壁和植物残体对磷的吸附造成.

对植物浸泡实验中上覆水氮磷浓度的方差分析表明,各种植物的 TN 释放过程 ( $P < 0.05$ ),  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  释放过程 ( $P < 0.05$ ), TP 释放过程 ( $P < 0.01$ ) 均存在显著差异,植物类型即初始基质性质对氮磷养分的释放有显著影响.

### 2.4 消落带植物氮磷养分浸泡释放量

消落带优势草本植物淹水后氮磷养分释放量用上覆水中实际测得的最大累积释放量来表征. 如图 3 所示,几种消落带草本植物的氮磷养分释放量均

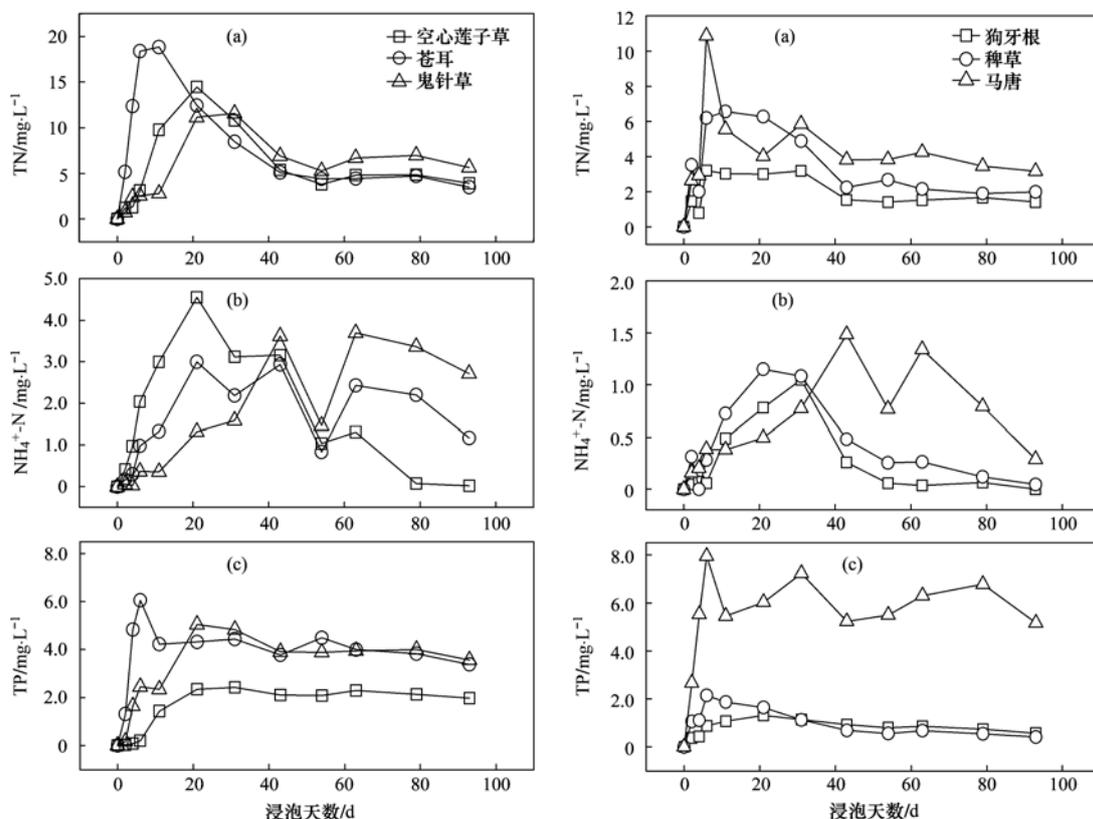


图 2 浸泡植物上覆水 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和 TP 浓度变化

Fig. 2 Concentration changes of TN,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  and TP in the overlying water with soaked plants

呈  $TN > TP > NH_4^+ - N$ , 分别为:  $(3.85 \pm 2.53)$ 、 $(1.33 \pm 0.73)$  和  $(0.92 \pm 0.80) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 各自占初始基质氮磷含量的 21.4%、46.1% 和 5.2%. TP 的释放量较小, 但释放比例却远大于 TN 和  $NH_4^+ - N$ .

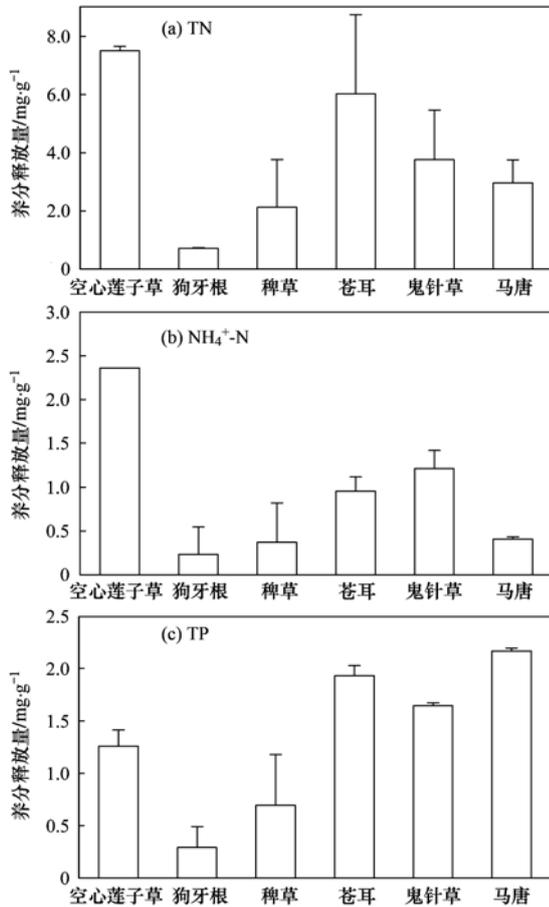


图 3 浸泡植物氮磷养分释放量

Fig. 3 Release amount of nitrogen and phosphorus from soaked plants

不同浸泡植物的氮磷养分释放量大小无一致性. 方差分析表明, 几种消落带优势草本植物的 TN 浸泡释放量无显著差异, 而  $NH_4^+ - N$  ( $P < 0.05$ ) 和 TP ( $P < 0.01$ ) 释放量之间差异显著. 空心莲子草 TN 和  $NH_4^+ - N$  释放量最大, 分别达到初始基质氮含量的 27.6% 和 8.7%, 为  $7.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $2.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 马唐 TP 释放量最大, 释放了初始基质磷含量的 76.3%, 为  $2.84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . 狗牙根 TN、 $NH_4^+ - N$  和 TP 的释放量均最小, 分别为 0.71、0.23 和  $0.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 占初始氮磷含量的 4.5%、1.5% 和 13.8%.

### 2.5 消落带植物氮磷养分浸泡释放速率

释放速率即养分的最大累积释放量与浸泡时间的比值. 几种消落带优势草本植物 TN、TP 累积释放量达到最大平均需要  $(15 \pm 10) \text{ d}$  的浸泡时间,

$NH_4^+ - N$  平均需要  $(33 \pm 17) \text{ d}$ . 养分淹水释放速率呈  $TN > TP > NH_4^+ - N$ , 分别为:  $(0.305 \pm 0.189)$ 、 $(0.155 \pm 0.149)$  和  $(0.035 \pm 0.040) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ .

如图 4 所示, 几种消落带优势植物的氮磷养分释放速率大小缺乏一致性. 方差分析表明, 几种消落带植物 TN 释放速率 ( $P < 0.05$ )、 $NH_4^+ - N$  释放速率 ( $P < 0.01$ ) 和 TP 释放速率均存在差异显著 ( $P < 0.01$ ), 不同消落带植物种类氮磷养分释放速率差异明显. 苍耳 TN 释放速率最大, 为  $0.548 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ; 空心莲子草  $NH_4^+ - N$  的释放速率最大, 为  $0.112 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ; 马唐 TP 释放速率最大, 为  $0.361 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ . 狗牙根 TN、 $NH_4^+ - N$  和 TP 的释放速率均最小, 分别为 0.118、0.008 和  $0.014 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ .

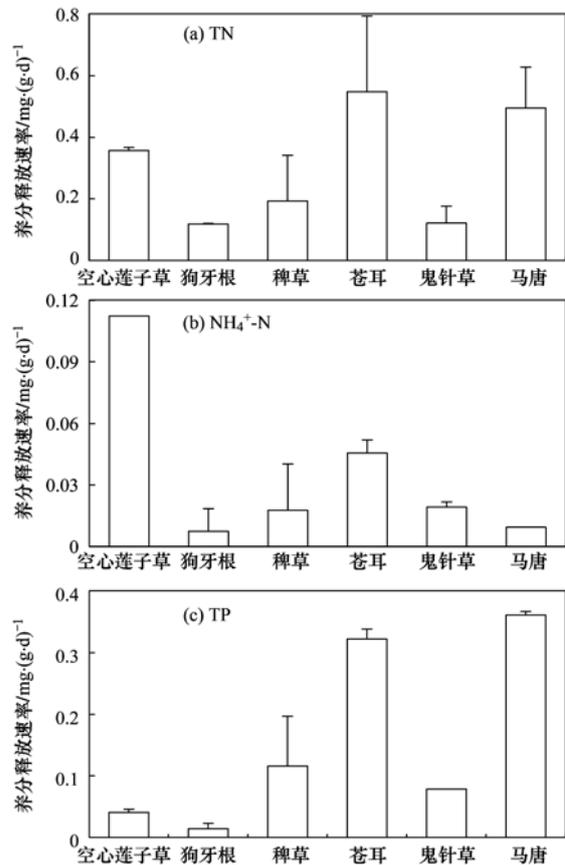


图 4 浸泡植物氮磷养分释放速率

Fig. 4 Release rate of nitrogen and phosphorus from soaked plants

### 2.6 消落带植物氮磷养分释放与初始基质碳氮磷含量的关系

C/N 是表征植物分解速率的最理想指标<sup>[30]</sup>, 也在一定程度上影响植物氮磷养分的淹水释放过程与通量.

统计分析表明(表 2), 各种消落带植物 TN 释

放量、释放速率与初始基质碳含量、C/N 和 C/P 呈负相关,与氮含量、N/P 呈正相关,与磷含量呈显著正相关,而释放峰值时间与初始基质性质相关性较弱.磷含量高低对 TN 释放量和释放速率影响明显.空心莲子草和苍耳具有较低的碳含量和较高的 N 含量,低的 C/N 比,所以有高的氮释放.

$\text{NH}_4^+$ -N 释放量和释放速率与初始基质碳含量、C/N、C/P 呈负相关,与氮磷含量、N/P 呈正相关. $\text{NH}_4^+$ -N 释放浓度峰值时间与初始基质碳含量、C/N、C/P 呈正相关,与氮磷含量、N/P 呈负相关.

表 2 浸泡植物氮磷养分释放与初始基质性质的关系

Table 2 Relationship between nitrogen and phosphorus release and the initial properties of soaked plants

养分		全碳(C)	全氮(N)	全磷(P)	C/N	C/P	N/P
TN(TN)	释放量	-0.757	0.775	0.878 <sup>1)</sup>	-0.609	-0.910 <sup>1)</sup>	0.497
	释放速率	-0.478	0.668	0.845 <sup>1)</sup>	-0.667	-0.794	0.410
	释放峰值时间	0.032	-0.117	0.119	0.368	-0.123	-0.290
氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N)	释放量	-0.692	0.560	0.552	-0.403	-0.649	0.402
	释放速率	-0.911 <sup>1)</sup>	0.760	0.619	-0.682	-0.750	0.648
	释放峰值时间	0.746	-0.663	-0.341	0.789	0.447	-0.713
TP(TP)	释放量	-0.019	0.218	0.694	-0.086	-0.583	-0.141
	释放速率	0.039	0.206	0.569	-0.214	-0.446	-0.060
	释放峰值时间	-0.321	0.167	-0.157	-0.101	0.046	0.330

1) 表示在  $\alpha=0.05$  水平下显著

## 2.7 消落带植被氮磷养分淹水释放负荷

在对消落带植被现场踏勘和测定的基础上,依据几种消落带优势植物的分布比例和样方中各种植物的高度和盖度数据,计算物种的重要值<sup>[29]</sup>.根据每种植物的重要值大小,对消落带几种优势草本植物分配权重(表 3),并结合消落带植被的地上生物量数据估算几种优势草本植物单位面积的氮磷释放负荷.结果如表 4,在淹水初期的 3 个月里,消落带草本植物通过淹水腐烂分解,平均释放到三峡水库

TP 释放量、释放速率和释放浓度峰值时间与初始基质性质相关性较弱.一定程度上植物初始基质磷含量越高,C/P 越低,磷的释放量越大,释放速率越快,释放峰值时间就越短.有研究认为,植物初始 N/P 在 2~8 之间时,整个分解环境处于 N 限制状态,此时过量的 P 将导致 P 的释放<sup>[31]</sup>.马唐初始 N/P 为 5.2,且具有较低的初始 C/P(145.5)和较高的 P 含量(2.87),结果其分解释放 P 的速率较大.

可见,植物初始基质的碳含量越低,氮、磷含量越高,越有利于植物体中氮磷养分的淹水释放.

的养分负荷 TN 为  $22.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N 为  $4.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , TP 为  $8.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ .其中,苍耳的 TN 释放负荷最大,为  $46.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,狗牙根最小,只有  $3.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,两者相差 11.6 倍.鬼针草  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TP 释放负荷最大,分别为:11.8 和  $16.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,狗牙根仍旧最小,仅有 1.2 和  $1.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ .另据消落带草本植物地上部分的氮磷含量(见表 1),可以估计单位面积消落带植被完全分解后的释放负荷惊人,TN 平均达  $125.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,TP 为  $21.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ .

表 3 消落带植物分布权重

Table 3 Distribution ratios of the dominant plants in water-level fluctuation zone

植物	空心莲子草	狗牙根	稗草	苍耳	鬼针草	马唐	其他
权重/%	10	10	20	20	10	20	10

表 4 单位面积消落带植被氮磷养分淹水释放负荷

Table 4 Nitrogen and phosphorus loads from soaked plants in the unit area of water-level fluctuation zone

项目	单一植物养分淹水释放负荷/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$						植被加权平均	
	空心莲子草	狗牙根	稗草	苍耳	鬼针草	马唐		其他
TN	23.0	3.7	13.6	46.8	36.8	19.8	—	22.4
$\text{NH}_4^+$ -N	7.2	1.2	2.4	7.5	11.8	2.7	—	4.5
TP	3.9	1.5	4.4	15.0	16.1	14.4	—	8.9

## 3 讨论

浸泡初期由于植物呼吸消耗水体  $\text{O}_2$  产生  $\text{CO}_2$ ,

导致上覆水 pH 降低;随着水体  $\text{O}_2$  含量消耗,植物开始厌氧分解,pH 值开始上升.植物淹水后没有表现出磷素的优先释放,氮磷养分释放均在 15 d 左右

达到峰值,可以推测水库蓄水半个月后水库水质将最差.蓄水前可以考虑对消落带植被进行回收处理<sup>[32]</sup>,防止营养物质大量释放造成二次污染.

三峡库区非点源污染特征已有一定的研究<sup>[33]</sup>,朱波等<sup>[34]</sup>对三峡库区典型小流域非点源氮磷污染负荷研究后认为,集镇径流的氮磷迁移通量达 64.2、9.3 kg·hm<sup>-2</sup>,村落径流次之,为 19.0、3.2 kg·hm<sup>-2</sup>,林地最低,为 1.4、0.6 kg·hm<sup>-2</sup>.黄丽等<sup>[35]</sup>研究后认为三峡库区 19 个县市 8 a (1996 ~ 2003 年)间农田氮肥平均土壤污染负荷为 90.2 kg·hm<sup>-2</sup>,磷肥为 9.8 kg·hm<sup>-2</sup>.对比后可见,消落带草本植物 3 个月的氮磷污染负荷超过村落径流污染水平,完全分解氮磷污染水平远远超过化肥污染和集镇污染水平.消落带植物淹水分解释放出的氮磷养分已成为三峡水库营养物质的重要来源和影响三峡水库水环境安全的重要因素.

实验选择开放系统,能够更好地贴近实际情况,但由于氮素的挥发和吸收,可能导致实验数据波动比较明显.模拟实验是在可控的理想条件下进行的,而三峡库区实际情况比较复杂,气候、水文、人类活动等都会对养分的释放过程产生影响.而且,整个三峡库区消落带类型多样,植物种类众多,分布特征也存在差异,特别是淹水后植被类型、地上生物量等都存在很大的不确定性,因此浸泡实验所获得的养分释放负荷结果也只能代表研究区域(云阳至涪陵段库区腹心区)的复合值,要获得整个三峡库区的负荷值,需要对三峡库区不同区域(如库尾、库中、库首等)消落带优势植被的分布面积、生物量、单一植物的养分释放量等开展进一步的调查和模拟研究,同时利用空间插值和地理信息系统方法进行高精度测算,方能较为准确地获得整个库区消落带植被的养分淹水释放负荷.

#### 4 结论

(1)消落带优势草本植物地上生物量、初始基质碳含量、氮含量差异显著,而磷含量彼此相近,差异不明显,趋向于磷素限制型.

(2)消落带优势草本植物的淹水浸泡将造成氮磷养分释放,上覆水中氮磷浓度升高. TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 释放过程呈先增后减的抛物线状变化, TP 释放过程呈对数曲线变化. TN、TP 释放平均在 15 d 左右达到浓度峰值, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均 33 d. 几种消落带优势草本植物的氮磷释放量和释放速率均是 TN > TP > NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. 消落带植物完全分解后的氮磷污染负荷可

达 TN 125.2 kg·hm<sup>-2</sup>, TP 21.0 kg·hm<sup>-2</sup>.

(3)消落带植物初始基质的 C 含量越低, N、P 含量越高,植物淹水后氮磷养分的释放量和释放速率就越大. TP 释放与初始基质性质相关性较弱.

(4)消落带植被淹水释放负荷有待对三峡库区不同地段植被分布、养分吸收与释放和空间插值计算的进一步研究.

#### 参考文献:

- [1] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1035-1039.
- [2] 冯大兰, 刘芸, 黄建国. 三峡库区消落带土壤不同含水量条件下芦苇的氮素与生物量动态变化 [J]. 环境科学学报, 2009, **29**(9): 2003-2009.
- [3] McLachlan S M. The rate of nutrient release from grass and dung following immersion in lake water [J]. Hydrobiologia, 1971, **37**(3-4): 521-530.
- [4] Gaudet J J, Muthuri F M. Nutrient relationships in shallow water in an African Lake, Lake Naivasha [J]. Oecologia, 1981, **49**(1): 109-118.
- [5] Chang S P, Wen C G. Changes in water quality in the newly impounded subtropical Feitsui Reservoir, Taiwan [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1997, **33**(2): 343-357.
- [6] Howard-Williams C, Howard-Williams W. Nutrient leaching from the swamp vegetation of Lake Chilwa, a shallow African Lake [J]. Aquatic Botany, 1978, **4**: 257-267.
- [7] 张志永, 彭建华, 万成炎, 等. 三峡库区澎溪河消落区草本植物的分布与分解 [J]. 草业学报, 2010, **19**(2): 146-152.
- [8] Kelley R H, Jack J D. Leaf litter decomposition in an ephemeral karst lake (Chaney Lake, Kentucky, U. S. A.) [J]. Hydrobiologia, 2002, **482**(1-3): 41-47.
- [9] 窦荣鹏, 江洪, 余树全, 等. 热带尖峰岭和亚热带千岛湖六种凋落叶的分解特征 [J]. 生态学报, 2010, **30**(16): 4521-4528.
- [10] 孙志高, 刘景双, 于君宝, 等. 模拟湿地水分变化对小叶章枯落物分解及氮动态的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2081-2093.
- [11] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 长白山次生针阔混交林凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系 [J]. 应用生态学报, 2008, **19**(2): 245-251.
- [12] Kasurinen A, Riikonen J, Oksanen E, et al. Chemical composition and decomposition of silver birch leaf litter produced under elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> [J]. Plant and Soil, 2006, **282**(1-2): 261-280.
- [13] 武海涛, 吕宪国, 杨青. 湿地草本植物枯落物分解的影响因素 [J]. 生态学杂志, 2006, **25**(11): 1405-1411.
- [14] Merrix F L, Lewis B R, Ormerod S J. The effects of low pH and palliative liming on beech litter decomposition in acid-sensitive streams [J]. Hydrobiologia, 2006, **571**(1): 373-381.
- [15] 韩红娟, 翟水晶, 胡维平. 马来眼子菜腐烂分解氮磷转化模

- 型研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1483-1488.
- [16] 李文朝, 陈开宁, 吴庆龙, 等. 东太湖水生植物生物质腐烂分解实验 [J]. 湖泊科学, 2001, **13**(4): 331-336.
- [17] 成小英, 王国祥, 濮培民, 等. 凤眼莲腐烂分解对湖泊水质的影响 [J]. 中国环境科学, 2004, **24**(3): 303-306.
- [18] 厉恩华, 刘贵华, 李伟, 等. 洪湖三种水生植物的分解速率及氮、磷动态 [J]. 中国环境科学, 2006, **26**(6): 667-671.
- [19] Masifwa W F, Okello W, Ochieng H, *et al.* Phosphorus release from decomposing water hyacinth and effects of decomposition on water quality [J]. Uganda Journal of Agricultural Sciences, 2004, **9**: 389-395.
- [20] 陈书秀, 江明喜. 三峡地区香溪河流域不同树种叶片凋落物的分解 [J]. 生态学报, 2006, **26**(9): 2905-2912.
- [21] Dezzeo N, Herrera R, Escalante G, *et al.* Mass and nutrient loss of fresh plant biomass in a small black-water tributary of Caura river, Venezuelan Guayana [J]. Biogeochemistry, 1998, **43**(2): 197-210.
- [22] Nanda A, Asaeda T, Fujino T, *et al.* Aggregation of Lepidostomatidae in small mesh size litter-bags; implication to the leaf litter decomposition process [J]. Wetlands Ecology and Management, 2009, **17**(4): 417-421.
- [23] 武海涛, 吕宪国, 杨青. 分解袋法在湿地枯落物分解研究中存在的问题与对策 [J]. 东北林业大学学报, 2007, **35**(2): 82-85.
- [24] 石孝洪. 三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化 [J]. 土壤肥料, 2004, (1): 40-42, 44.
- [25] 王里奥, 黄川, 詹艳慧, 等. 三峡库区消落带淹水-落干过程土壤磷吸附-解吸及释放研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(5): 593-597.
- [26] 林玉海, 王楠, 赵秀兰, 等. 三峡库区澎溪河流域消落区土壤氮磷释放研究 [J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 131-134, 140.
- [27] 蒙吉军, 申文明, 吴秀芹. 基于 RS/GIS 的三峡库区景观生态综合评价 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2005, **41**(2): 295-302.
- [28] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析 [J]. 水土保持通报, 2008, **28**(1): 46-49.
- [29] 王建超, 朱波, 汪涛. 三峡库区典型消落带淹水后草本植被的自然恢复特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(5): 603-610.
- [30] Lee A A, Bukaveckas P A. Surface water nutrient concentrations and litter decomposition rates in wetlands impacted by agriculture and mining activities [J]. Aquatic Botany, 2002, **74**(4): 273-285.
- [31] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, **40**(3): 523-534.
- [32] Asaeda T, Trung V K, Manatunge J. Modeling the effects of macrophyte growth and decomposition on the nutrient budget in Shallow Lakes [J]. Aquatic Botany, 2000, **68**(3): 217-237.
- [33] 田耀武, 黄志霖, 肖文发. 三峡库区黑沟小流域非点源污染物输出的动态变化 [J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 423-427.
- [34] 朱波, 汪涛, 王建超, 等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷 [J]. 中国水土保持, 2010, (10): 34-36.
- [35] 黄丽, 项雅玲, 袁锦方. 三峡库区农田的化肥面源污染状况研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(S2): 362-367.

## CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO <sub>2</sub> by Carbon Isotope Composition .....	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation .....	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing .....	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM <sub>2.5</sub> Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province .....	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust .....	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ <sup>15</sup> N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area .....	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters .....	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake .....	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed .....	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River .....	..... CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring .....	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China .....	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period .....	..... GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms .....	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall .....	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City .....	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir .....	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir .....	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta .....	..... LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake .....	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay .....	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India .....	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain .....	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System .....	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant .....	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation .....	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment .....	..... WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process .....	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite .....	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO <sub>2</sub> Photocatalyst .....	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China .....	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A <sup>2</sup> /O System .....	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System .....	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor .....	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment .....	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal .....	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene ( <i>nosZ</i> ) .....	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis .....	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain .....	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow .....	..... WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure .....	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils .....	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous <sup>14</sup> C Labeling .....	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields .....	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils .....	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils .....	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads .....	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste .....	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation .....	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill .....	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area .....	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

# 《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4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection 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 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@cees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE ) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@cees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, 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 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 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 (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

国内外公开发行人