

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.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响

严俊霞¹, 张媛¹, 焦晓燕^{2*}

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030031)

摘要: 基于对高粱地进行的5种培肥模式的长期定位试验, 研究了不同培肥模式下土壤呼吸速率(R_s)及其温度敏感性(Q_{10})与环境因子以及光谱特征参数的关系. 试验共设5个处理: 不施肥(CK)、无机肥(INF)、无机肥+有机肥(INF+M)、无机肥+有机肥+秸秆(INF+M+S)和有机肥+秸秆(M+S). 结果表明, 施肥处理没有改变 R_s 的时间动态变化趋势. INF与CK的 R_s 没有明显差异, 测定期间的平均值分别为 $3.68 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $3.51 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 与INF或CK相比, INF+M、M+S和INF+M+S的 R_s 分别增加了28.2%~39.1%、47.9%~76.0%和46.2%~50.8%, 有机肥和秸秆还田处理后 R_s 增加. 土壤温度和土壤水分分别能解释 R_s 季节变化的14%~96%和6%~37%, 施肥处理显著提高了土壤温度的解释能力, 而土壤水分的解释能力没有明显差异; R_s 与差值植被指数、比值植被指数、增强植被指数的相关系数高于归一化植被指数; 与红边斜率和红边面积的相关系数高于红边位置. 有机肥和秸秆的施用降低了 R_s 与光谱特征参数的相关性. 以光谱特征参数、 T_{10} 、 W_s 为自变量的3因子模型的决定系数 R^2 都高于双因子和单因子模型. 与CK相比, INF、INF+M、INF+M+S和M+S的 Q_{10} 分别提高了26%、39%、21%和37%, 表明施肥可以提高土壤呼吸的温度敏感性. 造成不同处理 $R_s/Q_{10}/R_{10}$ 差异的主要因子分别为Shannon多样性指数/容重/土壤有机质, 可以解释其97.6%/78.2%/92.8%的变异.

关键词: 培肥模式; 环境因子; 土壤呼吸; 温度敏感性; 高粱作物

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5515-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905138

Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field

YAN Jun-xia¹, ZHANG Yuan¹, JIAO Xiao-yan^{2*}

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Agricultural Environment and Resource, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract: The characteristics of soil respiration under the condition of fertilization have not been fully understood, especially for a long-term fertilization condition. In this study we measured both soil respiration using an LI-COR-6400-09 soil chamber attached to LI-COR-6400 portable photosynthesis system, and the vegetation spectrum using an ASD FieldSpec HandHeld2, in five different fertilization treatment fields. The soil respiration (R_s) and vegetation spectrum were simultaneously measured with two samples per month in the growing season in 2016 and 2017. The soil temperature at 10 cm depth (T_{10}) and moisture (W_s) for the surface of 10 cm were also measured simultaneously. The five different fertilization treatments included no fertilization (CK), inorganic fertilizer (INF), inorganic fertilizer + organic fertilizer (INF + M), inorganic fertilizer + organic fertilizer + straw turnover (INF + M + S) and organic fertilizer + straw turnover (M + S), and all treatments had been conducted since 2011. Based on those observation data, we made an analysis of R_s and its temperature sensitivity (Q_{10}) in the five different fertilization treatments. The results showed that no significant temporal change in R_s among the five treatments was found. No significant difference was found in R_s between the CK and INF treatments. Compared with the values of R_s in CK and INF, the R_s values in INF + M, M + S, and INF + M + S treatments increased by 28.2% - 39.1%, 47.9% - 76.0%, and 46.2% - 50.8%, respectively. This indicated that use of organic fertilization and straw application increased R_s . Both the T_s and W_s showed 14% - 96% and 6% - 37% in R_s seasonal variations, respectively. Among the treatments, the correlation coefficient of the fitted equations between R_s and T_s was higher in the INF + M, INF + M + S and M + S treatment than in CK and INF, but was not between R_s and W_s . For the relationship between R_s and vegetation indexes we found that the correlation coefficients between R_s and the difference vegetation index (DVI), ratio vegetation index (RVI), and enhanced vegetation index (EVI), respectively, were higher than that of R_s and the normalized differential vegetation index (NDVI); and that the correlation coefficients between R_s and the red edge slope (D_{red}) and red edge area (S_{red}) were higher than between R_s and the red edge position (λ_{red}). This indicated that the treatments in INF + M + S increased the correlation coefficient between R_s and the spectrum characteristics index. The determination coefficient of the fitted equations including the feature spectral parameters, T_{10} , and W_s variables was higher than that of the equations only including both T_{10} and W_s variables, or a single variable of T_{10} or W_s . Compared with CK, the Q_{10} value increased by 26%, 39%, 21%, and 37% for the INF, INF + M, INF + M + S, and M + S treatments, respectively. This indicated that temperature sensitivity Q_{10} increased under the condition of fertilization treatments. The Shannon diversity index, bulk density, and soil organic matter were the main factors causing the difference in R_s , Q_{10} , and R_{10} , i.e., R_s at a temperature of 10°C, in the different treatments, which could explain the 97.6%, 78.2%, and 92.8% variations in R_s , Q_{10} , and

收稿日期: 2019-05-18; 修订日期: 2019-06-26

基金项目: 国家现代农业高粱产业技术体系建设专项 (CARS-06-02-03); 高等学校服务产业创新学科建设计划项目

作者简介: 严俊霞 (1976~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态系统碳循环, E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xiaoyan_jiao@126.com

R_{10} , respectively.

Key words: fertilization treatment; environmental factors; soil respiration; temperature sensitivity; sorghum

土壤是陆地生态系统最大的碳库,其含碳量是大气的 2 倍^[1]. 每年从土壤中释放的碳是年化石燃料燃烧碳释放量的 10 倍以上,在全球碳循环研究中起着关键作用^[2],其微小变化会显著影响大气中的 CO_2 浓度,从而影响全球气候变化^[3]. 农田生态系统是全球碳库中最活跃的部分,每年通过土壤呼吸向大气排放 CO_2 $640 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[4],极易受到施肥、灌溉、耕作等人为管理措施的影响,使得农田土壤呼吸的时空变化更加复杂. 因此,阐明人为管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响机制,对精确评估 CO_2 排放量、缓解温室效应有重要意义.

施肥是农业生产活动中提高作物产量最常用的方法. 施肥不仅会改变土壤的理化性质、保水和通气能力,而且也会影响土壤微生物的群落结构及其活性^[5~8],进而影响土壤呼吸. 然而,施肥对土壤呼吸的影响尚没有统一结论. 土壤初始肥力水平^[9]、施肥种类^[10, 11]和施肥量^[12]等都会对土壤呼吸造成影响. 很多研究表明有机肥或有机无机肥配施都会使土壤呼吸速率显著增加^[10],而单施无机肥的结果则不尽相同^[13].

高粱(*Sorghum bicolor*)是世界第五大作物,具有抗旱、抗涝、耐盐碱、耐瘠薄、耐高温和耐寒冷等诸

多特性,是干旱及半干旱地区的主要粮食作物和工业原料. 目前,前人就施肥对玉米、小麦等农作物地土壤呼吸的影响已经做了大量的报道^[9, 10, 14],很少有研究关注不同培肥措施对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响. 基于此,本研究依托山西省农业科学院东阳试验基地高粱农田培肥的长期定位试验,对不同施肥处理下的土壤呼吸以及环境因子(土壤温度、水分、光谱植被指数以及微生物生物量、土壤酶活性等)进行了测定,分析不同培肥措施对土壤呼吸及其温度敏感性的影响机制,通过明确不同培肥措施下高粱地的固碳效应,以期为之后的研究提供科学依据和数据支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验依托山西省农业科学院东阳试验基地开展,该基地位于山西省晋中市榆次区东阳镇($112^{\circ}40'E, 37^{\circ}32'N$),海拔 804.6 m. 该区域属于暖温带半干旱大陆季风气候. 年均气温 9.7°C ,年降水量 440.7 mm,降水 70% 以上集中在 6~9 月,年日照数不低于 2 535 h. 供试土壤的基本理化性质见表 1.

表 1 样地土壤理化性质

Table 1 Soil physico-chemical properties of plot

土壤类型	土壤质地	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
潮土	黏土	11.13	1.16	17.81	177.65

1.2 试验设计

高粱培肥试验从 2011 年开始,采用大田分区的方法,每小区采用相同的管理措施,小区面积 75 m^2 ($5 \text{ m} \times 15 \text{ m}$),每种处理均为 3 个重复,随机区组排列设计. 播种前灌水 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,生育期间根据土壤水分状况进行灌溉. 试验品种为晋杂 34 号高粱. 每年 5 月上旬播种,同年 10 月上旬收获. 试验共设 5 个处理:CK(对照)、INF(无机肥)、INF + M(无机肥 + 有机肥)、INF + M + S(无机肥 + 有机肥 + 秸秆)和 M + S(有机肥 + 秸秆). 对照组 CK 做不施肥处理;INF 为无机肥处理,分别由 N、P 和 K 组成,其中氮肥用尿素,磷肥用磷二铵,钾肥用硫酸钾,在播种前将全部的钾肥、磷肥和一半的氮肥施入,剩余另一半的氮肥在高粱拔节期追施,氮肥、钾肥、磷肥的施入量分别为 225、75 和 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;M 为有机肥处理,在播种前将牛粪作为基肥全部一次性

施入,施入量为 $45 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$;S 为秸秆还田处理,在前一年收获时,将秸秆直接粉碎,全部均匀还田,还田量为 $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤呼吸、土壤温度和土壤水分的测定

使用 LI-COR 8100 土壤碳通量自动测量系统测定土壤呼吸速率(R_s),测定时间为 2016 年和 2017 年的 5~10 月,每月测定两次. 根据天气情况测定时间提前或推后 1~2 d. 每年测定前,在每个培肥小区中随机放置 3 个直径 19 cm、高 5 cm 的 PVC 环,间隔 2 m 左右. 所有 PVC 环一直保留到当年测定结束. 测定时每个 PVC 环测定 3 个循环,取平均值作为该处理的土壤呼吸速率. 土壤温度由 LI-COR 8100 碳通量自动测量系统自带的土壤温度探针测定,在测定 R_s 的同时,将温度探针插入土体 10 cm 深度测量土壤温度(T_{10}). 采用 TDR 法和传统烘

干法测定 0 ~ 10 cm 深度的土壤水分 (W_s)。

1.3.2 土壤理化因子的测定

土壤容重、饱和含水量、田间持水量采用环刀法测定, 每年高粱收获前测定一次; 土壤 pH 值采用土水比为 1:2.5 的溶液进行测定; 采用 Rovira 和 Vallejo 酸水解法测定土壤活性炭 1 和活性炭 2 (LC1 和 LC2); 用马尔文粒度仪 (Mastersizer 3000) 测定土壤的机械组成; 根系的测定主要采用 WinRHIZO 根系形态分析系统; 土壤微生物多样性用 BIOLOG 微平板分析法; 土壤酶活性测定采用高锰酸钾滴定法、硫代硫酸钠滴定法、靛酚蓝比色法和磷酸苯二钠比色法; 土壤养分测定的方法采用了凯氏定氮法、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 法、 NH_4OAC 浸提-火焰光度计法和重铬酸钾容量法。测定的具体方法详见文献[15]。土壤总空隙度采用如下公式计算:

$$\text{土壤总空隙度} = (d_s - r_s) / d_s \times 100\%$$

式中, d_s 为土粒密度, 本研究中为 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, r_s 为土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.3.3 光谱数据获取与处理

采用 ASD FieldSpec HandHeld 2 便携式地物光谱仪采集高粱冠层反射光谱。2016 年光谱仪损坏没有观测, 仅在 2017 年高粱生长季进行了观测, 采集日期同土壤呼吸。选取归一化植被指数 (NDVI)、差值植被指数 (DVI)、比值植被指数 (RVI)、增强植被指数 (EVI) 和红边参数 (λ_{red} : 红边位置, D_{red} : 红边斜率, S_{red} : 红边面积) 用于分析生物因子与土壤呼吸的相关性; 冠层反射光谱的测定方法和植被指数的具体计算方法见文献[16]。

1.4 数据处理与分析

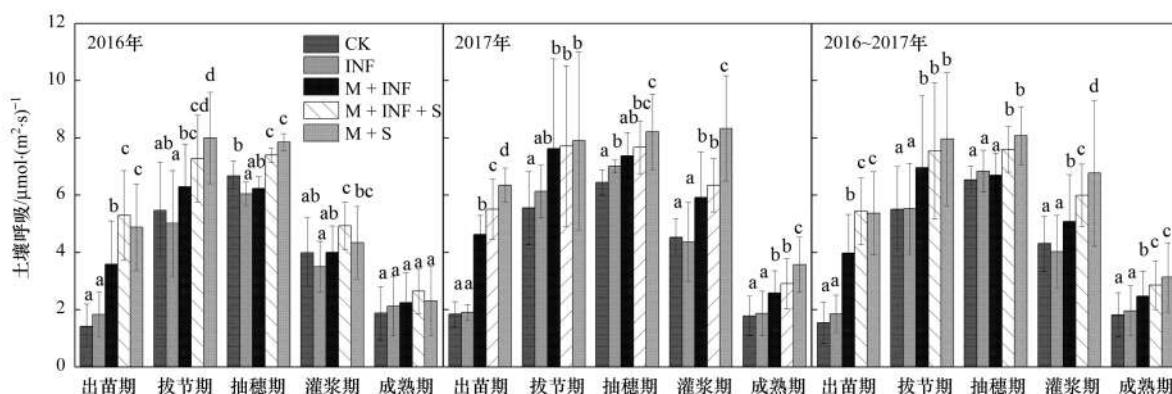
方差分析用于检验 5 种培肥模式下土壤呼吸速率 (R_s)、土壤温度 (T_{10}) 和土壤水分 (W_{10}) 的均值差异是否显著。用线性或非线性方程分析 R_s 与 T_{10} 或

R_s 与 W_s 之间的单因素关系; 用 R_s 与 T_{10} 的指数方程的拟合系数计算 Q_{10} 和土壤基础呼吸 [R_{10} , $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; 用线性方程拟合 R_s 与 T_{10} 、 W_s 、植被指数的双因子或三因子模型; 具体分析方法参见文献[17]。用相关分析法分析根系生物量、产量、土壤微生物多样性、高光谱参数、土壤酶活性、土壤养分等因子与土壤呼吸的相关关系。数据分析基于 SPSS 19.0 完成, 所有图件用 Sigmaplot 12.5 绘制。

2 结果与分析

2.1 不同培肥模式土壤呼吸动态变化特征

从苗期到成熟期, R_s 呈现先增加后降低的趋势, 最高值出现在拔节期或抽穗期 (图 1)。各生育期 CK 和 INF 差异不显著 ($P > 0.05$), 除抽穗期 INF + M 与 CK 和 INF 差异不显著外, 其他生育期 INF + M、INF + M + S 和 M + S 处理显著高于 CK 和 INF ($P < 0.05$)。5 个处理 R_s 的平均速率表现为: M + S [$5.19 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] > INF + M + S [$5.13 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] > INF + M [$4.50 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] > CK [$3.68 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] > INF [$3.51 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] (2016 年); M + S [6.44 和 $5.81 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] > INF + M + S [5.52 和 $5.33 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] > INF + M [5.09 和 $4.79 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] > INF [3.66 和 $3.58 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] > CK [3.46 和 $3.57 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] [2017 年和两年 (2016 和 2017)], 见表 2。INF (单施无机肥) 与 CK 无显著差异。与单施无机肥相比, 有机 + 无机肥配施使 R_s 增加了 28.21% ~ 39.07%, 有机肥 + 秸秆还田提高了 47.86% ~ 75.96%, 有机肥 + 无机肥 + 秸秆提高了 46.15% ~ 50.82%, 表明施有机肥和秸秆还田均可以促进 R_s 。



图中不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

图 1 不同培肥处理下土壤呼吸生育期动态变化

Fig. 1 Seasonal variation of soil respiration under different fertilization treatments

2.2 环境因子对土壤呼吸时间动态变化的影响

2.2.1 土壤温度

除 2017 年 CK 未达到显著水平外,其余处理的 R_s 与 T_{10} 呈显著或极显著的指数关系,与 CK 相比,施肥的 4 个处理都提升了拟合方程的解释度(表 3)。用 2 年测定的数据分析表明,与 CK 相比,施肥

处理后的 Q_{10} 均有不同程度地提高,INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S 处理分别提高了 19.60%、39.65%、18.53% 和 44.05%;5 个处理(CK、INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S)的 R_{10} 分别为 1.64、1.44、1.78、2.45 和 2.11 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,表明施有机肥均提高了土壤基础呼吸。

表 2 不同施肥处理土壤呼吸比较¹⁾/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$
Table 2 Comparison of soil respiration under different fertilization treatments/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$

年份	处理	平均值 ¹⁾	标准差	95 置信区域		最小值	最大值	变异系数/%
				下界	上界			
2016	CK	3.68a	2.11	2.33	5.02	0.74	6.90	57.34
	INF	3.51a	1.84	2.34	4.67	0.85	6.69	52.42
	INF + M	4.50a	2.38	2.99	6.01	1.03	9.76	52.89
	INF + M + S	5.13a	2.12	3.78	6.47	1.83	8.57	41.33
	M + S	5.19a	2.59	3.54	6.83	0.99	10.21	49.90
	总计	4.40	2.26	3.82	4.98	0.74	10.21	51.36
2017	CK	3.46a	2.06	2.15	4.76	1.03	6.88	59.54
	INF	3.66a	2.28	2.21	5.11	0.95	7.36	62.30
	INF + M	5.09ab	2.65	3.40	6.77	2.02	11.27	52.06
	INF + M + S	5.52ab	2.52	3.92	7.12	2.32	10.98	45.65
	M + S	6.44b	2.72	4.70	8.17	2.90	11.53	42.24
	总计	4.83	2.63	4.15	5.51	0.95	11.53	54.45
2016 ~ 2017	CK	3.57a	2.04	2.71	4.43	0.74	6.90	57.14
	INF	3.58a	2.03	2.73	4.44	0.85	7.36	56.70
	INF + M	4.79ab	2.48	3.75	5.84	1.03	11.27	51.77
	INF + M + S	5.33b	2.28	4.36	6.29	1.83	10.98	42.78
	M + S	5.81b	2.68	4.68	6.94	0.99	11.53	46.13
	总计	4.62	2.45	4.17	5.06	0.74	11.53	53.03

1) 不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)

表 3 不同施肥处理及年份下土壤呼吸与土壤温度拟合结果

Table 3 Fitting results of soil respiration and soil temperature under different fertilization treatments and years

施肥处理	年份	拟合方程	R^2	P	$Q_{10}/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	$R_{10}/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$
CK	2016	$R_s = 0.8182e^{0.0645T_{10}}$	0.45	0.017	1.91	1.56
	2017	$R_s = 1.1914e^{0.039T_{10}}$	0.14	0.232	1.48	1.76
	2016 ~ 2017	$R_s = 0.9776e^{0.0515T_{10}}$	0.28	0.008	1.67	1.64
INF	2016	$R_s = 0.7891e^{0.0694T_{10}}$	0.57	0.005	2.00	1.58
	2017	$R_s = 0.5418e^{0.0778T_{10}}$	0.42	0.022	2.18	1.80
	2016 ~ 2017	$R_s = 0.7169e^{0.0694T_{10}}$	0.46	<0.001	2.00	1.44
INF + M	2016	$R_s = 0.7086e^{0.0889T_{10}}$	0.85	<0.001	2.43	1.72
	2017	$R_s = 0.8405e^{0.0801T_{10}}$	0.70	0.001	2.23	1.87
	2016 ~ 2017	$R_s = 0.7625e^{0.0849T_{10}}$	0.79	<0.001	2.34	1.78
INF + M + S	2016	$R_s = 1.3522e^{0.0655T_{10}}$	0.78	0.001	1.93	2.60
	2017	$R_s = 1.0595e^{0.0744T_{10}}$	0.75	<0.001	2.10	2.23
	2016 ~ 2017	$R_s = 1.2363e^{0.0685T_{10}}$	0.76	<0.001	1.98	2.45
M + S	2016	$R_s = 0.6757e^{0.0981T_{10}}$	0.96	<0.001	2.67	1.80
	2017	$R_s = 1.3616e^{0.0699T_{10}}$	0.71	0.001	2.01	2.74
	2016 ~ 2017	$R_s = 0.8748e^{0.088T_{10}}$	0.85	<0.001	2.41	2.11

2.2.2 土壤水分

采用 4 种模型(线性、指数、幂函数和二次函数模型)分析 R_s 与 W_s 的关系,5 种处理的二次函数模型解释度明显高于其他 3 种模型。采用所有的

测定数据分析表明,不同施肥处理下,土壤水分对土壤呼吸变异的解释度分别为 28% (CK)、38% (INF)、29% (INF + M)、37% (INF + M + S) 和 28% (M + S),与对照组相比,不同施肥处理并未提升土

壤水分对土壤呼吸变异的解释度(表4)。

2.2.3 生物因子

4种植被指数中,CK的 R_s 与DVI呈极显著正相关,与EVI呈显著正相关,与NDVI、RVI相关不显著;INF的 R_s 与DVI、EVI呈极显著正相关,与NDVI、RVI呈显著正相关;INF+M和INF+M+S的 R_s 与DVI、RVI和EVI呈显著正相关,与NDVI相关不显著;M+S的 R_s 与RVI的相关系数最高为0.64,但未达到显著水平;用所有测定数据做相关分

析结果表明: R_s 与4种植被指数都呈极显著相关,其中DVI和EVI的相关系数最高为0.69(表5)。3个红边参数中, R_s 与 D_{red} 、 S_{red} 的相关性好于 λ_{red} 的,除M+S的相关系数没有达到显著水平外,CK和INF的都达到极显著水平,INF+M、INF+M+S的达到显著水平。用所有测定的数据做相关分析表明,3个红边参数与 R_s 的相关性都达到了极显著水平, D_{red} 、 S_{red} 和 λ_{red} 的相关系数依次为0.70、0.69和0.52(表5)。

表4 不同施肥处理下土壤呼吸与土壤水分拟合结果

Table 4 Fitting results of soil respiration and soil moisture under different fertilization treatments

施肥处理	年份	拟合方程	R^2	P
CK	2016	$R_s = -0.072\ 3\ W_s^2 + 1.779\ 7\ W_s - 5.8269$	0.49	0.050
	2017	$R_s = -0.011\ 2\ W_s^2 + 0.108\ 3\ W_s + 4.405\ 8$	0.23	0.319
	2016~2017	$R_s = -0.038\ 6\ W_s^2 + 0.908\ 6\ W_s - 0.906\ 6$	0.28	0.031
INF	2016	$R_s = -0.061\ 2\ W_s^2 + 1.578\ W_s - 5.397\ 1$	0.57	0.023
	2017	$R_s = -0.027\ W_s^2 + 1.184\ 5\ W_s + 14.732$	0.57	0.022
	2016~2017	$R_s = -0.035\ 3\ W_s^2 + 0.751\ 1\ W_s + 0.772\ 8$	0.38	0.007
INF+M	2016	$R_s = -0.048\ 7\ W_s^2 + 1.350\ 3\ W_s - 3.572$	0.44	0.074
	2017	$R_s = -0.011\ W_s^2 + 0.116\ 7\ W_s + 6.530\ 2$	0.28	0.233
	2016~2017	$R_s = -0.031\ 2\ W_s^2 + 0.830\ 1\ W_s + 0.315\ 9$	0.29	0.029
INF+M+S	2016	$R_s = -0.053\ 2\ W_s^2 + 1.613\ 3\ W_s - 5.589\ 9$	0.57	0.022
	2017	$R_s = -0.022\ 4\ W_s^2 + 0.597\ 5\ W_s + 2.551$	0.30	0.195
	2016~2017	$R_s = -0.033\ 9\ W_s^2 + 1.004\ 8\ W_s - 1.055\ 9$	0.37	0.008
M+S	2016	$R_s = -0.053\ W_s^2 + 1.307\ 6\ W_s - 1.103\ 4$	0.49	0.049
	2017	$R_s = -0.035\ 1\ W_s^2 + 0.993\ 6\ W_s + 0.509\ 9$	0.31	0.193
	2016~2017	$R_s = -0.033\ 4\ W_s^2 + 0.868\ W_s + 1.340\ 5$	0.28	0.033

表5 高粱地土壤呼吸与各类高光谱参数的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficients between hyperspectral parameters and soil respiration of sorghum

处理	CK	INF	INF+M	INF+M+S	M+S	所有
NDVI	0.62	0.77*	0.54	0.57	0.52	0.56**
DVI	0.84**	0.90**	0.73*	0.68*	0.55	0.69**
RVI	0.53	0.74*	0.70*	0.74*	0.64	0.68**
EVI	0.79*	0.90**	0.71*	0.70*	0.57	0.69**
λ_{red}	0.50	0.66	0.60	0.33	0.48	0.52**
D_{red}	0.85**	0.91**	0.70*	0.71*	0.60	0.70**
S_{red}	0.86**	0.91**	0.74*	0.70*	0.55	0.69**

1) NDVI:归一化植被指数;DVI:差值植被指数;RVI:比值植被指数;EVI:增强植被指数; λ_{red} :红边位置; D_{red} :红边斜率; S_{red} :红边面积;*表示 $P < 0.05$,**表示 $P < 0.01$

2.2.4 基于生物因子和非生物因子的土壤呼吸模型构建

由于光谱仪故障,高粱冠层光谱反射率只在2017年生长季测定。用2017年每次测定的 T_{10} 、 W_s 以及光谱特征参数数据进行分析。根据前面分析的结果,高光谱参数选择与呼吸相关性最好的DVI、EVI,红边参数选择 D_{red} 、 S_{red} 参与复合模型的构建。结果表明,用光谱特征参数、 T_{10} 和 W_s 做自变量的3因子 R_s 模型的回归模型均达到了99%的极显著水平,模型的决定系数 R^2 都高于双因子和单因子模

型,均能很好地预测高粱地的土壤呼吸(表6)。

2.3 环境因子对不同处理土壤呼吸的影响

分别对每个样地土壤呼吸的年均值(R_{av})、温度敏感性(Q_{10})和基础呼吸速率(R_{10})与环境因子进行皮尔逊相关分析,结果见表7。从中可以看出, R_{av} 与根表面积、Shannon多样性指数、碳源利用丰富度指数呈极显著正相关,与根体积、蔗糖酶、全氮、速效钾、有效磷、pH、砂粒和土壤水分呈显著正相关,与容重、黏粒含量和粉砂含量呈显著负相关;土壤温度敏感性 Q_{10} 与容重呈显著负相

关,与其他因子的相关性都不显著; R_{10} 与有机质呈极显著正相关,与根表面积、根体积和碳源利用丰富度指数、红边面积、蔗糖酶、全氮、有效磷、速效钾和土壤水分呈显著正相关. 逐步回归分析表明,决定不同处理土壤呼吸均值、 Q_{10} 、 R_{10} 差异的主要因子分别为 Shannon 多样性指数、容重和土壤有机质,可以解释 97.6%、78.2% 和 92.8% 的变异.

表 6 土壤呼吸与生物因子和非生物因子的回归模型¹⁾
Table 6 Regression models of soil respiration with biotic and abiotic factors

模型	自变量	回归方程	R^2	RMSE	MAE
三因子	$DVI、T_{10}、W_s$	$R_s = -8.922 + 8.111 DVI + 0.336T_{10} + 0.289 W_s$	0.63 **	1.566	1.161
	$EVI、T_{10}、W_s$	$R_s = -8.934 + 5.246 EVI + 0.335T_{10} + 0.275 W_s$	0.63 **	1.575	1.187
	$D_{red}、T_{10}、W_s$	$R_s = -9.025 + 387.189D_{red} + 0.319T_{10} + 0.312 W_s$	0.66 **	1.514	1.142
	$S_{red}、T_{10}、W_s$	$R_s = -8.960 + 8.972S_{red} + 0.328T_{10} + 0.299 W_s$	0.63 **	1.559	1.156
双因子	$T_{10}、W_s$	$R_s = -9.380 + 0.516T_{10} + 0.233 W_s$	0.51 **	1.790	1.373
	$DVI、T_{10}$	$R_s = -0.668 + 6.687 DVI + 0.182T_{10}$	0.52 **	1.783	1.420
	$EVI、T_{10}$	$R_s = -0.933 + 4.548 EVI + 0.179T_{10}$	0.52 **	1.774	1.414
	$D_{red}、T_{10}$	$R_s = -0.284 + 302.930D_{red} + 0.165T_{10}$	0.53 **	1.765	1.429
	$S_{red}、T_{10}$	$R_s = -0.521 + 7.124S_{red} + 0.176T_{10}$	0.52 **	1.787	1.423
	T_{10}	$R_s = -2.401 + 0.360 T_{10}$	0.44 **	1.931	1.538
单因子	T_{10}	$R_s = 0.783e^{0.083 T_{10}}$	0.54 **	1.965	1.544
	W_s	$R_s = 8.048 - 0.171 W_s$	0.08 *	2.461	1.983
	DVI	$R_s = 2.043 + 10.502DVI$	0.47 **	1.870	1.531
	EVI	$R_s = 1.592 + 7.042EVI$	0.48 **	1.861	1.522
	D_{red}	$R_s = 2.269 + 450.891D_{red}$	0.49 **	1.838	1.519
	S_{red}	$R_s = 2.119 + 11.107S_{red}$	0.47 **	1.866	1.524

1) *、* 表示在 0.01 水平上显著; $n=45$

表 7 土壤呼吸、温度敏感性、基础呼吸速率与环境因子的相关系数
Table 7 Correlation coefficients between soil respiration, temperature sensitivity, base respiration rate, and environmental factors

影响因子	R_{av}	R_{10}	Q_{10}	影响因子	R_{av}	R_{10}	Q_{10}
根系生物量/g	0.869	0.742	0.719	全氮/ $g \cdot kg^{-1}$	0.886 *	0.940 *	0.492
根表面积/ cm^2	0.967 **	0.942 *	0.527	有效磷/ $mg \cdot kg^{-1}$	0.882 *	0.936 *	0.487
根体积/ cm^3	0.889 *	0.896 *	0.567	速效钾/ $mg \cdot kg^{-1}$	0.894 *	0.955 *	0.470
产量/ $kg \cdot hm^{-2}$	0.674	0.553	0.696	有机质/ $g \cdot kg^{-1}$	0.817	0.964 **	0.335
EVI	0.861	0.869	0.565	pH	0.957 *	0.668	0.874
红边位置	0.697	0.537	0.724	容重/ $g \cdot kg^{-1}$	-0.880 *	-0.566	-0.884 *
红边斜率	0.819	0.817	0.576	饱和含水量/%	0.861	0.606	0.835
红边面积	0.795	0.905 *	0.403	田间持水量/%	0.758	0.622	0.680
Shannon 多样性指数	0.988 **	0.870	0.677	孔隙度/%	0.874	0.567	0.870
碳源利用丰富度指数	0.980 **	0.895 *	0.622	黏粒	-0.886 *	-0.837	-0.608
过氧化氢酶/ $mL \cdot g^{-1}$	0.656	0.637	0.557	粉砂	-0.892 *	-0.789	-0.705
脲酶/ $mg \cdot g^{-1}$	0.718	0.623	0.673	砂粒	0.892 *	0.793	0.695
蔗糖酶/ $mg \cdot g^{-1}$	0.942 *	0.904 *	0.591	土壤温度/%	-0.828	-0.671	-0.778
碱性磷酸酶/ $mg \cdot g^{-1}$	0.718	0.623	0.673	土壤水分/%	0.885 *	0.879 *	0.588

1) *、* 表示在 0.01 水平上显著,* 表示在 0.05 水平上显著; $n=5$

3 讨论

3.1 环境因子对土壤呼吸时间动态变化的影响

本研究中,高粱地的土壤呼吸随土壤温度/高粱生长阶段的不同有明显的季节变化,最高值出现在拔节期或抽穗期,变化范围(以 CO_2 计)为 $0.74 \sim 11.53 \mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ (图 1),与高会议等^[14]对黄土旱塬区冬小麦土壤呼吸的研究结果相一致. 有许多研究表明,在没有水分或其他环境因子胁迫的情况下,土壤呼吸与温度有显著的相关关系. 本研

究表明,土壤温度能解释 R_s 季节变化的 14% ~ 96%,除 2017 年 CK 处理的 R_s 与 T_{10} 未达到显著水平外,其余处理呈显著或极显著的指数关系,与大多数研究相一致. 与 CK 相比,INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S 处理的 T_{10} 解释 R_s 季节变化的能力分别提高了 18%、51%、46% 和 57% (2 年数据),表明施肥处理显著提高了土壤温度的解释能力. 土壤水分通过影响土壤通气状况、微生物活性等进而影响土壤呼吸速率,很多研究认为土壤水分只有在最低或最高时才会对土壤呼吸速率产生影响^[17]. 本

研究中, 5 种施肥处理的土壤呼吸速率和土壤水分之间采用二次函数拟合效果最好, 表明随着土壤水分的增加, 土壤呼吸速率先增加后减低, 与吴瑞娟等^[18]对东北中部春玉米农田土壤呼吸的研究结果相一致. 5 种处理中, 采用 2 a 的数据分析, 土壤水分对土壤呼吸变异的解释度分别为 28% (CK)、38% (INF)、29% (INF + M)、37% (INF + M + S) 和 28% (M + S), 与对照组相比, 不同施肥处理并未显著提升土壤水分对土壤呼吸变异的解释度. 当土壤水分分别超过 11.77% (CK)、10.64% (INF)、13.30% (INF + M)、14.82% (INF + M + S) 和 12.99% (M + S) 时, 土壤呼吸速率可能呈现下降趋势. 生物因子是影响土壤呼吸时空变化的关键因素之一^[19], 植被指数是植物光合能力的指示指标^[20], 影响土壤呼吸的底物供应, 与土壤呼吸相关关系显著. 本研究中, 采用所有的数据分析表明, 土壤呼吸与 4 个植被指数都呈显著的正相关, 与 Huang 等^[21]对青藏高原草地和 Wu 等^[22]对加拿大北方黑云杉林的研究结果相一致. 土壤呼吸与 DVI、RVI、EVI 的相关系数高于与 NDVI 的, 可能是因为高粱作物拔节期后植被盖度较高, NDVI 达到了饱和, 不能很好地反映出植被盖度间的空间差异. Huang 等^[23]也指出玉米和冬小麦农田生态系统土壤呼吸与 EVI 的相关性强于与 NDVI 的, 原因可能是当叶面积指数大于 3 时, NDVI 显示的季节变化幅度较小, 与本研究的结果相一致. 红边是植物所特有的光谱特征, 常被用来对植物营养状况、长势情况、水分含量、叶面积等指标进行监测. 采用所有测定的数据分析表明, 高粱地的土壤呼吸与 3 个红边参数都呈极显著正相关, 相关系数从大到小依次为红边斜率 (0.70)、红边面积 (0.69)、红边位置 (0.52), 表明红边参数可以用来模拟土壤呼吸的季节变化, 与武江星^[16]对生物炭和覆膜处理高粱的研究结果相一致.

3.2 施肥对土壤呼吸的影响

从两年的均值比较来看, 5 种处理土壤呼吸速率的平均值从高到低依次为 $M + S > INF + M + S > INF + M > INF > CK$. 与 CK 相比, 2016 年 INF 土壤呼吸的均值比 CK 低 $0.17 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、2017 年和 2016 ~ 2017 年的结果比 CK 高 $0.20 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $0.01 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 且均未达到显著水平. 关于无机肥对土壤呼吸的研究已经有很多, 但结论却不一致, 有增加^[12]和抑制^[24]、无显著影响^[9]这 3 种结论, 取决于样地的初始肥力水平和施肥量^[9]. Sun 等^[9]认为低、高肥力农田施氮肥和磷肥后与各自的对照相比, 土壤呼吸分别显著提

高了 46% 和 14%. 其原因可能是: 一方面, 施肥增加了低、高肥力农田的植物碳输入、光合速率、根系生物量和作物产量, 进而使土壤自养呼吸增加, 另一方面, 施氮肥和磷肥增加了低肥力农田的土壤微生物生物量、土壤碳的可利用性和酶活性, 进而刺激了土壤微生物呼吸的增加, 而高肥力农田的土壤微生物量下降、土壤酶活性增强, 因此高肥力农田土壤总呼吸的增加可能主要是由于根系呼吸的增加, 而低肥力农田的自养和异养呼吸都增加, 因此增加幅度高于高肥力农田. 本研究中, 与 CK 相比, INF 的根系生物量、产量和土壤蔗糖酶活性分别增加了 76.3% ($P < 0.05$)、80.6% ($P < 0.05$) 和 22.3% ($P > 0.05$), 土壤全氮、有效磷、速效钾和有机质增加了 10.3% ($P > 0.05$)、154.2% ($P > 0.05$)、10.7% ($P > 0.05$) 和 8.1% ($P > 0.05$), 而土壤微生物 Shannon 多样性指数、碳源利用丰富度指数, 拔节期减低了 5.2% ($P < 0.05$) 和 20.0% ($P < 0.05$)^[15], 表明施无机肥后高粱地自养呼吸增加, 而异养呼吸有可能减低, 因此土壤总呼吸变化不明显, 与 Sun 等^[9]报道的高肥力农田的结果相同. M + S 处理添加无机肥后 (INF + M + S) 土壤总呼吸减低了 1.2% ($P > 0.05$, 2016 年)、16.7% ($P > 0.05$, 2017 年) 和 8.3% ($P > 0.05$, 2016 ~ 2017 年), 其原因可能是添加无机肥后虽然 INF + M + S 的根系生物量、产量、土壤蔗糖酶活性、土壤养分都有所增加, 但是其土壤微生物 Shannon 多样性指数和碳源利用丰富度指数都降低^[15]. 大量研究表明, 有机和无机肥配施可以显著增加土壤呼吸速率^[11, 14], 施入有机肥一方面能够增加土壤呼吸的底物供应, 另一方面可以显著提高土壤微生物的活性, 进而促进土壤有机质的矿化^[7, 8]. 本研究中, INF 处理添加有机肥 (INF + M) 后, 根系生物量、土壤养分、微生物多样性和酶活性均有提高^[15], 进而使得土壤呼吸增加了 28.2% ($P > 0.05$, 2016 年)、39.1% ($P > 0.05$, 2017 年) 和 33.8% ($P > 0.05$, 2016 ~ 2017 年), 这一结果与上述结果相一致. 秸秆还田可以有效提高土壤养分以及有机质含量, 致使土壤微生物数量增多, 同时还可以降低土壤容重、增加土壤通气孔隙, 使得土壤的耕层变得疏松, 并能影响作物生长发育, 促进作物产量提高^[7], 因此会促进土壤呼吸. 本研究中, 添加秸秆后 (INF + M + S) 比 INF + M 的土壤呼吸增加了 1.2% ($P > 0.05$, 2016 年)、8.4% ($P > 0.05$, 2017 年) 和 11.27% ($P > 0.05$, 2016 ~ 2017 年), 表明秸秆还田和其他肥料的配施可以显著促进 R_s , 与田冬等^[25]和胡发龙等^[26]的研究结果相一致.

3.3 施肥对土壤呼吸温度敏感性的影响

不同生态系统类型的 Q_{10} 不尽相同^[27, 28], 从略大于 1 到大于 10, 主要受所在区域的环境因子以及生态系统的底物供应影响. 本研究中, 5 种处理的 Q_{10} 在 1.48 ~ 2.67 之间, 位于 Raich 等^[29] 报道的范围内(1.3 ~ 3.3). 有研究表明, 易降解有机碳的 Q_{10} 低, 难降解有机碳的高^[30]. 本研究中, 相比于 CK, 除 INF + M + S 活性碳的含量增加了 $0.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外, INF、INF + M 和 M + S 分别减少了 0.11、0.06 和 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而顽固性有机碳 INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S 分别增加了 0.3、1.6、4.1 和 $2.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 因此, 与 CK 相比, INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S 的 Q_{10} 分别提高了 26%、39%、21% 和 38%, 与 Cusack 等^[31] 和邵蕊等^[32] 的研究结果相一致, 施肥使土壤温度敏感性增加. Guo 等^[24] 研究也表明, 连续 15a 施氮肥和磷肥后青藏高原草甸的土壤微生物呼吸减低而土壤温度敏感性增加, 可能是因为施肥增加了具有高温敏感性难降解有机质的含量. 然而, Sun 等^[9] 报道了长武黄土高原农业生态试验站的低肥力农田施无机肥后 Q_{10} 显著降低了 6.9%, 高肥力农田没有明显变化, 因此施肥对 Q_{10} 的影响还有待进一步深入研究.

4 结论

(1) 施肥处理并没有改变 R_s 的时间动态变化趋势, 从苗期到成熟期, R_s 呈现先增加后降低的趋势, 峰值出现在拔节期或抽穗期. 单施无机肥并没有使 R_s 明显增加, 而有机无机肥配施、有机无机肥配施加秸秆还田、有机肥加秸秆还田使 R_s 增加. 同样, 施肥提高了 R_s 的温度敏感性.

(2) 土壤温度和土壤水分分别能解释 R_s 季节变化的 14% ~ 96% 和 6% ~ 37%, 施肥处理显著提高了土壤温度对土壤呼吸的解释能力, 但施肥处理后土壤水分对呼吸的影响没有明显差异; R_s 与 DVI、RVI、EVI 的相关系数高于与 NDVI 的相关系数, 与 D_{red} 和 S_{red} 的相关系数高于 λ_{red} , 有机肥和秸秆的施用降低了 R_s 与光谱特征参数的相关性; 用光谱特征参数、 T_{10} 、 W_s 为自变量的 3 因子模型的决定系数 R^2 都高于双因子和单因子模型.

(3) 造成不同施肥处理下 R_s 、 Q_{10} 和 R_{10} 差异的主要因子分别为 Shannon 多样性指数、容重和土壤有机质, 它们分别可以解释其 97.6%、78.2% 和 92.8% 的变异.

参考文献:

[1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. Global Change Biology, 2010, 1(1): 77-91.

[2] 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.

[3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.

[4] 刘德辉, 陶于祥. 土壤、农业与全球气候变化[J]. 火山地质与矿产, 2000, 21(4): 290-295.

Liu D H, Tao Y X. Soil, agriculture and global climate change[J]. Volcanology & Mineral Resources, 2000, 21(4): 290-295.

[5] Ran W B, Wang B, Xun W, et al. Significant alteration of soil bacterial communities and organic carbon decomposition by different long-term fertilization management conditions of extremely low-productivity arable soil in South China[J]. Environmental Microbiology, 2016, 18(6): 1907-1917.

[6] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S, et al. Effects of 15 years of manure and mineral fertilizers on enzyme activities in particle-size fractions in a North China Plain soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2014, 60: 112-119.

[7] Liu E K, Yan C R, Mei X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. Geoderma, 2010, 158(3-4): 173-180.

[8] Zhang S Q, Huang S M, Li J W, et al. Long-term manure amendments and chemical fertilizers enhanced soil organic carbon sequestration in a wheat (*Triticum aestivum* L.)-maize (*Zea mays* L.) rotation system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 97(8): 2575-2581.

[9] Sun Q Q, Rui W, Ying W, et al. Temperature sensitivity of soil respiration to nitrogen and phosphorous fertilization: Does soil initial fertility matter? [J]. Geoderma, 2018, 325: 172-182.

[10] Lai R, Arca P, Lagomarsino A, et al. Manure fertilization increases soil respiration and creates a negative carbon budget in a Mediterranean maize (*Zea mays* L.)-based cropping system[J]. Catena, 2017, 151: 202-212.

[11] 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.

Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1445-1451.

[12] Iqbal J, Hu R G, Shan L, et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 131(3-4): 292-302.

[13] Zhou L Y, Zhou X H, Zhang B C, et al. Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, 20(7): 2332-2343.

[14] 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.

Gao H Y, Guo S L, Liu W Z, et al. Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2551-2559.

[15] 董二伟, 王成, 丁玉川, 等. 高粱生长及其土壤环境对不同培肥措施的响应[J]. 华北农学报, 2017, 32(2): 217-225.

Dong E W, Wang C, Ding Y C, et al. Response of different fertilizing on growth and soil environment of sorghum[J]. Acta

- Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, **32**(2): 217-225.
- [16] 武江星. 生物炭和覆膜对高粱高光谱特征及其土壤呼吸的影响[D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [17] Li H J, Yan J X, Yue X F, *et al.* Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, **148**(3): 490-503.
- [18] 吴瑞娟, 王迎春, 朱平, 等. 长期施肥对东北中部春玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(1): 44-52.
- Wu R J, Wang Y C, Zhu P, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil respiration in spring maize field in the central part of northeast China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, **24**(1): 44-52.
- [19] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(7): 778-785.
- Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. Advances in Earth Sciences, 2005, **20**(7): 778-785.
- [20] Rahman A F, Sims D A, Cordova V D, *et al.* Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes [J]. Geophysical Research Letters, 2005, **32**(19): L19404.
- [21] Huang N, He J S, Niu Z. Estimating the spatial pattern of soil respiration in Tibetan alpine grasslands using Landsat TM images and MODIS data [J]. Ecological Indicators, 2013, **26**: 117-125.
- [22] Wu C Y, Gaumont-Guay D, Black T A, *et al.* Soil respiration mapped by exclusively use of MODIS data for forest landscapes of Saskatchewan, Canada [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, **94**: 80-90.
- [23] Huang N, Niu Z, Zhan Y L, *et al.* Relationships between soil respiration and photosynthesis-related spectral vegetation indices in two cropland ecosystems [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, **160**: 80-89.
- [24] Guo H, Ye C L, Zhang H, *et al.* Long-term nitrogen & phosphorus additions reduce soil microbial respiration but increase its temperature sensitivity in a Tibetan alpine meadow [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, **113**: 26-34.
- [25] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and Biochar in rape-maize rotation systems [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [26] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(1): 120-131.
- Hu F L, Chai Q, Gan Y T, *et al.* Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(1): 120-131.
- [27] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, **27**(6): 753-760.
- [28] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, **8**(3): 315-323.
- [29] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, **9**(1): 23-36.
- [30] Vanhala P, Karhu K, Tuomi M, *et al.* Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(11): 2967-2970.
- [31] Cusack D F, Torn M S, McDowell W H, *et al.* The response of heterotrophic activity and carbon cycling to nitrogen additions and warming in two tropical soils [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(9): 2555-2572.
- [32] 邵蕊, 赵苗苗, 赵芬, 等. 施肥对油茶园土壤呼吸和异养呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2018, **38**(7): 2315-2322.
- Shao R, Zhao M M, Zhao F, *et al.* Effects of fertilization on soil respiration, heterotrophic respiration, and temperature sensitivity in an oil tea plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(2): 2315-2322.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)