

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按 (403)

我国化学品的风险评价及风险管理 王铁宇,周云桥,李奇锋,吕永龙 (404)

土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)

中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素 黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)

关中地区冬季PM_{2.5}中碳气溶胶的污染特征及来源解析 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)

利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)

南京夏季市区VOCs特征及O₃生成潜势的相关性分析 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)

北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)

重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)

青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 余成,陈爽,张路 (499)

近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)

舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)

模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)

中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)

江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)

巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)

合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)

三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)

pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 王辉,孙波,关小红 (588)

EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)

镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 王婷,朱春山,胡承志 (602)

微生物对砷的氧化还原竞争 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)

污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 景明,王磊 (622)

异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫渊辉 (630)

基于新一代测序技术的A²O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析 田美,刘汉湖,申欣 (638)

1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)

纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)

3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)

合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)

芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)

芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)

增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)

基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 王幼奇,白一茹,王建宇 (710)

不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸附特征及影响因素 王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)

几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)

河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶澍,刘文新 (740)

湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响 罗鹏程,李航,王曙光 (750)

溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)

自组装哑铃状Fe₃O₄微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 黄鑫辰,宗刚,刘焯焯,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)

盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N₂O产生的影响 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)

污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)

《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响

林俊杰^{1,5}, 张帅¹, 刘丹², 周斌³, 肖晓君¹, 马慧燕¹, 于志国⁴

(1. 重庆三峡学院三峡库区水环境演变与污染防治重庆高校市级重点实验室, 重庆 404100; 2. 重庆三峡职业学院农林科技学院, 重庆 404100; 3. 辽宁省气象科学研究所, 沈阳 110166; 4. 南京信息工程大学水文气象学院, 南京 210044; 5. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院中国科学院水库水环境重点实验室, 重庆 400714)

摘要: 为揭示季节性温度升高对消落带落干期土壤氮矿化的影响, 分别采集三峡支流澎溪河消落带上游和下游两个水文断面, 155 m (低)、165 m (中) 和 175 m (高) 这 3 个水位高程表层土壤, 结合落干期气温变化特点, 在 25℃ 和 35℃ 两个温度下进行恒温培养. 结果表明, 消落带土壤总氮和硝态氮在上游断面和高水位高程含量更高, 而下游和低水位高程含量更低, 铵态氮分布与其相反. 硝态氮是无机氮的主要存在形式, 占无机氮的 57.4% ~ 84.7%. 相同培养温度下, 氨化、硝化、净氮矿化速率均表现为随水位高程增加, 随流域断面由下至上而显著增加 ($P < 0.05$); 总体上, 在水位高程和流域断面上均表现为: 温度升高使硝化速率和净氮矿化速率显著增加 ($P < 0.05$), 而对土壤氨化速率无显著影响 ($P > 0.05$).

关键词: 三峡支流; 氮矿化; 温度升高; 落干期; 消落带

中图分类号: X144; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0697-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.039

Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period

LIN Jun-jie^{1,5}, ZHANG Shuai¹, LIU Dan², ZHOU Bin³, XIAO Xiao-jun¹, MA Hui-yan¹, YU Zhi-guo⁴

(1. Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Control in Three Gorges Reservoir, Chongqing Three Georges University, Chongqing 404100, China; 2. Department of Agricultural and Forestry Science and Technology, Chongqing Three Gorges Vocation College, Chongqing 404100, China; 3. Liaoning Institute of Meteorological Science, Shenyang 110166, China; 4. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 5. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: To reveal the effect of seasonal temperature increasing on nitrogen mineralization in soil of the water level fluctuating soil zone of three gorge reservoir areas in the Yangtze river tributary during the dry period, surface soils were collected from the water level fluctuating zone of Pengxi river crossing two hydrological sections, i. e. upstream and downstream and three water level altitudes, 155 m (low), 165 m (middle) and 175 m (high). We incubated the soil at 25℃ and 35℃ to determine the transformation rates of nitrogen in soil of Pengxi river basin during the dry period. The result showed that TN and NO_3^- -N contents in the soil of upstream section and higher (175 m) altitude of water level were higher than those in downstream and low (165 m) altitude of water level, whereas the pattern for NH_4^+ -N was different, with higher NH_4^+ -N contents in downstream and low water level. The inorganic nitrogen was dominated by NO_3^- -N, which accounted for up to 57.4%-84.7% of inorganic nitrogen. Generally, soil ammoniation, nitration and net N mineralization increased with the rising water level altitude and stream sections ($P < 0.05$). In summary, nitration and net N mineralization significantly increased with increasing temperature, ($P < 0.05$), while ammoniation showed no difference ($P > 0.05$).

Key words: Three Gorge Tributary; nitrogen mineralization; temperature increasing; dry period; water level fluctuating zone

土壤氮库绝大部分以有机态形式存在, 而大部分植物无法直接利用有机氮^[1], 必需通过土壤氮矿化过程在微生物的作用下将有机氮转化为铵态氮 (NH_4^+ -N) 和硝态氮 (NO_3^- -N) 等无机氮加以利用, 而无机氮极易通过淋溶、淹水胁迫等作用进入水体, 从而增加了水体富营养化等问题发生的潜在风险^[2]. 土壤氮矿化主要受凋落物输入^[3]、土壤微生物^[4]、土壤根际过程^[5]等生物因素的影响. 近年来, 土壤温度、湿度^[6]和 pH 值^[7]等环境因子的影

响也得到了广泛的关注. 温度是控制土壤氮矿化的重要驱动, 土壤净硝化、净氮矿化速率均表现为随温度升高而增加^[8,9]. 也有研究表明, 水分变化是影响氮素矿化的重要因素, 如前期研究证明温带草

收稿日期: 2015-06-16; 修订日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301248); 中国科学院水库水环境重点实验室开放基金项目(RAE2014BA01B); 重庆高校市级重点实验室开放基金项目(WEPK12013MS-06)

作者简介: 林俊杰(1982~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境土壤学, E-mail: ybu_lin@126.com

地土壤水分变化量与土壤净氮矿化速率呈正相关关系^[10],水分对草原土壤氮矿化起控制作用^[11].也有研究认为,氮素的矿化和硝化作用受土壤含水量和土壤温度共同影响,且土壤含水量相关性更显著^[12].葛晓敏等^[13]通过研究不同温湿条件下杨树人工林土壤氮矿化特征发现,土壤净氮矿化量与温度呈极显著正相关关系,且适宜的湿度更有利于土壤氮的长期矿化.

三峡库区水位周期性涨落,在淹水期消落带淹没于水下,气温较低,而随夏季来临消落带进入落干期,气温呈季节性升高且土壤暴露在空气中,使落干-淹水过程环境因子和生物因子差异明显^[14].三峡支流蓄水期水流缓慢,氮素进入水体不易稀释扩散,可能对水生态安全造成潜在风险,因此,在落干期温度升高条件下,探讨三峡支流消落带落干-重新加湿过程对土壤氮矿化(氨化作用和硝化作用)的影响对控制三峡支流水体富营养化问题具有重要意义.本研究通过室内温度控制实验,以三峡支流澎溪河落干期消落带土壤为对象,分析温度升高对三峡支流消落带落干期土壤净氮矿化速率的影响,以期探明季节性温度升高对三峡支流消落带土壤氮向水体输入氮通量变化以及对水体富营养化潜在风险提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

澎溪河位于长江上游、重庆东北部, N30°49'30"~31°41'30"、E107°55'48"~108°54'之间,年均温 18.5℃,年均降水 1 100 mm. 由于三峡工程特殊

的调蓄水制度,使库区水位 12 月上涨至 175 m, 6 月消落至 145 m, 年际周期性涨落. 本研究于 2014 年 6 月,库区水位最低,消落带裸露期间,采集三峡支流澎溪河消落带上游(渠口镇)和下游断面(双江镇), 155、165 和 175 m 这 3 个水位高程的表层样品(0~20 cm), 每个采样点由 3 个随机样品混合而成(图 1), 置于保温箱内,带回实验室(4℃保存).

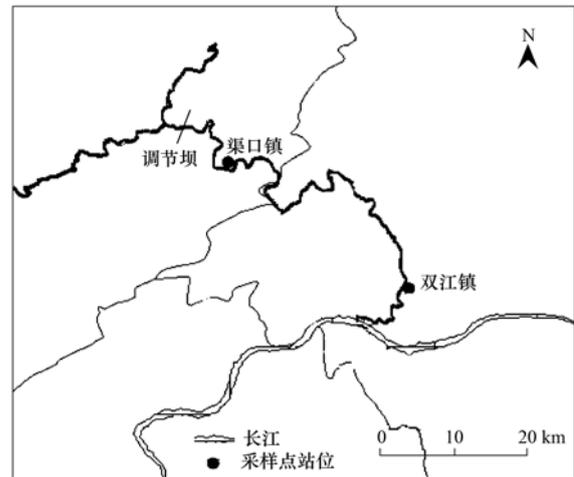


图 1 澎溪河流域采样点站位示意

Fig. 1 Sampling sites in the Pengxi River

1.2 水位涨落及落干期气温变化

2010-07~2014-07 三峡库区万州站水位波动见图 2(a), 由于三峡大坝特殊的调蓄水制度, 每年 1 月左右水位开始消落, 到 7 月左右逐渐水位下降至 145 m 完成落干过程, 之后水位逐渐上升, 到 11 月左右水位上升至 175 m 完成重新加湿过程, 并维持最高水位 2 个月左右. 不同水位高程消落带的淹水

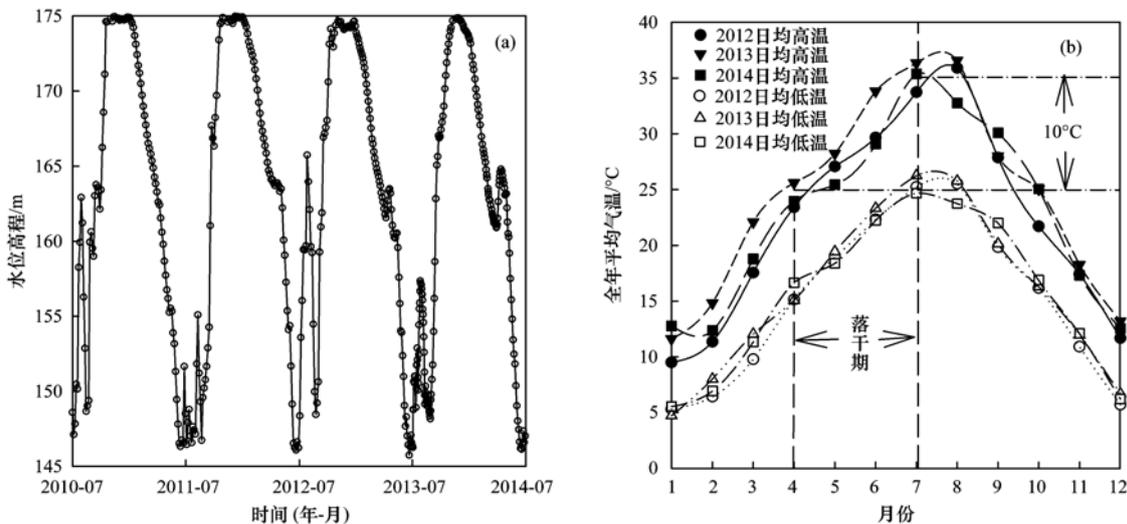


图 2 水位年际涨落及落干期温度变化

Fig. 2 Annual change of water level and temperature change during the dry period

时间相差较大,155、165 和 175 m 水位高程消落带的淹水历时平均为 282、171 和 60 d. 本研究区气温变化见图 2(b), 由 2012 ~ 2014 年全年平均气温统计数据显示,消落带落干期(4 ~ 7 月),无论日均最高温还是最低温均升高约 10℃ 左右.

1.3 土壤培养

原位新鲜土样,每个点 5 次重复,培养实验前测定土壤理化性质,分别在 25℃ 和 35℃ 自制三型聚丙烯培养器中培养,并用喷雾称重法调节土壤含水量,用穿孔封口膜保持水分恒定,培养 30 d 后的土壤用于测定铵态氮和硝态氮含量. 部分土样经风干、过筛后测定 pH、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、TC、TN. 土壤 pH 值采用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 浸提法、铵态氮采用靛酚蓝比色法、硝态氮采用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 浸提比色法、总碳、氮用元素分析仪(意大利 EA3000)以及土壤粒径组成采用比重计法测定.

1.4 计算方法

采用文献[15, 16]中氮矿化速率的方法,公式如下:

土壤净氮矿化速率 $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot 30 \text{ d})^{-1}] = (\text{土壤培养 30 d 后的 } \text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}) - (\text{土壤初始 } \text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N})$

硝化速率 $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot 30 \text{ d})^{-1}] = (\text{土壤培养 30 d 后的 } \text{NO}_3^- \text{-N}) - (\text{土壤初始 } \text{NO}_3^- \text{-N})$

氨化速率 $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot 30 \text{ d})^{-1}] = (\text{土壤培养 30 d$

后的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}) - (\text{土壤初始 } \text{NH}_4^+ \text{-N})$

1.5 统计方法

利用 SigmaPlot 12.5 图形绘制,Microsoft Excel 2010 进行数据处理,IBM SPSS Statistic 20 数据统计,在进行不同水位高程(155、165 和 175 m)相关参数比较时,数据分别为上游和下游相同高程相应参数的均值. 同样,在比较上游和下游断面相应参数差异时,数据分别为相同断面 3 个水位高程相应参数的均值.

2 结果与分析

2.1 消落带土壤基本理化性质

从表 1 可见,研究区土壤总碳含量为 $(5.88 \pm 4.33) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总氮为 $(0.53 \pm 0.19) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量为 $(6.38 \pm 3.61) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占总氮的 1.20%, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量为 $(17.35 \pm 7.37) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占总氮的 3.28%. 消落带土壤铵态氮含量分布趋势为:水位高程上,155 m > 165 m > 175 m; 流域断面上,下游 > 上游 ($P < 0.05$). 而硝态氮和总氮含量分布趋势在水位高程上均表现为 155 m < 165 m < 175 m,但 155 和 165 m 之间无显著差异 ($P > 0.05$),在流域断面上均为下游 < 上游 ($P < 0.05$). 砂砾在土壤粒径组成中占比最高 ($49.02\% \pm 14.38\%$),其次为粉粒 ($35.8\% \pm 12.08\%$)、黏粒 ($15.08\% \pm 2.70\%$).

表 1 消落带土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic physicochemical properties of the soils in the water level fluctuating zone

项目	总碳 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	C/N	pH 值	铵态氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	硝态氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	黏粒/%	粉粒/%	砂砾/%	
水位高程/m	155	$14.18 \pm 3.45\text{a}$	$0.42 \pm 0.03 \text{ a}$	34:1	7.18 ± 0.02	$9.27 \pm 0.96 \text{ a}$	$12.49 \pm 2.97 \text{ a}$	$13.62 \pm 2.24\text{a}$	$30.21 \pm 10.71\text{a}$	$54.22 \pm 16.27\text{a}$
	165	$4.75 \pm 1.01\text{b}$	$0.46 \pm 0.09 \text{ a}$	10:1	7.54 ± 0.03	$5.85 \pm 1.76 \text{ ab}$	$15.30 \pm 0.55 \text{ a}$	$15.27 \pm 1.29\text{a}$	$32.20 \pm 9.51\text{a}$	$52.52 \pm 10.23\text{a}$
	175	$5.08 \pm 1.28\text{b}$	$0.69 \pm 0.05 \text{ b}$	7:1	7.89 ± 0.11	$4.51 \pm 1.03 \text{ b}$	$24.97 \pm 0.50 \text{ b}$	$17.81 \pm 2.14\text{b}$	$46.71 \pm 1.41\text{b}$	$35.47 \pm 0.73\text{b}$
河流断面	下游	$8.03 \pm 3.15\text{a}$	$0.46 \pm 0.03 \text{ a}$	17:1	7.71 ± 0.01	$9.27 \pm 2.15 \text{ a}$	$12.49 \pm 8.40 \text{ a}$	$13.63 \pm 2.55\text{a}$	$32.32 \pm 13.81\text{a}$	$54.05 \pm 12.27\text{a}$
	上游	$4.81 \pm 1.22\text{b}$	$0.57 \pm 0.05\text{b}$	9:1	7.98 ± 0.13	$5.18 \pm 3.44 \text{ b}$	$20.13 \pm 5.19\text{b}$	$16.54 \pm 2.12\text{b}$	$39.46 \pm 10.00\text{a}$	$44.00 \pm 11.37\text{b}$
	均值	5.88 ± 4.33	0.53 ± 0.19	11:1	7.81 ± 0.22	6.38 ± 3.61	17.35 ± 7.37	15.08 ± 2.70	35.89 ± 12.08	49.02 ± 14.38

1) 同一列不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著

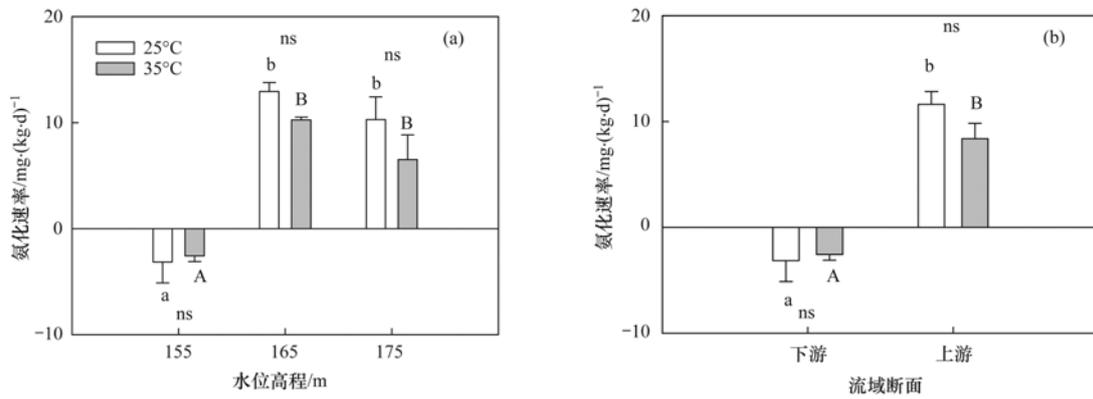
2.2 温度对土壤氨化速率的影响

由图 3 可见,土壤氨化速率均随温度升高而降低,但差异不显著 ($P > 0.05$). 相同培养温度下 (25℃ 或 35℃),155 m 水位高程消落带的土壤氨化速率均为负值且显著低于 165 m 和 175 m 水位高程 ($P < 0.05$),但 165 m 和 175 m 水位高程之间土壤氨化速率无显著差异 [$P > 0.05$, 图 3(a)]. 相同培养温度下 (25℃ 或 35℃),下游消落带土壤氨化速率为负值且显著低于上游消落带 [$P < 0.05$, 图 3

(b)].

2.3 温度对土壤硝化速率的影响

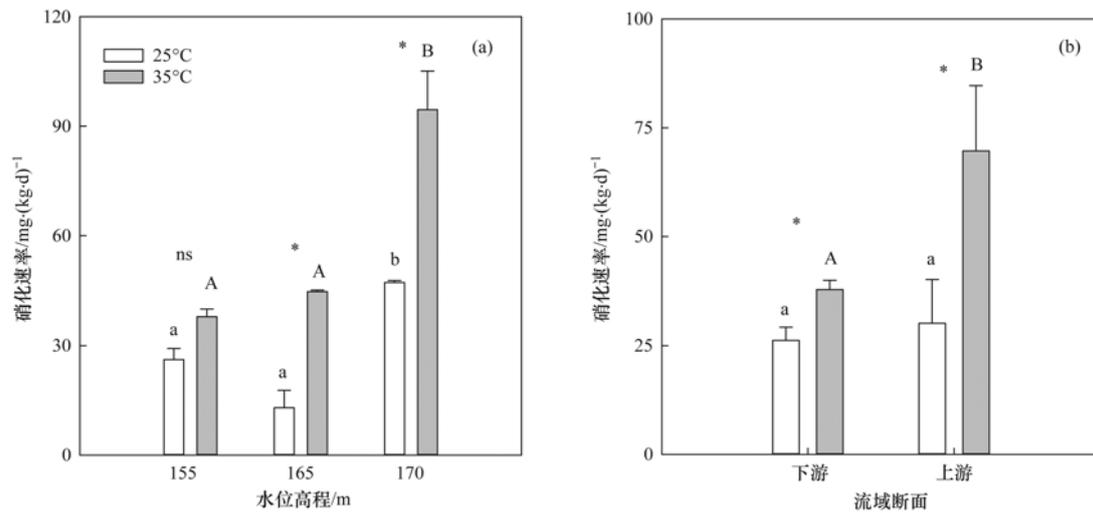
由图 4(a)可见,消落带土壤硝化速率随温度升高而增大,其中 165 m 和 175 m 显著增加 ($P < 0.05$),而 155 m 增加不显著 ($P > 0.05$). 相同温度下 (25℃ 或 35℃),155 m 和 165 m 水位高程消落带的土壤硝化速率均显著低于 175 m 水位高程 ($P < 0.05$),但 155 m 和 165 m 水位高程之间土壤硝化速率无显著差异 [$P > 0.05$, 图 4(a)]. 由图 4(b)可



ns 表示 25°C 和 35°C 处理之间无显著性差异 ($P > 0.05$)；不同小写字母表示 25°C 水位高程 (或流域断面) 之间差异显著性 ($P < 0.05$)，不同大写字母表示 35°C 水位高程 (或流域断面) 之间差异显著性 ($P < 0.05$)

图 3 温度升高对土壤氨化速率的影响

Fig. 3 Effect of temperature increasing on soil ammonification rate



* 为 25°C 和 35°C 处理之间差异显著性 ($P < 0.05$)，ns 为无显著差异；不同小写字母为 25°C 水位高程 (或流域断面) 之间差异显著性，不同大写字母为 35°C 水位高程 (或流域断面) 之间差异显著性 ($P < 0.05$)，下同

图 4 温度升高对土壤硝化速率的影响

Fig. 4 Effect of temperature increasing on soil nitrification rate

见，温度升高使流域上游和下游断面消落带土壤硝化速率均显著增加 ($P < 0.05$)。相同温度下 (25°C 或 35°C)，下游消落带土壤硝化速率均低于上游消落带，但 25°C 时两者差异不显著 ($P > 0.05$)，而 35°C 时两者差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 温度对土壤净氮矿化速率的影响

由图 5 可见，无论水位高程 [图 5(a)] 之间还是流域断面之间 [图 5(b)]，土壤净氮矿化速率均随温度升高而显著增加 ($P < 0.05$)。由图 5(a) 可知，25°C 时 155 m 和 165 m 水位高程消落带的土壤净氮矿化速率显著低于 175 m 水位高程 ($P < 0.05$)，但 155 m 和 165 m 水位高程之间无显著差异 ($P > 0.05$)，35°C 时土壤净氮矿化速率表现为：155 m <

165 m < 175 m。由图 5(b) 可见，温度升高使流域上游和下游断面消落带土壤净氮矿化速率均显著增加 ($P < 0.05$)。相同温度下 (25°C 或 35°C)，下游消落带土壤硝化速率均低于上游消落带 ($P < 0.05$)。

3 讨论

澎溪河消落带土壤总氮、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 随水位高程和水文断面变化差异显著 (表 1)，表现为总氮、 NO_3^- -N 在低水位高程及下游断面含量明显降低，而在高水位高程和上游断面消落带土壤含量更高，铵态氮分布与总氮和硝态氮分布相反 (表 1)。可能原因为土壤硝态氮带负电荷及溶解性使其更易进入水体^[17]，而由于不同水位高程和流域断面消落

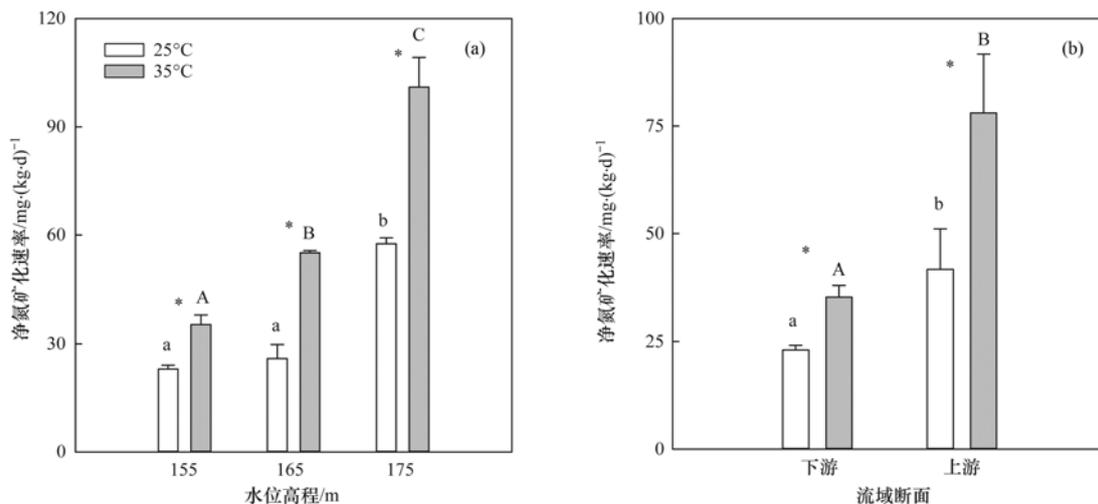


图 5 温度升高对土壤净氮矿化速率的影响

Fig. 5 Effect of temperature increasing on soil net nitrogen mineralization rate

带土壤干湿循环周期的差异性^[18],低水位高程和下游断面消落带淹水历时更长,通过矿化产生的硝态氮易于进入水体,表现为硝态氮含量更低,而高水位高程和上游断面消落带经历的淹水时间相对更短,硝态氮进入水体相对较少,表现为硝态氮含量更高.可见,淹水历时不同导致消落带土壤中氮素含量存在明显差异,而落干后重新加湿过程增加了土壤中氮素的转化速率,潜在增加了进一步进入水体的风险.另外,研究表明硝态氮更易吸附于黏粒、粉粒^[19],而受干湿循环影响,三峡支流澎溪河低水位高程和下游断面消落带土壤中砂粒比例更高,而黏粒、粉粒流失.随着粒级的由细到粗,土壤氮素进一步向水体释放,使低水位高程和下游断面消落带土壤中硝态氮含量较低.

土壤氨化是有机氮通过好氧微生物分解产生铵态氮的过程^[20].在澎溪河高水位高程[图 3(a)]和上游断面[图 3(b)]消落带土壤氨化速率显著更快,可能为高水位高程、上游断面土壤暴露空气时间相对更长,好氧微生物活性更高,土壤有机氮大量分解为无机态氮,氨化速率、硝化速率相对较高^[21].总体上,高水位高程、上游断面消落带土壤 NO_3^- -N含量更高、铵态氮含量低,但氨化速率高(图 3),可能原因为与氨化速率相比,硝化速率更快,使氨化作用产物(NH_4^+ -N)作为硝化作用反应物转化 NO_3^- -N,导致 NO_3^- -N累积而 NH_4^+ -N消耗^[22].另外,本研究区土壤 pH 值偏中性(表 1), NH_4^+ -N不易通过挥发形式损失^[23, 24],说明高水位高程、上游断面土壤 NH_4^+ -N含量较低不是 NH_3 挥发造成的.相反,低水位高程和下游断面氨化速率较低,而铵态氮含量却更高,可能为

干湿循环导致其淹水胁迫时间更长,长期缺氧不利于 NH_4^+ -N向 NO_3^- -N的转化,且 NH_4^+ -N带正电荷易被土壤吸附,不易流失,铵态氮积累^[25].土壤净氮矿化与土壤水分含量呈显著负相关^[26],土壤在淹水通气不畅情况下,厌氧的反硝化细菌能将 NO_3^- 还原成 N_2O 和 N_2 ,进而降低净矿化速率^[27].本研究表明,低水位高程和下游断面淹水时间长,表现为氨化、硝化、净氮矿化速率均较低.

总体上,本研究中较高培养温度促使土壤硝化速率和净氮矿化速率显著增加^[28],但对氨化速率影响不显著.赵琦齐等^[8]研究了温度对太湖湖滨带不同水分梯度土壤氮矿化的影响,温度升高均显著增加了不同湿度土壤硝化和净氮矿化速率,这与本研究结果一致.葛晓敏等^[13]探讨了不同温湿度下杨树人工林土壤氮矿化特征,也发现土壤净氮矿化与温度呈显著正相关.李玉霖等^[29]研究了不同湿度条件下模拟增温对科尔沁沙质草地土壤氮矿化的影响,研究发现湿度是影响土壤氮矿化增温效应的重要因素,土壤湿度小于 8.5%时,增温使土壤净氨化速率较对照明显提高;但土壤湿度为 11.8%和 15.2%时,增温处理使土壤净氨化速率较对照显著降低;土壤湿度为 8.5%和 11.8%时,增温使土壤净硝化速率和净矿化速率显著升高,而湿度较低时无显著差异,这与本研究的结论高度吻合.因此,落干期季节性温度升高,提高氮可利用性,促进消落带植被短期生长,但随水位重新上涨后可能加速氮素进入水体,对消落带植被生长和生态系统结构与功能形成负反馈作用,增加蓄水期三峡支流水体富营养化风险.

由于三峡库区较低水位落干期历时较短,造成本实验无法在野外原位条件下研究消落带土壤氮矿化特征,而且落干-重新加湿过程与温度升高对消落带土壤氮矿化的内在机制尚不清楚,还有待于今后作进一步研究。

4 结论

本研究发现季节性温度升高是控制三峡支流澎溪河不同水位高程和不同流域断面消落带落干期土壤净氮矿化速率的关键因素,而消落带淹水历时不同也造成消落带氮素在水位高程和流域断面上分布差异明显。因此,落干期季节性温度升高-重新加湿过程可能是三峡支流水体富营养化频发的不可忽略的因素。

参考文献:

- [1] 蔡瑜如,傅华,陆丽芳,等. 陆地生态系统植物吸收有机氮的研究进展[J]. 草业科学, 2014, **31**(7): 1357-1366.
- [2] Horst G P, Samelle O, White J D, *et al.* Nitrogen availability increases the toxin quota of a harmful cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa*[J]. Water Research, 2014, **54**: 188-198.
- [3] Mueller K E, Hobbie S E, Oleksyn J, *et al.* Do evergreen and deciduous trees have different effects on net N mineralization in soil? [J]. Ecology, 2012, **93**(6): 1463-1472.
- [4] Abera G, Wolde-Meskel E, Bakken L R. Carbon and nitrogen mineralization dynamics in different soils of the tropics amended with legume residues and contrasting soil moisture contents[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, **48**(1): 51-66.
- [5] Zhu B, Gutknecht J L M, Herman D J, *et al.* Rhizosphere priming effects on soil carbon and nitrogen mineralization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **76**: 183-192.
- [6] Guntiñas M, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, *et al.* Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. European Journal of Soil Biology, 2012, **48**: 73-80.
- [7] Sun S H, Liu J J, Chang S X. Temperature sensitivity of soil carbon and nitrogen mineralization: impacts of nitrogen species and land use type[J]. Plant and Soil, 2013, **372**(1-2): 597-608.
- [8] 赵琦齐,沈玉娟,李平,等. 温度对太湖湖滨带不同水分梯度土壤氮矿化的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, **35**(6): 147-150.
- [9] 赵宁,张洪轩,王若梦,等. 放牧对若尔盖高寒草甸土壤氮矿化及其温度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(15): 4234-4241.
- [10] 刘杏认,董云社,齐玉春,等. 温带典型草地土壤净氮矿化作用研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 633-639.
- [11] Jin V L, Haney R L, Fay P A, *et al.* Soil type and moisture regime control microbial C and N mineralization in grassland soils more than atmospheric CO₂-induced changes in litter quality[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **58**: 172-180.
- [12] 李铭,朱利川,张全发,等. 不同土地利用类型对丹江口库区土壤氮矿化的影响[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(6): 530-538.
- [13] 葛晓敏,王瑞华,唐罗忠,等. 不同温湿度条件下杨树人工林土壤氮矿化特征研究[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(10): 208-213.
- [14] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, *et al.* Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **191**(1-3): 366-372.
- [15] Robertson G P. Nitrification and nitrogen mineralization in a lowland rainforest succession in Costa Rica, Central America [J]. Oecologia, 1984, **61**(1): 99-104.
- [16] Montagnini F, Buschbacher R. Nitrification rates in two undisturbed tropical rain forests and three slash-and-burn sites of the Venezuelan Amazon[J]. Biotropica, 1989, **21**(1): 9-14.
- [17] Shang F Z, Yang P L, Li Y K, *et al.* Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(7): 103-110.
- [18] Tang Q, Bao Y H, He X B, *et al.* Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **479-480**: 258-266.
- [19] 王新中,刘国顺,张正杨,等. 土壤粒径空间分布及其与土壤养分的关系[J]. 中国烟草科学, 2011, **32**(5): 47-51.
- [20] 韩建刚,曹雪. 典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2383-2389.
- [21] Guo X B, Drury C F, Yang X M, *et al.* The extent of soil drying and rewetting affects nitrous oxide emissions, denitrification, and nitrogen mineralization [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, **78**(1): 194-204.
- [22] 高建梅,董丽媛,胡古,等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤氮转化的海拔效应[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(10): 2149-2154.
- [23] Berendse F. Implications of increased litter production for plant biodiversity[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, **14**(1): 4-5.
- [24] 曹兵,贺发云,徐秋明,等. 南京郊区番茄地中氮肥的气态氮损失[J]. 土壤学报, 2006, **43**(1): 62-68.
- [25] 周涛,李正魁,冯露露. 氨氮和硝氮在太湖水华自维持中的不同作用[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(2): 305-311.
- [26] 牟晓杰,孙志高,刘兴土. 黄河口典型潮滩湿地土壤净氮矿化与硝化作用[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(5): 1466-1473.
- [27] 马芬,马红亮,邱泓,等. 水分状况与不同形态氮添加对亚热带森林土壤氮素净转化速率及 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(2): 379-387.
- [28] 周旺明,秦胜金,刘景双,等. 沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(4): 806-811.
- [29] 李玉霖,陈静,崔夺,等. 不同湿度条件下模拟增温对科尔沁沙质草地土壤氮矿化的影响[J]. 中国沙漠, 2013, **33**(6): 1775-1781.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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@rcees. 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@rcees. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行