

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥化中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

水环境条件对三峡库区消落带狗牙根氮磷养分淹水浸泡释放的影响

肖丽微^{1,2,3}, 朱波^{1,2*}

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院山地表生与生态调控重点实验室, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 三峡库区消落带会经历周期性的淹水-出露循环过程, 消落带在出露期大量植物生长, 淹水期植物体淹没腐解并释放氮磷养分, 可能加剧三峡水库水环境压力。狗牙根 [*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.] 是三峡库区分布最广泛的优势植物之一。针对三峡水库水环境条件(温度、pH 和光照)变化对狗牙根淹水条件下矿化分解及养分释放过程的影响进行了研究。结果表明, 狗牙根淹水后, 植物残体矿化分解, 干重下降, 全氮和全磷含量减少。狗牙根浸泡 200 d 后, 25℃ 和 15℃ 时总氮(TN)释放量分别为 $(2.66 \pm 0.29) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(3.76 \pm 0.04) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总磷(TP)释放量分别为 $(0.79 \pm 0.03) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(1.40 \pm 0.02) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 上覆水 pH 为 5.0、7.0、9.0 时, TN 释放量分别为 (3.76 ± 0.08) 、 (2.66 ± 0.29) 、 $(2.55 \pm 0.12) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP 的释放量分别为 (1.53 ± 0.04) 、 (0.79 ± 0.03) 、 $(1.70 \pm 0.07) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 避光时上覆水 TN 和 TP 的释放量为 $(3.87 \pm 0.14) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(1.78 \pm 0.08) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。氮的释放以颗粒态氮(PN)为主, 占 80% 以上, 而颗粒态磷(PP)占比在 50% 左右。随三峡水环境条件变化, 如温度降低, 狗牙根的氮磷浸泡释放量增大; 而酸、碱性水体较中性条件有利于氮磷释放; 避光时狗牙根的氮磷释放得到促进。研究结果表明三峡水库冬季蓄水或污水排放导致的水环境变化将进一步促进消落带植物淹水分解及养分释放, 从而可能加剧三峡库区水体富营养化。

关键词: 三峡库区; 消落带; 植物浸泡; 氮磷释放; 水质恶化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4580-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201703195

Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region

XIAO Li-wei^{1,2,3}, ZHU Bo^{1,2*}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The flooding-drying cycles in the water-level fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) result in an abundance of plants that are submerged and decomposed to release nutrients. This has the potential to lead to water quality deterioration of the TGR. *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers., one of the typical plants in the WLFZ, was collected and inundated in the laboratory under different conditions under temperatures of 15℃ and 25℃, a pH 5.0 to 9.0, and under light and dark conditions, respectively, to measure the decomposition rate and nitrogen and phosphorus release mechanisms. The dry weight lost with the contents of nitrogen and phosphorus was found to decrease after *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. was soaked for decomposition. The amount released of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) at 25℃ for 200-days inundation was $(2.66 \pm 0.29) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ or $(3.76 \pm 0.04) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively and at 15℃ was $(0.79 \pm 0.03) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ or $(1.40 \pm 0.02) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. When the pH of the water submerging the grass was 5.0, 7.0 and 9.0, the amount of TN released was $(3.76 \pm 0.08) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $(2.66 \pm 0.29) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $(2.55 \pm 0.12) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively while the amount of TP released was $(1.53 \pm 0.04) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $(0.79 \pm 0.03) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $(1.70 \pm 0.07) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The TN and TP released was $(3.87 \pm 0.14) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(1.78 \pm 0.08) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ under dark condition. The lower the temperature, the higher the amount of TN and TP will be released for inundation from *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. When the overlying water is acidic or alkaline, more TN and TP is released. Dark conditions are beneficial to nitrogen and phosphorus release into the overlying water. Thus, the water environment changes in each flooding season in winter. Sewage discharge will also accelerate the nutrients released from soaked plants through their decomposition in the WLFZ, and then will aggravate the deterioration of water quality in TGR.

收稿日期: 2017-03-22; 修订日期: 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430750)

作者简介: 肖丽微(1988~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水体非点源污染控制与治理, E-mail: xiaoliwei@imde.ac.cn

* 通信作者, E-mail: bzhu@imde.ac.cn

Key words: Three Gorges Reservoir; water-level fluctuation zone; plant inundation; nitrogen and phosphorus release; water quality deterioration

三峡水库采用“蓄清排浊”的水库运行调度机制,水库从9月底开始蓄水至次年1月(水位高程175 m)逐渐下降,6月水位高程回落至最低145 m。从而在库区两岸形成了垂直落差30 m,面积为349 km²的消落带^[1]。消落带平均淹水期大于6个月,最长约240 d(145 m)^[1]。消落带夏季出露,植物生长旺盛,9月植物生物量最大时蓄水淹没,导致植物腐解的同时释放出大量养分,可能影响库区水环境^[2-4]。三峡库区消落带在经历数次淹水和落干后,植物群落多样性发生变化,物种的结构和组成趋于简单化^[5,6]。狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]不仅在库区消落带分布范围广,且耐淹性强,是自然和人工恢复的主要多年生草本植物^[6,7]。但笔者前期的研究发现,狗牙根随消落带蓄水淹没后,仍然有矿化分解,并且养分释放亦较为可观^[2,4]。

目前已有研究主要是针对植物本身初始基质含量(如C、N、P、木质素、纤维素含量等)对植物的分解速率和养分释放的影响^[3,4,8],对消落带植物在淹水分解中受环境因素影响的研究较少。植物在浸泡腐烂过程的物理、化学以及微生物过程可能会受到温度、pH、光照等因素的影响^[8-12]。温度是控制水生植物腐解的重要环境因子,有研究指出夏季水温升高,使植物的分解速率要明显大于冬季^[8]。三峡库区水温年变化范围为11~28℃^[13],温度可能通过改变微生物的活性等来影响植物的淹水腐解过程^[8]。同时,水体的pH值也会对植物的分解速率产生影响^[9,10],三峡库区水体的来源范围广泛,有工业废水、城镇污水、农业排污等,导致库区水体pH值的时空分布差异性大,江水pH范围为6~9,主要偏碱性^[14]。此外,最底层消落带淹水时垂直深度最高可达30m,此时的植物和土壤几乎处于避光状态^[15]。

综上所述,消落带植物在淹水时上覆水体的环境条件(水温、pH、光照条件)差异较大,但水环境条件的变化会对消落带植物淹水分解时养分的释放产生怎样的影响目前还未见报道。因此,本文针对三峡水库水环境变化的实际情况,模拟狗牙根浸泡时上覆水温度、pH和光照等条件变化,探讨三峡水环境变化对消落带优势草本植物——狗牙根氮磷养分释放的影响,以期为三峡库区植被对于干湿交替的生态响应、环境影响和消落带植被恢复重建提供科

学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区主要涉及湖北省宜昌、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20个县(市、区)。库区范围为东经105°44′~111°39′,北纬28°32′~31°44′,总面积5.67万km²^[1]。本研究所采用的狗牙根均采集自重庆市忠县石宝镇共和村消落带160 m高程处(30°24′~30°52′N,107°23′~108°09′E),属于亚热带季风气候,年降雨量1000~1800 mm,日照充足,年平均气温18.2℃,相对湿度80%。

1.2 实验设计

多年生草本禾本科植物狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]为消落带人工恢复植被的重要物种,已在三峡库区消落带广泛分布^[4,6]。选取狗牙根进行淹水浸泡模拟实验。根据三峡库区的水位调节规律,在9月水库开始准备蓄水前的160~170 m水位高程处采集本实验所用的狗牙根样品。将采集的狗牙根鲜样(地上部分)混合均匀后取50 g入尼龙网袋内(20 cm×20 cm,网孔大小为1.0 mm×1.0 mm),放入盛有2 L去离子水(水温已在培养箱中培养至25℃恒温)的玻璃烧杯中,尼龙网袋完全淹没在水中,透光浸泡、水体pH为7.0,系统为敞口开放环境,以模拟三峡水库的实际。每隔1 d,用pH计测定浸泡上覆水酸碱度,并用0.1 mol·L⁻¹的氢氧化钠和0.05 mol·L⁻¹的硫酸将上覆水的pH维持为7.0。

设置25℃和15℃两种不同的水温环境,先将水温在培养箱中调整至目标值并保持恒定后加入狗牙根样品进行浸泡。在pH为7.0的透光开放系统中进行不同水温条件下狗牙根浸泡的模拟。

在25℃透光条件下,另设置3组不同水体pH环境下狗牙根的模拟浸泡。在去离子水基础上,使用0.1 mol·L⁻¹的氢氧化钠和0.05 mol·L⁻¹的硫酸将上覆水调节至pH值为5.0、7.0、9.0,每隔1 d,用pH计测定浸泡上覆水酸碱度,并用0.1 mol·L⁻¹的氢氧化钠和0.05 mol·L⁻¹的硫酸维持上覆水的pH至目标值。

为了了解光照与否对狗牙根浸泡的影响,在上覆水水温为 25℃、pH 为 7.0 的基础上,分别设置透光和避光两种光照条件. 每组实验设置 3 个平行和一个空白对照.

在实验进行的第 1、2、3、5、7、10、15、20、30、45、60、90、120、150、200 d(以消落带 160 m 高程处最长淹水时间为例^[4]),取不同淹水条件下的上覆水 10 mL,经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后用 AA3 流动注射分析仪(AA3, SEAL Analytical GmbH, 德国)测定养分形态及含量[总氮(TN)、可溶性总氮(DN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、可溶性总磷(DP)及正磷酸盐磷(PO₄³⁻-P)],颗粒态氮(PN)含量为总氮减去可溶态氮,颗粒态磷(PP)含量为总磷减去可溶态磷. 取样后补充相应水分,以保证实验过程中浸泡水体体积的一致. 同时每 30 d 全面换水一次以模拟水库换水周期且避免上覆水养分饱和.

在浸泡前后分别测定狗牙根的干重. 植物的全氮、全磷含量是在植物体烘干磨碎后进行测定,方法如下^[16]:用浓硫酸消煮后,凯氏定氮仪蒸馏法(加氢氧化钠碱化)测定植物全氮;用硝酸-高氯酸混合液消煮后用钼锑抗比色法测定植物全磷.

1.3 数据计算及处理

狗牙根植物体在浸泡后总的氮(磷)损失量为浸泡分解前后氮磷元素的含量和干重乘积的差值,植物残体养分损失量的计算公式如下:

$$R = (w_0 \times X_0 - w_t \times X_t) / w_0 \quad (1)$$

式中, R 为狗牙根干重氮(磷)的损失量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); w_t 为浸泡 200 d 后狗牙根的干重(g), X_t 为 200 d 后狗牙根中氮(磷)元素的含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), w_0 为浸泡前狗牙根的初始干重(g), X_0 为浸泡前狗牙根中氮(磷)元素的初始含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

狗牙根在浸泡过程中氮(磷)的累积释放量则为上覆水中累积养分浓度与上覆水体积的乘积再比上植物浸泡的初始干重值,计算如下:

$$T_i = (c_i \times V_i + \sum_j^n c_j \times V_j) / w_0 \quad (2)$$

式中, T_i 为养分的累积释放量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); c_i 、 V_i 分别为第 i 次取样时溶液的养分浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和体积(mL); n 为换水次数; c_j 、 V_j 分别为第 j 次换水时溶液的养分浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和换水体积(mL).

实验数据使用 Excel 2007 进行处理后,采用 One way-ANOVA 方法对数据进行显著性分析. 养分释放量与残体性质的相关性使用 Pearson 相关分

析进行. 数据的统计分析使用 SPSS 16.0 软件,图形的处理使用 Origin 8.1 软件.

2 结果与分析

2.1 狗牙根浸泡前后的干重与养分变化

测定狗牙根在浸泡前后的干重、全氮和全磷含量,结果见表 1. 狗牙根初始基质全氮含量为(6.92 ± 0.10) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量为(1.16 ± 0.03) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 经过 200 d 的模拟浸泡狗牙根干重减少至(15.01 ± 0.91) g,干重损失率为 64%. 狗牙根残体的全氮、全磷含量分别为(6.91 ± 0.19) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(0.30 ± 0.02) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

表 1 狗牙根在淹水浸泡前后的残体干重和氮磷养分含量

Table 1 Dry weight of plant detritus and the nitrogen and phosphorus content of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. before and after inundation

性质	干重/g	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
初始	35.76 ± 2.57	6.92 ± 0.10	1.16 ± 0.03
200 d 浸泡后	15.01 ± 0.91	6.91 ± 0.19	0.30 ± 0.02

2.2 水温对狗牙根养分浸泡释放的影响

狗牙根在 25℃ 和 15℃ 水温下浸泡时上覆水 TN、NO₃⁻-N、PN、TP、PO₄³⁻-P 和 PP 的浓度变化如图 1 所示. 可以看出,不同温度浸泡下的上覆水各养分浓度在 30 d 内没有明显的差异,30 d 后温度的变化开始影响养分的浓度. 浸泡 30 d 后,25℃ 时上覆水 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 浓度均大于 15℃,而 TP 和 PP 浓度一直小于 15℃ 时. 上覆水中 TN 和 PN 浓度在浸泡 30~60 d 内,25℃ 时大于 15℃,60 d 后 15℃ 大于 25℃. 整个浸泡过程中,上覆水 PN 的浓度变化与 TN 变化一致,至上覆水各养分浓度稳定后(120 d),25℃ 浸泡时 PN 浓度占 TN 浓度的 80% (质量分数)以上,15℃ 时 PN 占 TN 的 90% 以上. 120 d 后,25℃ 和 15℃ 时 PP 占 TP 分别为 26.5% 和 57.2%.

狗牙根浸泡 200 d 后,25℃ 和 15℃ 水温条件下狗牙根 TN 和 TP 的释放量对比见图 2. 25℃ 和 15℃ 条件下上覆水中 TN 的释放量分别为(2.66 ± 0.29) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 (3.76 ± 0.04) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 上覆水中 TP 的释放量分别为(0.79 ± 0.03) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 (1.40 ± 0.02) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.3 水体 pH 对狗牙根养分浸泡释放的影响

图 3 显示了不同上覆水 pH 条件下狗牙根浸泡时上覆水的 TN、NO₃⁻-N、PN、TP、PO₄³⁻-P 和 PP 浓度变化. 上覆水 TN 和 PN 浓度变化一致,且在 30 d 后 pH 5.0 浸泡条件下浓度明显高于 pH 7.0 和 pH 9.0 时,碱性和中性条件差异不大. 至 PN 浓度稳定

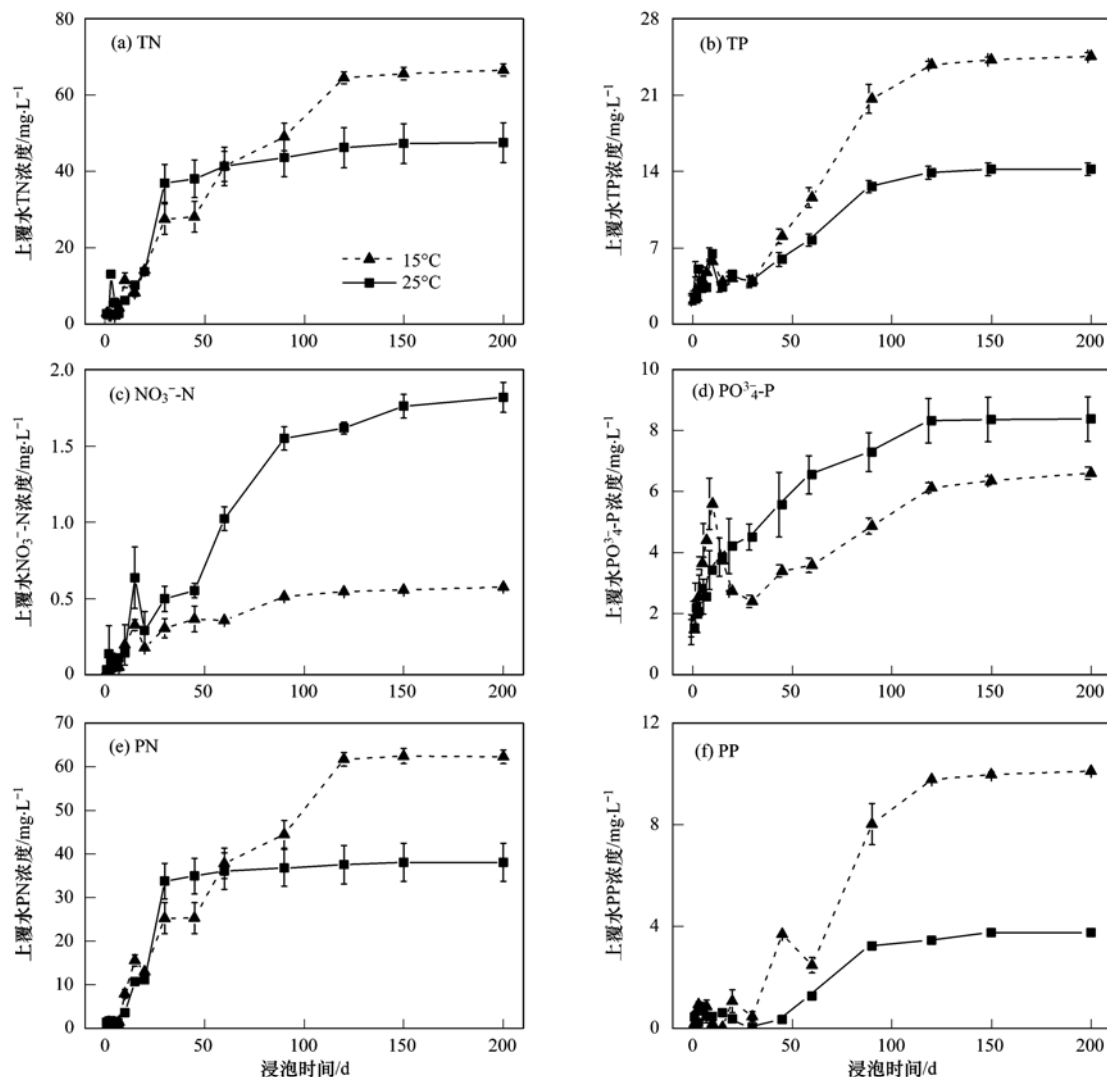


图1 狗牙根在不同水温浸泡下的上覆水 TN、 NO_3^- -N、PN、TP、 PO_4^{3-} -P和PP变化

Fig. 1 Variations of TN, NO_3^- -N, PN, TP, PO_4^{3-} -P and PP concentrations in the overlying water when *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. inundated at different temperatures

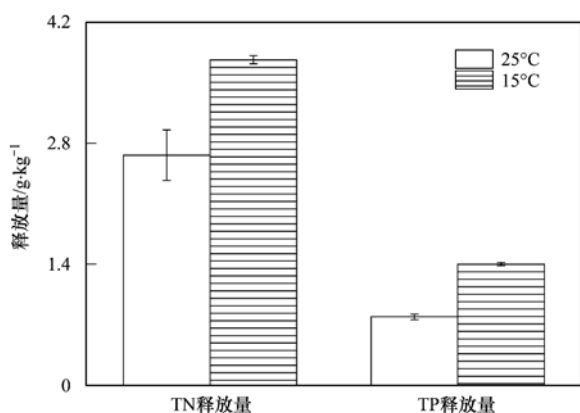


图2 狗牙根在不同温度浸泡200 d后的氮、磷释放量

Fig. 2 Amounts of nitrogen and phosphorus released into overlying water from *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. after 200 d of inundation at different temperatures

后,不同 pH 条件下 PN 占 TN 的 85% 以上. 浸泡 60 d 后上覆水 TP 和 PP 浓度快速上升,浓度随上覆水 pH 值变化顺序为 $\text{pH } 9.0 > \text{pH } 5.0 > \text{pH } 7.0$. 在碱性条件下上覆水中磷以 PP 为主,浓度稳定后 PP 占比达 75.5%; 酸性和中性条件下,PP 占比在 40% 以下. 上覆水 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 浓度变化一致,均在上覆水中性时浓度最大,碱性条件时最小.

不同 pH 浸泡 200 d 后 TN 和 TP 的释放量如图 4 所示. pH 5.0、pH 7.0 和 pH 9.0 溶液下浸泡,狗牙根向上覆水中释放的 TN 分别为 (3.76 ± 0.08) 、 (2.66 ± 0.29) 和 $(2.55 \pm 0.12) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TN 释放量具有显著差异 ($P < 0.05$); TP 的释放量分别为 (1.53 ± 0.04) 、 (0.79 ± 0.03) 和 $(1.70 \pm 0.07) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,具有显著差异 ($P < 0.05$).

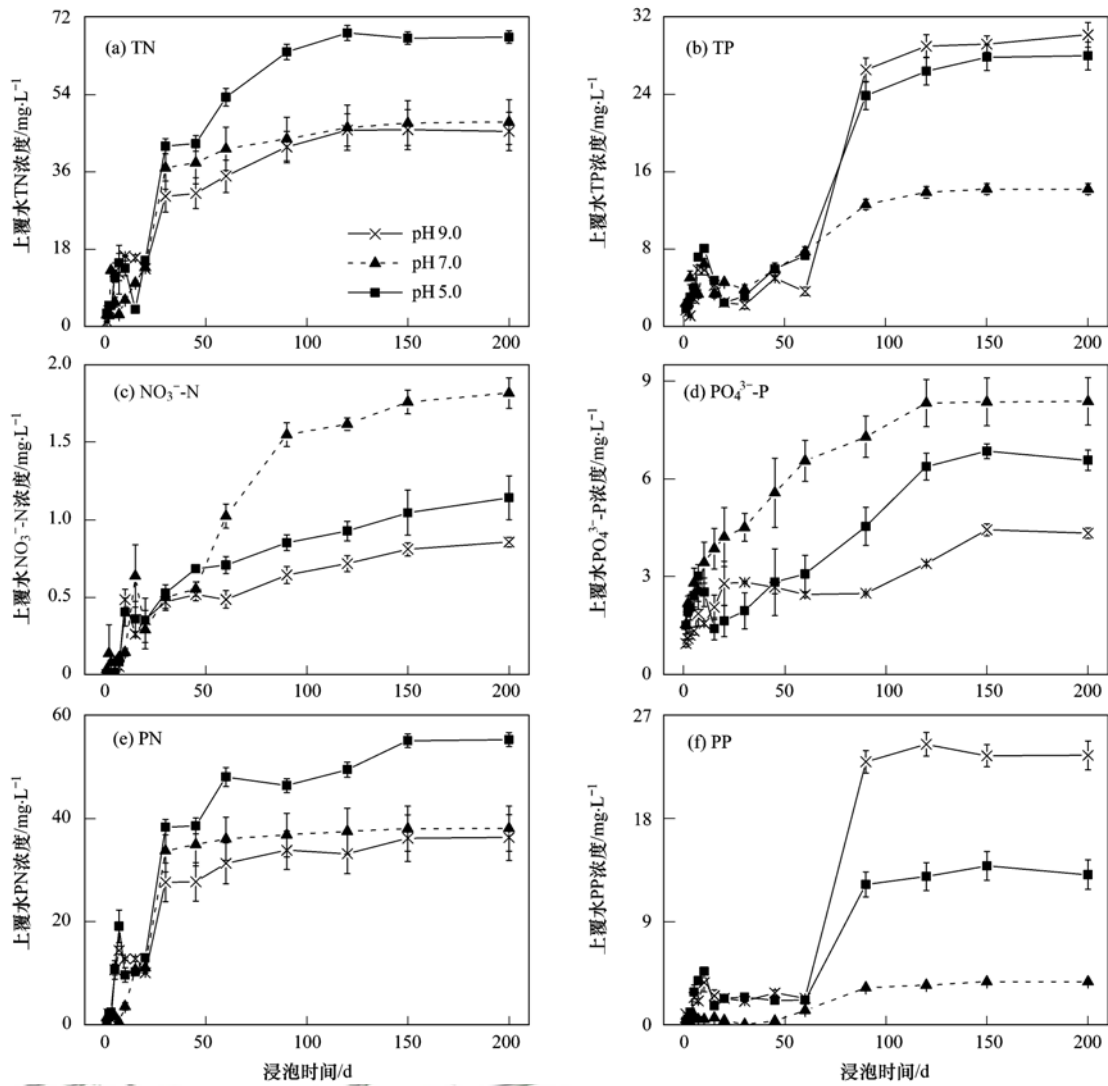


图3 狗牙根在不同 pH 水体浸泡时上覆水的 TN、NO₃⁻-N、PN、TP、PO₄³⁻-P和 PP 变化

Fig. 3 Variations of TN, NO₃⁻-N,PN, TP, PO₄³⁻-P and PP concentrations in overlying water when *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. inundated at different pH levels

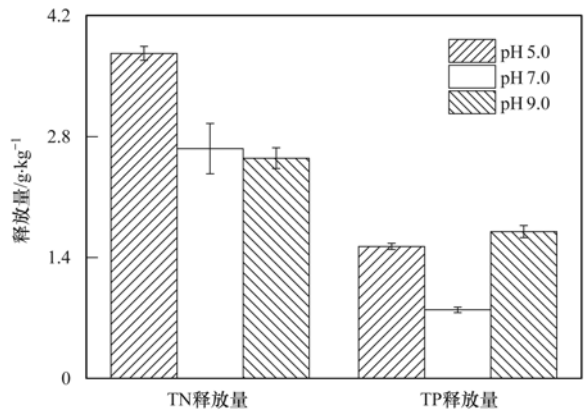


图4 狗牙根在不同 pH 水体浸泡 200 d 后的氮、磷释放量

Fig. 4 Amounts of nitrogen and phosphorus released into overlying water from *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. after 200 d of inundation at different pH levels

2.4 光照对狗牙根养分浸泡释放的影响

狗牙根在透光和避光条件下浸泡时上覆水 TN、NO₃⁻-N、PN、TP、PO₄³⁻-P和 PP 的浓度变化过程见图 5。当上覆水各养分浓度达到平衡后(120 d),避光条件下上覆水 TN、TP、PO₄³⁻-P和 PP 的浓度均大于透光浸泡时,上覆水NO₃⁻-N浓度小于透光时。上覆水 PN 浓度变化不受光照的影响。避光浸泡过程中,氮、磷的释放均以颗粒态为主,PN 占 81.8%,PP 占 42.8%。

狗牙根避光浸泡 200 d 后 TN 和 TP 的释放量明显大于透光时(图 6),避光时上覆水 TN 和 TP 的释放量为 (3.87 ± 0.14) g·kg⁻¹ 和 (1.78 ± 0.08) g·kg⁻¹。

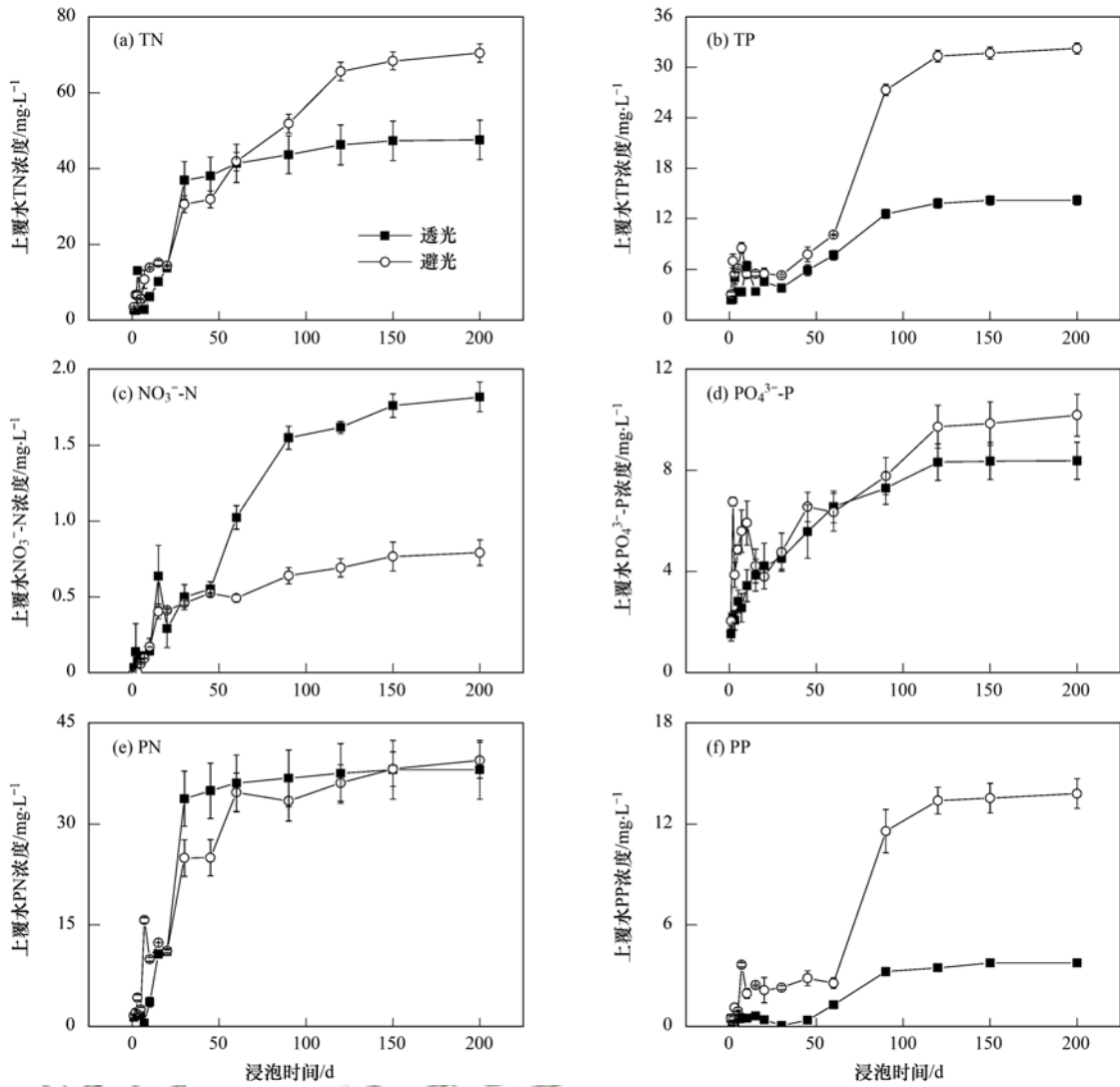


图5 狗牙根在不同光照水体浸泡下上覆水的 TN、NO₃⁻-N、PN、TP、PO₄³⁻-P和 PP 变化

Fig. 5 Variations of TN, NO₃⁻-N, PN, TP, PO₄³⁻-P and PP concentrations in the overlying water when *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. inundated under light or dark conditions

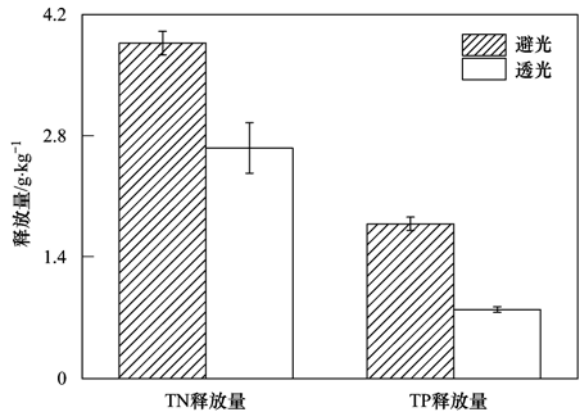


图6 狗牙根在光照与否条件浸泡 200 d 后氮、磷的释放量

Fig. 6 Amounts of nitrogen and phosphorus released into overlying water from *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. after 200 d inundation under light or dark conditions

3 讨论

3.1 狗牙根的淹水分解特征

Xiao 等^[4]研究已经表明了三峡消落带典型植物的浸泡分解具有明显的阶段性,前期主要是受到初始基质控制下的易溶物质快速溶解过程,而后则受控于环境条件控制的微生物分解作用^[11,17],且在 120 d 内浸泡分解基本完成.植物的分解速率主要受到植物初始基质性质控制,氮、C/N、木质素等都被认为是主要的影响因素^[17].在本研究中,浸泡时间的推移使得环境因素开始逐步对狗牙根的分解产生影响.浸泡分解结束后,狗牙根残体中全氮含量的减少幅度明显小于全磷含量的减少,说明狗牙根在淹水分解时氮磷组分损失的受控过程不同^[4].植物分解时,氮的损失不仅增加了水体的氮负荷,更会

受到微生物作用变为含氮气体进入大气^[11]. 磷主要以磷酸根的形式在植物体内存在, 容易通过淋溶作用流失^[17].

3.2 上覆水环境条件改变对狗牙根氮、磷释放的影响

在各水环境条件下狗牙根浸泡 200 d 后, 残体氮、磷的损失量(表 2)与上覆水中 TN、TP 的释放量存在差异且没有明显的相关性($P > 0.05$). 这说明了植物浸泡时对水体的营养元素贡献值不能通过植物氮磷的损失来进行估算, 因为在分解过程中, 植物体内的氮、磷不仅能释放到水中, 也可能被微生物吸收或者以气态形式挥发, 而水中的颗粒态氮、磷则可能会重新沉淀后附着在植物体上^[17].

表 2 不同条件浸泡 200 d 后狗牙根残体的氮、磷损失量¹⁾

Table 2 Amount of nitrogen and phosphorus lost from the residual in *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.

浸泡条件		氮损失量 /g·kg ⁻¹	磷损失量 /g·kg ⁻¹
不同温度	25℃	4.03 ± 0.09b	1.33 ± 0.02b
	15℃	3.79 ± 0.05b	1.39 ± 0.02a
不同 pH	pH 5.0	4.06 ± 0.24b	1.33 ± 0.04b
	pH 7.0	4.03 ± 0.09b	1.33 ± 0.02b
	pH 9.0	4.42 ± 0.18a	1.34 ± 0.01a
不同光照	透光	4.03 ± 0.09b	1.33 ± 0.02b
	避光	4.30 ± 0.22ab	1.40 ± 0.01a

1) 同一列相同字母表示差异不显著, 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

植物分解时向水中释放养分是复杂的物理、化学、生物过程的集合, 受环境因素、植物形态与性质等的制约^[12]. 本实验选用的浸泡植物为狗牙根, 植物内在机制的影响大致相似, 使得植物养分的浸泡释放主要由外界环境所控制.

水温被认为对湿地水生植物分解的影响要大于植物本身的性质, 温度越高, 植物的物理溶解加速和微生物活性增强^[8]. 温度可以通过调节系统微生物的活性来影响植物溶解态养分的释放^[18]. 一般认为, 25℃时微生物活性最强, 氨化、硝化和反硝化作用增强, 利于大分子化合物的溶解及水中的氮转化为 N_2O 进入大气, 这导致了上覆水中 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 的浓度升高^[19]. 然而, 本研究中溶液温度越低, 狗牙根上覆水中 TN、TP 释放量越大. 主要是因为水中植物的分解由微生物和腐生生物共同作用, 而 Martínez 等^[20]研究发现, 微生物分解速率不会随水温发生变化. 而植物腐烂过程中产生的腐生生物使植物分解为大量的小分子颗粒物, 而这些腐生

物更利于在温度较低的环境中生存^[21]. 这就导致了低温浸泡时, 狗牙根上覆水中 PN、PP 的释放量增大, 而由于氮、磷的释放主要以 PN、PP 为主, 使 TN、TP 的释放量较大. 在三峡水库运行时冬季高水位期平均水温为 $(14.92 \pm 4.67)^\circ C$, 夏季低水位期时水温为 $(21.37 \pm 4.70)^\circ C$ ^[14]. 同时, 刘流等^[22]的研究表明三峡库区冬季蓄水时水温无分层现象, 而在 3~5 月蓄水时水温会出现明显的分层, 表层水温在 14~22℃, 30 m 水深处水温仅 10~15℃. 因此, 库区冬季高水位蓄水时, 大面积植物淹水且水温较低, 可能在其腐烂分解的过程中对水体氮、磷的产生较大影响.

水体 pH 值不仅能改变某些物质的溶解状态, 也会影响微生物的分解作用, 这两者都关系到植物浸泡时对养分的释放. 狗牙根在中性条件淹水分解初期会消耗水体中的 O_2 产生 CO_2 导致 pH 值有一个快速的降低, 但长期浸泡后对上覆水体 pH 的影响不大^[2]. 酸性或碱性浸泡条件下, 植物中的木质素、纤维素等结构发生改变, 加速植物组织中养分的溶解, 增加了狗牙根向水体中释放养分的量, 导致酸碱条件下狗牙根养分浸泡释放量大^[9]. 而碱性条件下, 不利于溶液中铝浓度的增加, 从而使磷不易结合成稳定的化合物, 更利于磷的释放^[10]. 三峡库区水体以弱碱性为主^[14], 当存在排污口时, 会使水体酸性或碱性增大, 均能加速消落带植物淹水后对氮、磷的释放, 可能会使得三峡库区水体富营养水平加剧.

光照与否主要通过影响系统中微生物的活性及光催化降解过程而改变植物分解和养分释放^[23]. 本研究中狗牙根在避光条件下更易于向上覆水中释放氮磷, 特别是对 TP 和 PP 释放的促进作用明显. 一般而言, 光照能够为微生物分解者提供充足的能量及营养物质^[24], 从而加速微生物对植物的分解和木质素、纤维素的降解^[23]. 本研究的结果与此相反, 因为避光条件下微生物裂解酶的增加会导致植物体中有机物质的光化学聚合作用减弱而催化降解作用增强^[25], 从而更利于狗牙根浸泡向水体中释放养分. 同时, Bosco 等^[12]认为光照虽然能促进植物分解时干重的下降, 但不能直接影响到植物体内木质素等物质的化学分解. 在浸泡初始时狗牙根中大量的有机物质会通过物理作用洗脱至上覆水中, 光照条件下这些可溶性有机物更易于被光催化降解而不是被微生物所利用, 使水中可以提供给微生物生长的营养元素减少^[26], 从而抑制了养分的释放. 由

于三峡库区水位高程较低处的植物受水淹胁迫,淹水时间长且水深高水压大,库区水位到达最高 175 m 时,最底层的植物和土壤光照弱几乎处于避光状态^[15]。因此,综合消落带最底层植物淹水时的水温和光照等多方面条件,认为底层植物的淹水浸泡对库区水体的影响更大。

4 结论

(1)不同淹水条件浸泡时,消落带优势植物种狗牙根的干重下降,植物体内氮、磷养分释放。浸泡结束后植物残体的氮、磷损失量与上覆水 TN、TP 释放量存在差异。

(2)狗牙根浸泡上覆水氮磷养分的浓度在前 30 d 几乎不受环境条件的影响。120 d 后植物分解完全,上覆水中氮磷养分浓度保持稳定,且颗粒态氮和颗粒态磷在释放过程中占主要地位。不同温度、pH 和光照条件下,狗牙根淹水浸泡 200 d 后上覆水 TN 释放量为 $(2.55 \pm 0.12) \sim (3.87 \pm 0.14) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP 释放量为 $(0.79 \pm 0.03) \sim (1.78 \pm 0.08) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3)随三峡水环境的变化,消落带狗牙根浸泡时养分的释放也有所不同。如库区冬季蓄水水温较低时,植物浸泡上覆水氮磷的释放量增大;当存在酸性或碱性污水排放时,有利于植物的腐解,会促进养分的释放;当水位较高时底层植物处于避光条件下,更有利于植物浸泡向水体中释放养分。因此,对三峡水环境条件的确定有助于估算消落带植物浸泡过程对库区水体水质的影响。

参考文献:

- [1] Yuan X Z, Zhang Y W, Liu H, *et al.* The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: challenges and opportunities [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20** (10): 7092-7102.
- [2] 王建超, 朱波, 汪涛, 等. 三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1144-1151.
Wang J C, Zhu B, Wang T, *et al.* Nitrogen and phosphorus release from herbaceous vegetation under simulated inundation experiment of water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1144-1151.
- [3] 袁庆叶, 谢宗强, 杨林森, 等. 水淹条件下三峡水库消落带常见草本植物的分解[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(8): 2229-2237.
Yuan Q Y, Xie Z Q, Yang L S, *et al.* Decomposition of herbaceous species in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir under flooding condition [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(8): 2229-2237.
- [4] Xiao L W, Zhu B, Kunwimba M N, *et al.* Plant soaking decomposition as well as nitrogen and phosphorous release in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **592**: 527-534.
- [5] 雷波, 王业春, 由永飞, 等. 三峡水库不同间距高程消落带草本植物群落物种多样性与结构特征[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(4): 600-606.
Lei B, Wang Y C, You Y F, *et al.* Diversity and structure of herbaceous plant community in typical water-level-fluctuation zone with different spacing elevations in Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(4): 600-606.
- [6] 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.
Wang J C, Zhu B, Wang T. Characteristics of restoration of natural herbaceous vegetation of typical water-level fluctuation zone after flooding in the Three gorges Reservoir area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(5): 603-610.
- [7] 谭淑端, 张守君, 张克荣, 等. 长期深淹对三峡库区三种草本植物的恢复生长及光合特性的影响[J]. *植物科学学报*, 2009, **27**(4): 391-396.
Tan S D, Zhang S J, Zhang K R, *et al.* Effect of long-time and deep submergence on recovery growth and photosynthesis of three grass species in Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2009, **27**(4): 391-396.
- [8] Liu G D, Sun J F, Tian K, *et al.* Long-term responses of leaf litter decomposition to temperature, litter quality and litter mixing in plateau wetlands [J]. *Freshwater Biology*, 2016, **62**(1): 178-190.
- [9] 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.
- [10] Clivot H, Charmasson F, Felten V, *et al.* Danger, Interactive effects of aluminium and phosphorus on microbial leaf litter processing in acidified streams: a microcosm approach [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **186**: 67-74.
- [11] Raposeiro P M, Ferreira V, Guri R, *et al.* Leaf litter decomposition on insular lentic systems: effects of macroinvertebrate presence, leaf species, and environmental conditions [J]. *Hydrobiologia*, 2017, **784**(1): 65-79.
- [12] Bosco T, Bertiller M B, Carrera A L. Combined effects of litter features, UV radiation, and soil water on litter decomposition in denuded areas of the arid Patagonian Monte [J]. *Plant and Soil*, 2016, **406**(1-2): 71-82.
- [13] 任华堂, 陈永灿, 刘昭伟. 三峡水库水温预测研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2008, **23A**(2): 141-148.
Ren H T, Chen Y C, Liu Z W. Study on water temperature prediction in Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2008, **23A**(2): 141-148.
- [14] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1266-1272.
Guo S, Li C M, Guo J S, *et al.* Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1266-1272.
- [15] 施美芬, 曾波, 申建红, 等. 植物水淹适应与碳水化合物的相关性[J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(7): 855-866.

- Shi M F, Zeng B, Shen J H, *et al.* A review of the correlation of flooding adaptability and carbohydrates in plants [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(7): 855-866.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Analytical methods of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] Moore R T, Trofymow A J, Prescott E C, *et al.* Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests[J]. Ecosystems, 2006, **9**(1): 46-62.
- [18] Schaller J, Hines J, Brackhage C, *et al.* Silica decouples fungal growth and litter decomposition without changing responses to climate warming and N enrichment [J]. Ecology, 2014, **95**(11): 3181-3189.
- [19] Prado R, Erdocia X, Labidi J. Effect of the photocatalytic activity of TiO₂ on lignin depolymerization [J]. Chemosphere, 2013, **91**(9): 1355-1361.
- [20] Martínez A, Monroy S, Pérez J, *et al.* In-stream litter decomposition along an altitudinal gradient: does substrate quality matter? [J]. Hydrobiologia, 2016, **766**(1): 17-28.
- [21] Boyero L, Pearson R G, Gessner M O, *et al.* A global experiment suggests climate warming will not accelerate litter decomposition in streams but might reduce carbon sequestration [J]. Ecology Letters, 2011, **14**(3): 289-294.
- [22] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 [J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [23] Foereid B, Bellarby J, Meier-Augenstein W, *et al.* Does light exposure make plant litter more degradable? [J]. Plant and Soil, 2010, **333**(1): 275-285.
- [24] Day T A, Zhang E T, Ruhland C T. Exposure to solar UV-B radiation accelerates mass and lignin loss of *Larrea tridentata* litter in the Sonoran Desert [J]. Plant Ecology, 2007, **193**(2): 185-194.
- [25] Harvey G R, Boran D A, Chesal L A, *et al.* The structure of marine fulvic and humic acids [J]. Marine Chemistry, 1983, **12**(2-3): 119-132.
- [26] Tranvik L J, Bertilsson S. Contrasting effects of solar UV radiation on dissolved organic sources for bacterial growth [J]. Ecology Letters, 2001, **4**(5): 458-463.



CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)