

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
喹啉降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蚶及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征

熊瑛^{1,2}, 王龙昌^{1*}, 杜娟¹, 赵琳璐¹, 周泉¹, 张赛¹

(1. 西南大学农学与生物科技学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 南方山地农业教育部工程研究中心, 重庆 400716; 2. 河南科技大学农学院, 洛阳 471003)

摘要: 土壤呼吸是土壤有机碳库输出的主要途径, 为探讨垄作和不同秸秆覆盖量对旱三熟蚕豆田土壤呼吸及有机碳特征的影响, 测定了平作无覆盖(T)、垄作无覆盖(R)、垄作+半量覆盖(RS1)、垄作+全量覆盖(RS2)这4个处理下的西南紫色土丘陵区蚕豆/玉米/甘薯旱三熟体系中蚕豆田土壤呼吸及有机碳变化, 分析了土壤温度和水分与土壤呼吸的关系。结果表明, 蚕豆生长季节农田土壤呼吸随作物生长一致, 呈先增加后减弱的变化趋势, 全生育期平均土壤呼吸速率差异显著, 表现为RS2 > RS1 > T > R, 分别为3.365、2.935、2.683、2.263 g·(m²·d)⁻¹。垄作显著降低了蚕豆农田土壤呼吸速率, 而秸秆覆盖显著提高土壤呼吸速率, 且随着覆盖量的增加而增加。土壤呼吸速率随土壤温度(5 cm和10 cm)呈指数型增长, 10 cm处的回归模型明显好于5 cm。10 cm土层Q₁₀值表现为RS2 > RS1 > R > T, 分别为1.751、1.665、1.616、1.35。垄作和秸秆覆盖下土壤温度、水分与土壤呼吸速率的混合指数模型可以解释土壤呼吸速率变异的68%(R)、79%(RS1)和76%(RS2)。垄作和秸秆覆盖下0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm土层土壤有机碳含量均得到不同程度的提高, 且随着覆盖量的增加而增加, 其中5~10 cm、10~20 cm土层表现为RS2 > RS1 > R > T, 差异达显著水平, 且5~10 cm土层有机碳含量增幅最大; 但垄作和秸秆覆盖仅显著提高了颗粒有机碳0~30 cm加权平均值, 对颗粒有机碳占土壤有机碳比例的影响效应不显著。

关键词: 土壤呼吸; 土壤有机碳; 垄作; 秸秆覆盖; 蚕豆田

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2102-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611046

Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China

XIONG Ying^{1,2}, WANG Long-chang^{1*}, DU Juan¹, ZHAO Lin-lu¹, ZHOU Quan¹, ZHANG Sai¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Soil respiration is an important process for carbon emission. A field study was conducted with four treatments including T (traditional tillage + straw mulching level 0 kg·hm⁻²), R (ridge tillage + straw mulching level 0 kg·hm⁻²), RS1 (ridge tillage + straw mulching level 3 750 kg·hm⁻²), and RS2 (ridge tillage + straw mulching level 7 500 kg·hm⁻²), so as to probe the effects of ridge tillage and straw mulching amount on soil respiration and soil organic carbon(SOC) and the relationships of soil respiration rate with soil temperature and water content (SWC) during the growth period of fava bean in the triple intercropping system of fava bean/maize/sweet pomato in dryland region of southwest China known as the purple hilly region. The changes of soil respiration rate were in accordance with crop growing, being firstly increased and then decreased during the whole growth period of fava bean, and there were significant differences in soil respiration rate among different treatments, which could be ranked as RS2 [3.365 g·(m²·d)⁻¹] > RS1 [2.935 g·(m²·d)⁻¹] > T [2.683 g·(m²·d)⁻¹] > R [2.263 g·(m²·d)⁻¹]. Ridge tillage reduced soil respiration in fava bean farmland, whereas straw mulching treatment increased it, whose variation trend was in accordance with that of straw mulching levels. There was a significant exponential relationship between soil respiration and soil temperature at 5 cm and 10 cm depth, and the exponential model at 10 cm produced better fitness than that at 5 cm. The temperature sensitivity (Q₁₀) at 10 cm could be ranked as RS2 > RS1 > R > T, being 1.751, 1.665, 1.616, and 1.35, respectively. The combined exponential model indicated that soil temperature and water content (SWC) could jointly explain 68% (R), 79% (RS1) and 76% (RS2) of variation in soil respiration. This study results suggested that ridge tillage and straw mulching significantly increased SOC of 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm soil layers, and the increase of SOC was in accordance with that of straw mulching levels. The SOC was significantly increased in 5-10 cm and 10-20 cm soil layers, which could be ranked as RS2 > RS1 > R > T, and the increases in SOC at 5-10 cm were especially notable. The weighted average of particulate organic carbon (POC) at 0-30 cm was significantly increased, but the proportion of POC in SOC did not show significant influence.

Key words: soil respiration; soil organic carbon; ridge tillage; straw mulching; fava bean farmland

收稿日期: 2016-11-07; 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271673); 公益性行业(农业)科研专项(201503127)

作者简介: 熊瑛(1980~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为农业资源高效利用, E-mail: amber1109@126.com

* 通信作者, E-mail: wanglc2003@163.com

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,其中2/3为土壤有机碳库,其较小幅度的变化会对大气CO₂和全球气候产生影响^[1]。土壤有机碳库的平衡由生物质的输入和土壤呼吸的输出两个方面共同决定^[2]。农田土壤碳库作为全球碳库中最活跃的部分^[3],耕作、栽培等农事活动都会引起农田土壤有机质和土壤呼吸的变化,进而影响土壤有机碳库^[4]。因此,在二氧化碳温室效应和全球气候变暖的形势下,开展农田耕作措施对土壤呼吸和土壤碳库影响研究,探讨农田生态系统中土壤有机碳固定与排放过程与机制具有积极意义。

秸秆覆盖还田是我国旱作农田区常见的耕作措施,同少免耕、垄作、深松等统属于保护性耕作范畴^[5]。秸秆覆盖还田后增加了土壤有机碳的直接输入,对土壤呼吸的影响与土壤类型、气候条件、覆盖材料及覆盖量有关^[6]。在生产实践中,秸秆还田通常与其他耕作方式配合使用。许多学者就不同耕作方式(常规翻耕、深耕、深松)结合秸秆还田^[7~10]、少、免耕条件下秸秆还田^[11~13]对农田土壤呼吸及有机碳的影响方面上展开了大量研究,而垄作结合秸秆还田对温室气体排放及有机碳影响的研究相对比较薄弱,西南紫色土旱地垄作模式下不同秸秆覆盖量的影响效应更鲜见报道。基于此,本文在西南旱地丘陵区蚕豆(*Vicia faba*)/玉米(*Zea mays*)/甘薯(*Ipomoea batatas*)早三熟模式下,以蚕豆田为研究对象,重点分析了垄作模式不同秸秆覆盖量下蚕豆田土壤呼吸和土壤有机碳特征,补充完善土壤类型(紫色土)和作物类型(蚕豆)对土壤呼吸和土壤碳库影响机制;另一方面,通过对不同覆盖量下土壤碳输出和固定的量化分析,确定适宜该地区的秸秆覆盖量,以期对秸秆覆盖还田的合理高效利用,实现节能减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于重庆市北碚区西南大学教学试验农场,属亚热带季风湿润气候,年均太阳总辐射量87 108 kJ·cm⁻²,年均总日照时数1 276.7 h,多年平均气温17.5℃,≥10℃年积温5 979.5℃,夏季最高气温达40℃左右,无霜期达334 d,多年平均降雨量1 125.3 mm,年蒸发量1 181.1 mm,伏旱发生频率达93%。试验地土壤为旱地中性紫色土,坡度较缓,地力相对均匀。0~20 cm土层土壤基本理化性质分析如下:土壤容重1.21 g·cm⁻³,pH值为6.47,土壤有

机质28.00 g·kg⁻¹,全氮1.68 g·kg⁻¹,全磷1.46 g·kg⁻¹,全钾34.54 g·kg⁻¹,速效磷18.13 mg·kg⁻¹,速效钾170.13 mg·kg⁻¹,碱解氮35.23 mg·kg⁻¹。

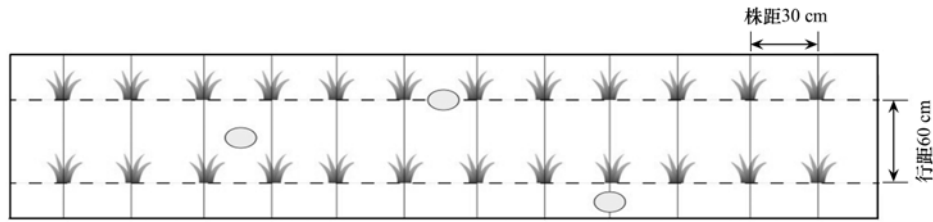
1.2 试验设计

试验地已经连续8 a进行保护性耕作下三熟分厢复种间套作模式研究,前两年是“小麦/玉米/大豆”,自2013年11月起连续两年采用“蚕豆/玉米/甘薯”三熟复种间套作模式,设置4个处理:①平作无覆盖(CK/T):秋季整地后不起垄,无秸秆覆盖。②垄作无覆盖(R):于秋季整地后横向起垄,垄宽1 m,沟宽1 m,垄高20 cm,采用垄上双行栽培,无秸秆覆盖。所有种植模式均采用2 m开厢(1 m+1 m),分厢带状套种,第1茬(蚕豆)和第3茬(甘薯)均种在垄上,第2茬(玉米)种在沟内,整个生育期内实行少耕。③垄作+半量覆盖(RS1):作物生育期内分别将3 750 kg·hm⁻²玉米秸秆和3 750 kg·hm⁻²小麦秸秆均匀覆盖在垄上和沟内。④垄作+秸秆全量覆盖(RS2):作物生育期内将7 500 kg·hm⁻²玉米秸秆和7 500 kg·hm⁻²小麦秸秆均匀覆盖在垄上和沟内。覆盖处理所用的玉米及小麦秸秆,收获后人工截成10 cm左右,分别于蚕豆播种后、玉米和甘薯移栽后进行覆盖处理。随机区组排列,重复3次,小区面积4 m×8 m。供试作物为蚕豆(当地品种,种植密度180 000株·hm⁻²),玉米(东单80,移栽密度80 000株·hm⁻²)和甘薯(渝紫七号,移栽密度为40 000株·hm⁻²)。蚕豆、玉米、甘薯各处理均施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16:16:16)225 kg·hm⁻²,作为基肥一次施入,玉米在拔节期追施尿素450 kg·hm⁻²。蚕豆采用穴播,每穴留苗3株;玉米和甘薯均采用育苗移栽。蚕豆于2013年11月9日播种、2014年5月1日收获;玉米于2014年4月3日移栽、2014年7月28日收获;甘薯于2014年5月24日移栽、2014年10月23日收获。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤呼吸测定

采用LI6400便携式光合作用系统连接6400-09呼吸室测定土壤呼吸。各处理按照行间、株间和条带边缘3个位置选取3个固定点(图1),放置PVC环,底面积80 cm²,高5 cm,插入土壤2 cm左右。为减少对土壤的干扰,PVC环于测定前一天安置好。每个PVC环测定1次,设定2个循环,每个处理3次重复,共6个数据,取其平均值作为日土壤呼吸值。于蚕豆苗期(2013年11月23日)、分枝期(2013年12月25日)、现蕾期(2014年1月7日)、



图内小圆圈代表一个厢内布置的 PVC 环,从左到右依次为行间、株间和条带边缘

图 1 PVC 环安放位置

Fig. 1 Installed position of PVC collars in measurement plots

开花初期(2014 年 2 月 3 日)、开花盛期(2014 年 2 月 17 日)、结荚期(2014 年 3 月 1 日)、鼓粒前期(2014 年 3 月 25 日)、鼓粒中期(2014 年 4 月 7 日)和成熟期(2014 年 4 月 25 日)分别测定,测定时间统一为上午 09:00 ~ 11:00.

1.3.2 土壤水热因子测定

在测定土壤呼吸的同时,用 LI6400-09 自带的土壤温度探针测定 10cm 土壤温度,用 Procheck 手持式多功能测定仪(美国 Decagon 公司)测定 5 cm 土壤温度和水分.

1.3.3 土壤样品的采集和测定

蚕豆收获时按 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 分层采集土壤样品. 各处理区随机采集 5 个样点的混合土样,四分法取出足够的样品,捡去植物根系、石头等杂质,带回实验室自然风干,一部分过 0.25 mm 筛,用于总碳的测定;另一部分过 2 mm 筛,用于颗粒有机碳的测定.

总碳(total organic carbon, TOC)的测定:采用日本岛津总有机碳(TOC)分析仪(SSM-5000A)测定^[14],称取过 0.25 mm 土壤筛的土样 0.150 ~ 0.200g 土样于 900℃ 燃烧测定总碳含量. 经测定本试验地的土壤 pH 值低于 6.5,偏酸性,无机碳含量忽略不计,总碳即为总有机碳含量.

颗粒有机碳含量(particulate organic carbon, POC)的测定:采用六偏磷酸钠分散法^[15]. 称取 10 g 过 2 mm 土壤筛的风干土样,加入到装有 30 mL 质量浓度为 5 g·L⁻¹ 的六偏磷酸钠溶液中,先手摇 15 min,再放入往返振荡机上以 90 r·min⁻¹ 振荡 15 h. 将土壤悬液过 0.053 mm 土壤筛,反复用蒸馏水冲洗直至滤液澄清为止. 将所有留在筛子上的物质在 60℃ 下烘干后称重,计算这些部分占整个土壤样品质量的比例. 研磨过 0.25 mm 土壤筛后测定其有机碳含量,再换算为单位质量土样中对应组分碳含量,即为 POC 含量.

颗粒有机碳含量 = 颗粒物中有机碳含量 × 颗粒

物占土壤的百分含量 (1)

颗粒有机碳的分配比例 = POC 含量/TOC 含量 × 100% (2)

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行试验数据作图,在 SPSS 22.0 下进行 ANOVA 方差分析后用 DUNCAN 法进行多重比较. 将数据标准化后,用线性回归方法(SPSS 22.0)建立土壤呼吸速率与土壤温度、土壤水分的统计模型. 土壤呼吸速率与土壤温度的指数模型为:

$$y = \alpha \times e^{\beta T} \quad (3)$$

式中, y 为土壤呼吸速率, T 为土壤温度, α 、 β 为相关系数.

根据式(3)得到的相关系数 β 计算土壤呼吸速率的温度敏感系数 Q_{10} :

$$Q_{10} = e^{(10 \times \beta)} \quad (4)$$

土壤呼吸速率与土壤温度、水分的综合指数模型为:

$$y = \alpha \times e^{\beta T} \times \text{SWC}^{\delta} \quad (5)$$

式中, y 为土壤呼吸速率, T 为土壤温度, SWC 为土壤体积含水量, α 、 β 、 δ 为相关系数.

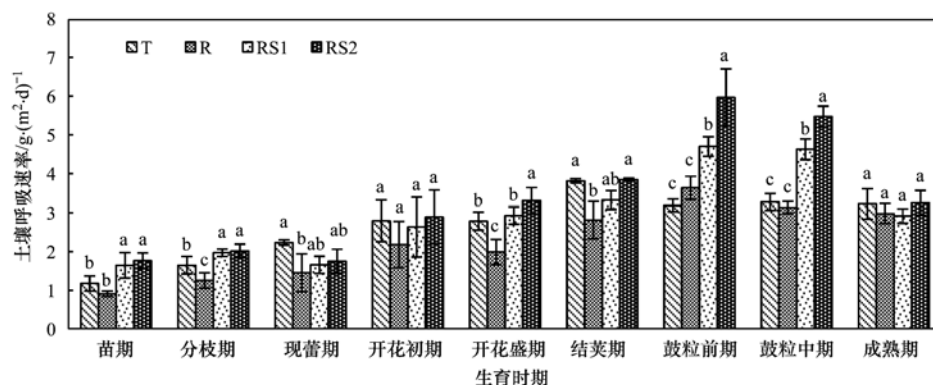
2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率动态变化

土壤呼吸是指 CO₂ 返回大气的过程,是土壤碳素向大气输出的主要途径,也是土壤碳库输出的关键环节^[16]. 由图 2 可以看出,蚕豆田土壤呼吸速率随生育进程推进逐渐增加,即现蕾期之前缓慢增加,开花期至鼓粒期迅速增加达到峰值,成熟期略有降低. 与对照(平作处理)相比,垄作处理条件下蚕豆田土壤呼吸速率在整个生育期内基本表现为显著低于对照;而秸秆覆盖处理后则出现苗期和分枝期显著高于对照、现蕾期到结荚期及成熟期差异不显著、鼓粒期又显著高于对照的现象. 生育期内 4 个处理土壤呼吸速率均值表现为 RS2 > RS1 > T > R,

分别为 3.365、2.935、2.683、2.263 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 处理间差异显著。在蚕豆生育期内, 与对照相比, 垄作处理均在不同程度上降低了土壤呼吸速率, 影响幅度为 -34.88% ~ -4.27%, 均值为 -15.68%; 垄作 + 秸秆半量覆盖的土壤呼吸较对照影响幅度为

-25.72% ~ 41.30.75%, 均值为 9.4%; 垄作 + 秸秆全量覆盖影响 -21.60% ~ 87.12%, 均值为 25.41%。表明在本试验条件下, 单纯性垄作会降低蚕豆田土壤呼吸, 垄作结合秸秆覆盖后土壤呼吸增加, 且随着覆盖量的增加而增加。



图中不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 2 蚕豆田土壤呼吸速率

Fig. 2 Changes of soil respiration rate in fava bean soil

2.2 土壤温度变化

蚕豆田 10 cm 土壤温度随生育期的推进呈先降低后增加而后又降低的趋势, 每个生育时期内 4 个处理表现不同 (图 3)。整个生育期土壤温度平均值 4 个处理大小为 $R > T > RS1 > RS2$, 分别为 14.27、14.09、13.80、13.78℃, 垄作处理和对照处理显著高于半量覆盖和全量覆盖处理, 而垄作与对照之间、

半量覆盖和全量覆盖之间差异不显著, 表明秸秆覆盖降低了 10 cm 土壤温度, 但与覆盖量的多少无关。值得注意的是, 垄作覆盖提高了苗期 10 cm 土层土壤温度, 有利于蚕豆促苗早发。蚕豆生长季内 T、R、RS1、RS2 这 4 个处理土壤温度的变化幅度分别为: 15.55、17.05、14.72、15.42℃, 除垄作处理高于对照外, 覆盖处理均低于对照。

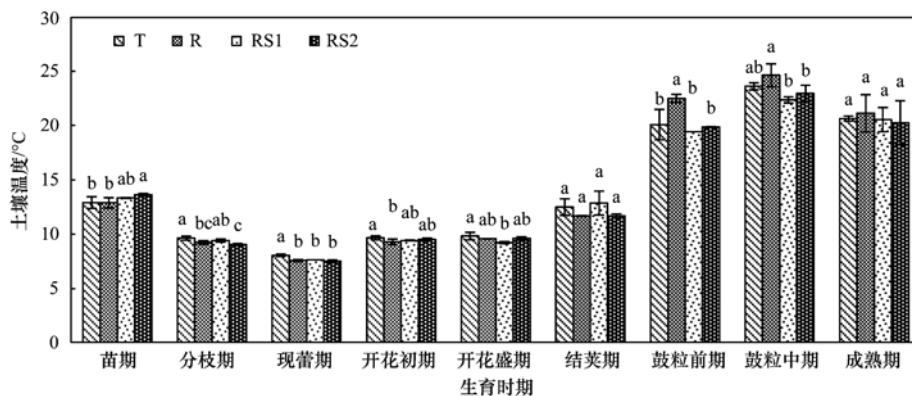


图 3 蚕豆田 10 cm 土层土壤温度

Fig. 3 Changes of soil temperature at 10 cm depth in fava bean soil

蚕豆生长季内 5 cm 土壤温度变化趋势与 10 cm 基本相同, 现蕾期最低, 鼓粒中期最高; 处理间仅在分枝现蕾期及鼓粒期存在显著性差异 (图 4)。土壤温度平均值以全量覆盖处理最高, 显著高于其余 3 个处理, 且其余 3 个处理间差异不显著。与 10 cm 土壤温度相比, T、R、RS1、RS2 这 4 个处理 5 cm 土壤温度的变化幅度均变大, 分别为: 22.61、21.9、21.89、21.47℃, 垄作及覆盖各处理均低于对照, 说

明秸秆覆盖减缓了蚕豆田表层土壤温度的变化, 这与秸秆覆盖具有平衡和改善耕层土壤温度情况, 即低温时有增温效应, 高温时有降温效应有关^[17]。

2.3 土壤水分变化

图 5 表明, 蚕豆田 5 cm 土壤水分变化存在明显的阶段性规律: 开花初期之前维持较高的土壤水分, 而到开花盛期显著降低, 而后逐渐升高。蚕豆苗期的 4 个处理间土壤水分差异不显著, 之后垄作及秸

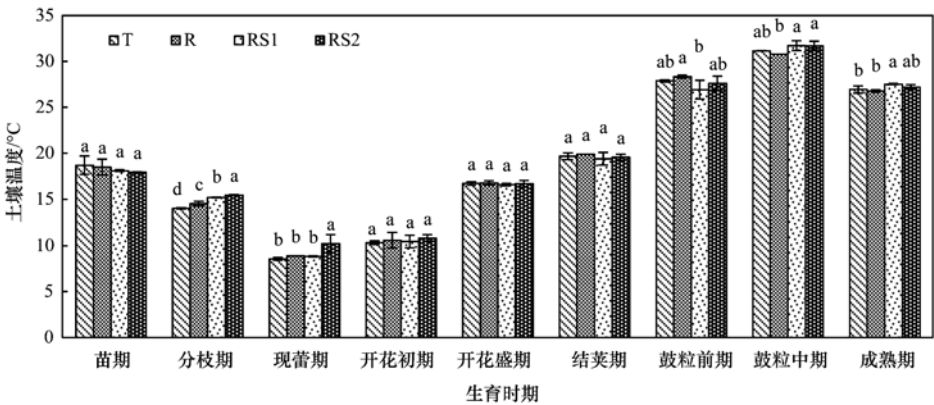


图 4 蚕豆田 5 cm 土层土壤温度

Fig. 4 Changes of soil temperature at 5 cm depth in fava bean soil

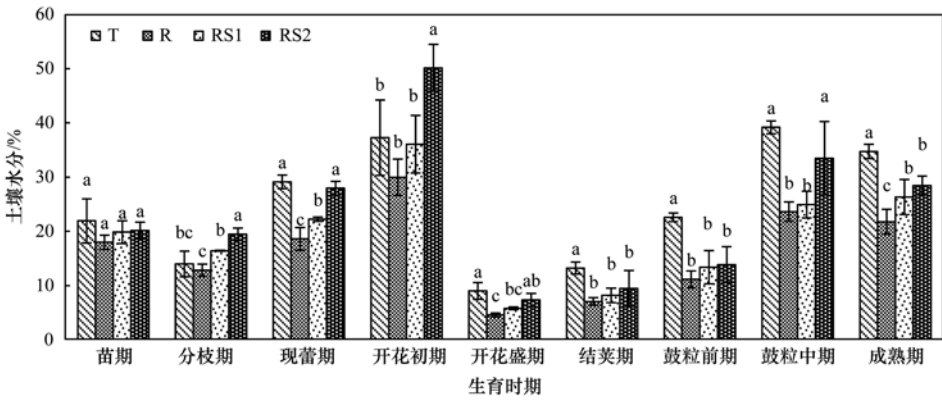


图 5 蚕豆田 5 cm 土层土壤水分

Fig. 5 Changes of soil moisture at 5 cm depth in fava bean soil

秆覆盖效应出现,基本表现为垄作处理显著降低了土壤水分,而秸秆覆盖之后土壤水分有所回升,但均低于对照(分枝期及开花初期除外).

2.4 土壤呼吸速率与土壤温度、水分关系

土壤呼吸速率随土壤温度(5 cm 和 10 cm)呈指数型增长,其中温度能够解释土壤呼吸速率变异的 40% ~ 75% (表 1). 土壤呼吸速率与 10 cm 温度的回归模型下 Q_{10} 值均高于同一处理 5 cm 温度,其 Q_{10} 值分别高 9.4% (T)、9.4% (R)、10.5% (RS1) 和 10.5% (RS2). 与平作相比,垄作提高了 5 cm 和 10 cm 的 Q_{10} 值,表明垄作提高了土壤呼吸的土壤温度敏感性. 进一步分析发现秸秆覆盖提高 10 cm 的 Q_{10} 值,且随着秸秆覆盖量的增加而增加,但秸秆覆盖下 5 cm 的 Q_{10} 值没有体现这一规律.

垄作和秸秆覆盖下土壤温度、水分与土壤呼吸速率的混合模型能更好地反映其变化规律(表 2),分别解释了土壤呼吸速率变异的 64% (R)、76% (RS1) 和 76% (RS2). 传统平作模式下,混合模型不能更好地反映土壤呼吸的变化规律.

表 1 土壤速率与土壤温度关系方程

处理	Table 1 Regression function of soil respiration and temperature				
	$y = \alpha \times e^{\beta T}$				
	α	β	R^2	Sig.	Q_{10}
T 5 cm	1.625	0.021	0.421	0.029	1.234
R 5 cm	0.896	0.041	0.637	0.000	1.507
RS1 5 cm	1.236	0.039	0.718	0.000	1.477
RS2 5 cm	1.184	0.046	0.749	0.000	1.584
T 10 cm	1.600	0.030	0.438	0.022	1.350
R 10 cm	0.993	0.048	0.642	0.000	1.616
RS1 10 cm	1.298	0.051	0.672	0.000	1.665
RS2 10 cm	1.355	0.056	0.693	0.000	1.751

1) y : 土壤呼吸速率; T : 5 cm 和 10 cm 土壤温度

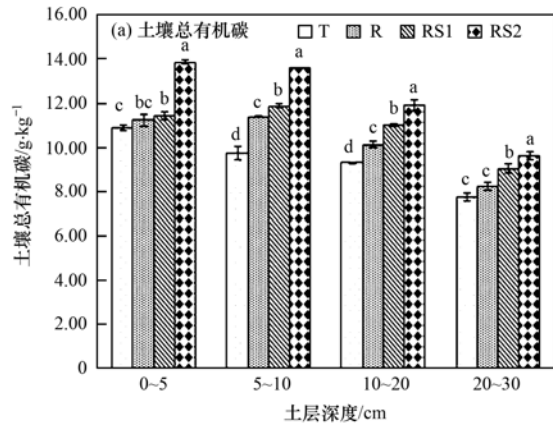
表 2 土壤呼吸速率与土壤温度、水分关系方程

处理	Table 2 Regression function from combined exponential model of soil respiration with soil temperature and moisture				
	$y = \alpha \times e^{\beta T} \times SWC^{\delta}$				
	α	β	δ	R^2	Sig.
T 5 cm	1.516	0.020	0.030	0.407	0.114
R 5 cm	1.050	0.049	-0.060	0.641	0.002
RS1 5 cm	2.020	0.039	-0.180	0.757	0.000
RS2 5 cm	1.675	0.046	-0.113	0.765	0.000

1) y : 土壤呼吸速率; T : 5 cm 土壤温度; SWC : 5 cm 土壤水分含量

2.5 土壤总有机碳与颗粒有机碳含量变化

垄作和秸秆覆盖对土壤耕层的有机碳有影响[图 6(a)]. 与传统平作相比, 垄作和秸秆覆盖均提高了不同土层土壤有机碳含量, 除 0~5 cm 垄作处理外, 4 个土层各处理及 0~30 cm 加权平均值均达到显著水平, 且随着秸秆覆盖量的增加而增加. 垄作和秸秆覆盖对不同土层土壤有机碳增幅的影响不同, 以 5~10 cm 土层增幅最大, 分别较平作增加 17.2% (R)、22.1% (RS1) 和 39.7% (RS2).



如图 6(b) 所示, 垄作和秸秆覆盖显著提高了 10~20 cm 土层土壤中颗粒有机碳含量, 但 R、RS1 和 RS2 处理间差异不显著; RS2 显著提高了 0~5 cm、5~10 cm 及 20~30 cm 土层 POC 含量. 0~30 cm 加权平均值表现为 RS2 > R > RS1 > T, 处理间达显著水平. 通过分析看出, 除 20~30 cm 土层中 RS2 处理下颗粒有机碳的分配比例显著高于传统平作外, 其余土层内处理间差异不显著, 表明颗粒有机碳的分配比例受到耕作方式的影响较小.

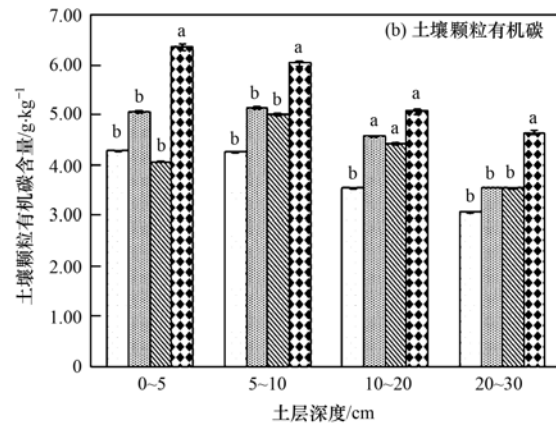


图 6 不同土层土壤总有机碳和颗粒有机碳含量

Fig. 6 Changes of soil organic carbon and particulate organic carbon at different soil depth in fava bean soil

3 讨论

3.1 农田土壤呼吸的影响因素

土壤呼吸的影响因素很多, 主要因子包括土壤温度、土壤水分、土壤有机体含量、土地利用、施肥、土壤质地、种植作物、土壤生物等, 既有环境因子, 又有土壤本身的影响. 各因素之间并不是孤立存在的, 不仅同时对土壤呼吸产生影响, 而且他们之间也有相互影响^[18].

(1) 农田生态系统土壤呼吸动态变化与季节和作物生育期密切相关, 究其原因, 土壤呼吸与土壤温度呈指数型函数关系, 季节的变化必然引起土壤温度的变化进而带来土壤呼吸的变化. 而土壤呼吸主要由土壤微生物呼吸和根系呼吸两部分组成, 在作物生长旺盛期根系的快速生长大大提高了根系呼吸速率, 同时微生物活性增强, 土壤微生物呼吸随之增强, 最终引起土壤呼吸的增强. 本研究和前人的研究均证明了这一点. 前人的研究结果指出, 土壤呼吸峰值出现在作物的开花期^[19,20], 开花期前后作物生长及生理代谢活动均达到最旺盛时期, 此时土壤 CO₂ 释放量达到高峰^[21].

(2) 农田土壤呼吸还受到耕作措施的影响. 垄

作是在克服了传统平作许多不利因素的基础上发展起来的一种保护性耕作方式. 垄作栽培使土壤表面由平面型变为波浪型, 增加了土壤的表面积, 改变了土壤的光、热、水条件和微生物活动环境^[22], 进而影响土壤呼吸. 垄作对土壤呼吸的作用是促进还是抑制目前结论不一, 本研究中垄作降低了蚕豆田土壤呼吸速率和呼吸总量, 而有研究表明^[17,23,24], 垄作条件下玉米田土壤呼吸低于传统平作, 而小麦田和大豆田则高于传统平作, 充分说明垄作对土壤呼吸的影响效应与作物类型以及多熟种植制度有关. 不同的种植模式形成不一样的农田微气候环境, 不同作物之间的化感效应对土壤微生物的活动以及作物根系生长带来一定的影响, 并最终影响土壤呼吸. 作物类型和根系属性在不同程度上影响土壤呼吸, 但是它们对土壤呼吸的作用机制目前还不明确, 还需进一步研究. 秸秆覆盖还田作为常见的耕作管理措施, 不仅能够为土壤提供额外的养分, 同时也会对土壤微生物的活性产生影响, 促进土壤有机质的矿化, 进而引起土壤呼吸的变化. 关于秸秆覆盖对土壤呼吸的影响结论大体一致, 一般认为秸秆还田会促进土壤中二氧化碳的释放, 不同的研究结论表明秸秆覆盖均在不同程度增强了土壤呼吸, 且随着秸

秆分解后期对土壤呼吸的影响逐渐减弱^[11,19,25]。垄作与秸秆覆盖还田结合使用后,提高了蚕豆田土壤呼吸平均速率,且随着覆盖量的增加而增加。这种协同增加是否存在量化关系、是否可以用数学模型呈现是需要进一步研究的问题。

(3) 土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的关系非常密切。有关农田生态系统中土壤温度与土壤呼吸的关系模型主要有指数模型、线性模型、抛物线模型^[26]等,本研究分别对上述3种模型进行模拟,发现指数模型能更好地体现土壤温度与土壤呼吸之间的关系。垄作和秸秆覆盖下蚕豆田表层(0~10cm)的 Q_{10} 值高于传统平作,说明垄作和秸秆覆盖提高了土壤呼吸对温度的敏感性,这可能与单纯性垄作改善了根际土壤的通气性,秸秆覆盖增加了土壤表层的底物输入量,为微生物活动提供物质能源,从而促进土壤呼吸释放 CO_2 有关。在本试验条件下,土壤水分与土壤呼吸之间无直接相关关系($P > 0.05$),而是与土壤温度一起共同影响土壤呼吸(表2),二者呈负相关关系。有相关的研究表明,在一定的土壤水分范围内,土壤呼吸随着土壤水分增加而增强,但当土壤湿度低于田间持水量的40%,土壤呼吸将下降^[27],这是由于较低的水分含量限制底物的有效性而减少微生物呼吸速率^[28],本研究结果表明,垄作秸秆覆盖条件下土壤体积含水量均值分别为R 16.40%、RS1 19.25%、RS2 23.37%,这可能是得到的混合指数模型能更好地反映土壤呼吸速率与土壤温度、土壤水分相关性的原因。保护性耕作措施导致土壤微环境复杂化,伴随土壤温度和湿度的共同变化,土壤呼吸受到多种因子的复合影响。因此还需要大量开展土壤呼吸的水、热、生物复合因子耦合关系的研究,从而进一步明确土壤呼吸的影响机制。

3.2 保护性耕作措施的固碳效应

一般认为保护性耕作减少了土壤的扰动,降低了有机碳的矿化速度,加上秸秆覆盖的作用,减少了表土层内有机碳的流失,能够增加土壤表层有机碳含量^[29]。本研究表明,垄作和秸秆覆盖提高了0~30 cm土层的土壤有机碳含量,且随着覆盖量的增加而增加。不同的保护性耕作措施具有不同程度的固碳效应,对土壤中有机碳质量分数及储量都有影响^[30]。与免耕秸秆覆盖显著增加了表层0~5 cm有机碳含量不同,垄作秸秆覆盖后5~10 cm土壤有机碳含量的增幅最大。这可能是由于垄作的频繁翻动使土壤与空气的接触增多,使得表层土壤有机碳的

分解加快。垄作秸秆覆盖能增加深层土壤有机碳含量,且随着土层加深,增幅减小。这主要由于秸秆的腐解向土壤中输入较多有机碳,在垄作的频繁翻动下使得有机碳向下转移贮存^[31,32]。

土壤碳库的稳定性主要决定于土壤颗粒有机碳的比例,土壤颗粒有机碳比例越高,土壤碳库越不稳定^[33,34]。本研究结果表明,垄作与秸秆覆盖并不改变土壤中颗粒有机碳比例,对土壤碳库活性影响不显著。值得注意的是,垄作秸秆全量覆盖后20~30 cm颗粒有机碳比例显著高于其他处理,这表明该土层土壤中非稳定性有机质部分所占比例增大,在受到外界的干扰后,该部分容易被分解,造成这一现象的原因与颗粒有机碳的形成过程有关。农田中颗粒有机碳通常由未分解或半分解的动植物和根系残体组成^[35],而20~30 cm为蚕豆根系的主要分布土层,根系分解过程中颗粒有机碳与土壤团聚体一起生成,形成颗粒有机碳稳定大团聚体^[36]。该团聚体是一个临时碳库,具有不稳定性,频繁耕作会破坏土壤大团聚体,导致其碳库失去保护,秸秆覆盖向土壤中持续添加有机物,使土壤保持较高水平的大团聚体。

4 结论

(1) 西南紫色丘陵区“蚕豆/玉米/甘薯”三熟复种间套作模式下蚕豆田土壤呼吸与季节及作物生长发育规律基本一致,呈先增加后降低的趋势,蚕豆生长发育旺盛期也是土壤呼吸速率与总量最大的时期。与传统平作相比,单纯性垄作显著降低了蚕豆田土壤呼吸,秸秆覆盖提高了蚕豆田土壤呼吸,且随着覆盖量的增加而增加。

(2) 以垄作和秸秆覆盖为主体的保护性耕作减缓了蚕豆田表层土壤温度的变化,提高了土壤呼吸对温度的敏感性,且随着覆盖量增加而增加。土壤温度是影响土壤呼吸的重要因子,二者之间具有指数函数关系,保护性耕作下土壤水分与土壤温度一起共同影响土壤呼吸,土壤温度、水分与土壤呼吸速率的混合回归指数模型能更好地反映其变化规律。

(3) 垄作与秸秆覆盖还田均有利于土壤耕层有机碳的积累,对5~10 cm土层的有机碳含量影响效应最大,以颗粒有机碳的分配比例为指标的土壤碳库活性受耕作方式的影响较小。在西南丘陵区推行以垄作结合全量秸秆覆盖为主的保护性耕作可以使更多的碳积累于农田土壤碳库中,有利于实现农田

土壤固碳.

参考文献:

- [1] Luo Z K, Wang E L, Sun O J. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis[J]. *Geoderma*, 2010, **155**(3-4): 211-223.
- [2] Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, *et al.* Carbon input to soil may decrease soil carbon content[J]. *Ecology Letters*, 2004, **7**(4): 314-320.
- [3] Song G H, Li L Q, Pan G X, *et al.* Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, **74**(1): 47-62.
- [4] Iqbal J, Hu R G, Lin S, *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.
- [5] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J]. *中国农业科学*, 2007, **40**(12): 2702-2708.
Gao W S. Development trends and basic principles of conservation tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(12): 2702-2708.
- [6] Ghosh P K, Dayal D, Bandyopadhyay K K, *et al.* Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut[J]. *Field Crops Research*, 2006, **99**(2-3): 76-86.
- [7] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(19): 155-165.
Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, *et al.* Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(19): 155-165.
- [8] 孟凡乔, 匡星, 杜章留, 等. 不同土地利用方式及栽培措施对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1733-1739.
Meng F Q, Kuang X, Du Z L, *et al.* Impact of land use change and cultivation measures on soil organic carbon (SOC) and its ^{13}C values[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1733-1739.
- [9] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(2): 373-378.
Tian S Z, Ning T Y, Wang Y, *et al.* Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(2): 373-378.
- [10] Al-Kaisi M M, Yin X H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, **34**(2): 437-445.
- [11] 王维钰, 乔博, Akhtar K, 等. 免耕条件下秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统土壤呼吸及土壤水热状况的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(11): 2136-2152.
Wang W Y, Qiao B, Akhtar K, *et al.* Effects of straw returning to field on soil respiration and soil water heat in winter wheat - summer maize rotation system under no tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(11): 2136-2152.
- [12] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2362-2367.
Li C F, Kou Z K, Zhang Z S, *et al.* Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(11): 2362-2367.
- [13] Ghimire R, Lamichhane S, Acharya B S, *et al.* Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon sequestration in rice-based cropping systems: a review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, **15**: 1-16.
- [14] 李小涵, 李富翠, 刘金山, 等. 长期施氮引起的黄土高原旱地土壤不同形态碳变化[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(14): 2795-2803.
Li X H, Li F C, Liu J S, *et al.* Changes of different carbon fractions caused by long-term N fertilization in dryland soil of the Loess plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(14): 2795-2803.
- [15] Quiroga A R, Buschiazzi D E, Peinemann N. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinian pampas[J]. *Soil Science*, 1996, **161**(2): 104-108.
- [16] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7-20.
- [17] 付国占, 李潮海, 王俊忠, 等. 残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, **21**(1): 52-56.
Fu G Z, Li C H, Wang J Z, *et al.* Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical properties and water use efficiency of summer maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, **21**(1): 52-56.
- [18] 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 等. 西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2815-2820.
Zhang S, Zhang X Y, Wang L C, *et al.* Analysis of soil respiration and influence factors in wheat farmland under conservation tillage in Southwest Hilly region[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2815-2820.
- [19] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. *生态学报*, 2013, **33**(6): 1916-1925.
Zhang D C, Cai D X, Dai K, *et al.* Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(6): 1916-1925.
- [20] 于爱忠, 黄高宝, 柴强. 不同耕作措施对西北绿洲灌区冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. *草业学报*, 2012, **21**(1): 273-278.
Yu A Z, Huang G B, Chai Q. Effect of different tillage treatments on soil respiration of winter-wheat farmland in oasis irrigated area northwest China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, **21**(1): 273-278.
- [21] 刘合明, 刘树庆. 不同施氮水平对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 通量的影响[J]. *生态环境*, 2008, **17**(3): 1125-1129.
Liu H M, Liu S Q. Effect of different nitrogen levels on soil CO₂ fluxes of winter wheat in north China plain[J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(3): 1125-1129.

- [22] Williams A, Kane D A, Ewing P M, *et al.* Soil functional zone management: a vehicle for enhancing production and soil ecosystem services in row-crop agroecosystems[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, **7**: 65.
- [23] 张赛, 罗海秀, 王龙昌, 等. 保护性耕作下大豆农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(8): 913-920.
- Zhang S, Luo H X, Wang L C, *et al.* Analysis of soil respiration and the influencing factors in soybean fields under conservation tillage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(8): 913-920.
- [24] 张赛, 王龙昌, 周航飞, 等. 西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, **34**(21): 6244-6255.
- Zhang S, Wang L C, Zhou H F, *et al.* Analysis of soil respiration and influencing factors in maize farmland under different tillage patterns in hilly area in southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6244-6255.
- [25] 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 等. 绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 1114-1120.
- Zhou Q, Wang L C, Xiong Y, *et al.* Effects of green manure intercropping and straw mulching on winter rape rhizosphere soil organic carbon and soil respiration[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1114-1120.
- [26] 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2184-2192.
- Cheng S T, Hu Z H, Zhang Y, *et al.* Review of the factors influencing the temporal and spatial variability of soil respiration in terrestrial ecosystem[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2184-2192.
- [27] Luo Y Q, Zhou X H. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2007. 9-10.
- Luo Y Q, Zhou X H. Soil respiration and the environment[M]. Jiang L F, Qu L Y, Zhou Y M, *et al.*, trans. Beijing: Higher Education Press, 2007. 9-10.
- [28] Yuste C J, Baldocchi D D, Gershenson A, *et al.* Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture[J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(9): 2018-2035.
- [29] Fuentes M, Hidalgo C, Etchevers J, *et al.* Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions[J]. *Plant and Soil*, 2012, **355**(1-2): 183-197.
- [30] 彭义, 解宏图, 李军, 等. 免耕条件下不同秸秆覆盖量的土壤有机碳红外光谱特征[J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(11): 2257-2264.
- Peng Y, Xie H T, Li J, *et al.* Effect of no-tillage with different stalk mulching on soil organic carbon and mid-infrared spectral characteristics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(11): 2257-2264.
- [31] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(6): 1930-1946.
- [32] Mishra U, Ussiri D A N, Lal R. Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in Corn Belt of Ohio USA[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, **107**(2): 88-96.
- [33] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. *林业科学*, 2002, **38**(4): 19-29.
- Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, *et al.* The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(4): 19-29.
- [34] Solomon D, Lehmann J, Zech W. Land use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, **78**(3): 203-213.
- [35] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, *et al.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, **32**(2): 285-309.
- [36] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, **85**: 221-268.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ...	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)