

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜酸降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系

吴静, 陈书涛*, 胡正华, 张旭

(南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 为研究不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳(DOC)和转化酶的关系, 设置了室内培养实验. 采集南京市周边老山、紫金山、宝华山的土壤, 研究不同土壤的微生物呼吸对温度升高的响应规律, 并分析土壤 DOC 含量及转化酶活性. 结果表明, 不同土壤的累积微生物呼吸与土壤温度之间的关系均可用指数方程描述, 其 P 值均达到极显著水平($P < 0.001$), 不同地点土壤的微生物呼吸温度敏感系数(Q_{10} 值)在 1.762~1.895 之间变异. 累积土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值随着土壤温度升高表现出降低的趋势. 培养后 27 d 土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值与培养后 1 d 的 Q_{10} 值无显著差异($P > 0.05$), 这表明难分解有机质的温度敏感性与易分解有机质的温度敏感性一致. 对于所有土壤而言, 累积土壤微生物呼吸与 DOC 含量之间存在极显著($P = 0.003$)的线性回归关系, DOC 可以解释累积土壤微生物呼吸 31.6% 的变异性. 无论是单独分析不同土壤还是综合所有土壤的测定结果, 累积微生物呼吸与土壤转化酶活性均存在极显著($P < 0.01$)的一元线性回归关系, 由此说明转化酶活性是衡量土壤微生物呼吸大小的一个较好的指标.

关键词: 温度; 土壤微生物呼吸; 温度敏感系数; 水溶性有机碳; 转化酶

中图分类号: X144; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1497-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.04.050

Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase

WU Jing, CHEN Shu-tao*, HU Zheng-hua, ZHANG Xu

(School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to investigate the soil microbial respiration under different temperature conditions and its relationship to soil dissolved organic carbon (DOC) and invertase, an indoor incubation experiment was performed. The soil samples used for the experiment were taken from Laoshan, Zijinshan, and Baohuashan. The responses of soil microbial respiration to the increasing temperature were studied. The soil DOC content and invertase activity were also measured at the end of incubation. Results showed that relationships between cumulative microbial respiration of different soils and soil temperature could be explained by exponential functions, which had P values lower than 0.001. The coefficient of temperature sensitivity (Q_{10} value) varied from 1.762 to 1.895. The Q_{10} value of cumulative microbial respiration decreased with the increase of soil temperature for all soils. The Q_{10} value of microbial respiration on 27 days after incubation was close to that of 1 day after incubation, indicating that the temperature sensitivity of recalcitrant organic carbon may be similar to that of labile organic carbon. For all soils, a highly significant ($P = 0.003$) linear relationship between cumulative soil microbial respiration and soil DOC content could be observed. Soil DOC content could explain 31.6% variances of cumulative soil microbial respiration. For the individual soil and all soils, the relationship between cumulative soil microbial respiration and invertase activity could be explained by a highly significant ($P < 0.01$) linear regression function, which suggested that invertase was a good indicator of the magnitude of soil microbial respiration.

Key words: temperature; soil microbial respiration; temperature sensitivity coefficient; dissolved organic carbon; invertase

大气温室气体浓度升高导致的全球变暖问题引起了人们的广泛关注. CO_2 是最主要的温室气体, 大气中 CO_2 浓度的变化与陆地生态系统中碳循环过程密切相关. 土壤呼吸是陆地生态系统中重要的碳通量过程之一^[1~3], 其年通量估算值约为 98 Pg^[4], 比每年化石燃料燃烧排放 CO_2 量高 1 个数量级^[5].

一般而言, 土壤呼吸可较简化地划分为土壤微生物呼吸(异养呼吸)和根呼吸(自养呼吸)^[6, 7], 土壤微生物呼吸是土壤呼吸的重要组分, 在自然生态系统中, 土壤微生物呼吸与净初级生产力的差值即为净生态系统交换量^[8, 9], 研究土壤微生物呼吸作

用的影响因素对了解土壤碳循环过程具有重要意义. 土壤温度是影响土壤微生物呼吸的最主要的因素^[10], 人们常用 Q_{10} 值(温度升高 10℃, 土壤微生物呼吸变为原来的倍数)来表示土壤微生物呼吸对温度的响应程度^[11, 12]. 土壤温度会通过影响酶活性进而影响土壤微生物呼吸的温度敏感性, 大量研究

收稿日期: 2014-10-10; 修订日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375006, 41175136); 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介: 吴静(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统碳氮循环与气候变化, E-mail: wujing_0630@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: chenstyf@aliyun.com

表明,在不受其他限制因子影响的条件下,土壤微生物呼吸的温度敏感性随着温度的升高而下降^[13]. 水分会通过对基质扩散的影响而作用于土壤微生物呼吸的温度敏感性,一般而言,在干旱时期观测得到的土壤微生物呼吸温度敏感性较低^[14]. 不同的微生物群落有着其特定的温度适应范围,土壤微生物群落结构的改变会影响到土壤微生物呼吸温度敏感性的变化^[15]. 土壤水溶性有机碳(DOC)含量是重要的土壤理化指标,土壤 DOC 含量随土壤条件的改变而改变,它既是土壤微生物呼吸的底物来源,又是土壤中微生物呼吸的产物. 转化酶参与土壤碳的周转和循环,转化酶是一种可以把土壤中高分子量的糖分子分解为能被土壤微生物和植物吸收利用的葡萄糖和果糖的水解酶,是重要的土壤生化指标^[16~18],转化酶在土壤碳循环中具有重要作用. 虽然以往人们针对不同温度下的某种土壤的微生物呼吸进行了大量研究^[19],但关于不同土壤的微生物呼吸对土壤温度变化的响应方式研究相对较少^[20],并且关于土壤微生物呼吸与土壤 DOC 含量及转化酶活性关系的研究更为鲜见,土壤 DOC 含量及转化酶

活性与土壤碳循环过程有关,研究土壤 DOC 含量及转化酶活性与土壤微生物呼吸的关系有助于从机制上阐明土壤微生物呼吸的影响因素^[21].

本研究观测不同温度条件下的土壤微生物呼吸,分析土壤微生物呼吸与土壤 DOC 含量及转化酶活性的关系,以期为更准确地了解土壤微生物呼吸这一重要的碳循环过程提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 取样地点概况

取土壤样品的地点位于南京老山和紫金山、镇江宝华山,这 3 个观测地点位于北亚热带的北缘地区,具有典型的北亚热带植被,各取样地点的土壤类型均为黄棕壤(灰马肝土属). 虽然 LS1、LS2、LS3 地点的土壤均为黄棕壤且土壤有机碳及全氮含量差别不大,但这 3 个地点的植被类型存在差异,LS1、LS2、LS3 地点的代表性植被分别为杜仲林、马尾松及栎林、竹林. 取样时,以土钻钻取 0~20 cm 表土,剔除土壤中的残根及凋落物. 取样地点概况及 0~20 cm 表土有机碳和全氮含量见表 1.

表 1 取样地点概况

Table 1 A survey of soil sampling sites

样点标号	纬度(N)	经度(E)	地名	有机碳/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	植被类型
LS1	32°09'13"	118°40'24"	老山	32.4	1.1	落叶阔叶林
LS2	32°07'10"	118°35'27"	老山	34.1	1.2	针阔混交林
LS3	32°06'06"	118°35'16"	老山	31.8	1.1	落叶阔叶林
ZJS	32°05'10"	118°49'59"	紫金山	35.5	1.7	落叶阔叶林
BHS	32°08'29"	118°05'48"	宝华山	34.8	1.4	灌丛

1.2 培养实验

将供试土壤自然晾干,用研钵磨碎过 2 mm 筛备用,分别称量 60 g 干土放入 820 mL、口径为 79 mm 的广口培养瓶中,加水 20 mL,使土壤的含水量为 25%. 以往研究表明:25% 左右的含水量对应于土壤微生物呼吸量的最优值^[22],在此条件下有利于研究土壤微生物呼吸的温度敏感性. 为抵消被培养土壤水分蒸发的影响,在培养实验期间采用称重法向培养瓶中加水,使土壤含水量保持为 25%. 采用称重法补水时,将培养瓶置于天平上,测定由于水分蒸发导致的水分减少的质量,再向土壤中加入与减少的质量等量的蒸馏水. 向土壤中加水时使用小滴管轻轻滴加,以尽量减少水分添加对土壤呼吸在短期内的激发效应. 另外,由于每个培养瓶中均添加了水,因此,土壤水分添加的激发效应可视为系统误差. 在正式进行不同温度处理之前预先对土壤进行 3 d 的预培养,之后把 5 个培养箱温度分别设置

为 5、10、15、20、25℃,将装有 5 种不同土壤的培养瓶放入 5 个设定了不同温度的培养箱中,即每种土壤均放入 5 个不同温度的培养箱中. 每个培养温度下的每种土壤设置 3 个重复,总计 75 个培养瓶.

1.3 土壤微生物呼吸速率的测定

采用便携式土壤 CO₂ 排放量测量系统测定 (SoilBox-FMS, Miller 公司,美国) 土壤微生物呼吸速率. 分别在设定不同温度条件后的第 1、2、3、5、7、10、14、20、27d 观测土壤 CO₂ 排放速率. 测定时,通过导管将土壤 CO₂ 排放量测量系统连接到待测玻璃瓶瓶盖的采气口上,仪器每秒钟记录 1 次瓶内 CO₂ 气体的浓度,仪器每轮记录瓶内 CO₂ 气体浓度的时间段为 3 min,仪器通过测定玻璃瓶内 CO₂ 浓度随时间的变化进而计算出土壤微生物呼吸速率,具体的计算公式为:

$$R = \frac{C \times P \times K}{T \times W}$$

式中, R 为土壤微生物呼吸速率 [$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$], C 为测试时间内 CO_2 浓度变化的直线斜率 ($\times 10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$), P 是测量时瓶内的大气压强 (kPa), K 是气体质量随时间的转化系数, T 是转换之后的华氏温度 (K), W 是培养瓶内土壤干重 (g).

1.4 土壤 DOC 含量及转化酶的测定

培养实验结束后,测定土壤 DOC 含量及转化酶活性. 土壤 DOC 含量采用 Mn(III) -焦磷酸比色法测定^[23]; 土壤转化酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[24, 25].

1.5 数据分析

采用加权累积法计算 27 d 的土壤微生物呼吸总量,即累积土壤微生物呼吸,其具体方法为: 以每两个观测日的土壤 CO_2 排放速率计算平均值,以该平均值乘以两个观测日间隔的天数可得该阶段的土壤 CO_2 排放量,继而把所有观测阶段的土壤 CO_2 排放量相加可得 27 d 培养期间的累积 CO_2 总排放量. 利用 SPSS 16.0 软件的单因素方差分析模块分析 5 个温度梯度下的土壤微生物呼吸差异是否显著,并利用单因素方差分析模块分析 5 种土壤之间的呼吸、DOC 含量及酶活性是否存在显著差异. 利用 EXCEL 2003 制作累积土壤微生物呼吸的动态变化图以及土壤微生物呼吸与温度、土壤微生物呼吸与 DOC、土壤微生物呼吸与转化酶之间的回归关系图.

2 结果与分析

2.1 土壤微生物呼吸的时间变异性

不同温度、不同土壤的累积微生物呼吸量均随

着培养时间的延长而增大,培养实验前期(即培养后第 1 d)和后期(即培养后第 27 d)累积微生物呼吸量的增加速率差异较大,这表明在整个培养实验阶段前期微生物呼吸量高于培养实验后期的量值(图 1). 对于同一种土壤而言,累积土壤微生物呼吸量随土壤温度的升高而增大,在不同观测日期的累积土壤微生物呼吸量差异达到极显著水平($P < 0.001$). 对于不同土壤而言,相同土壤温度下对应的累积土壤微生物呼吸量存在极显著差异($P < 0.001$),LS3 地点的累积土壤微生物呼吸量最大,BHS 地点的累积土壤微生物呼吸量最小. 随着培养温度升高,每种土壤的累积微生物呼吸均表现出逐渐升高的趋势,不同土壤温度下的累积土壤微生物呼吸的差异达到极显著水平($P < 0.001$).

2.2 土壤微生物呼吸与温度的关系

回归分析表明,不同土壤的累积微生物呼吸与土壤温度之间的关系均可用指数方程描述(图 2),其 P 值均达到极显著水平($P < 0.001$). 土壤温度对于 LS3 地点的累积土壤微生物呼吸具有最高的解释性($R^2 = 0.994$),而对于 LS2 地点的累积土壤微生物呼吸具有最低的解释性($R^2 = 0.978$). LS1、LS2、LS3、ZJS、BHS 地点的累积土壤微生物呼吸温度敏感系数分别为 1.762、1.804、1.850、1.768、1.895.

以相邻 3 个温度点(例如: 5、10、15℃)对应的土壤微生物呼吸值进行回归,可得 1 个指数回归方程,通过该指数方程可计算出 3 个温度点的平均值所对应的 Q_{10} 值(表 2). 如果考虑不同的培养温度

表 2 在不同温度范围内不同土壤的累积微生物呼吸与土壤温度的拟合方程
Table 2 Functions fitting the relationship between cumulative microbial respiration and soil temperature for different soils under different temperature ranges

样点标号	温度范围/℃	方程	R^2	Q_{10}
LS1	5 ~ 15	$R_m = 0.090e^{0.065 2t}$	0.996	1.919
	10 ~ 20	$R_m = 0.106e^{0.052 4t}$	0.996	1.689
	15 ~ 25	$R_m = 0.111e^{0.050 2t}$	0.998	1.652
LS2	5 ~ 15	$R_m = 0.105e^{0.072 5t}$	0.971	2.065
	10 ~ 20	$R_m = 0.142e^{0.049 9t}$	1.000	1.647
	15 ~ 25	$R_m = 0.142e^{0.050 0t}$	1.000	1.649
LS3	5 ~ 15	$R_m = 0.125e^{0.067 0t}$	0.987	1.954
	10 ~ 20	$R_m = 0.141e^{0.058 6t}$	0.998	1.797
	15 ~ 25	$R_m = 0.142e^{0.057 5t}$	0.996	1.777
ZJS	5 ~ 15	$R_m = 0.082e^{0.069 0t}$	0.982	1.994
	10 ~ 20	$R_m = 0.105e^{0.050 3t}$	0.999	1.654
	15 ~ 25	$R_m = 0.109e^{0.048 2t}$	1.000	1.619
BHS	5 ~ 15	$R_m = 0.060e^{0.074 6t}$	0.994	2.109
	10 ~ 20	$R_m = 0.074e^{0.058 8t}$	0.996	1.800
	15 ~ 25	$R_m = 0.078e^{0.055 8t}$	0.999	1.747

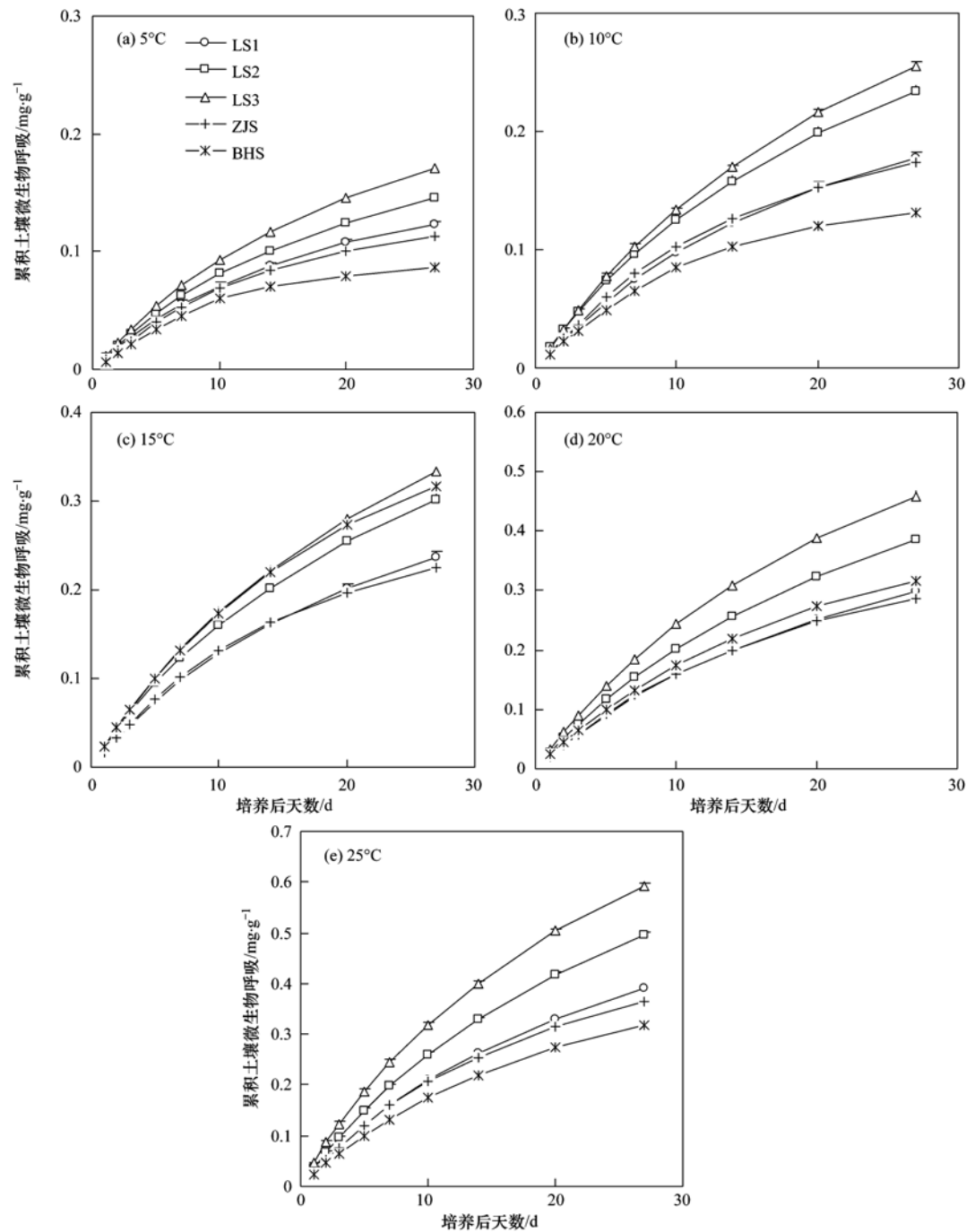


图 1 累积土壤微生物呼吸的时间变异性

Fig. 1 Temporal variability in the cumulative soil microbial respiration

范围下(例如: 5 ~ 15、10 ~ 20、15 ~ 25℃)累积土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值,则可见随着平均温度升高 5 种土壤累积微生物呼吸的 Q_{10} 值均呈现出逐渐降低的趋势(表 2). 例如: 在平均温度 10、15、20℃ 下 LS1 地点累积土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值分别为 1.919、1.689、1.652.

如果将培养后每一次测定的土壤微生物呼吸速率与土壤温度分别进行线性回归,则可见土壤微生物

呼吸速率与土壤温度均表现出极显著的指数回归关系(图 3),且培养后期的温度敏感性与培养前期的温度敏感性无显著差异($P > 0.05$),由于土壤微生物在初期分解的有机质为易分解组分,而在后期分解的有机质为难分解组分,这表明土壤难分解有机质组分与易分解有机质组分具有类似的 Q_{10} 值.

2.3 土壤微生物呼吸与 DOC 的关系

土壤 DOC 含量与土壤温度的关系可用指数方

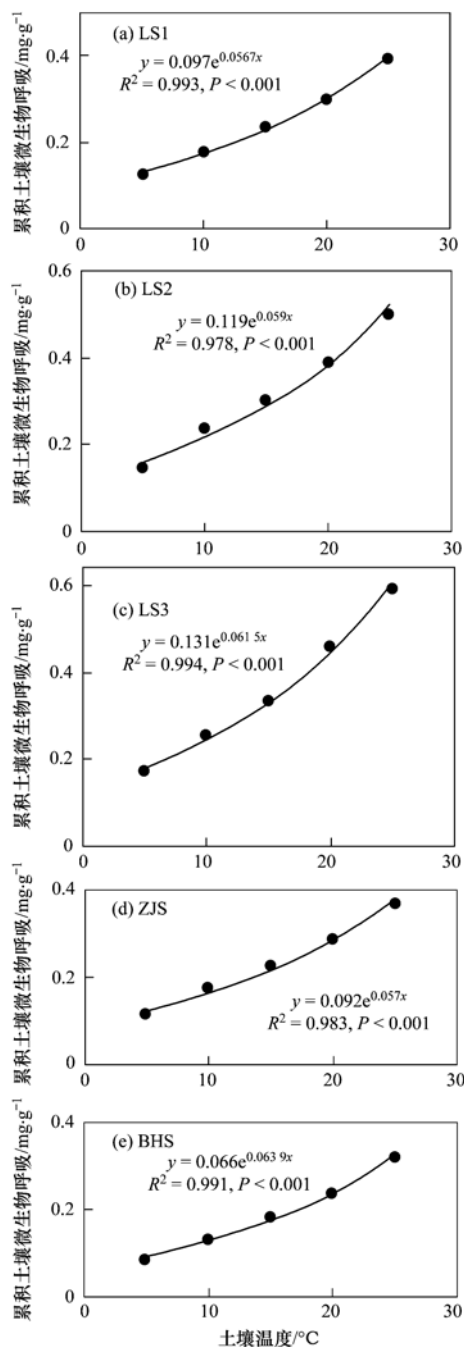


图2 累积土壤微生物呼吸与土壤温度的关系

Fig. 2 Relationship between cumulative soil microbial respiration and soil temperature

程描述(图4),土壤温度对DOC的解释性均在91.1%以上。与土壤微生物呼吸类似的是,DOC含量也存在温度敏感性,随着温度升高,土壤中DOC含量也随之增加。以往的研究表明土壤样品中的可溶性有机碳的产生量随温度增加而呈指数形式的增加^[26],在这里,也可将土壤温度升高10℃土壤中DOC含量变化为原来的倍数定义为DOC的温度敏感性系数,在考虑全部样本数据的前提下,进而计算

可得不同土壤的DOC温度敏感性系数在1.814~2.438之间变异。累积土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值与DOC的温度敏感性具有显著($P=0.039$)的线性回归关系(图5)。DOC的温度敏感性可解释累积土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值的80.6%的变异。对于所有土壤而言,累积土壤微生物呼吸与DOC含量之间存在极显著($P=0.003$)的线性回归关系(图6)。DOC可以解释累积土壤微生物呼吸31.6%的变异性。

2.4 土壤微生物呼吸与转化酶的关系

对于不同土壤而言,27 d的累积土壤微生物呼吸与转化酶活性存在极显著的一元线性回归关系(图7),不同土壤的累积微生物呼吸对转化酶活性增加的响应程度存在差异。如果考虑所有土壤的累积微生物呼吸与转化酶活性的关系,也可见两者之间呈现出极显著的线性回归关系(图8),转化酶可以解释不同土壤温度条件下累积土壤微生物呼吸56.7%的变异。图7和8表明,无论是单独分析不同土壤还是综合所有土壤的测定结果,累积微生物呼吸与土壤转化酶活性均存在极显著的一元线性回归关系,由此说明转化酶活性是衡量土壤微生物呼吸量大小的一个较好的指标。

由于DOC含量及土壤转化酶活性对土壤微生物呼吸均有影响,故而以DOC含量(x_1)及土壤转化酶活性(x_2)作为2个变量分析其对土壤微生物呼吸(y)的复合影响规律,结果表明, y 与 x_1 和 x_2 的关系可用如下方程描述:

$$y = 0.262x_1 + 0.003x_2 + 0.088$$

$$(R^2 = 0.593, P < 0.001)$$

该方程比基于DOC或转化酶的单因素模拟方程对土壤微生物呼吸的解释性有所提高。

3 讨论

3.1 土壤微生物呼吸的温度敏感性

土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值受土壤微生物、环境因子(如温度、水分)、呼吸底物的影响。比如:土壤微生物的生理生化特征、种群结构、群落组成等因素都可能改变土壤微生物呼吸对温度的响应方式。本研究中,LS1、LS2、LS3、ZJS、BHS地点的累积土壤微生物呼吸 Q_{10} 值分别为1.762、1.804、1.850、1.768、1.895,LS1地点的累积土壤微生物呼吸 Q_{10} 值最低,这可能与该地点的全氮含量相对较低有关;BHS地点的累积土壤微生物呼吸 Q_{10} 值最高,该地点的凋落物量相对较大,这造成了土壤养分相对较丰富,由此导致 Q_{10} 值最高。

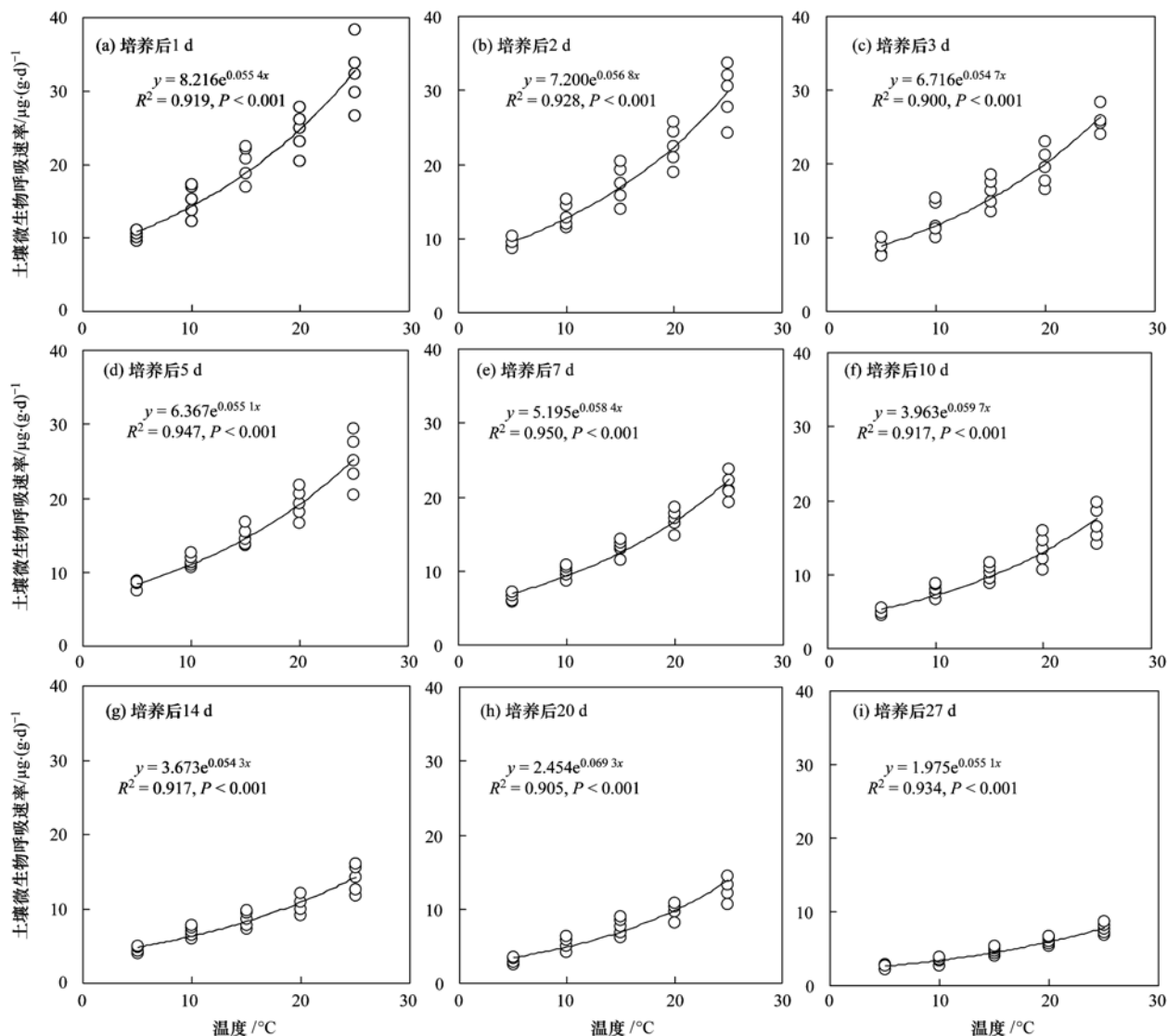


图3 不同培养天数后土壤微生物呼吸与温度的关系

Fig. 3 Relationship between soil microbial respiration and soil temperature after different incubation times

Fierer 等^[27]发现,在室内控制条件下采用外加有机质(凋落物)后,培养实验期间随着土壤微生物呼吸速率的逐步下降土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值越来越高, Mikan 等^[28]对阿拉斯加解冻土壤的研究也表明,土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值随培养时间的延长而逐渐增大,而 Fang 等^[29]、Leifeld 等^[30]的连续培养实验结果都表明培养初期和培养后期土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值差异不大。

本研究中,不同土壤的 Q_{10} 值在 1.762 ~ 1.895 之间变化,这些量值与基于酶动力学的生物反应的典型温度敏感性(大约为 2)存在差异^[15]。如果考虑不同培养时期的 Q_{10} 值,可见培养后 1 d 与培养后 27 d 的温度敏感性非常接近(图 3),土壤难分解有机质组分和易分解有机质组分具有相同的 Q_{10} 值。这

与 Fierer 等^[27]和 Mikan 等^[28]的结果存在差异,但与 Fang 等^[29]和 Leifeld 等^[30]的研究结果具有一致性。

本研究还表明,土壤的 Q_{10} 值与 DOC 的温度敏感系数呈正相关关系,土壤中的 DOC 既是土壤微生物呼吸的底物来源,又是土壤中微生物呼吸的产物,这一方面说明土壤 Q_{10} 值与土壤中的呼吸底物来源有密切关系,另一方面说明土壤微生物呼吸和土壤中可溶出的 DOC 含量均受温度的影响,且二者对温度的响应模式类似。

3.2 土壤微生物呼吸与 DOC

虽然关于 DOC 作为土壤微生物呼吸底物的报道相对较少,但有限的研究表明 DOC 含量与土壤微生物呼吸具有正相关关系。高会议等^[31]的田间观测结果表明,同一生育期不同处理间 DOC 含量与土

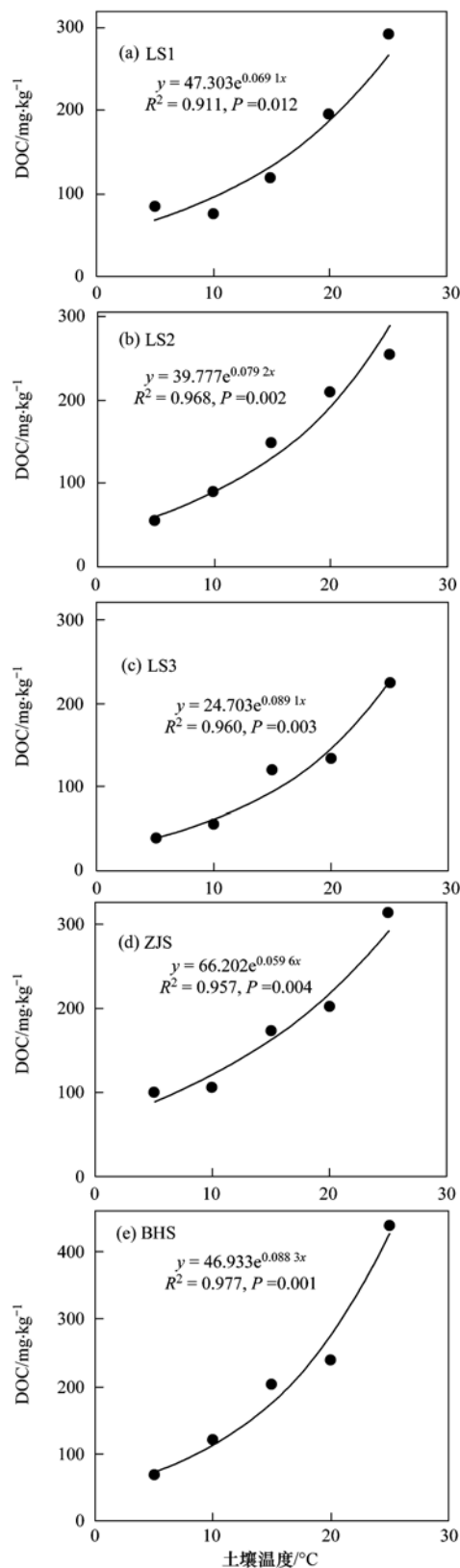


图4 土壤水溶性有机碳(DOC)含量与土壤温度的关系
Fig. 4 Relationship between dissolved organic carbon content in soil and soil temperature

壤呼吸之间存在显著的相关关系。有研究表明,控

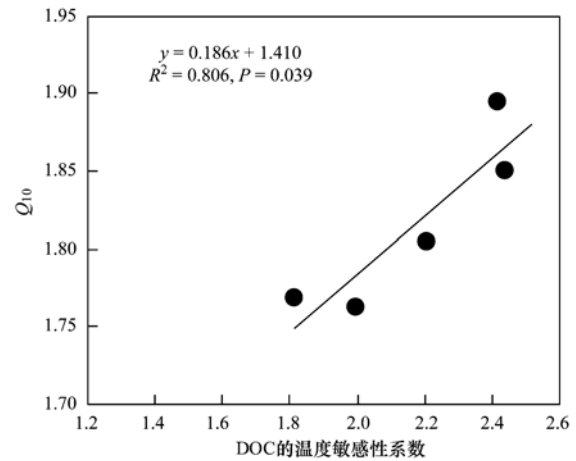


图5 累积土壤微生物呼吸的温度敏感系数(Q_{10})与DOC的温度敏感系数的关系

Fig. 5 Relationship between the temperature sensitivity coefficient of cumulative soil microbial respiration and the temperature sensitivity coefficient of DOC

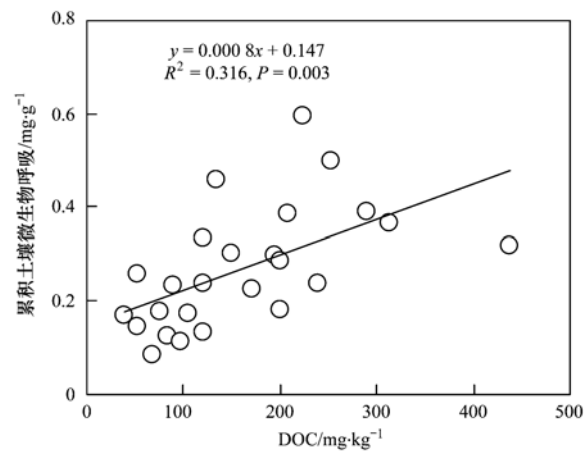


图6 累积土壤微生物呼吸与DOC的关系
Fig. 6 Relationship between cumulative soil microbial respiration and DOC

制土壤中DOC产生量与控制CO₂排放和微生物活性的因子是一致的^[32, 33]。Seto等^[34]的研究表明土壤CO₂排放速率与DOC浓度极显著相关,且土壤CO₂排放速率可以由土壤DOC含量和土壤温度来预测。黄靖宇等^[35]报道土壤DOC与微生物生物量碳有显著的正相关关系,但与土壤呼吸没有显著相关性。王峰等^[36]发现施用有机肥后土壤呼吸速率和土壤DOC含量均显著提高,这与李伟成等^[37]观测到的酒竹人工林土壤呼吸与DOC含量显著正相关的结果一致。土壤中有有机碳在矿化前要先进行解聚和溶解。即在矿化过程释放CO₂前要先进入土壤溶液中混合,DOC分解的难易程度决定了土壤微生物呼吸量值的大小^[38]。土壤微生物呼吸与DOC的

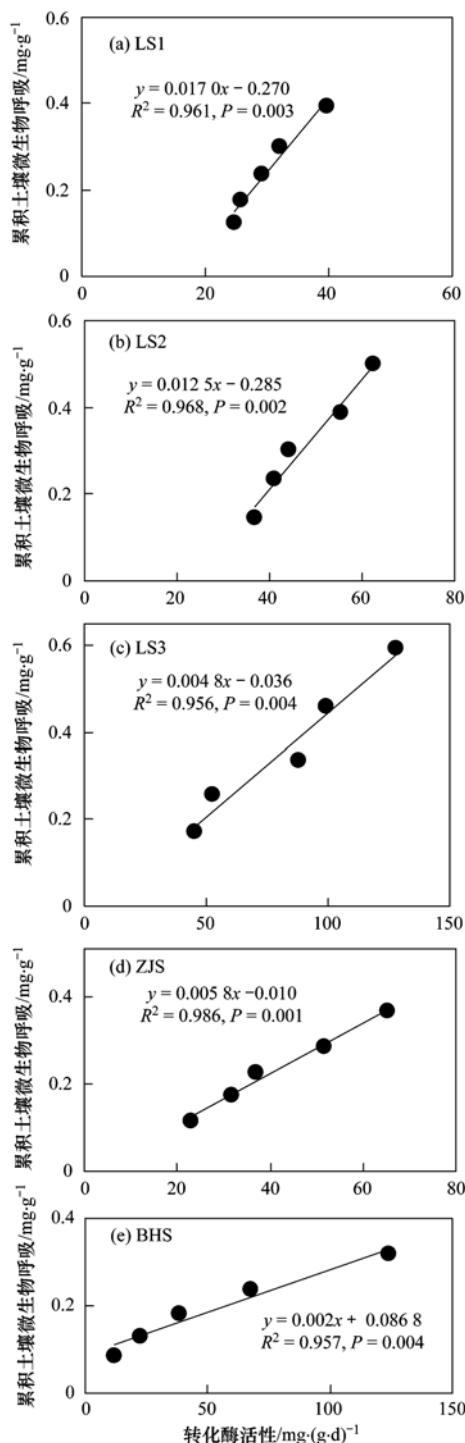


图7 不同土壤微生物呼吸与土壤转化酶活性的关系

Fig. 7 Relationship between microbial respiration of different soils and soil invertase activity

产生过程具有同步性. 土壤微生物呼吸与 DOC 的产生过程均受土壤温度的控制, 温度越高, 土壤微生物呼吸量越大, DOC 的产生速率也越大(图 6).

3.3 土壤微生物呼吸与转化酶

转化酶参与土壤碳的周转和循环^[39, 40]. 转化酶能催化糖的水解过程^[41], 转化酶活性与土壤中的

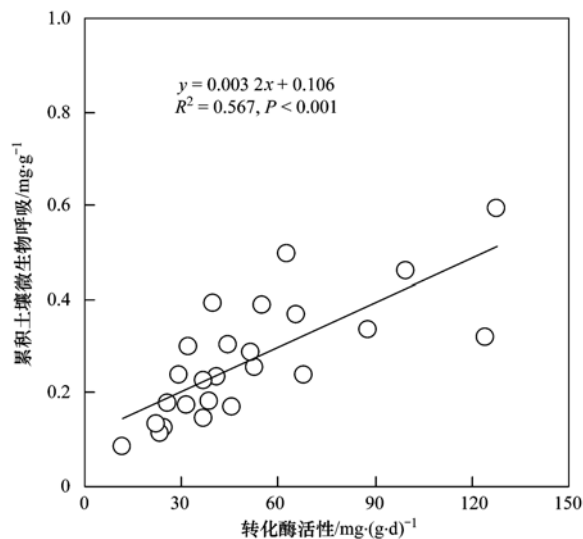


图8 土壤微生物呼吸与土壤转化酶活性的关系

Fig. 8 Relationship between soil microbial respiration and soil invertase activity

腐殖质、水溶性有机质和黏粒含量以及微生物数量和其活动呈正相关, 人们常用土壤转化酶活性来表征土壤的熟化程度和肥力水平^[42, 43]. 转化酶在参与土壤碳循环的过程中会释放低分子量的糖, 这成为微生物重要的碳源和能量源^[44, 45]. 本研究中, 土壤微生物呼吸与转化酶活性具有极显著的线性回归关系(图 7、图 8). Xiong 等^[46]的研究表明, 土壤呼吸和转化酶活性的变化具有一致性, 两者间具有正相关关系. Chen 等^[47]认为转化酶活性与土壤中高密度的有机碳数量和微生物生物量有关. Fereidooni 等^[48]报道土壤微生物量与转化酶活性具有显著的正相关关系. 而荆瑞勇等^[49]观测到在氯嘧磺隆农药胁迫情况下土壤微生物呼吸与转化酶活性存在负相关关系. 本研究结果与 Xiong 等^[46]的研究结果一致, 即: 土壤呼吸和转化酶活性的变化具有一致性, 两者间具有正相关关系. 土壤微生物呼吸为酶促反应, 虽然转化酶活性不能代表土壤中所有类型微生物的数量和活性, 但它能代表土壤中与碳转化有关的微生物类群. 关于在不同环境条件下土壤微生物呼吸与土壤酶活性的关系值得进一步深入研究.

4 结论

(1) 不同土壤的微生物呼吸与土壤温度之间的关系均可用指数方程描述, 土壤微生物呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 值随着土壤温度升高表现出降低的趋势. 培养后第 27 d 的温度敏感性与培养后第 1 d 的温度敏感性无显著差异, 这表明土壤难分解有机

质组分与易分解有机质组分具有类似的 Q_{10} 值。

(2) 对于所有土壤而言, 土壤微生物呼吸与 DOC 含量之间存在极显著的线性回归关系, DOC 可以解释土壤微生物呼吸 31.6% 的变异性; 如果考虑所有土壤的微生物呼吸与转化酶活性的关系, 也可见两者之间呈现出极显著的线性回归关系, 转化酶可以解释不同土壤温度条件下土壤微生物呼吸 56.7% 的变异。

参考文献:

- [1] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 115-146.
- [2] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. *Nature*, 2001, **411**(6839): 789-792.
- [3] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**(1): 3-27.
- [4] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 2010, **464**(7288): 579-582.
- [5] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(8): 800-812.
- [6] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(10): 1756-1766.
- [7] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 425-448.
- [8] DeFries R S, Field C B, Fung I, *et al.* Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**(3): 803-815.
- [9] Steffen W L, Noble I, Canadell J, *et al.* The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol [J]. *Science*, 1998, **280**(5368): 1393-1394.
- [10] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**(2): 217-227.
- [11] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, **440**(7081): 165-173.
- [12] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, **44B**(2): 81-89.
- [13] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(2): 154-164.
- [14] Nikolova P S, Raspe S, Andersen C P, *et al.* Effects of the extreme drought in 2003 on soil respiration in a mixed forest [J]. *European Journal of Forest Research*, 2009, **128**(2): 87-98.
- [15] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(8): 2301-2311.
- [16] 薛冬, 姚槐应, 何振立, 等. 红壤酶活性与肥力的关系 [J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(8): 1455-1458.
- [17] 邵兴华, 张建忠, 胡兴万, 等. 红壤不同利用方式下理化性状及土壤生物学特性的变化 [J]. *新疆农业大学学报* 2011, **34**(4): 339-343.
- [18] Schinner F, Von Mersi W. Xylanase-, CM-cellulase- and invertase activity in soil: An improved method [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(4): 511-515.
- [19] Peng S, Piao S, Wang T, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(5): 1008-1014.
- [20] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(3): 687-696.
- [21] Qi Y, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises [J]. *Ecological Modelling*, 2002, **153**(1-2): 131-142.
- [22] 陈书涛, 张勇, 胡正华, 等. 臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1476-1483.
- [23] 占新华, 周立祥. 土壤溶液和水体中水溶性有机碳的比色测定 [J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(5): 433-437.
- [24] Gopal M, Gupta A, Arunachalam V, *et al.* Impact of azadirachtin, an insecticidal allelochemical from neem on soil microflora, enzyme and respiratory activities [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(16): 3154-3158.
- [25] Gu Y, Wang P, Kong C H. Urease, invertase, dehydrogenase and polyphenoloxidase activities in paddy soil influenced by allelopathic rice variety [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2009, **45**(5-6): 436-441.
- [26] Christ M J, David M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a Spodosol [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(9): 1191-1199.
- [27] Fierer N, Craine J M, McLauchlan K, *et al.* Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition [J]. *Ecology*, 2005, **86**(2): 320-326.
- [28] Mikan C J, Schimel J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(11): 1785-1795.
- [29] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, *et al.* Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature [J]. *Nature*, 2005, **433**(7021): 57-59.
- [30] Leifeld J, Fuhrer J. The temperature response of CO₂ production from bulk soils and soil fractions is related to soil organic matter

- quality [J]. Biogeochemistry, 2005, **75**(3): 433-453.
- [31] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态[J]. 生态学报, 2009, **29**(5): 2551-2559.
- [32] Jandl R, Sollins P. Water-extractable soil carbon in relation to the belowground carbon cycle [J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, **25**(2): 196-201.
- [33] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈光水, 等. 森林生态系统 DOM 的来源、特性及流动[J]. 生态学报, 2003, **23**(3): 547-558.
- [34] Seto M, Yanagiya K. Rate of CO₂ evolution from soil in relation to temperature and amount of dissolved organic carbon [J]. Japanese Journal of Ecology, 1983, **33**(1): 199-205.
- [35] 黄靖宇, 宋长春, 张金波, 等. 凋落物输入对三江平原弃耕农田土壤基础呼吸和活性碳组分的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 3417-3424.
- [36] 王峰, 王义祥, 翁伯琦, 等. 双胞蘑菇菌渣施用对龙眼园土壤呼吸及可溶性有机碳的影响[J]. 福建农业学报, 2011, **26**(2): 291-297.
- [37] 李伟成, 王曙光, 盛海燕, 等. 酒竹人工林土壤呼吸对氮输入的响应及其因子分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, **39**(3): 299-308.
- [38] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(4): 422-429.
- [39] 邵兴华, 王艾平, 张建忠. N、P 肥对红壤酶活性和呼吸强度的影响——以江西上饶地区土壤为例[J]. 上饶师范学院学报, 2011, **31**(6): 55-58.
- [40] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, **42**(3): 364-371.
- [41] 刘骅, 林英华, 张云舒, 等. 长期施肥对灰漠土生物群落和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3899-3904.
- [42] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [43] 周春娟, 贾夏, 董岁明. 低质量分数 Pb 对冬小麦幼苗根微域土壤酶活性、微生物量 C 及土壤呼吸的影响[J]. 西北农业学报, 2012, **21**(2): 178-183.
- [44] Zhang Y M, Wu N, Zhou G Y, *et al.* Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Applied Soil Ecology, 2005, **30**(3): 215-225.
- [45] Gianfreda L, Rao M A, Piotrowska A, *et al.* Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution [J]. Science of the Total Environment, 2005, **341**(1-3): 265-279.
- [46] Xiong D, Gao Z Z, Fu B, *et al.* Effect of pyrimorph on soil enzymatic activities and respiration [J]. European Journal of Soil Biology, 2013, **56**: 44-48.
- [47] Chen J H, Liu X Y, Zheng J W. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China [J]. Applied Soil Ecology, 2013, **71**(1): 33-44.
- [48] Fereidooni M, Raiesi F, Fallah S. Ecological restoration of soil respiration, microbial biomass and enzyme activities through broiler litter application in a calcareous soil cropped with silage maize [J]. Ecological Engineering, 2013, **58**: 266-277.
- [49] 荆瑞勇, 王丽艳. 氯噻磺隆对土壤微生物数量、酶活性及呼吸强度的影响[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(3): 60-64.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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

国内外公开发行人