

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅,李梓铭,熊亚军,乔林,邱雨露,孙兆彬,寇星霞(1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响	李颖若,汪君霞,韩婷婷,王焱,何迪,权维俊,马志强(1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气PM _{2.5} 来源解析	王彤,华阳,许庆成,王书肖(1035)
四川省典型工业行业PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼,陈军辉,熊文朋,梅林德,徐雪梅,尹寒梅,范武波,姜涛,钱骏,叶宏(1043)
典型物流城市2016年冬季2次污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳,杨文,王静,刘盈盈,白雯宇,徐艳萍,王歆华,白志鹏(1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显,田莎莎,刘盈盈,赵雪艳,余浩,张辉,陈莉,王歆华(1062)
新乡冬季PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩,雷豪杰,张靖雯,唐明双,张佳羽,曹治国,李云蓓,王跃思,樊静,李虎(1071)
烟台市环境受体PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童,王晓军,陈倩,温杰,黄渤,朱红霞,田瑛泽,冯银厂(1082)
常州市冬季PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远,李清,黄爱倩,赵竹子,马帅帅,叶招莲(1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅,赵留元,穆熙,李尧捷,毛潇萱,黄韬,马建民,高宏(1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀,李令军,姜磊,王新辉,赵文慧,张立坤,鹿海峰(1111)
中国城市O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚,赵景波,曹军骥,宋永永(1120)
基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩,张兴赢(1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽,董敏丽,李素静,吴成志,王刚,陈必新,李伟,高翔,叶荣民(1143)
中国建筑涂料使用VOCs排放因子及排放清单的建立	高美平,邵霞,聂磊,王海林,安小桂(1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟,曹罡,朱荣淑,欧阳峰(1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学,郭文凯,何昕,朱玉凡,陈强(1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月,刘国东,孟玉川,张文江,夏成城(1179)
基于TBL模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞,杨平,赵光辉,李玲,谭立山,全川(1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化	刘兆冰,梁文健,秦礼萍,唐建辉(1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇,原杰,刘瑜,Khan M. G. Mostofa(1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明,梁海涛,锡桂莉,胡欣,葛健(1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗,肖琼,赵海娟,王健力,郭永丽,张清华(1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦,张幼宽,赵雨晴,韩双宝,刘元晴,张涛(1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪,印红玲,李世平,王增武,邓旭,罗怡,罗林(1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与PICRUS1功能预测分析	张菲,田伟,孙峰,陈彦,丁传雨,庞发虎,姚伦广,李玉英,陈兆进(1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎,许海,詹旭,朱广伟,秦伯强,张运林(1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶,许育新,安文浩,王云龙,何振超,楼颖雯,沈阿林(1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊,梁根坤,梁岩,罗星,陈玉成(1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨,陈诚,林育青,严晗璐,董建玮,陈求稳(1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海,吉庆华,兰华春,李静(1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾,宋云,魏文侠,王海见,孙仲平(1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君,王学江,成雪君,景焕平,赵建夫(1310)
Ca/Mg负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓,李婷婷,李海红,黄巧,杨金娥,陈玉成,杨志敏(1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬,沈启斌,刘子丹,杨小莹,张太平,廖志钟(1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳,林建伟,詹艳慧,何思琪,吴小龙,王艳,赵钰颖,林莹,刘鹏茜(1337)
4种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏,张烟,颜昌宙(1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷,李勇,朱怡嘉,薛梦娜,汤同欢(1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬,曹美忠,郭跃利,梅宁,李帅,张杰(1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲,李冬,张杰,刘博(1367)
CAST工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟,杨蕊春,俞小军,周猛,陈永志(1375)
不同曝气量 and 好氧时间下SPNDPR系统处理低C/N城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞,于德爽,巩秀珍,王晓霞,陈光辉,杜世明,甄建国(1382)
ABR除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田,曹家炜,谢凤莲,沈耀良,吴鹏,宋吟玲(1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳,王建芳,钱飞跃,张泽宇,沈耀良,齐泽坤(1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡,陈林艺,李慧春,秦玉洁,曹雁,王桐屿,周少奇(1405)
降温过程中生物膜CANON反应器的运行特征	付昆明,廖敏华,周厚田,付巢,姜娜,仇付国,曹秀芹(1412)
IEM-UF同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇,张岩,马翔山,张博康,曹孟京,曹昌明(1419)
温度对硝化杆菌(Nitrobacter)活性动力学影响	于雪,孙洪伟,李维维,祁国平,马娟,陈永志,吕心涛(1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤,刘吉宝,马爽,李亚明,解立平,魏源送,孟晓山(1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊,王科,谷月,王爱杰(1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军,郭胜利(1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡,王玉杰,王彬,王云琦(1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜,黄志霖,曾立雄,肖文发,宋文梅(1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵,程爱武,唐海明,葛体达,邓扬悟,苏以荣,陈香碧(1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶,王季斐,祝贞科,邓扬悟,陈珊,葛体达,袁红朝,吴金水(1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平,李艳琼,沈育伊,张德楠,孙英杰,张中峰,周龙武,段春燕(1491)
缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华,吕盛,黄容,高明,王子芳,徐畅(1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰,谢志祥,李阳(1512)
《环境科学》征订启事(1042)	《环境科学》征稿简则(1162)
信息(1208, 1235, 1286)	

环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响

张彦军^{1,2}, 郭胜利^{1*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013)

摘要: 在田间条件下研究土壤微生物呼吸及其温度敏感性 (Q_{10}) 的变化特征及其影响因素对准确理解地区的气候变暖潜力具有重要意义. 本研究依托长武农田生态试验站的裸地处理, 利用土壤碳通量系统 (Li ~ 8100) 连续 6 a (2008 ~ 2013 年) 监测裸地处理下的呼吸速率、土壤温度和水分, 探究土壤微生物呼吸及其温度敏感性的变化特征及其影响因素. 在日变化尺度上, 土壤微生物呼吸速率的变化特征呈单峰曲线, 且这种变化趋势主要与土壤温度有关 ($P < 0.05$), 然而日平均土壤微生物呼吸速率和 Q_{10} 在不同土壤水分含量条件下不同. 均呈现出: 适度的土壤水分条件 > 较高的土壤水分条件 > 较低土壤水分条件的趋势 [土壤微生物呼吸速率: $1.20 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $0.95 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $0.79 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; Q_{10} : 2.12、1.93、1.59]. 在季节尺度上, 土壤微生物呼吸速率和 Q_{10} 均呈现出雨季大于非雨季的趋势 [土壤微生物呼吸速率: $1.11 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $0.90 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; Q_{10} : 1.96、1.59], 且这种变化趋势与土壤温度和水分的变化有关 ($P < 0.05$), 然而土壤温度和土壤水分的双变量模型比土壤温度或者土壤水分的单变量模型能解释更多的土壤微生物呼吸季节变异性 (R^2 : 0.45 ~ 0.82、0.32 ~ 0.67、0.35 ~ 0.86; 模拟值和实测值的拟合系数: 0.76、0.64、0.58). 在年际尺度上, 年累积土壤微生物呼吸变化于 $226 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $298 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 之间, Q_{10} 变化于 1.48 ~ 1.94 之间, 而年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的年际变异性主要与年平均土壤水分含量有关 ($P < 0.05$), 且年平均土壤水分分别可以解释 39% 和 54% 的年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 年际变异性. 在裸地处理上, 土壤有机碳由试验初的 $6.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到目前的 $5.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但是年累积土壤微生物呼吸却高达 $255 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 即裸地处理的呼吸流失量比土壤有机碳的流失量高 20 倍以上.

关键词: 土壤微生物呼吸; 土壤微生物呼吸温度敏感性; 土壤水分; 土壤温度; 黄土高原

中图分类号: X144; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1446-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201705155

Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity

ZHANG Yan-jun^{1,2}, GUO Sheng-li^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, College of Geography and Environment Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

Abstract: Studying the effect of environmental factors on the variation of soil microbial respiration and its temperature sensitivity (Q_{10}) at different time scales under field conditions is of great significance for accurately understanding the region's climate warming potential. From March 2008 to November 2013, in situ soil microbial respiration rates were determined using an automated CO_2 flux system (Li ~ 8100) in long-term bare fallow soil at the Changwu State Key Agro-Ecosystem Experimental Station, Shaanxi, China, for studying the effect of environmental factors on the variation of soil microbial respiration and Q_{10} at different time scales. At diurnal time scales, the daily variation of soil microbial respiration rates showed a single-peak curve, which was closely related to soil temperature ($P < 0.05$); whereas the daily mean soil microbial respiration rate and Q_{10} varied with soil moisture, with both showing the order of moderate soil moisture conditions > higher soil moisture conditions > lower soil moisture conditions [daily mean soil microbial respiration rate: $1.20 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ vs. $0.95 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ vs. $0.79 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; Q_{10} : 2.12 vs. 1.93 vs. 1.59]. At seasonal time scales, both the seasonal mean soil microbial respiration rate and Q_{10} showed the order of rainy season > non-rainy season [seasonal mean soil microbial respiration rate: $1.11 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ vs. $0.90 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; Q_{10} : 1.96 vs. 1.59], which was consistent with the trend of soil temperature and moisture (soil temperature: 20.39 vs. 14.50°C ; soil moisture: 49.2% vs. 38.6%). The bivariate model of soil temperature and soil moisture could explain the greater seasonal variability of the soil microbial respiration rate than did the univariate model of soil temperature or soil moisture (R^2 : 0.45-0.82 vs. 0.32-0.67 vs. 0.35-0.86; the fitting coefficient between the simulated and measured soil microbial respiration rates: 0.76 vs. 0.64 vs. 0.58). At annual time scales, the annual cumulative soil microbial respiration ranged from 226 to $298 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, with an average of $253 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, and the annual Q_{10} ranged from

收稿日期: 2017-05-16; 修订日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801069, 41601016); 陕西省科技厅项目 (2018JQ3023); 宝鸡文理学院博士科研启动费项目 (ZK2017041)

作者简介: 张彦军 (1985 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为陆地生态系统碳循环, E-mail: zhangyanjun@bjwlyx.cn

* 通信作者, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

1.48 to 1.94, with an average of 1.70. The annual cumulative soil microbial respiration and Q_{10} showed a negative quadratic correlation with annual mean soil moisture ($P < 0.05$), with the annual mean soil moisture explaining 39% and 54% of the annual variability of annual cumulative soil microbial respiration and Q_{10} , respectively. In the bare soil treatment, the soil organic carbon decreased from $6.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ at the beginning of the experiment to $5.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ at present; whereas, the annual cumulative soil microbial respiration was up to $255 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and the loss of annual cumulative soil microbial respiration was 20 times larger than the loss of soil organic carbon in the Loess Plateau region, China.

Key words: soil microbial respiration rate; temperature sensitivity of soil microbial respiration; soil moisture; soil temperature; Loess Plateau

在全球尺度上, 0 ~ 100 cm 土层内的土壤碳储量大约为 1 500 PG, 其量甚至比大气和植被碳库的总和还要多, 因此土壤碳库的微小变动将会对全球气候变化产生重要的影响^[1,2]. 土壤呼吸是一个复杂的生态学过程, 其主要包括根系呼吸和微生物呼吸^[3], 而土壤微生物呼吸作为土壤呼吸的一个重要组成部分, 其呼吸速率和呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 的变化与大气 CO_2 浓度以及陆地生态系统土壤碳储量的关系最为紧密^[3,4]. 因此, 研究土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的变化特征及其影响因素对准确理解地区的气候变暖潜力和碳储量具有重要的意义.

目前虽然有大量的研究从模型和机理的角度探讨土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的变化特征及其影响因素^[5-8], 但是这些研究中的土壤微生物呼吸要么来源于室内培养试验要么来源于野外根系隔离法, 均无法准确估算土壤微生物呼吸^[3,8,9]. 因此, 在田间条件下研究土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的变化特征及其影响因素显得十分必要. 土壤微生物呼吸和 Q_{10} 与土壤碳库^[10-12]、土壤微生物群落结构和活性^[13-15]、外界环境 (土壤温度和水分) 因素有关^[8,16-19]. 在长期裸地条件下, 由于没有任何有机物质的输入, 其土壤碳库和土壤微生物群落结构在短期内 (数年内) 变化不显著, 因此土壤微生物呼吸和 Q_{10} 主要受土壤温度和水分限制^[10,16,20]. 在不同的时间尺度上, 驱动土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的因素不同, 在日变化尺度上, 土壤温度变化剧烈而土壤水分含量则基本维持一个恒定的水平^[20], 在季节尺度上, 土壤温度和土壤水分均剧烈波动^[21-23], 在年际变化尺度上, 年平均土壤温度变化平缓而年平均土壤水分变化剧烈^[10,16]. 因此, 笔者推测不同时间尺度上驱动土壤微生物呼吸和 Q_{10} 变化的因素不同.

在田间裸地条件下, 虽然目前在日变化尺度上^[20,21]、季节尺度上^[21-23]、年际尺度上^[10,16]分别探究了土壤微生物呼吸或者 Q_{10} 的变化特征及其影响因素, 但是至今没有在上述 3 个尺度上 (日变化、季节变化和年际变化) 共同研究土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的变化特征及其影响因素. 基于此, 本文

以长期的 (1984 年至今) 裸地处理为研究对象, 通过连续 6 a (2008 ~ 2013 年) 监测裸地处理下的呼吸速率、土壤温度和土壤水分, 在田间条件下分别在日变化尺度上、季节变化尺度上和年际变化尺度上, 研究土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的变化特征及其影响因素.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于陕西省长武县 (东经 $107^{\circ}40'$, 北纬 $35^{\circ}12'$) 的长武农田生态系统国家野外科学观测研究站 (长武站). 研究区域属于典型的黄土旱塬区, 海拔 1 200 m, 气候类型为半干旱湿润性季风气候. 1984 ~ 2013 年间年均降水量为 560 mm, 其中最高年份为 954 mm, 最低年份为 296 mm, 且平均雨季 (7 ~ 9 月) 的降水量占年总降雨量的 60% 左右. 年平均气温 9.4°C , 而雨季 (7 ~ 9 月) 的平均气温 19.4°C . 大于等于 10°C 积温为 $3\,029^{\circ}\text{C}$, 年日照时数为 2 230 h, 日照率为 51%, 年辐射总量为 $484 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$, 无霜期 171 d. 地带性土壤为黏壤质黑垆土, 母质为中壤质马兰黄土, 土层深厚, 土质疏松. 耕层土壤 (0 ~ 20 cm) 有机碳 $6.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $37.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $129.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CaCO_3 10.5%, pH 8.4, 田间持水量 $0.29 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 土壤容重 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 黏粒含量 24%.

1.2 试验设计

该长期试验于 1984 年设立, 主要用于研究不同作物和肥料管理措施对土壤生产力、土壤养分和水分的影响. 试验所用裸地为长武站长期试验处理之一, 试验小区面积 $10.3 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$, 小区间距 0.5 m, 区组间距和周边宽各 1.0 m, 试验 3 次重复, 随机区组排列. 裸地处理自 1984 年 6 月小麦收获后至今一直处于休闲状态, 杂草等及时人工清除.

1.3 呼吸速率、水分和温度的测定

试验中每个重复 (小区) 内安装 2 个 PVC 管 (直径 20 cm, 高度 12 cm), 且 PVC 管基座离地面 2 cm, 共计 6 个 PVC 管. 每个 PVC 管上连续测定两次, 且这两次土壤微生物呼吸值之间的变异控制在

15% 之内 (如果 2 次土壤微生物呼吸值之间的变异高达 15%, 则这 2 次的测量值舍去, 重新测定直到符合试验设置要求为止). 因此, 试验中每个 PVC 管上测定 2 个土壤微生物呼吸速率数据, 共计 12 个数据, 文中参与作图和数据分析的数据均是 12 个数据的均值.

土壤微生物呼吸速率的测定利用闭路式土壤碳通量系统 (LI ~ 8100). 为了避免 PVC 管安装过程中对土壤造成的扰动而引起短期土壤微生物呼吸速率的剧烈波动, 在 PVC 管安装 24 h 后再进行土壤微生物呼吸速率的测定, 且测定前去除 PVC 管里面的一切可见动植物活体. 每个 PVC 管上的测量时间为 150 s, 其中包括 30 s 的前期预处理、30 s 的后期预处理以及 90 s 的观测期, 两次测量之间的时间间隔为 30 s.

2009 年 3 月 ~ 2013 年 11 月 (除寒冷冬季的 12、1、2 月), 选择晴好天气在 09:00 ~ 11:00 进行土壤微生物呼吸速率、土壤温度和土壤水分的测定. 大约每 10 天测定 1 次, 其中高温多雨季节 (7 ~ 9 月) 每周测定一次. 因此, 试验期间的土壤微生物呼吸速率在 2008 年测定了 17 次, 2009 年 25 次, 2010 年 26 次, 2011 年 22 次, 2012 年 26 次, 2013 年 17 次, 共计 133 次. 与此同时, 依次在 2008 年 4 月 27 日、2008 年 6 月 21 日、2008 年的 10 月 1 日, 2010 年的 5 月 14 日, 2010 年的 7 月 25 日, 2010 年的 9 月 15 日进行土壤微生物呼吸速率日变化的测定 (大约每 2 h 测定一次, 一天共计测定 12 次).

在测定土壤微生物呼吸速率的同时测定土壤温度 (每个 PVC 管 3 次重复) 和水分 (每个 PVC 管 4 次重复), 土壤温度和水分的测定在距离 PVC 管 10 cm 处进行. 距地表 5 cm 处的土壤温度利用数字显示温度计 (仪器型号: JM624 测温仪; 产地: 中国; 精度: $\pm 0.1^\circ\text{C}$) 测定, 0 ~ 5 cm 处的土壤水分利用便携式水分仪 (仪器型号: ML3 ~ HH2; 产地: 英国; 精度: $\pm 1\%$ vol) 测定. 土壤容重的测定利用环刀法, 田间持水量的测定利用围框淹灌法.

土壤充水孔隙 (soil water-filled pore space, WFPS) 由下列方程计算获得^[16]:

$$\text{WFPS}(\%) = 100 \times 2.65\theta_v / (2.65 - \rho_b) \quad (1)$$

式中, θ_v 是体积含水量, ρ_b 是土壤容重, 2.65 是土壤颗粒密度.

1.4 数据处理与统计分析

利用 SigmaPlot 软件进行有关基础图件的制作, 且数据分析的来源均采用均值进行统计分析. 此外, 利用线性内插法估算年累积土壤微生物呼吸.

利用 SigmaPlot 软件进行土壤温度与土壤微生物呼吸速率的回归分析, 且土壤温度对土壤微生物呼吸速率影响的关系模型采用指数关系模型^[24]:

$$F = \beta_0 e^{\beta_1 T} \quad (2)$$

Q_{10} 的关系模型为^[24]:

$$Q_{10} = e^{10\beta_1} \quad (3)$$

利用 SigmaPlot 软件进行土壤水分与土壤微生物呼吸速率的回归分析, 且土壤微生物呼吸速率对土壤水分的响应关系模型采用一元二次关系模型^[16, 25]:

$$F = \beta_2 W^2 + \beta_3 W + \beta_4 \quad (4)$$

利用 SAS 软件的 REG 程序包进行土壤温度和水分与土壤微生物呼吸速率之间的回归分析, 且土壤微生物呼吸速率对土壤温度和水分的影响曲面采用双变量模型进行模型拟合^[25]:

$$F = \beta_2 e^{\beta_3 TW + \beta_6 TW^2} \quad (5)$$

式中, $F [\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$ 为土壤微生物呼吸速率; $T (^\circ\text{C})$ 为土壤 0 ~ 5 cm 土层温度; $W (\%)$ 为土壤 0 ~ 5 cm 土层水分; β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 和 β_6 为模型参数.

2 结果与分析

2.1 土壤微生物呼吸速率的日变化特征及其影响因素

在日变化尺度上, 土壤微生物呼吸速率的变化特征呈现单峰变化趋势, 而这种变化趋势与土壤温度的变化趋势基本一致, 且均呈现出先增加后减少的趋势, 但是土壤微生物呼吸速率最大值出现的时间因土壤水分含量差异而不同 (图 1). 在较低土壤水分含量的条件下 (L, 土壤水分 < 35%), 土壤微生物呼吸速率的最大值出现在 08:00; 在适度的土壤水分含量条件下 (M, 35% < 土壤水分 < 50%), 土壤微生物呼吸速率的最大值出现在 12:00; 而在较高的土壤水分含量条件下 (H, 土壤水分 > 50%), 土壤微生物呼吸速率的最大值出现在 16:00.

在日变化尺度上, 土壤微生物呼吸速率的变化与土壤温度密切相关 ($P < 0.05$), 土壤温度对土壤微生物呼吸速率的影响可以利用指数关系模型进行拟合, 且土壤温度可以解释 41% ~ 85% 的土壤微生物呼吸速率日变异性 (表 1). 不同土壤水分含量条件下的 Q_{10} 差异较大 (表 1), 均呈现出适度的土壤水分含量条件 > 较高的土壤水分含量条件 > 较低土壤水分含量条件的趋势 (2008 年: 1.86、1.73、1.23; 2010 年: 2.38、2.12、1.95).

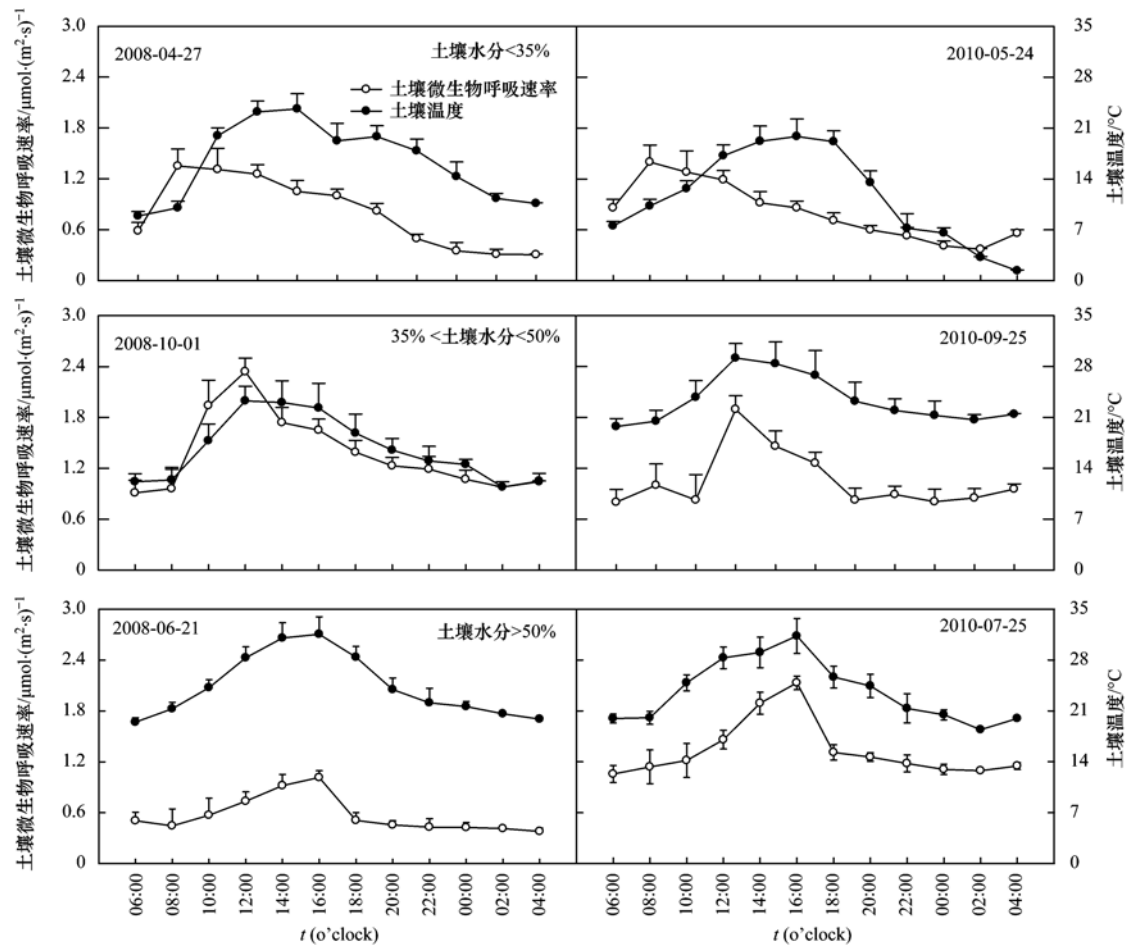


图1 土壤微生物呼吸速率和土壤温度的日变化特征

Fig. 1 Diurnal variation of soil microbial respiration rate and soil temperature over two discontinuous days under low, moderate, and high soil moisture conditions

表1 在日变化尺度上土壤温度对土壤微生物呼吸速率的影响¹⁾

Table 1 Effect of soil temperature on soil microbial respiration rate at the diurnal scale under low, moderate, and high soil moisture conditions

项目	2008 年				2010 年			
	方程	R^2	P	Q_{10}	方程	R^2	P	Q_{10}
L	$F = 0.48e^{0.0207T}$	0.41	<0.05	1.23	$F = 0.21e^{0.0668T}$	0.49	<0.05	1.95
M	$F = 0.42e^{0.0621T}$	0.85	<0.01	1.86	$F = 0.11e^{0.0867T}$	0.79	<0.01	2.38
H	$F = 0.46e^{0.0548T}$	0.82	<0.01	1.73	$F = 0.17e^{0.0751T}$	0.79	<0.01	2.12

1) L 代表较低的土壤水分含量条件, M 代表适中的土壤水分含量条件, H 代表较高的土壤水分含量条件

2.2 土壤微生物呼吸速率的季节变化特征及其影响因素

在季节尺度上,土壤微生物呼吸速率的变化趋势与土壤或者大气温度的变化趋势基本一致,呈现出先增加后降低的趋势(图2).在雨季前(3~6月),土壤微生物呼吸速率随着土壤温度或者大气温度的增加逐渐增加;在雨季(7~9月)土壤微生物呼吸速率由于频繁的降雨而剧烈波动;在雨季后(10~11月),土壤微生物呼吸速率又随着土壤温度或者大气温度的减少而快速下降.在整个试验期间(2008~2013年),土壤微生物呼吸速率变化于 $0.06\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $2.16\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 之间.

在季节尺度上,土壤微生物呼吸速率受土壤温度、土壤水分以及土壤温度和土壤水分交互作用的影响(表2和图3).土壤温度对土壤微生物呼吸速率的影响利用指数关系模型进行拟合($P<0.05$),且土壤温度可以解释32%~67%的土壤微生物呼吸速率季节性,而土壤微生物呼吸速率对土壤水分的响应利用抛物线关系模型进行拟合($P<0.05$),且土壤水分可以解释35%~86%的土壤微生物呼吸速率季节性.此外,土壤温度和土壤水分交互作用对土壤微生物呼吸速率的影响达到极显著水平($P<0.01$),且土壤温度和水分交互作用可以解释高达45%~82%的土壤微生物呼吸速率

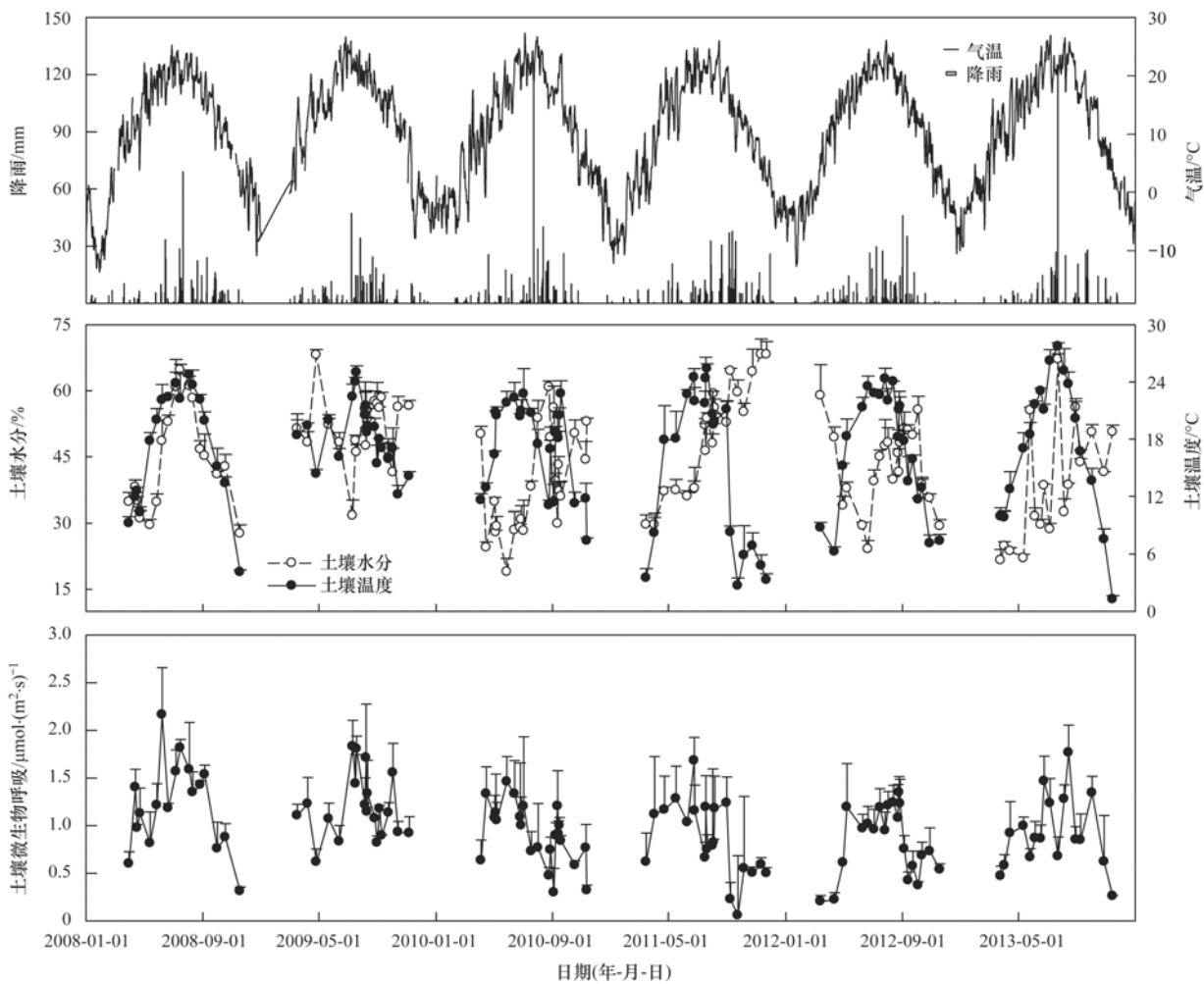


图2 土壤温度、土壤水分和土壤微生物呼吸速率的季节变异特征

Fig. 2 Temporal variations of soil moisture, soil temperature, and soil microbial respiration rate from 2008 to 2013

季节变异性.

在季节尺度上,土壤微生物呼吸速率和 Q_{10} 的变化趋势与土壤温度和水分的变化趋势一致(图2和图4),均呈现出雨季(7~9月)大于非雨季(其它季节)的趋势[土壤微生物呼吸速率: $1.11 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、 $0.90 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; Q_{10} : 1.96、1.59; 土壤温度: 20.39°C 、 14.50°C ; 土壤水分: 49.2%、38.6%].

2.3 土壤微生物呼吸速率的年际变化特征及其影响因素

在年际尺度上,年平均土壤水分含量变化于 38.6%~50.7%之间,其均值为 43.8%;年平均土壤温度变化于 14.90°C 和 18.42°C 之间,其均值为 17.05°C ;土壤微生物呼吸速率的变化范围为 $0.83 \sim 1.22 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,其均值为 $0.99 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$;年累积土壤微生物呼吸的最小值为 $226 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,最大值为 $298 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,其均值为 $253 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$; Q_{10} 变化于 1.48~1.94 之间,其均值为 1.70.

表2 土壤微生物呼吸速率对土壤温度和水分的双变量方程

Table 2 Bivariate regression equations the soil microbial respiration rate and soil microclimate calculated for each year from 2008 to 2013

年份	土壤微生物呼吸速率与土壤微气候的关系		
	方程	R^2	P
2008	$F = 0.41e^{0.00257W - 0.000027W^2}$	0.65	<0.01
2009	$F = 0.55e^{0.00297W - 0.000047W^2}$	0.82	<0.01
2010	$F = 0.56e^{0.00287W - 0.000057W^2}$	0.68	<0.01
2011	$F = 0.36e^{0.00347W - 0.000057W^2}$	0.45	<0.01
2012	$F = 0.23e^{0.00467W - 0.000077W^2}$	0.76	<0.01
2013	$F = 0.36e^{0.00297W - 0.000047W^2}$	0.66	<0.01

在年际尺度上,年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 与年平均土壤水分含量的相关性达到统计显著水平($P < 0.05$),二者对年平均土壤水分的响应利用抛物线关系模型进行拟合,且土壤水分别可以解释 39% 的累积土壤微生物呼吸年际变异性和 54% 的 Q_{10} 年际变异性(图5).

3 讨论

在本研究中,年累积土壤微生物呼吸 [$226 \sim 298 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$] 和 Q_{10} (1.48~1.94) 的变化范围

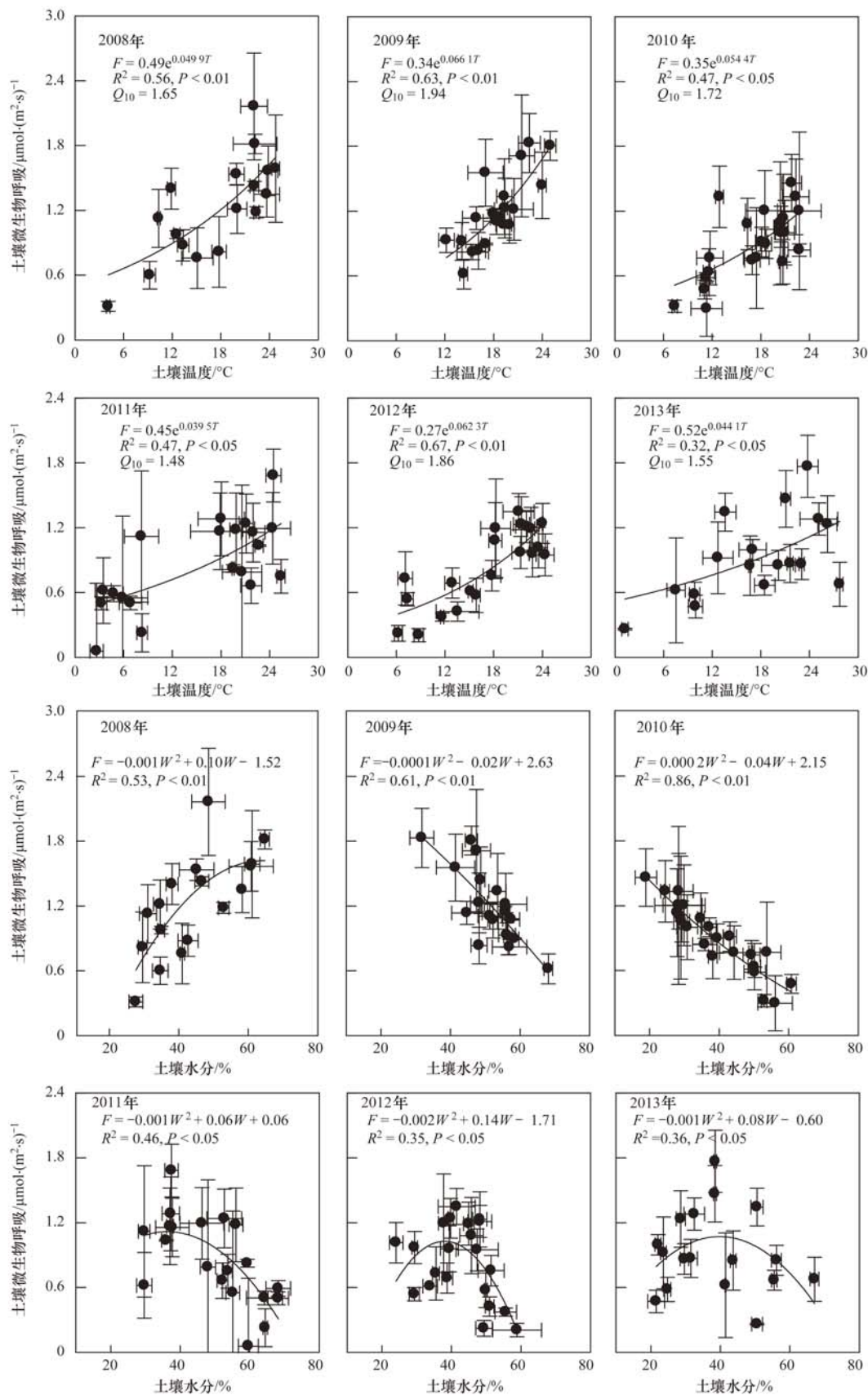


图3 在季节尺度上土壤温度和土壤水分对土壤微生物呼吸速率的影响

Fig. 3 Effect of soil temperature and soil moisture on soil microbial respiration rate at the seasonal scale

均位于全球年累积土壤微生物呼吸 [61 ~ 970 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] [18,26] 和 Q_{10} (1.20 ~ 4.89) 的变化范围之内 [27~31]。然而, 平均年累积土壤微生物呼吸 [253 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 显著低于全球林地平均年累积土壤微生物呼吸 [397 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] [26]、全球草地平均年累积土壤微生物呼吸 [570

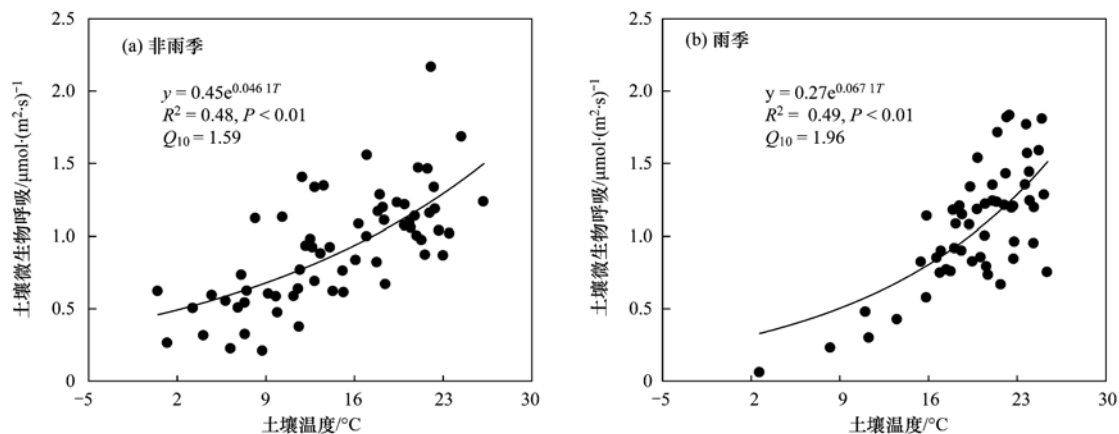
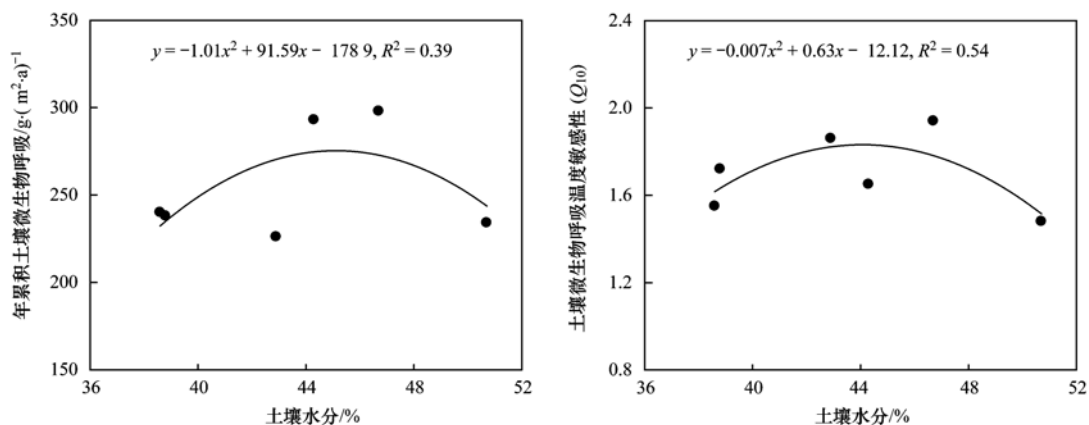


图4 雨季和非雨季土壤温度对土壤微生物呼吸速率的影响

Fig. 4 Differences of Q_{10} between the rainy season and non-rainy season图5 年平均土壤水分含量对累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的影响Fig. 5 Effect of annual mean soil moisture on annual cumulative soil microbial respiration and Q_{10}

$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]^[17]、甚至也低于全球农田平均土壤微生物呼吸速率 [$0.99 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $2.51 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]^[18]。同时,平均 Q_{10} (1.70) 也显著低于全球平均 Q_{10} (2.47)^[27~31]。较低的土壤微生物呼吸和 Q_{10} 可能与较低的土壤有机碳含量、较小的微生物群落结构、干旱的土壤条件以及在田间条件下区分土壤微生物呼吸速率方法的选择等因素有关^[16,26,29,30]。

在日变化尺度上,土壤微生物呼吸速率的日变化特征呈单峰曲线,而这种变化趋势与土壤温度的变化趋势相一致 ($P < 0.05$),且土壤温度可以解释 41% ~ 85% 的土壤微生物呼吸速率日变异性,这与已有的研究结果相类似^[10,20,22,23]。在某一特定的监测日期,土壤水分含量的日变化较小或者可以忽略不计,而土壤温度的日变化较为明显,因此土壤微生物呼吸速率的日变化仅受土壤温度的影响^[32],但是土壤温度的日变化并不能完全解释呼吸速率的日变化变异性^[10,20,22,23]。这是因为在水分受限的干旱半干旱地区,土壤水分是驱动地下生理过程的重要限制性因素,因此土壤水分含量对呼吸速率的影

响不容忽视^[33,34]。学术界目前利用开口向下的抛物线关系模型拟合呼吸速率对土壤水分的响应,即当土壤水分低于某个临界范围时,呼吸速率随着土壤水分的增加而增加,当土壤水分超过某个临界范围时,呼吸速率随着土壤水分的增加而降低,而当土壤水分在临界范围内波动时,呼吸速率的变化很微弱,而这一临界范围一般就在田间持水量附近波动^[8,17]。此外,利用连续 6 a 的监测数据分析,当土壤水分含量低于 35% 时,土壤微生物呼吸速率随着土壤水分的增加而增加,当土壤水分含量大于 50% 时,土壤微生物呼吸速率随着土壤水分的增加而降低,当土壤水分在 35% ~ 50% 之间波动时,土壤微生物呼吸速率的波动相对较小 (图 6)。据此,将日变化的土壤水分含量分为较低 (L)、较高 (H) 和适宜 (M) 这 3 个梯度,类似的研究方法在其它研究中也有报道^[33]。且进一步地研究结果显示,土壤微生物呼吸速率出现最大值的时间也受到土壤水分含量的影响 (低水分条件出现在 08:00,适度水分条件下出现在 12:00,高水分条件下出现在 16:00),类似的研究结果在中国的沙漠灌丛生态系统中也有

报道^[33]。同时, 日变化的 Q_{10} 从低水分条件下的 1.59 增加到适度水分条件下的 2.12, 这可能是由于长期受土壤水分干旱胁迫的影响, 底物的有效性会随着土壤水分含量的增加而增加, 从而导致土壤微生物呼吸速率对温度的变化相对敏感^[34]。此外, 日变化的 Q_{10} 从适度水分条件下的 2.12 减少到高水分条件下的 1.93, 这可能是由于较高的土壤水分条件导致氧气的扩散受阻所致^[35]。

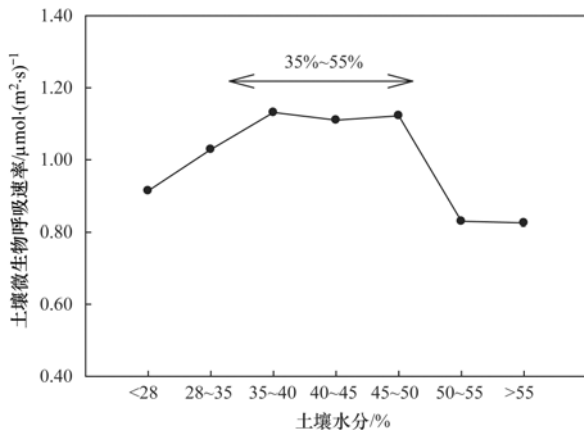


图6 土壤水分对土壤微生物呼吸速率的影响

Fig. 6 Effect of soil moisture on soil microbial respiration rate during the entire observation period

在季节尺度上, 土壤微生物呼吸速率和 Q_{10} 的季节变化特征明显, 且均呈现出雨季大于非雨季的趋势 [$1.11 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $0.90 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 1.96 、 1.59], 这与已有的研究结果相类似^[36]。究其原因可能与以下因素有关。①土壤温度: 平均季节土壤温度在雨季是非雨季的 1.40 倍 (20.39°C 、 14.50°C), 增加的土壤温度会增加土壤微生物的活性甚至会导致部分处于休眠状态的土壤微生物处于非休眠状态, 因此会增加土壤微生物的丰富度和潜在的拓宽土壤微生物的底物有效性^[13, 37]; ②土壤水分含量: 平均季节土壤水分含量从非雨季的 38.6% 增加到雨季的 49.2%, 由于长期干旱胁迫的存在, 增加的土壤水分含量会潜在增加土壤微生物的活性和底物的有效性^[13, 34]; ③频繁的干湿交替

循环: 雨季频繁的干湿交替循环 (试验期间雨季降雨占到全年降水的 72%) 会造成土壤微生物呼吸速率的增加, 进而导致 Q_{10} 的增加^[34, 38]。土壤微生物呼吸速率的季节变化特征与土壤温度、土壤水分以及二者交互作用密切相关 ($P < 0.05$), 这与已有的研究结果相一致^[10, 16]。同时, 土壤温度和土壤水分的双变量模型较土壤温度或者水分的单变量模型能更好地解释土壤微生物呼吸速率的季节变异性 (图 3 和表 2), 这是因为: ①从模型拟合的角度而言, 土壤温度和土壤水分双变量模型可以解释高达 45% ~ 82% 的土壤微生物呼吸速率季节变异性, 而土壤温度和水分则分别可以解释 32% ~ 67% 和 35% ~ 86% 的土壤微生物呼吸速率季节变异性; ②从模拟值和实测值对比的角度而言, 土壤温度的拟合系数仅为 0.58, 土壤水分的拟合系数仅为 0.64, 而土壤温度和水分的双变量模型的拟合系数高达 0.76 (图 7)。此外, 土壤温度和水分的双变量模型可以直观地显示土壤温度、土壤水分以及土壤温度和水分二者交互作用对土壤微生物呼吸速率的影响 (图 8), 类似的研究结果在其它研究中也有报道^[10, 16, 25]。

年累积土壤微生物呼吸 [$226 \sim 298 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 和 Q_{10} ($1.48 \sim 1.94$) 的年际变异性较大, 这种年际差异性与年平均降雨量无关而与年平均土壤水分含量密切相关 ($P < 0.05$), 这与已有的研究结果相类似^[17, 19]。在土壤水分受限的地区, 土壤水分含量是影响该区地下生理过程的重要限制性因素^[33, 34], 虽然在长期裸地土壤上, 降雨是土壤水分的唯一来源, 但是土壤水分含量与年平均降雨量没有相关性而与降雨的频率与分布 (降雨天数) 密切相关 ($y = 0.27x + 18$, $R^2 = 0.54$, $P < 0.05$), 这与已有的研究结果相吻合^[39, 40]。在 2011 年由于降雨的相对均匀分布, 2011 年的年平均土壤水分含量高达 51%; 在 2010 年和 2013 年由于降雨的相对不均匀分布 [2010 年 7 月 23 日的日降雨量 (118 mm) 占到 2010 年全年降雨量 (588 mm) 的 20%,

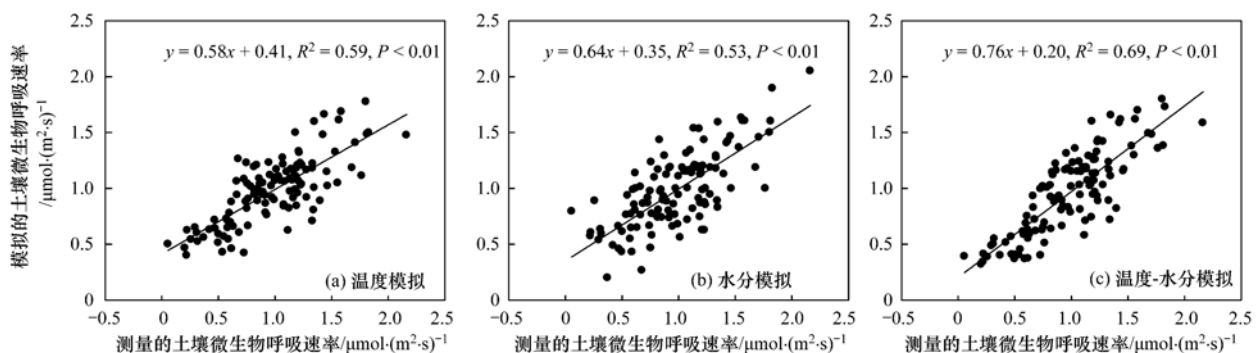


图7 测量值和实测值之间的回归分析

Fig. 7 Regression analyses performed between measured and modeled soil microbial respiration rate during the entire observation period

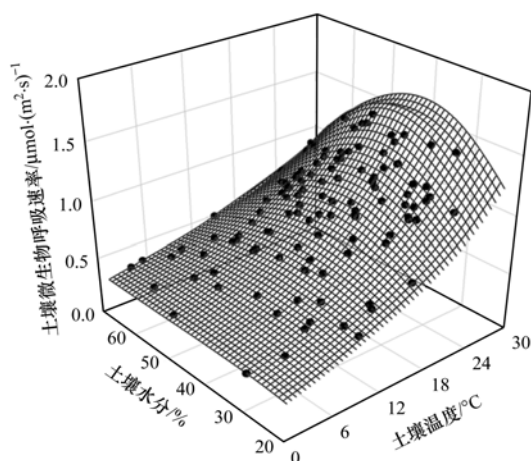


图8 土壤微生物呼吸速率对土壤温度和水分的响应曲面

Fig. 8 Response surface of soil microbial respiration rate as a function of soil moisture and soil temperature during the entire observation period

2013年7月22日的降雨量(121 mm)占到2013年全年降雨量(523 mm)的23%], 2010年和2013年的年平均土壤水分含量仅为38%;在2008、2009和2012年,由于降雨的正常分布,这3a的年平均土壤水分含量波动于43%~47%之间. 年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 均随着年平均土壤水分的增加而呈现出负抛物线增加的趋势,即当年平均土壤水分含量小于45%时,年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 均随着年平均土壤水分的增加而呈现出增加的趋势,而当年平均土壤水分含量大于45%时,年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 均随着年平均土壤水分的增加而呈现出减少的趋势(图4),这与已有的研究结果相类似^[41, 42]. 究其原因可能与以下因素有关:①在较低的土壤水分含量条件下,土壤孔隙的水分变得越来越不连续,底物的扩散受到抑制,因此土壤微生物呼吸的底物有效性受限^[34, 43],同时干旱胁迫导致土壤微生物的群落结构和活性均不同程度地降低,导致土壤微生物呼吸和 Q_{10} 均不同程度地受到限制^[12],此时年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 均随着年平均土壤水分的增加而呈现出增加的趋势;②在较高的土壤水分含量条件下,土壤中的绝大部分有效孔隙可能被土壤水分填充,而已有的研究表明氧气在水中的扩散速率远远低于在空气中的扩散速率^[44],可能致使氧气在土壤中的扩散受限,从而导致好氧微生物的分解活动因氧气的缺乏而受到抑制^[35, 45],此时年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 均随着年平均土壤水分的增加而呈现出减少的趋势;③在适度的土壤水分条件下,底物和氧气的扩散均不受土壤水分的抑制,土壤微生物也不受干旱胁迫的制约^[46],此时年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 对年平均土壤水分的变化相对不敏感.

在田间裸地条件下,由于没有根系系统的存在和新鲜有机物质的输入,呼吸速率仅反映了土壤微生物群落对原有土壤有机碳库的分解. 在本研究中,裸地处理的土壤有机碳含量由1984年以来的 $6.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到目前的 $5.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但是年累积土壤微生物呼吸量(以 CO_2 计)却高 $255 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,即裸地处理的呼吸流失量比土壤有机碳的流失量高20倍以上,究其原因可能与地区的大气沉降^[47, 48]、土壤微生物固碳^[49]、部分呼吸来自于下层土壤^[50, 51]以及人为管理措施(定期清除裸地上的杂草)等因素有关,具体原因有待进一步探讨. Q_{10} 是陆地生态系统碳循环模型中的一个重要参数^[7, 52],但是 Q_{10} 的巨大变异性为陆地生态系统碳循环模型的预测带来了巨大的不确定性^[12, 24]. 本研究结果显示,不同时间尺度上 Q_{10} 的差异与相应土壤水分含量密切相关($P < 0.05$),因此不同时间尺度上土壤水分的变异性在碳循环模型中必须加以考虑,否则就会给干旱半干旱地区的土壤碳循环预测带来巨大的偏差.

4 结论

(1)不同时间尺度上的土壤微生物呼吸速率和 Q_{10} 的变化特征显著.

(2)在日变化尺度上,土壤微生物呼吸速率的变化特征呈单峰曲线,且这种变化趋势主要与土壤温度有关($P < 0.05$),然而日平均土壤微生物呼吸速率和 Q_{10} 在不同土壤水分含量条件下不同,均呈现出适度的土壤水分条件>较高的土壤水分条件>较低土壤水分条件的趋势.

(3)在季节尺度上,土壤微生物呼吸速率和 Q_{10} 均呈现出雨季大于非雨季的趋势,且这种变化趋势与土壤温度和水分的变化有关($P < 0.05$),然而土壤温度和土壤水分的双变量模型比土壤温度或者土壤水分的单变量模型能解释更多的土壤微生物呼吸季节变异性.

(4)在年际尺度上,年累积土壤微生物呼吸和 Q_{10} 的年际差异特征显著,这种年际变异特征与年平均土壤水分含量密切相关($P < 0.05$),二者对年平均土壤水分含量的响应可以利用抛物线关系模型进行拟合($P < 0.05$).

(5)在裸地处理上,土壤有机碳由试验初的 $6.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到目前的 $5.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但是年累积土壤微生物呼吸却高达 $255 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$.

参考文献:

- [1] Lal R. Carbon sequestration[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1492):

- 815-830.
- [2] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000, **10**(2): 423-436.
- [3] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 425-448.
- [4] Subke J A, Inglima I, Francesca Cotrufo M. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: a metaanalytical review [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(6): 921-943.
- [5] Ise T, Moorcroft P R. The global-scale temperature and moisture dependencies of soil organic carbon decomposition: an analysis using a mechanistic decomposition model [J]. *Biogeochemistry*, 2006, **80**(3): 217-231.
- [6] Bauer J, Herbst M, Huisman J A, *et al.* Sensitivity of simulated soil heterotrophic respiration to temperature and moisture reduction functions[J]. *Geoderma*, 2008, **145**(1-2): 17-27.
- [7] Conant R T, Ryan M G, Ågren G I, *et al.* Temperature and soil organic matter decomposition rates-synthesis of current knowledge and a way forward[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(11): 3392-3404.
- [8] Moyano F E, Manzoni S, Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **59**: 72-85.
- [9] Hamdi S, Moyano F, Sall S, *et al.* Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 115-126.
- [10] 张彦军, 郭胜利, 刘庆芳, 等. 田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征[J]. *生态学报*, 2013, **33**(22): 7270-7276.
- Zhang Y J, Guo S L, Liu Q F, *et al.* Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(22): 7270-7276.
- [11] Ågren G I, Wetterstedt J Å M. What determines the temperature response of soil organic matter decomposition? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(7): 1794-1798.
- [12] 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.
- [13] Vanhala P, Karhu K, Tuomi M, *et al.* Transplantation of organic surface horizons of boreal soils into warmer regions alters microbiology but not the temperature sensitivity of decomposition [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(1): 538-550.
- [14] Karhu K, Fritze H, Hämäläinen K, *et al.* Temperature sensitivity of soil carbon fractions in boreal forest soil [J]. *Ecology*, 2010, **91**(2): 370-376.
- [15] 范分良, 黄平容, 唐勇军, 等. 微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 932-937.
- Fan F L, Huang P R, Tang Y J, *et al.* Altered microbial communities change soil respiration rates and their temperature sensitivity[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 932-937.
- [16] Zhang Y J, Guo S L, Zhao M, *et al.* Soil moisture influence on the interannual variation in temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in the Loess Plateau [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(11): 3655-3664.
- [17] Suseela V, Conant R T, Wallenstein M D, *et al.* Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old - field climate change experiment[J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(1): 336-348.
- [18] Zhang Q, Lei H M, Yang D W. Seasonal variations in soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration of a wheat and maize rotation cropland in the North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **180**: 34-43.
- [19] Poll C, Marhan S, Back F, *et al.* Field-scale manipulation of soil temperature and precipitation change soil CO₂ flux in a temperate agricultural ecosystem[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **165**: 88-97.
- [20] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子[J]. *生态学报*, 2011, **31**(18): 5217-5224.
- Gao H Y, Guo S L, Liu W Z. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(18): 5217-5224.
- [21] Nakadai T, Yokozawa M, Ikeda H, *et al.* Diurnal changes of carbon dioxide flux from bare soil in agricultural field in Japan [J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, **19**(2): 161-171.
- [22] Herbst M, Protingheuer N, Graf A, *et al.* Characterization and understanding of bare soil respiration spatial variability at plot scale[J]. *Vadose Zone Journal*, 2009, **8**(3): 762-771.
- [23] 王亭亭, 王秀君, 赵成义, 等. 新疆南部农田裸地土壤呼吸变化特征[J]. *干旱区研究*, 2015, **32**(3): 453-460.
- Wang T T, Wang X J, Zhao C Y, *et al.* Characteristics of soil respiration in bare soil of farmland in the South of Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(3): 453-460.
- [24] 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.
- [25] Tang J W, Qi Y, Xu M, *et al.* Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada [J]. *Tree Physiology*, 2005, **25**(1): 57-66.
- [26] 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.
- [27] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Nature*, 1998, **396**(6711): 570-572.
- [28] Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(4): 761-775.
- [29] Gaumont-Guay D, Black T A, Barr A G, *et al.* Biophysical controls on rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in a boreal black spruce stand [J]. *Tree Physiology*, 2008, **28**(2): 161-171.
- [30] Zhu B, Cheng W X. Rhizosphere priming effect increases the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(6): 2172-2183.
- [31] Zimmermann M, Leifeld J, Conen F, *et al.* Can composition and physical protection of soil organic matter explain soil respiration temperature sensitivity? [J]. *Biogeochemistry*, 2012, **107**(1-3): 423-436.

- [32] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, *et al.* Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**(1-4): 220-235.
- [33] Wang B, Zha T S, Jia X, *et al.* Soil moisture modifies the response of soil respiration to temperature in a desert shrub ecosystem [J]. *Biogeosciences*, 2014, **11**(2): 259-268.
- [34] Balogh J, Pintér K, Fóti S, *et al.* Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO₂ uptake in dry grasslands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(5): 1006-1013.
- [35] Saiz G, Black K, Reidy B, *et al.* Assessment of soil CO₂ efflux and its components using a process-based model in a young temperate forest site [J]. *Geoderma*, 2007, **139**(1-2): 79-89.
- [36] Reichstein M, Subke J A, Angeli A C, *et al.* Does the temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter depend upon water content, soil horizon, or incubation time? [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(10): 1754-1767.
- [37] Singh B K, Bardgett R D, Smith P, *et al.* Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(11): 779-790.
- [38] Unger S, Máguas C, Pereira J S, *et al.* Interpreting post-drought rewetting effects on soil and ecosystem carbon dynamics in a Mediterranean oak savannah [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **154-155**: 9-18.
- [39] Cho E, Choi M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **516**: 317-329.
- [40] 王昌江, 施成晓, 冯帆, 等. 集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4437-4445.
- Wang C J, Shi C X, Feng F, *et al.* Soil respiration in response to different ridge/furrow ratios and its relationship with soil moisture and temperature under ridge-furrow planting patterns [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4437-4445.
- [41] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, *et al.* Controls on soil respiration in semiarid soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(6): 945-951.
- [42] Smith V R. Moisture, carbon and inorganic nutrient controls of soil respiration at a sub-Antarctic island [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(1): 81-91.
- [43] Wan S Q, Norby R J, Ledford J, *et al.* Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(11): 2411-2424.
- [44] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis [J]. *Ecology*, 2012, **93**(4): 930-938.
- [45] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 53-69.
- [46] McCulley R L, Boutton T W, Archer S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: response to water additions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(3): 820-828.
- [47] 李晋昌, 董治宝, 王训明. 中国北方东部地区春季降尘量及其环境意义 [J]. *中国沙漠*, 2008, **28**(2): 195-201.
- Li J C, Dong Z B, Wang X M. Amount of spring dustfall and its environmental significance in east part of northern China [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, **28**(2): 195-201.
- [48] 孙东怀, 苏瑞侠, 袁宝印, 等. 黄土高原现代天然降尘的组成、通量和磁化率 [J]. *地理学报*, 2001, **56**(2): 171-180.
- Sun D H, Su R X, Yuan B Y, *et al.* Composition, susceptibility and input flux of present aeolian dust over Loess Plateau of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(2): 171-180.
- [49] Yuan H Z, Ge T D, Chen C Y, *et al.* Significant role for microbial autotrophy in the sequestration of soil carbon [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(7): 2328-2336.
- [50] Kayler Z, Sulzman E, Mix A, *et al.* The measurement and analysis of the isotopic signature of soil respiration derived from subsurface carbon dioxide [A]. In: EGU General Assembly 2010 [C]. Vienna, Austria: EGU, 2010.
- [51] Jin X B, Wang S M, Zhou Y K. Microbial CO₂ production from surface and subsurface soil as affected by temperature, moisture, and nitrogen fertilisation [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, **46**(3): 273-280.
- [52] Sakurai G, Jomura M, Yonemura S, *et al.* Inversely estimating temperature sensitivity of soil carbon decomposition by assimilating a turnover model and long-term field data [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **46**: 191-199.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)