

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH₃和N₂O)减排效果比较:以夏玉米季为例 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO₂、CH₄和N₂O通量的观测 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO₂和CH₄分压特征分析 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce³⁺与Cu²⁺协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO₂光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu²⁺、Zn²⁺的吸附特性 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨

柴雪思, 雷利国, 江长胜, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊*

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 本文以三峡库区王家沟一典型消落带为研究对象, 选择 180、175、165 和 155 m 这 4 个高程以探讨水位变化对土壤微生物生物量碳 (SMBC) 和微生物生物量氮 (SMBN) 的影响。其中, 175、165 和 155 m 高程坐落在消落带内, 分别表现为短、中和长期淹水, 180 m 高程作为对照, 为永不淹水的陆地。土壤样品的采集深度为 0~20 cm, 每周采集一次。结果表明, 180 m 高程处土壤有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 均无明显的季节变化, 而 175 m 高程处 SOC 和 TN 季节变化明显, 表现为春夏季高于秋冬季; 各高程上的 SMBC 和 SMBN 及其分配比例呈现出秋高夏低的季节变化形态, 表明消落带夏季高温低湿的土壤环境限制了微生物活性及土壤有机碳氮的周转速率。数据分析表明, 与 180 m 高程相比, 消落带上的 175 m 和 165 m 高程 SOC、TN、SMBC 及微生物商、SMBN 及其分配比例均得到不同程度的升高, 而 155 m 高程除了 SMBN 及其分配比例与对照无显著差异外, 其他指标均显著低于对照, 表明与未淹水对照点相比较, 中短期淹水有利于提高消落带土壤碳氮含量及周转速率和微生物生物量, 而长期受到江水淹没胁迫的土壤则会抑制土壤碳氮以及 SMBC 含量, 并降低 SOC 的周转速率。相关分析表明, SMBC 和 SMBN 均与地下 5 cm 处温度和 pH 呈极显著负相关, 说明地下 5 cm 处的温度以及 pH 对土壤微生物生物量有强烈的影响。

关键词: 三峡库区; 消落带; 土壤微生物生物量碳; 土壤微生物生物量氮; 季节变化

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2979-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.020

Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir

CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HUANG Zhe, FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju*

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Taking a typical drawdown area located in Wangjiagou of the Three Gorges Reservoir as the study object, four elevations 180, 175, 165 and 155 m were selected to explore the effect of water level change on soil microbial biomass carbon (SMBC) and microbial biomass nitrogen (SMBN). Wherein, 175, 165 and 155 m elevations located in the fluctuating zone, manifested as short, medium and long-term flooding, respectively; 180 m was used as the control, located on the land and never flooded. Sampling depth in soil samples was 0-20 cm, collected once a week. The results indicated that, soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents at 180 m had no obvious seasonal changes, while they showed remarkable seasonal trends at 175 m, which in spring and summer were significantly higher than in autumn and winter; SMBC and SMBN contents and their allocation ratio at four elevations were similar and had significant seasonal fluctuation, which were highest in autumn and lowest in summer at each elevation, indicating that in drawdown area the microbial activity and turnover rate of soil organic carbon and nitrogen were limited by the high-temperature and low-humidity soil environment in summer. Data analysis showed that, compared with the 180 m elevation, contents of SOC, TN, SMBC and microbial quotient, SMBN and its allocation proportion showed varying degrees of increase, while contents of these indexes were significantly lower than control except SMBN and its allocation proportion, meaning that compared with 180 m short and medium-term flooding was conducive to improve soil carbon, nitrogen and their turnover rate and microbial biomass, however, contents of soil carbon and nitrogen and microbial biomass carbon were significantly restricted at 155 m as soil was subjected to flooding stress, meanwhile the turnover rate of SOC was reduced. Correlation analysis implied that SMBC and SMBN had very significant negative correlation with temperature at 5 cm soil depth and pH, meaning that the two environmental factors had a strong effect on soil microbial biomass.

Key words: Three Gorges Reservoir; drawdown area; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen; seasonal changes

收稿日期: 2015-12-31; 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013, XDJK2016D040)

作者简介: 柴雪思(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 1770661805@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: haoqingju@163.com

在植被-土壤系统中,土壤微生物参与养分循环和物质代谢过程,直接影响地球生物化学循环,对植物凋落物降解、养分循环与平衡、土壤理化性质改善起着重要作用^[1,2]. 土壤微生物生物量是土壤有机质中有生命的成分,是土壤养分的重要“源”和“库”^[3],常被用于评价土壤质量的生物学性状^[4],且其对土壤环境条件变化非常敏感,能在短时间内发生大幅度变化,因而土壤微生物量的多少可以作为判断土壤生态系统功能变化的敏感指标^[5].

目前国内学者针对土壤微生物生物量碳(SMBC)及微生物生物量氮(SMBN)开展了较多的研究,但主要集中在森林、草原、农田以及湿地生态系统^[6~9],而对于水库消落带这一特殊生境,相关研究还比较匮乏. 水库消落带是由于水位季节性的变化导致水库周边陆地出现干湿交替的区域,与库区水域和两岸坡地间存在着物质、能量交换,可看做一类特殊的淡水湿地生态系统^[10,11]. 有研究表明在三峡水库蓄水前(最高水位线 156 m),土壤养分含量在不同海拔高程间无明显差异^[12,13],而三峡水库完成蓄水后,形成了最高水位 175 m,最低水位 145 m,垂直落差 30 m,总面积约 348.93 km² 的消落带. 消落带上由于水位变化,每年有大量土地处于季节性淹没和落干状态,这种干湿交替的环境条件势必会引起土壤理化性质的改变^[10,14],并对土壤的微生物学特性产生较深刻的影响^[15]. 因此,本文以三峡库区的涪陵区珍溪镇王家沟一典型消落带为研究对象,探讨消落带土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、SMBC 和 SMBN 含量在不同海拔高程上的季节变化及其差异,并对相关影响因素进行分析,通过揭示水库高水位运行后消落带土壤碳氮以及微生物生物量的变化趋势,以期为三峡库区的科学管理提供基础数据与理论支持.

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

本实验研究区域位于重庆市涪陵区珍溪镇王家沟流域(北纬 29°54'~30°46',东经 107°27'~108°30'). 王家沟位于涪陵区东北部,为亚热带季风气候,年平均气温在 17~18℃之间,最低气温为 -2.5℃,积温在 5 300~5 600℃之间,年降雨量在 1 000~1 100 mm 之间,太阳辐射量年平均为 3 360.02 MJ·m⁻². 具有三峡库区典型的山地、丘陵夹沟谷的地形、地貌特征,地貌类型以低山丘陵为主,海拔在 153~330 m 之间,现主要被草本植物覆

盖,常见植物主要有空心莲子草 [*Alternanthera Philoxeroides* (Mart.) Griseb.]、狗牙根 [*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]、苍耳 [*Xanthium sibiricum* Patr.] 和稗草 [*Echinochloa frumentacea* (Roxb.) Link] 等. 该消落带地势平坦,受人为影响因素较少,属于三峡水库典型流域开阔河段冲积土型消落区,土壤类型主要是水稻土和紫色土,土壤 pH 介于 4.00~8.10 之间.

1.2 样品采集与测定

本研究共选择 4 个高程:180、175、165 和 155 m,其中 180 m 高程位于陆地,作为永不淹水的对照点,而 175、165 和 155 m 处于消落带内,表现为季节性淹水. 自 2010 年 9 月 7 日至 2011 年 9 月 3 日进行土壤样品的采集,每周一次. 在实验期间内,175 m 高程自 2010 年 10 月 27 日到 2011 年 1 月 24 日经历了短时间的淹水(约 90 d),但由于淹水深度较浅,在淹水期间通过搭设栈桥的方式仍然进行了土壤样品的采集工作;165 m 高程于 2010 年 10 月初到次年 3 月中旬处于淹水状态,表现为中期淹水(约 175 d),155 m 高程于 2010 年 9 月中旬到第二年 5 月中旬被淹没,表现为长期淹水(约 260 d),由于这 2 个高程在淹水期间淹水较深,故没有进行土壤样品的采集. 在每个高程上分别随机设置 3 个面积为 1 m×1 m 的样方,每个样方内设置 3 个采样点,采样深度为 0~20 cm,在每个采样点内采用蛇形采样法采集土样,充分混合后去杂,分成两部分:一部分鲜土样放置于冰箱中并于 4℃ 以下保存,用来测定土壤含水量、SMBC 和 SMBN 等;另一部分土壤样品风干,以测定 SOC、TN、pH 等.

SOC 的测定采用重铬酸钾法-外加热法^[16],TN 的测定采用半微量凯氏定氮法^[16]. 在采集样品的同时用 JM624 型便携式测温计测定地下 5 cm 处土壤的温度. 采用土:水=1:2.5 水浸提,酸度计法测定土壤 pH. 土壤含水量的测定方法为烘干法^[16]. SMBC 和 SMBN 的测定采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法进行^[16],并分别用公式(1)和(2)计算 SMBC 及 SMBN 的含量.

$$\text{SMBC} = E_C / 0.38 \quad (1)$$

$$\text{SMBN} = E_N / 0.45 \quad (2)$$

式中, E_C 、 E_N 分别为熏蒸土壤与未熏蒸土壤有机碳、氮的差值,0.38 和 0.45 分别为 SMBC 和 SMBN 的校正系数^[16].

1.3 数据统计与分析

用 SPSS 17.0 软件对 4 个高程处在相同时间段

内(2011年5月22日至2011年9月3日)以及同一高程不同季节的SOC、TN、SMBC和SMBN含量及其分配比例进行单因素方差分析(ANOVA),当其通过方差齐次性检验时($P > 0.05$),则进行均值间最小差异显著性(LSD)检验;若其不能通过方差齐次性检验($P < 0.05$),则采用Tamhane' T_2 进行差异显著性检验。采用配对 t 检验进行180 m和175 m高程处各变量全年均值的比较。变量间的相关关系采用Pearson相关统计方法进行分析。

2 结果与分析

2.1 消落带SOC和TN含量的变化特征

图1展示了三峡库区消落带各高程SOC及TN的季节变化。从中可知,180 m高程处SOC的含量在2010年9月到12月中旬一直保持在 $10.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,至12月底开始下降,并在2011年1月22日降到最低值 $6.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,然后从2011年2月中旬起SOC含量升高,并于3月1日达到最高值 $11.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在实验期间(2010年9月7日~2011年9月3日),以9~11月为秋季,12~次年2月为冬季,3~5月为春季,6~8月为夏季来进行四季的划分。单因素方差分析表明180 m高程上4个季节的SOC含量没有显著性差异(表1),表明在该高程上SOC含量没有明显的季节变化。175 m处SOC含量在2010年11月中旬前波动不大,然后呈现出波浪状上升趋势,并在2011年7月3日达到最大值 $16.31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;该高程春、夏季SOC的含量均

显著高于秋、冬季($P < 0.05$)。165 m和155 m高程处SOC的含量在2011年8月21日之前大致呈现出相反的变化趋势,之后的变化模式趋于一致。165 m高程处的最大值 $13.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和155 m高程处的最小值 $4.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 均出现在7月25日,165 m高程处SOC含量在5月22日出现最小值($8.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),该高程SOC含量夏季高于春季($P < 0.05$);155 m高程处SOC含量在6、7月较高,8月较低,最大值($8.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)出现在7月8日。

如图1所示,消落带各高程土壤TN含量的季节变化趋势与其对应高程SOC的相似,180、175、165和155 m高程土壤TN含量的最大值均出现在2011年7月下旬,分别为1.99、1.98、1.75和1.46 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。180 m高程处土壤TN含量在2011年3月下旬之前波动较大,3月22日到5月28日之间变化较为平稳,之后又呈现出较为剧烈的变化趋势,但各个季节之间TN的含量没有显著性差异(表1);175 m高程处土壤TN含量从2011年1月开始呈现出明显的波浪状上升趋势,5月初有所下降,并在6月6日降到最小值 $0.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,之后其值大致呈锯齿状变化,与该高程SOC含量的季节变化趋势相同,TN的含量也表现为春、夏季显著高于秋、冬季($P < 0.05$)(表1);165 m高程处TN的值在观测初期出现最小值 $0.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,之后有所上升,于7月底达到最高并在其后仍维持在较高水平;155 m高程处TN表现为先低后高,6、7月较低而8月较高。

表1 消落带各高程不同季节SOC、TN的含量¹⁾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Seasonal contents of SOC and TN in different heights in the drawdown area/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

季节	SOC 含量				TN 含量			
	180 m	175 m	165 m	155 m	180 m	175 m	165 m	155 m
秋	9.71 ± 0.19a	8.86 ± 0.33b			1.30 ± 0.06a	1.21 ± 0.04b		
冬	8.44 ± 0.39a	7.86 ± 0.16b			1.32 ± 0.05a	1.15 ± 0.03b		
春	8.98 ± 0.43a	11.95 ± 0.66a	9.87 ± 0.24		1.42 ± 0.03a	1.62 ± 0.06a	1.26 ± 0.02	
夏	9.51 ± 0.27a	12.48 ± 0.61a	11.02 ± 0.33	6.20 ± 0.33	1.42 ± 0.06a	1.52 ± 0.09a	1.35 ± 0.05	0.89 ± 0.08

1) 同列不同小写字母表示同一高程不同季节SOC和TN的含量有显著差异($P < 0.05$),下同

消落带155、165、175和180 m高程在相同时间段内SOC的平均含量分别为6.17、10.69、12.40和 $9.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,单因素方差分析表明155 m高程处的SOC含量显著低于其它3个高程($P < 0.05$),而175 m和165 m高程处SOC的含量显著高于180 m高程($P < 0.05$)。相同时间段内,180、175和165 m高程土壤TN的含量分别为1.42、1.53和 $1.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,单因素方差分析表明这3个高程间TN含量无显著差异,但均显著高于155 m高程的0.86

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$)。另外,配对 t 检验分析发现,175 m高程处的SOC含量年均值($10.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于180 m高程($9.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)($P < 0.05$);但2个高程处TN含量的年均值均为 $1.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,无明显差异。

综上所述,与从未淹水的对照点相比,淹水后SOC及TN的含量会有较大的季节波动,且中短期淹水有利于消落带SOC的累积,但对TN含量的影响不大,而长期被江水浸泡、冲刷的土壤,SOC和TN的含量则会大大减少。

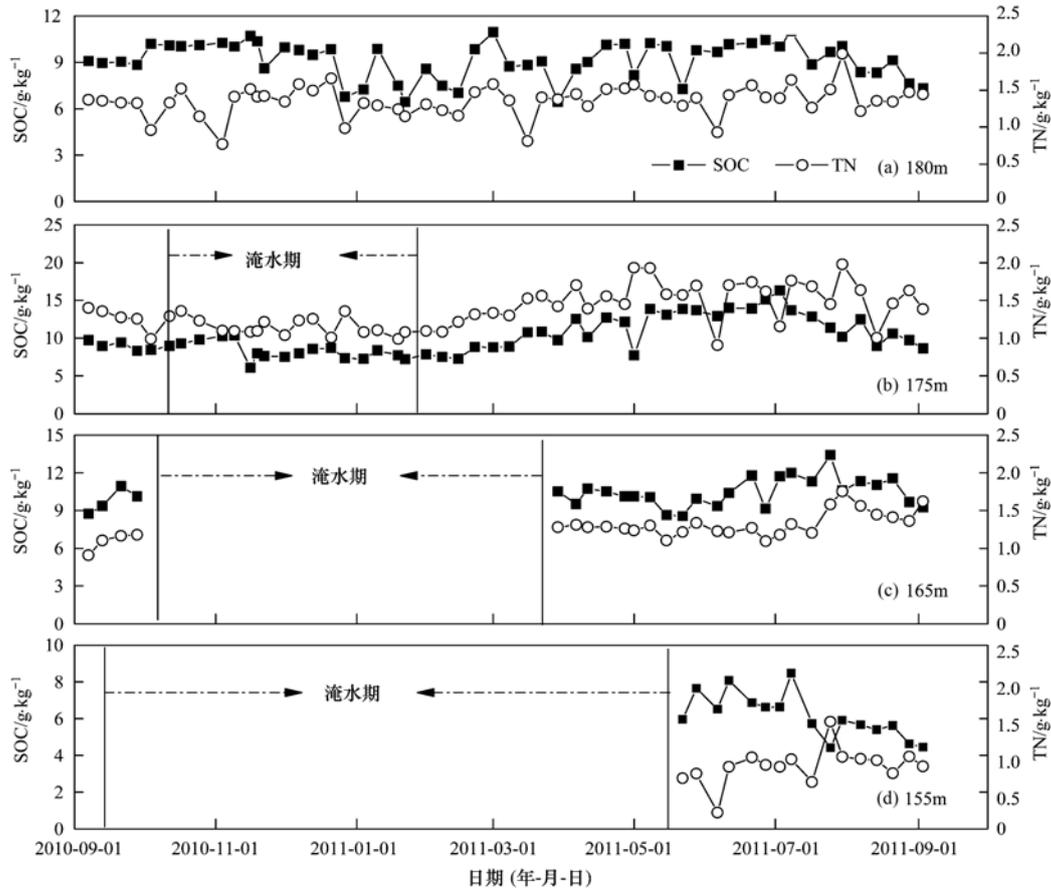


图1 消落带各高程 SOC 及 TN 含量的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes of SOC and TN in different heights in the drawdown area

2.2 消落带 SMBC 含量及微生物商的变化特征

图2为消落带各高程 SMBC 及微生物商的季节变化. 从中可以看出,180 m 高程处 SMBC 的含量前期较高,最大值为 $222.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,出现在 2010 年 10 月 17 日,自 2011 年 5 月开始呈持续下降趋势,并于 9 月初降到整个观测期间的最小值 ($20.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 175 m 高程处 SMBC 含量的波动性较大,大致呈现双峰型变化,最高峰出现在 2010 年 10 月 17 日 ($342.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),次高峰出现在 2011 年 4 月 11 日 ($269.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),之后开始下降,并于 8 月底降到了最小值 $22.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 180 m 和 175 m 高程处 SMBC 的含量均在秋季最高,夏季最低,而冬、春两季的值较为接近,单因素方差分析显示,2 个高程 SMBC 的含量均表现为夏季显著低于其它季节 ($P < 0.05$),冬、春季之间无显著差异而均显著低于秋季 ($P < 0.05$) (表 2); 165 m 高程处 SMBC 含量在落干后迅速出现一个短暂的高峰 ($271.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),然后便持续降低,并在 8 月底降到最低值 $38.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,春季 SMBC 的值比夏季高约 1 倍 (表 2). 155 m 高程在落干期间 SMBC 的含量变化

范围为 $14.08 \sim 24.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,波动性不大.

微生物商是指 SMBC 和 SOC 含量的百分比^[17],各高程土壤微生物商的季节变化趋势和相对应高程 SMBC 含量的变化趋势基本一致,表明土壤微生物商主要受 SMBC 含量的控制. 180、175 和 165 m 高程处土壤微生物商范围为 $0.20\% \sim 3.70\%$,而 155 m 处微生物商的最大值为 0.43% ,最小值为 0.23% ,变化范围较小. 表 2 中 4 个高程土壤微生物商的单因素方差分析结果与 SMBC 的分析结果略有不同:180 m 高程处夏季该值显著低于其它季节 ($P < 0.05$),而其它 3 个季节间无显著差异.

相同时间段内,消落带 SMBC 的平均含量在 165 m 高程处最高,为 $115.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,175 m 和 180 m 高程处分别为 $99.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $82.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,单因素方差分析表明这 3 个高程间 SMBC 含量无显著差异,但 155 m 高程处 SMBC 含量均值仅为 $19.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于其它 3 个高程 ($P < 0.05$); 180 m 高程 SMBC 的年均值为 $135.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于 175 m 高程处的年均值 $157.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$). 相同时间段内,不同高程间微

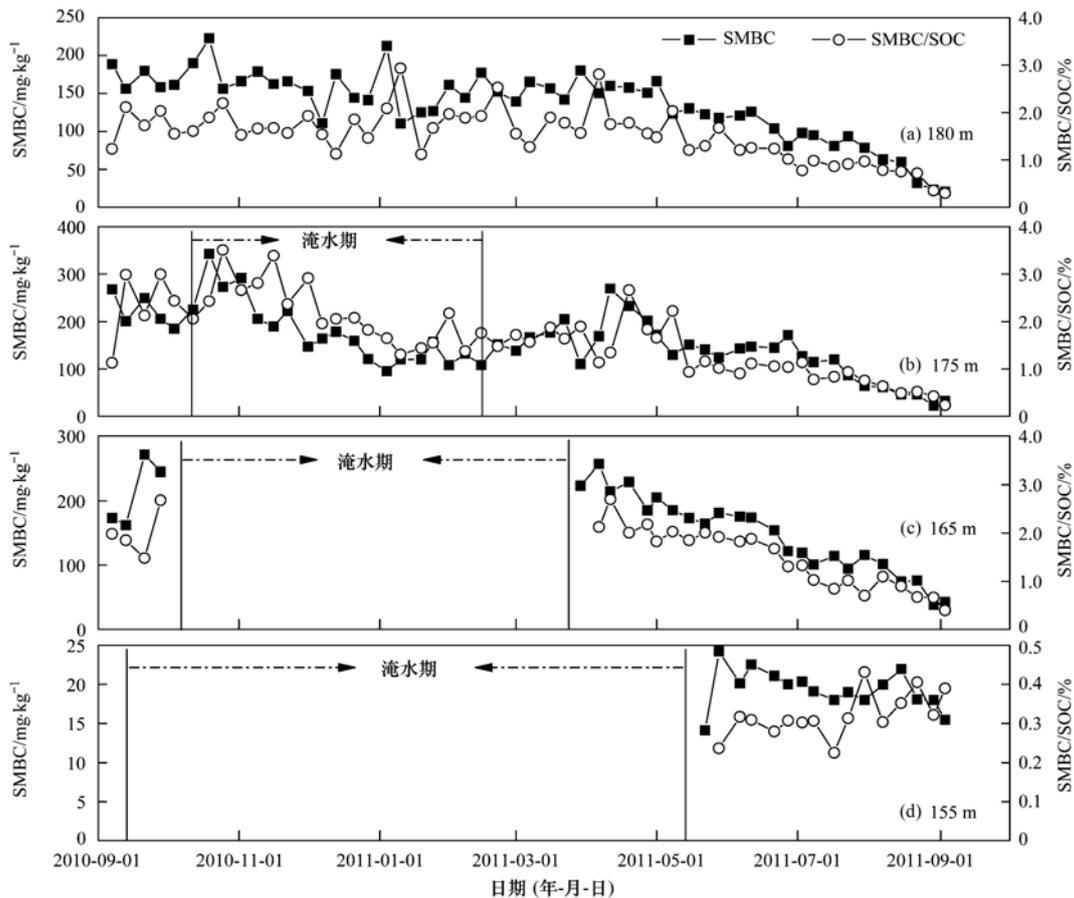


图2 消落带各高程 SMBC 含量及微生物商的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of SMBC and Microbial quotient in different heights in the drawdown area

表2 消落带各高程不同季节 SMBC 的含量及微生物商

Table 2 Seasonal values of SMBC and Microbial quotient in different heights in the drawdown area

季节	SMBC 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				微生物商/%			
	180 m	175 m	165 m	155 m	180 m	175 m	165 m	155 m
秋	$172.92 \pm 5.22a$	$235.47 \pm 12.96a$			$1.80 \pm 0.06a$	$2.70 \pm 0.13a$		
冬	$148.71 \pm 7.94b$	$135.29 \pm 7.13b$			$1.82 \pm 0.14a$	$1.72 \pm 0.08b$		
春	$145.78 \pm 6.71b$	$169.78 \pm 6.11b$	201.77 ± 9.18		$1.68 \pm 0.15a$	$1.48 \pm 0.19b$	2.04 ± 0.08	
夏	$81.09 \pm 8.53c$	$99.29 \pm 9.20c$	112.19 ± 9.91	19.70 ± 0.42	$0.84 \pm 0.08b$	$0.76 \pm 0.08c$	1.04 ± 0.12	0.33 ± 0.01

m (1.10%) > 180 m (0.88%) > 175 m (0.76%) > 155 m (0.32%), 与 SMBC 含量的单因素方差分析结果一致。但微生物商的年均值在 180 m 高程处 (1.51%) 和 175 m 高程 (1.66%) 处无显著性差异。

综上, 4 个高程处的 SMBC 含量及对应的微生物商均呈现出明显且相似的季节变化。与对照点相比, 中短期淹水有利于消落带 SMBC 含量的增加, 但江水的长期浸泡则会显著降低 SMBC 的含量及微生物可利用基质的有效性。

2.3 消落带 SMBN 含量及其分配比例的变化特征

图 3 为消落带各高程 SMBN 含量及其分配比例的季节变化。从中可知, 4 个高程 SMBN 含量都表现

出了明显且相似的季节变化形态: 180 m 和 175 m 高程呈现双峰型, 165 m 和 155 m 高程在落干期间呈现单峰型。180 m 高程 SMBN 的第一个峰值出现在 2010 年 11 月 16 日 ($73.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 175 m 高程第一个峰值出现在 2010 年 10 月 17 日 ($83.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 2 个高程第二个峰值均出现在 2011 年 4 月, 分别为 $87.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $82.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。如表 3 所示, 180 m 和 175 m 高程处 SMBN 的季节均值为秋 > 春 > 冬 > 夏, 单因素方差分析表明, 180 m 高程处夏季显著低于其它季节 ($P < 0.05$), 秋、春季显著高于冬季 ($P < 0.05$); 而 175 m 高程处秋季显著高于其他季节 ($P < 0.05$), 冬季与春、夏季均

无明显差异,春季显著高于夏季($P < 0.05$). 165 m 高程处 SMBN 同 SMBC 相似,也是在落干后迅速出现一个短暂的峰值($57.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),然后大幅降低,并在其后的时间里一直维持较低水平; SMBN

含量春季较高,而夏季较低(表 3). 155 m 高程 SMBN 的值较小,变化范围为 $0.28 \sim 7.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,峰值比其它 3 个高程延后约两个月,出现在 2011 年 6 月下旬.

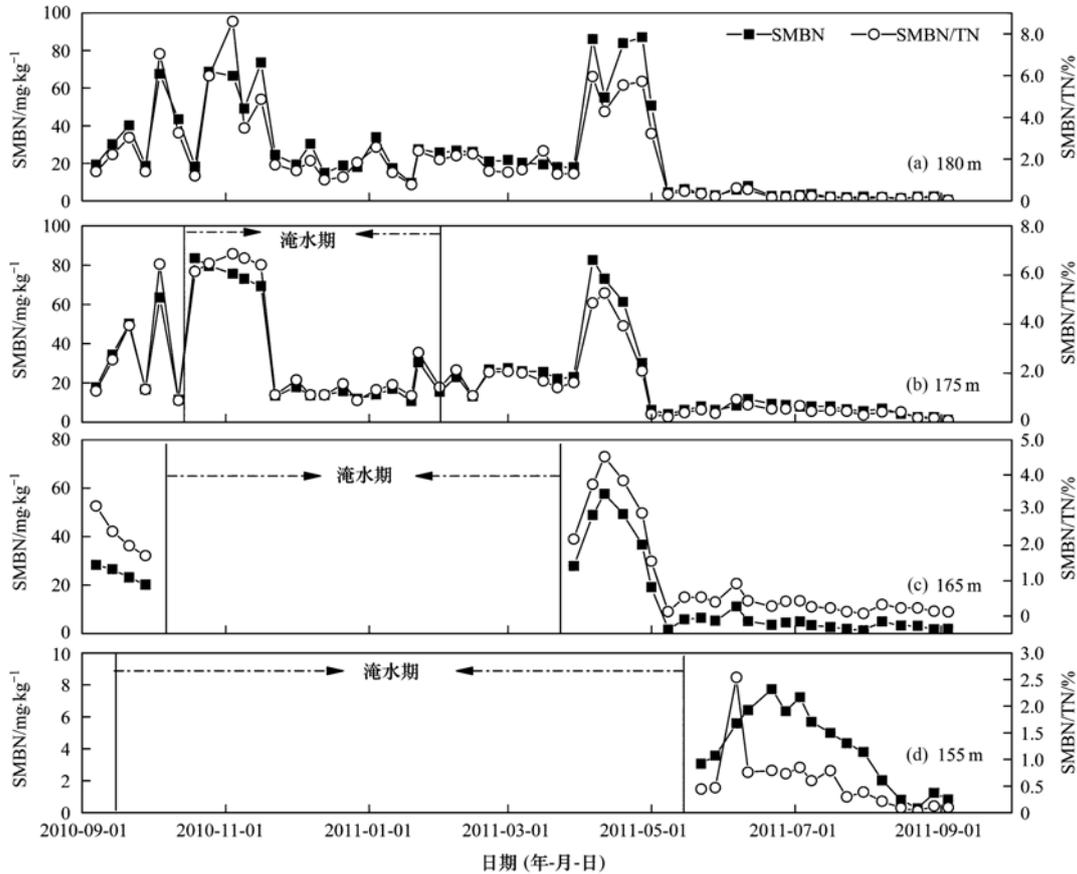


图 3 消落带各高程 SMBN 含量及其分配比例的季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of SMBN and allocation ratio of SMBN to TN in different heights in the drawdown area

180、175、165 和 155 m 高程处 SMBN 的分配比例的变化范围分别为 $0.04\% \sim 8.60\%$ 、 $0.078\% \sim 6.87\%$ 、 $0.08\% \sim 4.51\%$ 和 $0.04\% \sim 2.54\%$. 由图 3 可见, SMBN 的分配比例的季节变化趋势与其

含量相似,表明同微生物商一样,也是由其含量决定的. 各高程 SMBN 的分配比例均为秋季较高而夏季最低,方差分析结果与 SMBN 含量的结果大体一致(表 3).

表 3 消落带各高程不同季节 SMBN 的含量及分配比例

Table 3 Seasonal values of SMBN and allocation ratio of SMBN to TN in different heights in the drawdown area

季节	SMBN 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				SMBN 分配比例/%			
	180 m	175 m	165 m	155 m	180 m	175 m	165 m	155 m
秋	$43.76 \pm 4.72a$	$48.47 \pm 4.79a$			$3.66 \pm 0.27a$	$4.14 \pm 0.38a$		
冬	$22.24 \pm 1.87b$	$17.22 \pm 1.66bc$			$1.71 \pm 0.16b$	$1.52 \pm 0.15bc$		
春	$39.87 \pm 4.11a$	$30.10 \pm 5.19b$	25.87 ± 1.70		$2.73 \pm 0.28ab$	$1.96 \pm 0.23a$	2.03 ± 0.32	
夏	$3.04 \pm 0.50c$	$7.01 \pm 0.73c$	4.03 ± 0.70	4.34 ± 0.70	$0.23 \pm 0.05c$	$0.48 \pm 0.06c$	0.31 ± 0.06	0.63 ± 0.18

相同时间段内,175 m 高程处 SMBN 的平均含量 ($6.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著高于 165 m ($4.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、155 m ($3.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 180 m 高程 ($3.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$),但 180 m 和 175 m 高

程处 SMBN 的年均值相近,分别为 $25.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $24.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,配对 t 检验表明无显著差异. 相同时间段内,不同高程 SMBN 的分配比例为 155 m (0.58%) $>$ 175 m (0.45%) $>$ 165 m (0.32%) $>$

180 m (0.22%); 但 180 m 和 175 m 高程处 SMBN 分配比例的年均值相同, 均为 1.98%。

由以上分析可以看出, 4 个高程上的 SMBN 含量及其分配比例呈现出相似的季节变化模式, 与对照点相比, 消落带各高程 SMBN 含量以及分配比例均有所升高。

表 4 消落带 SMBC 及 SMBN 和土壤基本理化特征的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlations between SMBC, SMBN and soil physicochemical properties in the drawdown area

	SMBC	SMBN	SOC	TN	土壤含水率	地下 5 cm 处温度	pH
SMBC	1	0.585**	0.257**	0.183*	0.393**	-0.408**	-0.304**
SMBN		1	0.032	0.019	0.128	-0.437**	-0.296**

1) * 表示存在显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示存在极显著相关 ($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 消落带 SOC、TN 变化特征及影响因素的探讨

土壤有机物质含量是土壤稳定性的重要保障, 土壤有机碳主要来源于地上植物光合作用输入的碳, 以及进入土壤的植物、动物、微生物残体及其分解合成的有机物中的碳, 并且处于不断的分解与合成的动态过程中^[15,18]. 本研究结果表明对照点 180 m 高程处 SOC 的含量未表现出十分明显的季节性波动, 但位于消落带上的 175 m 高程处 SOC 的含量呈现出明显的季节变化. 关于 SOC 的时间动态变化, 有研究认为 SOC 在短期之内难以监测其变化趋势^[19], 但也有一些学者在小叶章湿地、纳帕海湿地和甘南尕斯库勒湖湿地通过测定发现 SOC 含量具有明显的时间变化趋势^[20-22]. 175 m 高程上 SOC 含量春夏季显著高于秋冬季, 可能主要是受土壤温度的影响, 相关分析表明, SOC 含量与地下 5 cm 土壤温度呈显著正相关 ($R = 0.187, P < 0.05$), 温度的季节性变化是导致 SOC 季节变化的主要因子, 与吴艳等^[18]在西南地区油菜地的研究结果相一致. 温度的升高一方面加速了土壤有机质的分解, 从而使土壤碳含量降低^[23]; 另一方面, 加速了土壤外源有机质的分解, 从而使土壤碳含量增加^[24]. 175 m 高程从 10 月底开始淹水并一直持续到 1 月底, 浅水淹没导致地表植物死亡但又未被江水冲刷带走, 春夏季节随着温度的升高和地表的落干, 枯死的地表植物在微生物的分解作用进入土壤, 从而使得 SOC 含量升高^[18]. 另外, 夏季植物生长旺盛, 地上光合作用强烈, 吸收固定大气中的碳传输到根部, 然后以根系分泌物、根皮脱落等形式进入土壤中的碳增多, 从而提高 SOC 含量.

本研究结果表明, 消落带中短期淹水的土壤其

2.4 土壤微生物生物量碳、氮与土壤理化性质的关系

如表 4 所示, SMBC 与 SMBN、SOC、TN 以及土壤含水率呈显著或极显著正相关, SMBC 和 SMBN 均与地下 5 cm 处温度及 pH 呈极显著负相关, 微生物量氮与其他指标相关性不大. 总的来说土壤微生物生物量受到地下 5 cm 处温度和 pH 的影响较大.

SOC 含量显著高于对照点 ($P < 0.05$), 而长期被江水浸泡的土壤其 SOC 的值则明显偏低 ($P < 0.05$). 这可能是由于 175 和 165 m 高程处的土壤在淹水状态时有机物质不易被矿化, 发生了累积^[25], 并且这 2 个高程在春季水位下降地表落干后地上植物开始重新生长, 从而向土壤中提供了新的有机碳源; 而 155 m 高程处的土壤由于长期处于淹水状态, 基本上只有在夏季才处于落干状态, 有研究表明长期遭受江水浸泡的土壤, 会出现软化、泥化现象, 在江水的冲刷下, 表层土壤很容易被剥蚀^[14]; 而且该高程消落带落干时正值雨季, 土壤表层还要继续遭受雨水的冲刷. 而且, 在这种比较恶劣的侵蚀环境下, 地表植物很难生长发育和存活, 低矮稀疏, 2011 年 6 月的地上生物量调查显示, 175、165 及 155 m 高程分别为 342.8、264.0 和 192.1 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$. 以上环境因素导致 155 m 高程土壤中的营养元素贫瘠^[12], SOC 含量偏低. 关于消落带 SOC 在不同高程上的分布, 已有一些报道, 从研究结果来看还存在着差异: 有研究表明三峡库区消落带土壤有机质的平均含量与对照带之间无显著性差异^[10,13], 也有研究表明淹水会导致 SOC 含量显著低于未淹水土壤 ($P < 0.05$)^[12,26], 但淹水时间对 SOC 的影响并不一致, 贾国梅等^[26]发现随高程的降低 SOC 含量随之下降, 即淹水时间越长 SOC 含量越低, 而常超等^[12]却发现相对于中短期淹水高程, 长期淹水高程处反而会出现 SOC 累积现象. 不同的学者在三峡库区消落带的研究结果各异, 可能和土壤样品的采集年份有关, 三峡大坝在 2009 完成了最高 175 m 水位的实验性蓄水, 而在这之前, 每年的最高蓄水水位并不相同. 因此, 在不同的研究中, 土壤样品的采集年份不同, 消落带的范围、蓄水水位以及蓄水时间各不相同, 因而可能导致研究结果有所差异.

自然土壤中的氮素主要来源于动植物残体和生物固氮,也有少量来自于大气降水;土壤氮的输出主要是土壤中有机质的分解^[25],土壤中氮主要以有机态存在,占全氮含量的95%以上,因此,一般来说土壤TN含量应与土壤有机碳含量的变化趋势一致,并且TN一般与土壤有机质含量存在显著正相关关系^[27].本研究得到了与之相一致的结论,通过相关性分析发现,TN与SOC的含量呈极显著正相关($R=0.547, P<0.01$),说明土壤全氮含量的消长在很大程度上取决于土壤有机质含量的变化.

3.2 消落带土壤微生物生物量及其分配比例变化特征及影响因素的探讨

土壤微生物生物量的多少可以反映土壤同化和矿化能力的大小,是土壤活性大小的标志^[28].本研究结果表明SMBC和SMBN的含量均具有明显的季节变化特征,总的来说表现为秋季较高而夏季最低,可能是由于夏季高温低湿的土壤环境限制了土壤微生物活性所致.大量研究表明,在自然生态系统中土壤微生物生物量的季节变化显著,黄土丘陵沟壑区2种典型植被类型下土壤微生物生物量均存在明显的季节变化趋势^[29],扎龙湿地两种生境土壤微生物量碳、氮在整个生长季节内大致呈现出“W”型变化格局^[9],刘纯等^[30]研究发现SMBC和SMBN的季节变化因森林类型的差异而有所不同,但最高值多出现在8月中旬,另外,纳帕海湿地天然沼泽、沼泽化草甸和草甸SMBC基本上也呈现出秋季最高夏季较低的季节变化形式^[21],与本研究结果相似.微生物生物量随季节涨落与有机物的供应、植物生长状况及温度、湿度等环境因素有关.表4显示,本研究

区域内SMBC与SOC、TN、土壤含水率呈显著或极显著正相关,SMBC和SMBN均与地下5cm处温度和pH呈极显著负相关,说明土壤微生物量除了受到有机物质的影响还与无机环境紧密相关.温度是影响微生物生长繁殖的重要因素之一,目前关于温度对土壤微生物生物量影响的结论各不相同:一些研究表明土壤温度与微生物生物量呈正相关关系^[31,32],但也有研究发现当土壤温度较高时,泥炭土壤中微生物生物量碳呈降低趋势^[33],这些研究结论的差异可能与所处的研究区域有关,在低温环境下,温度的升高可能刺激微生物活性,而在高温环境下则可能起抑制作用.本研究地处亚热带气候区,在这样较高的温度背景下,温度的升高限制了土壤微生物活性.除土壤温度外,土壤湿度也是影响微生物活性的一个重要因子.植物和微生物的许多生命活动需要水分的参与,微生物产生的胞外酶和有机物的扩散都需要在液相中进行,含水量过高或者过低都会对微生物的量产生不利影响^[34].本研究中的土壤样品都是在消落带各高程落干期间采集,地表落干期间,土壤中的水分含量较低,各高程土壤重量含水量介于5%~35%之间,夏季土壤湿度尤其偏低[图4(a)],对土壤微生物活性可能主要起抑制作用,因而土壤含水率的升高有利于微生物活性的增强.土壤pH影响土壤微生物的种类及活性,微生物的繁殖生存需要一个适宜的土壤pH值范围,超过或低于此范围的pH值环境都会抑制土壤微生物量^[35].消落带各高程土壤落干期间pH值范围为6~8[图4(b)],表现为弱酸性、中性或弱碱性土壤环境,SMBC及SMBN与土壤pH值呈极显著

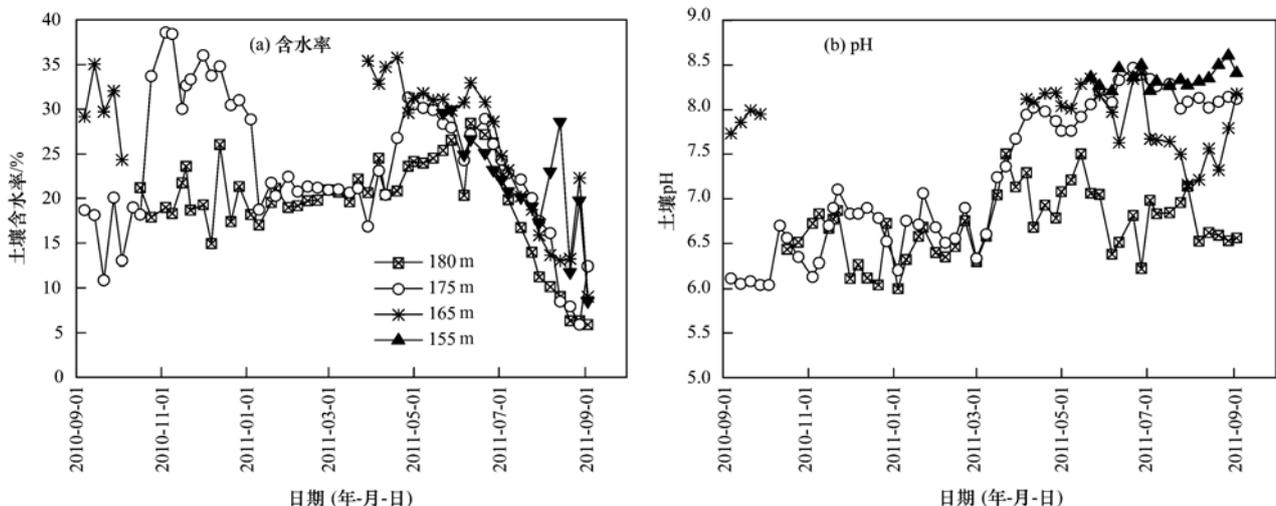


图4 消落带各高程土壤含水率及pH的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of soil moisture and pH in different heights in the drawdown area

负相关(表 4), 表明该研究区域土壤微生物可能适应酸性土壤环境, 这需要对土壤微生物种类进行进一步研究。

相对于未淹水的 180 m 高程, 175 m 和 165 m 中短期淹水高程 SMBC 含量升高, 而长期淹水的 155 m 高程则 SMBC 含量显著降低, 与 SOC 的高程变化相似, SMBC 在不同高程上的分布差异可能与淹水时间的长短、地表植物的生长发育状况以及江水的浸泡侵蚀有关, 这部分内容前文已叙述, 在此不再赘述。另外, 如前文所述, 土壤 pH 也是影响 SMBC 的一个重要因子, 相关分析表明, 二者呈极显著负相关(表 4), 如图 4(b) 所示, 相比于对照, 消落带各高程土壤 pH 值均有所升高, 其中, 155 m 高程 pH 值升高幅度最大, 180 m 高程处土壤 pH 值在一年中波动幅度不大, 介于 6~7 之间, 而 155 m 高程在整个出落期间都高于 8, 土壤环境由弱酸性演变为偏碱性, 土壤 pH 值的升高抑制了微生物活性, 导致 SMBC 含量降低。相同时间段内, 消落带 175 m 高程处 SMBN 显著高于对照点 180 m 高程, 165 m 高程处 SMBN 也略高于对照, 这与 SMBC、SOC 及 TN 的高程分布相类似, 但与 SMBC、SOC、TN 不同的是, 155 m 高程 SMBN 含量与对照点的值相接近, 并无显著性差异。造成这个特殊现象的原因, 目前还无法阐释, 还需要进一步的观测和研究。SOC、TN 可反映土壤的影响状况, SMBC、SMBN 可作为判断土壤质量状况的生物学指标, 综合来看, 三峡库区形成后, 消落带中短期淹水的 175 m 和 165 m 高程处土壤质量得到改善, 而长期淹水的 155 m 高程处土壤质量变差。

土壤微生物商及 SMBN 分配比例从微生物学的角度揭示了土壤肥力的差异, 由于 SMBC 和 SMBN 周转快, 所以它们分配比例的值越大, 土壤有机碳氮周转也就越快^[36]。消落带上微生物商及 SMBN 分配比例均在夏季最低, 说明土壤有机碳氮虽然在夏季含量较高, 但周转速率却最慢。消落带 175 m 和 165 m 高程土壤微生物商及 SMBN 分配比例均与对照 180 m 高程无显著差异, 155 m 高程土壤微生物商低于对照, 而 SMBN 分配比例却高于对照, 表明中短期淹水对土壤有机碳氮的周转速率影响不明显, 但长期淹水却抑制了 SOC 的周转而促进了 TN 的周转。

4 结论

与从未淹水的对照点相比, 淹水后的土壤 SOC

和 TN 的含量表现出明显的季节变化趋势, 表现为春夏季高于秋冬季; 各高程 SMBC 与 SMBN 的含量及其分配比例的季节变化形式表现为秋高夏低, 说明夏季高温低湿的土壤环境限制了微生物活性及土壤有机碳氮的周转速率。与对照 180 m 高程相比, 消落带中短期淹水的 175 m 和 165 m 高程 SOC、TN、SMBC 及微生物商、SMBN 及其分配比例均得到不同程度的提高, 而长期淹水的 155 m 高程除了 SMBN 及其分配比例与对照无显著差异外, 其他指标均显著低于对照, 表明中短期淹水可改善土壤质量, 而长期淹水则导致土壤质量变差。SMBC 和 SMBN 均与地下 5 cm 处温度和 pH 呈极显著负相关, 表明地下 5 cm 处的温度以及 pH 对土壤微生物生物量有强烈的影响。

参考文献:

- [1] He Z L, Yang X E, Baligar V C, *et al.* Microbiological and biochemical indexing systems for assessing quality of acid soils [J]. *Advances in Agronomy*, 2003, **78**: 89-138.
- [2] Iqbal J, Hu R G, Feng M L, *et al.* Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses; a case study at Three Gorges Reservoir Area, South China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **137**(3-4): 294-307.
- [3] Lundquist E J, Jackson L E, Scow K M, *et al.* Changes in microbial biomass and community composition, and soil carbon and nitrogen pools after incorporation of rye into three California agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(2): 221-236.
- [4] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(5): 1445-1451.
- [5] 张成霞, 南志标. 土壤微生物生物量的研究进展 [J]. *草业科学*, 2010, **27**(6): 50-57.
- [6] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局 [J]. *生态学报*, 2010, **30**(12): 3135-3143.
- [7] 任佐华, 张于光, 李迪强, 等. 三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(11): 3232-3238.
- [8] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 277-282.
- [9] 张静, 马玲, 丁新华, 等. 扎龙湿地不同生境土壤微生物生物量碳氮的季节变化 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(13): 3712-3719.
- [10] 郭劲松, 黄轩民, 张彬, 等. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征 [J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 213-219.
- [11] 谢德体, 范小华. 三峡库区消落带生态系统演变与调控 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. 1-3.
- [12] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响 [J]. *自然资源学报*, 2011, **26**(7): 1236-

- 1244.
- [13] 王晓荣,程瑞梅,肖文发,等. 三峡库区消落带初期土壤养分特征[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(2): 281-289.
- [14] 康义,郭泉水,程瑞梅,等. 三峡库区消落带土壤物理性质变化[J]. 林业科学, 2010, **46**(6): 1-5.
- [15] 李飞,张文丽,刘菊,等. 三峡水库泄水期消落带土壤微生物活性[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(4): 968-974.
- [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. 228-233.
- [17] 韩玮,申双和,谢祖彬,等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(18), doi: 10.5846/stxb201504220829.
- [18] 吴艳,江长胜,郝庆菊. 西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2804-2809.
- [19] 徐明岗,于荣,孙小凤,等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(4): 459-465.
- [20] 侯翠翠,宋长春,李英臣,等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 290-297.
- [21] 赖建东,田昆,郭雪莲,等. 纳帕海湿地土壤有机碳和微生物量碳研究[J]. 湿地科学, 2014, **12**(1): 49-54.
- [22] 马维伟,王辉,李广,等. 甘南尕斯湖湿地不同植被退化阶段土壤有机碳含量及动态[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(5): 254-259.
- [23] 潘新丽,林波,刘庆. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(8): 1637-1643.
- [24] 徐小锋. 小叶章根际微生态系统有机碳动态模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [25] 白军红,邓伟,张玉霞,等. 洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J]. 环境科学, 2002, **23**(2): 77-81.
- [26] 贾国梅,牛俊涛,席颖. 三峡库区消落带湿地土壤有机碳及其组分特征[J]. 土壤, 2015, **47**(5): 926-931.
- [27] 李扬,王冬梅,信忠保,等. 漓江水陆交错带不同淹没区植物多样性与土壤特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(15): 5121-5130.
- [28] Wang X L, Xu L G, Wan R R, *et al.* Seasonal variations of soil microbial biomass within two typical wetland areas along the vegetation gradient of Poyang Lake, China[J]. CATENA, 2016, **137**: 483-493.
- [29] 胡婵娟,刘国华,陈利顶,等. 黄土丘陵沟壑区坡面上土壤微生物量碳、氮的季节变化[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(10): 2227-2232.
- [30] 刘纯,刘延坤,金光泽. 小兴安岭6种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(2): 451-459.
- [31] 立天宇,康峰峰,韩海荣,等. 冀北辽河源油松天然林土壤微生物碳代谢特征研究[J]. 土壤, 2015, **47**(3): 550-557.
- [32] 邹莉,于洋,孙婷婷,等. 原始红松林土壤微生物量动态及其与土壤理化性质的关系[J]. 草业科学, 2014, **31**(1): 15-21.
- [33] Domisch T, Finér L, Lehto T, *et al.* Effect of soil temperature on nutrient allocation and mycorrhizas in Scots pine seedlings[J]. Plant and Soil, 2002, **239**(2): 173-185.
- [34] 庞绪,何文清,严昌荣,等. 耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(4): 1308-1316.
- [35] Srivastava S C. Microbial C, N and P in dry tropical soils: seasonal changes and influence of soil moisture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, **24**(7): 711-714.
- [36] 骆坤,胡荣桂,张文菊,等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 676-684.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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