

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙,彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤,李金香,杨妍研,程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅,李洁,肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任巍,徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚,朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎,孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡,毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英 (4428)
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	王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161)	《环境科学》征订启事 (4365)
信息 (4123,4132,4409)	

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

王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 吴伟, 廖允成*

(西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100)

摘要: 为探明不同宽度沟垄集雨种植下土壤呼吸对土壤水热因子的响应机制, 对比研究了沟垄比分别为 20 cm: 40 cm (P40)、30 cm: 30 cm (P30)、40 cm: 20 cm (P20) 的沟垄集雨种植和平作种植 (CP) 下冬小麦的土壤呼吸动态变化, 及其与土壤温度和水分的关系。结果表明, 4 个处理的土壤呼吸速率在越冬期最低, 返青期开始升高, 扬花期前后达到峰值, 之后逐渐降低。沟垄集雨处理土壤呼吸速率表现为 $P40 > P30 > P20$, 垄宽增加使呼吸速率提高 1.2% ~ 18.4%; 苗期和越冬期, 沟垄集雨种植提高了土壤呼吸速率, 表现为 $P40 > P30 > P20 > CP$, 其中苗期 3 个沟垄集雨处理均显著高于 CP ($P < 0.05$), 越冬期 P40 处理显著高于 CP; 苗期和越冬期沟垄集雨种植提高了土壤温度, 拔节期至成熟期 CP 土壤温度高于沟垄集雨处理; 沟垄集雨种植能有效蓄水保墒, 随着垄宽的增加集雨效果越好, 苗期至拔节期降雨稀少, 7.6 cm 和 12 cm 土层土壤含水量均表现为 $P40 > P30 > P20 > CP$ 。相关分析表明, 土壤呼吸与温度的相关系数达极显著水平 ($P < 0.01$), P40 和 P30 的土壤呼吸与水分的相关系数小于 P20 和 CP; 水热双因子二次方程模型能解释呼吸变化的 61.7% ~ 74.1%, 温度指数模型能解释 50.3% ~ 68.2%。本研究结果为沟垄集雨种植的生态效益评估提供理论依据。

关键词: 冬小麦; 沟垄集雨种植; 沟垄比; 土壤呼吸; 土壤水热状况

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4437-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201605154

Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns

WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, CHEN Ting, ZHANG Lei, LÜ Xiao-kang, WU Wei, LIAO Yun-cheng*

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: This study aimed to explore soil respiration in response to soil moisture and soil temperature subjected to different ridge/furrow ratios under various planting patterns. Traditional flat planting and three different ridge-furrow plantings with altering ridge/furrow ratios, i. e. 20:40 cm (P40); 30:30 cm (P30); 40:20 cm (P20), were performed in the present study. Soil respirations among different planting patterns were compared. Their relationships with soil moisture and soil temperature were also analyzed. The results showed that soil respiration flux of four planting patterns reached its minimum value during the wintering stage, started to rise during the returning green stage until it reached a peak value at the flowering stage, and decreased gradually when reaching the maturity stage. The magnitude of soil respiration flux in three ridge-furrow planting patterns followed this order: $P40 > P30 > P20$, which implied that increasing ridge width could improve soil respiration by 1.2% - 18.4%. In addition, soil respiration fluxes of three ridge-furrow plantings patterns were significantly higher than those under conditional patterns during the seedling stage ($P < 0.05$). The soil temperature of ridge-furrow planting patterns was higher than that of the conditional flat pattern from the seeding stage to the wintering stage, but was converse from the jointing stage to the maturity stage. Moreover, three ridge-furrow planting patterns have shown significant effect on preserving soil water storage in comparison with the conditional flat pattern. In general, increasing the width of the ridge increased soil water storage due to less rainfall from the seedling stage to the jointing stage. The correlation analysis indicated a positive and significant correlation coefficient between soil respiration and soil temperature ($P < 0.01$). Correlation coefficients in case of P40 and P30 were higher than those in P20 and the conditional flat pattern. The quadratic model of two-factor soil moisture and soil temperature could explain 61.7% - 74.1% of variations in soil respiration. The single factor of the soil temperature model could explain 50.3% - 68.2% of variations in soil respiration. Those results could provide a theory basis for further evaluation of ecological effect on the ridge-furrow planting patterns.

Key words: winter wheat; ridge-furrow planting; ridge-furrow ratios; soil respiration; soil hydrothermal conditions

收稿日期: 2016-05-22; 修订日期: 2016-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31401348); 公益性行业(农业)科研专项(201503121-09); 中国博士后科学基金项目(2015M572604)

作者简介: 王昌江(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高效农作制度, E-mail: wangchangjiang2015@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yunchengliao@163.com

全球气候变暖已是无可争议的事实,CO₂ 是温室效应贡献率最大的气体^[1]. 农田生态系统是大气中 CO₂ 的主要来源之一,约占人为 CO₂ 排放量的 11%^[2]. 研究农田碳排放对于缓解大气 CO₂ 浓度的增加具有重要生态意义^[3]. 土壤呼吸是土壤碳排放的主要途径^[4],土壤呼吸主要包括根系呼吸、土壤微生物、少量动物呼吸和少量土壤有机物通过氧化产生 CO₂,其中根系呼吸和微生物呼吸是主要部分^[5-7]. 有研究表明土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸的主要因子^[8,9],二者通过影响植物生长和微生物活动来影响土壤呼吸^[10,11].

沟垄集雨种植技术包括田间修筑的沟垄和地表覆盖物两个部分,沟垄相间排列,降雨由垄上汇集到沟中,沟中种植作物^[12]. 沟垄集雨种植技术可以使小于 5mm 的无效降雨转变为有效降雨,增加降雨的使用效率^[13]. 有研究表明,沟垄集雨种植技术可以提高玉米^[14]、小麦^[15]、苜蓿^[16]和马铃薯^[17]等作物的产量,也可以提高地表土壤的温度^[18],增加土壤表层有机质和速效钾的含量,提高土壤酶活性^[19]. 沟垄集雨种植技术在干旱和半干旱的雨养农业中运用广泛^[14-17],大量研究集中在沟垄集雨种植技术对作物生长和土壤水热的影响,而关于沟垄集雨种植对土壤呼吸的影响报道较少;不同宽度沟垄集雨种植将构建不同集雨面积,所引起的水热变化不相同,继而对土壤呼吸产生影响,为此,本文通过设置不同的沟垄比,以平作为对照,研究沟垄集雨种植及不同沟垄比下土壤呼吸和水热因子变化特征,对土壤呼吸与水热双因子之间的关系进行了拟合与分析,探究土壤呼吸对水热因子的响应机制,以期正确估算沟垄集雨种植下麦田 CO₂ 排放特征及评估沟垄集雨种植的生态效益提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验在西北农林科技大学斗口试验站(108°52'E,34°36'N)进行,地处关中平原中部偏西,土质为壤土,土壤容重 1.05 g·cm⁻³,0~20 cm 土层中有机质含量为 14.60 g·kg⁻¹,全氮 1.14 g·kg⁻¹,碱解氮 99.40 mg·kg⁻¹,速效磷 20.24 mg·kg⁻¹,速效钾 243.20 mg·kg⁻¹,属中等肥力. 试验区属典型暖温带半湿润大陆性季风气候,2013、2014 和 2015 年降水量分别为 450、539 和 505 mm,年均陆面蒸发量为 417.6 mm,其中 60%~70% 的降水集中在 7~9 月;全年太阳总辐射量为 494.70 kJ·cm⁻²,全年

生理辐射量 247.35 kJ·cm⁻²,历年平均日照时数 2 271.6 h,日照百分率为 51%;年平均气温 13.2℃,无霜期在 220 d 左右,0℃ 的活动积温 4 926.8℃,10℃ 的活动积温 4 337.7℃,20℃ 的活动积温 2 556.4℃,平均无霜期 215 d.

1.2 试验设计与管理

大田条件下,试验采用随机区组设计,共设置 4 个处理,包括 3 个沟垄集雨处理和 1 个平作处理(CP). 集雨处理设置 3 种沟垄比,分别为 20 cm:40 cm、30 cm:30 cm 和 40 cm:20 cm,根据垄宽依次记为 P40、P30 和 P20. 垄上覆盖 0.008 mm 塑料薄膜,垄高 15 cm,沟内沿着垄两侧种植两行小麦,供试品种为小偃 22. 平作处理行距为 30 cm,各处理播种量均为 150 kg·hm⁻². 小区区长 6 m、宽 4 m,每个处理 3 次重复,共 12 个小区,沟垄集雨处理小区内起 6 个垄,平作处理不起垄,每个小区种植 12 行小麦. 各小区施肥量为 P₂O₅ 120 kg·hm⁻²(过磷酸钙)和纯 N 225 kg·hm⁻²(尿素),播前一次性施入磷肥和 40% 氮肥,在返青期和孕穗期分别施入 30% 氮肥,小麦生长期不灌溉. 试验于 2014 年 10 月 13 日播种,2015 年 6 月 10 日收获.

1.3 测定指标及方法

土壤呼吸速率采用便携式红外线二氧化碳分析仪 GXH-3010E1(北京华云分析仪器研究所生产)进行测定,土壤呼吸室直径为 16 cm,高度改装为 18.35 cm. 土壤呼吸室放置在 PVC 底座上,PVC 底座紧贴麦行一侧插入种植区(沟内),插入深度 5 cm,去除底座内的一切植物,每个小区安装 1 个底座,于首次测定前两天安置完成,整个生育期不再移动. 测定频率为每周一次,小麦生长季共进行 33 次测定(2014 年 11 月 23 日因设备故障暂停一次),每次测定时每个底座测定一次,遇降雨稍作调整,测定时间均为上午 08:30~11:30^[8]. 具体测定及呼吸速率计算方法参考文献[20].

土壤温度随土壤呼吸同步测定,使用 TP3001 电子温度计(沈阳华盛昌机电设备有限公司生产)测定种植区(沟内)5 cm 和 10 cm 土层温度.

土壤体积含水量在测定呼吸当天测定,使用 TDR-300 水分测定仪(英国 Delta 公司生产)测定种植区(沟内)7.6 cm 和 12 cm 土层体积含水量;降水量通过 DAVIS Vantage Pro2 气象站(美国 DAVIS 公司生产)监测.

为明确不同阶段土壤温度、水分和呼吸的变化特征,将小麦全生育期划分为 5 个生长阶段,分别为

苗期(2014-10-26 ~ 2014-12-13),越冬期(2014-12-14 ~ 2015-02-14),返青期-拔节期(2015-02-15 ~ 2015-03-21),拔节期-扬花期(2015-03-22 ~ 2015-04-24),扬花期-成熟期(2015-04-24 ~ 2015-06-09),各阶段每个处理的土壤呼吸速率、温度和水分为该段时间内全部观测值的平均值,各处理生育期平均土壤呼吸速率、温度和水分为小麦生长季内全部观测值的平均值.

1.4 数据分析与处理

使用 SPSS 18.0 进行方差分析和相关性分析,采用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同处理间土壤呼吸、温度和水分的差异,设置显著水平为 $\alpha=0.05$,极显著水平 $\alpha=0.01$;利用 Pearson 相关系数评价土壤呼吸与水热因子的相关性;采用 SigmaPlot 12.5 进行方程的拟合和图表的制作.

2 结果与分析

2.1 土壤温度

5cm 和 10cm 土层土壤温度在小麦生长季均呈季节性变化(图 1),5 cm 和 10 cm 土层温度均表现为 1 月最低,6 月最高. 5 cm 土层 3 个沟垄集雨处理全生育期平均温度均低于 CP(表 1); 10 cm 土层 P40 和 P30 的全生育期平均温度高于 P20 和 CP,其中 P40 显著高于 P20($P<0.05$). 苗期和越冬期,5 cm 和 10 cm 土层温度均表现为沟垄集雨处理高于 CP,其中苗期阶段 P30 处理 5 cm 土层温度显著高于 CP,沟垄集雨处理 10 cm 土层温度显著高于 CP,越冬期 P40 处理 5 cm 土层温度显著高于 CP,P40 和 P30 处理 10 cm 土层温度显著高于 P20 和 CP. 之后随着生育期的推进 CP 处理的温度逐渐升高,于拔节期高于沟垄集雨处理,开花期至成熟期 5 cm 土层温度表现为 CP 显著高于 P40,10 cm 土层表现为

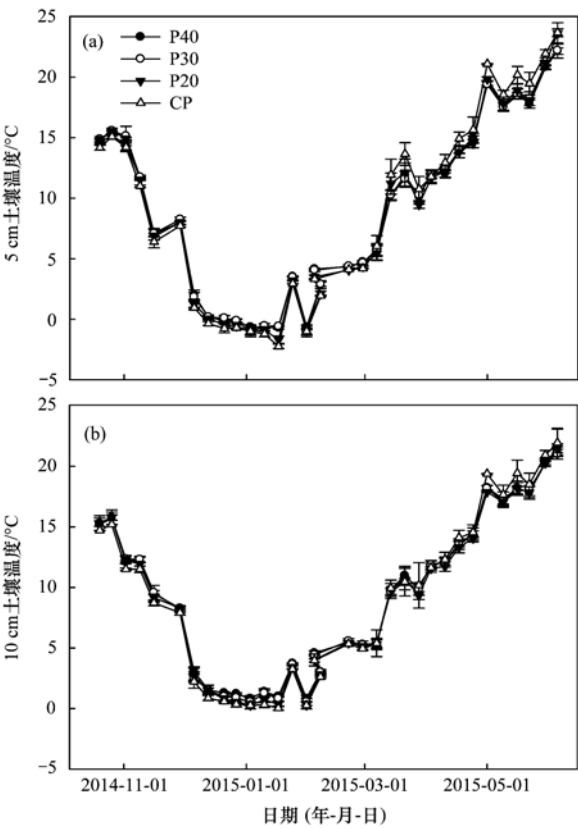


图 1 2014 ~ 2015 年冬小麦全生育期土壤 5 cm 和 10 cm 土层温度变化

Fig. 1 Soil temperature among different planting patterns at 5 cm and 10 cm soil depth in winter wheat growing season in 2014-2015

CP 高于 3 个沟垄集雨处理.

2.2 降水和土壤含水量

小麦生育期内降水分散且不均匀(图 2),发生降水事件 50 次,降水量累计 204.2 mm. 从 2014 年 10 月底至 2015 年 3 月中旬,降水稀少,发生 21 次小于 5 mm 的降水,仅发生 1 次大于 10 mm 的降水; 3 月底至 5 月初降水量较大且较为频繁,累计降水 154 mm; 5 月中旬至小麦收获无大于 10 mm 的降水.

表 1 冬小麦不同生长阶段土壤温度的变化规律¹⁾/°C

Table 1 Averaged soil temperatures among different planting patterns in various growth stages of winter wheat/°C							
土层/cm	处理	不同生育阶段					
		苗期	越冬期	返青-拔节期	拔节-开花期	开花-成熟期	全生育期
5	P40	8.35 ± 0.24ab	0.85 ± 0.17a	7.35 ± 0.86a	12.60 ± 0.48a	19.44 ± 0.47b	8.89 ± 0.27a
	P30	8.55 ± 0.52a	0.70 ± 0.13ab	7.34 ± 0.47a	12.63 ± 0.45a	19.53 ± 0.83ab	8.91 ± 0.12a
	P20	8.30 ± 0.25ab	0.36 ± 0.48ab	7.44 ± 1.04a	12.62 ± 0.94a	19.93 ± 0.90ab	8.81 ± 0.36a
	CP	7.92 ± 0.05b	0.25 ± 0.11b	7.98 ± 1.25a	13.20 ± 1.09a	20.80 ± 0.56a	9.06 ± 0.20a
10	P40	8.92 ± 0.17A	1.99 ± 0.11A	7.37 ± 0.30A	12.34 ± 0.20A	18.91 ± 0.28B	9.22 ± 0.28A
	P30	8.88 ± 0.21A	1.78 ± 0.17A	7.28 ± 0.06A	12.36 ± 0.35A	18.82 ± 0.41B	9.12 ± 0.41AB
	P20	8.73 ± 0.20A	1.46 ± 0.18B	7.27 ± 0.40A	12.24 ± 0.58A	18.86 ± 0.46B	8.95 ± 0.46B
	CP	8.32 ± 0.10B	1.29 ± 0.08B	7.20 ± 0.56A	12.54 ± 0.67A	19.66 ± 0.37A	9.02 ± 0.37AB

1) 数字后小写字母的不同表示不同处理间 5 cm 土层温度在 0.05 水平上差异显著; 数字后大写字母的不同表示不同处理间 10 cm 土层温度在 0.05 水平上差异显著

土壤含水量随着降水的发生而改变(图2),在小麦生育期内,土壤含水量变化剧烈,4月上旬土壤含水量最高.生育期平均土壤含水量在两个土层均表现为P40>P30>P20>CP(表2),其中7.6 cm土层水分表现为P40和P30处理显著高于P20和CP($P<0.05$),且P20显著高于CP,12 cm土层水分表现为P40和P30显著高于CP.苗期至拔节期,7.6 cm和12 cm土层土壤含水量均表现为P40>P30>P20>CP(表2),其中7.6 cm土层P40和P30处理显著高于P20和CP,12 cm土层含水量表现为苗期P40和P30显著高于P20和CP,越冬期P40显著高于CP,返青期至拔节期P40和P30显著高于P20和CP;拔节期至扬花期由于降水较多且频繁,CP与沟垄集雨处理在两个土层的含水量没有显著差异;开花期至成熟期,由于持续高温少雨,7.6 cm土层水分表现为CP处理显著低于3个沟垄集雨处理,12 cm土层水分表现为CP处理显著低于P40和P30.

2.3 土壤呼吸

4个处理的土壤呼吸速率与土壤温度的变化趋势相似,呈现出明显的季节性变化特征(图3),表现为先降低后升高,到生育后期又降低.第一次测定时,由于耕作和播种对土壤的扰动,4处理土壤呼吸速率较高;之后随着温度的降低,以及降水使土壤状态趋于稳定,土壤呼吸速率逐渐降低,至冬小麦

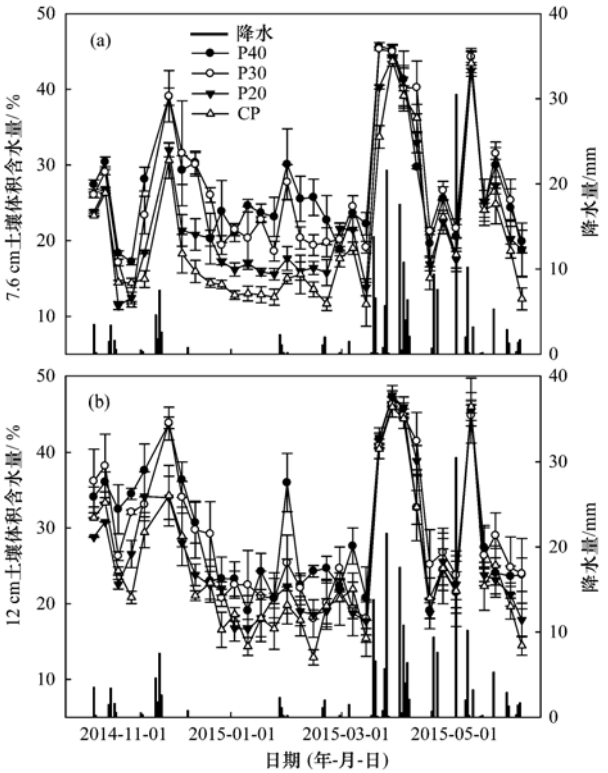


图2 2014~2015年冬小麦全生育期7.6 cm和12.0 cm土层土壤体积含水量以及降水变化

Fig. 2 Precipitation and soil volumetric moisture among different planting patterns at 7.6 cm and 12 cm soil depth in winter wheat growing season in 2014-2015

表2 冬小麦不同生长阶段土壤体积含水量的变化规律¹⁾/%

Table 2 Averaged soil volumetric moisture among different planting patterns in different growth stages of winter wheat/%

土层/cm	处理	不同生育阶段					
		苗期	越冬期	返青-拔节期	拔节-开花期	开花-成熟期	全生育期
7.6	P40	27.54 ± 1.30a	24.22 ± 2.87a	26.63 ± 1.31a	32.29 ± 1.06a	27.28 ± 1.22a	27.17 ± 1.35a
	P30	25.98 ± 2.66a	21.80 ± 1.85a	25.79 ± 1.03a	34.65 ± 2.99a	27.70 ± 0.29a	26.44 ± 1.32a
	P20	20.48 ± 0.11b	16.91 ± 0.68b	22.59 ± 0.44b	31.54 ± 0.52a	25.23 ± 0.74b	22.47 ± 0.32b
	CP	19.28 ± 0.83b	13.78 ± 1.37b	18.72 ± 1.00c	31.45 ± 1.29a	23.56 ± 0.81c	20.44 ± 0.99c
12	P40	35.95 ± 2.20A	24.05 ± 2.98A	27.44 ± 2.56A	33.86 ± 2.72A	27.66 ± 3.42A	29.54 ± 2.37A
	P30	33.92 ± 1.37A	22.47 ± 3.45AB	24.59 ± 2.03AB	36.92 ± 2.95A	28.80 ± 4.37A	28.98 ± 2.65A
	P20	28.57 ± 0.67B	19.63 ± 2.98AB	23.84 ± 0.09B	35.32 ± 1.64A	25.76 ± 1.78A	25.94 ± 0.83AB
	CP	27.46 ± 1.50B	17.51 ± 2.27B	23.63 ± 0.77B	33.71 ± 1.73A	24.86 ± 1.79A	24.76 ± 1.33B

1) 数字后小写字母的不同表示不同处理间7.6 cm土层体积含水量在0.05水平上差异显著;数字后大写字母的不同表示不同处理间12 cm土层体积含水量在0.05水平上差异显著

越冬期土壤呼吸速率降至最低;二月中旬之后4个处理呼吸速率随着温度的攀升而升高,在5月上旬达到峰值,P40和P30呼吸速率峰值高于P20和CP,P40、P30、P20和CP的峰值分别为10.80、10.25、7.49和8.73 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,5月中旬呼吸速率开始下降直至小麦收获.

冬小麦生长季内P40和P30的平均呼吸速率高

于P20和CP(表3),其中P40显著高于P20和CP($P<0.05$).除返青期至拔节期外,沟垄集雨处理土壤呼吸速率均表现为P40>P30>P20,垄宽增加使呼吸速率提高1.2%~18.4%.在冬小麦苗期和越冬期,土壤呼吸速率均表现为P40>P30>P20>CP,其中苗期阶段沟垄集雨处理显著高于CP,沟垄集雨处理间的差异不显著,越冬期P40处理的呼吸

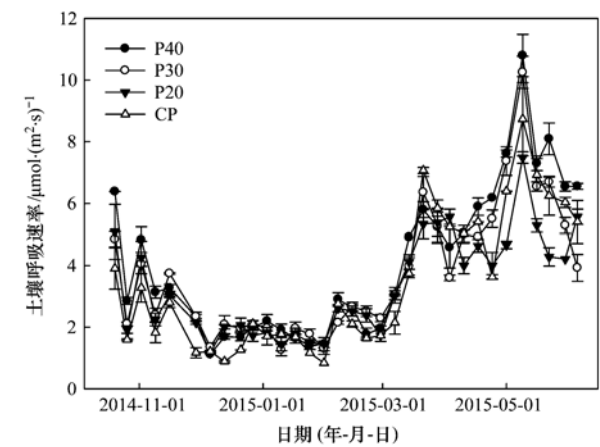


图3 2014~2015年冬小麦全生育期土壤呼吸变化

Fig. 3 Soil respiration among different planting patterns in winter wheat growing season in 2014-2015

速率显著高于CP,其他处理间的差异不显著.返青期至拔节期,沟垄集雨处理的土壤呼吸速率高于CP;拔节期至成熟期,土壤呼吸速率表现为 $P40 > CP > P30 > P20$,其中扬花期至成熟期,P40的呼吸速率显著高于P20.

2.4 土壤呼吸与土壤温度和水分的

2.4.1 土壤呼吸与土壤温度和水分的

相关性分析
由土壤呼吸与温度和水分的
相关性分析可知(表4),土壤呼吸与5 cm和10 cm土层温度的相关系数均达极显著水平($P < 0.01$),其中与5 cm土层温度的相关性高于10 cm土层;P40处理与两个土层温度的相关性均高于其他3个处理.土壤呼吸速率与土壤水分的相关系数在两个土层均表现为 $P40 < P30 < P20 < CP$,其中与7.6 cm土层水分的相关

表3 冬小麦不同生长阶段土壤呼吸速率变化¹⁾/μmol·(m²·s)⁻¹

Table 3 Averaged soil respiration among different planting patterns in various growth stages of winter wheat/μmol·(m²·s)⁻¹

处理	不同生育阶段					
	苗期	越冬期	返青-拔节期	拔节-开花期	开花-成熟期	全生育期
P40	3.20 ± 0.22a	1.98 ± 0.22a	3.50 ± 0.14a	5.28 ± 0.67a	7.86 ± 0.45a	4.03 ± 0.01a
P30	2.87 ± 0.32a	1.91 ± 0.34ab	3.64 ± 0.67a	4.85 ± 0.45a	6.64 ± 0.80ab	3.66 ± 0.33ab
P20	2.73 ± 0.31a	1.88 ± 0.20ab	3.32 ± 0.37a	4.80 ± 0.45a	5.95 ± 1.36b	3.32 ± 0.16b
CP	2.08 ± 0.19b	1.71 ± 0.32b	3.26 ± 0.82a	5.25 ± 1.41a	6.89 ± 0.97ab	3.38 ± 0.36b

1) 数字后小写字母的不同表示不同处理间土壤呼吸速率在0.05水平上差异显著

表4 土壤呼吸与土壤温度和水分的

Table 4 Correlations among soil respiration, soil temperature and soil moisture

处理	温度		水分	
	5 cm	10 cm	7.6 cm	12.0 cm
P40	0.836 **	0.830 **	0.261 **	0.168
P30	0.732 **	0.722 **	0.394 **	0.297 **
P20	0.748 **	0.728 **	0.510 **	0.458 **
CP	0.735 **	0.725 **	0.524 **	0.428 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$,下同

性高于12 cm土层;除P40只与7.6 cm土层水分的相关系数达到极显著水平外,其余3个处理与两个土层水分的相关性均达到极显著水平.选择与土壤呼吸相关性较高的5 cm土层温度和7.6 cm土层水分探讨呼吸与水热因子的关系.

2.4.2 土壤呼吸与土壤温度的关系

本研究通过指数方程($R_s = ae^{bT}$,其中 a 、 b 为拟合参数)能较好拟合土壤呼吸(R_s)与温度(T)间的关系(图4).土壤呼吸速率随着温度的上升而升高,呼吸速率在温度较高时相对于低温时上升速度快.5 cm土层温度可以解释土壤呼吸变化的50.3%~68.2%;P40的决定系数最高,达到

0.682,P30、P20和CP分别为0.503、0.531和0.514.国内外学者一般将土壤呼吸速率随温度的变化程度使用温度敏感性系数(Q_{10})表示,由温度敏感性方程 $Q_{10} = e^{10b}$ 可知;P40、P30、P20和CP的土壤温度敏感系数分别为1.95、1.71、1.61和1.79,其中P40对温度变化最敏感,P20对温度的敏感性最差.

2.4.3 土壤呼吸与土壤水分的

关系
土壤呼吸速率的残差值是指基于温度模型(本研究采用指数方程)的模拟值与观测值间的差值,反映了除土壤温度外,其它因素对土壤呼吸受控制的强度.本研究通过分析土壤呼吸的残差随土壤水分的变化(图5)表明,P40和P30残差值离散度低,P20和CP处理残差值的离散度较高,说明P40和P30的土壤呼吸不易受到土壤水分的影响,而P20和CP的土壤呼吸速率受土壤水分的影响较大.

2.4.4 土壤呼吸与水热双因子之间的关系

通过二次方程($R_s = \delta + \varepsilon T + \zeta W + \theta T^2 + \lambda W^2$)和线性方程($R_s = \alpha + \beta T + \gamma W$)两种模型拟合土壤呼吸与水热双因子间的关系(表5).水热双因子对土壤呼吸的协同影响作用高于单因子,水热双因子方

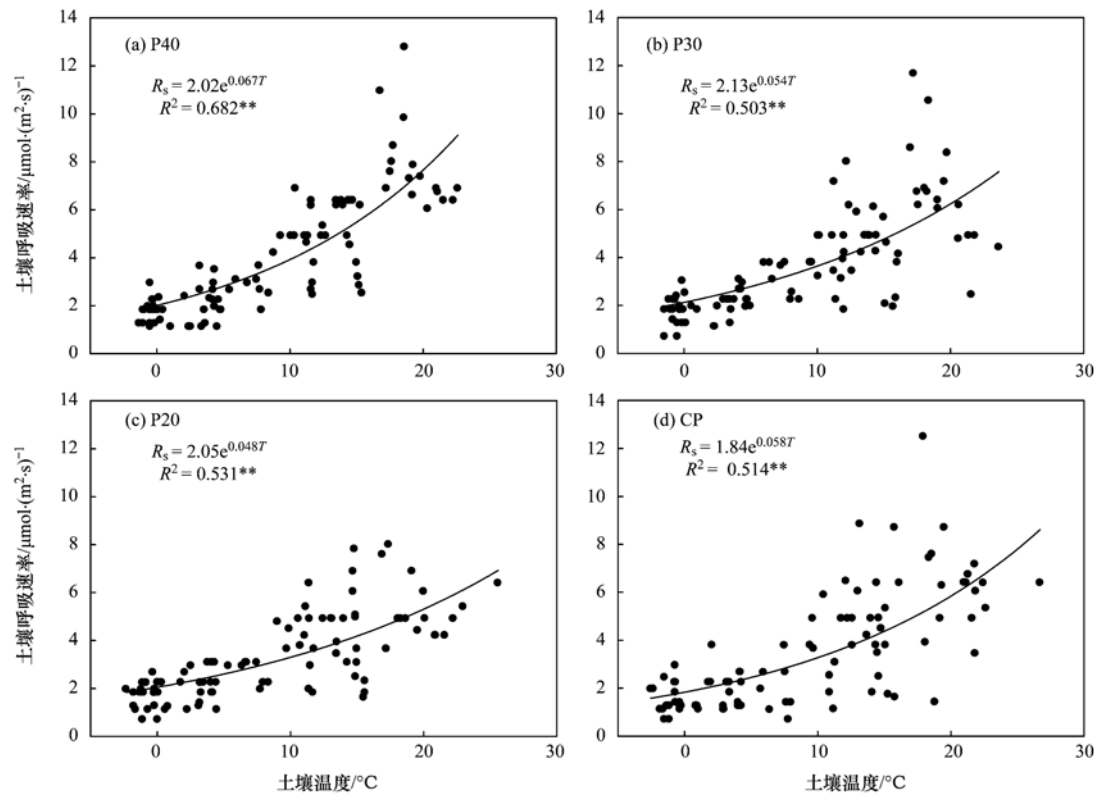


图 4 2014 ~ 2015 年冬小麦全生育期土壤呼吸与 5 cm 土层温度的关系

Fig. 4 Relationship between soil respiration and temperature of 5 cm soil layer in winter wheat growing season in 2014-2015

程的决定系数高于温度的单因子方程. 二次方程比线性方程可以更好拟合试验结果,其拟合方程的决定系数高于线性方程,前者可以解释土壤呼吸变化的 61.7% ~ 74.1%,后者可以解释 59.9%

~72.4%. 不同处理的土壤呼吸与水热双因子的拟合方程的决定系数均达到极显著水平,两种模型拟合结果均表现为 P40 的决定系数最高,P30 和 CP 最低.

表 5 基于土壤水分 (W) 和土壤温度 (T) 的土壤呼吸模型参数¹⁾

处理	$R_s = \delta + \varepsilon T + \zeta W + \theta T^2 + \lambda W^2$						$R_s = \alpha + \beta T + \gamma W$				N
	δ	ε	ζ	θ	λ	R^2	α	β	γ	R^2	
P40	2.757	0.147	-0.116	0.007	0.003	0.741**	0.229	0.283	0.048	0.724**	97
P30	2.106	0.149	-0.074	0.003	0.002	0.617**	0.161	0.203	0.064	0.608**	97
P20	4.210	0.102	-0.235	0.003	0.005	0.690**	0.727	0.153	0.056	0.631**	95
CP	3.107	0.071	-0.185	0.006	0.005	0.652**	0.338	0.185	0.068	0.599**	95

1) δ 、 ε 、 ζ 、 θ 、 λ 、 α 、 β 、 γ 为拟合参数

3 讨论

沟垄集雨种植对土壤的增温作用主要集中在作物生长的前期阶段,而之后增温效果逐渐减弱^[15,21],本研究中苗期和越冬期,沟垄集雨处理土壤温度高于 CP,而拔节期至成熟期,CP 土壤温度高于沟垄集雨处理,主要原因是小麦生长的前期阶段沟垄集雨种植通过覆膜使垄上土壤保温升温,并通过热传递逐步使沟中土壤温度升高^[22];小麦生育后期 CP 处理冠层盖度小,透光率大,土层表面可以

接受到更多太阳辐射能,相反,沟垄集雨处理地上部生长旺盛冠层盖度大,太阳辐射主要被冠层截获,导致土壤温度降低^[23]. 沟垄集雨种植通过构筑的垄面向沟中集雨,有效蓄存自然降水^[24,25],能使小于 5 mm 的无效降水转化为有效水分贮存于土壤中,增加土壤含水量^[13,25]. 本研究从 2014 年 10 月底至 2015 年 3 月中旬,小于 5 mm 的降水达 21 次,大于 10 mm 的降水只有 1 次,沟垄集雨种植集雨效果好,并且随着垄宽的增加土壤含水量越高,拔节期至扬花期降雨量增加,沟垄集雨处理与 CP 的土壤水分

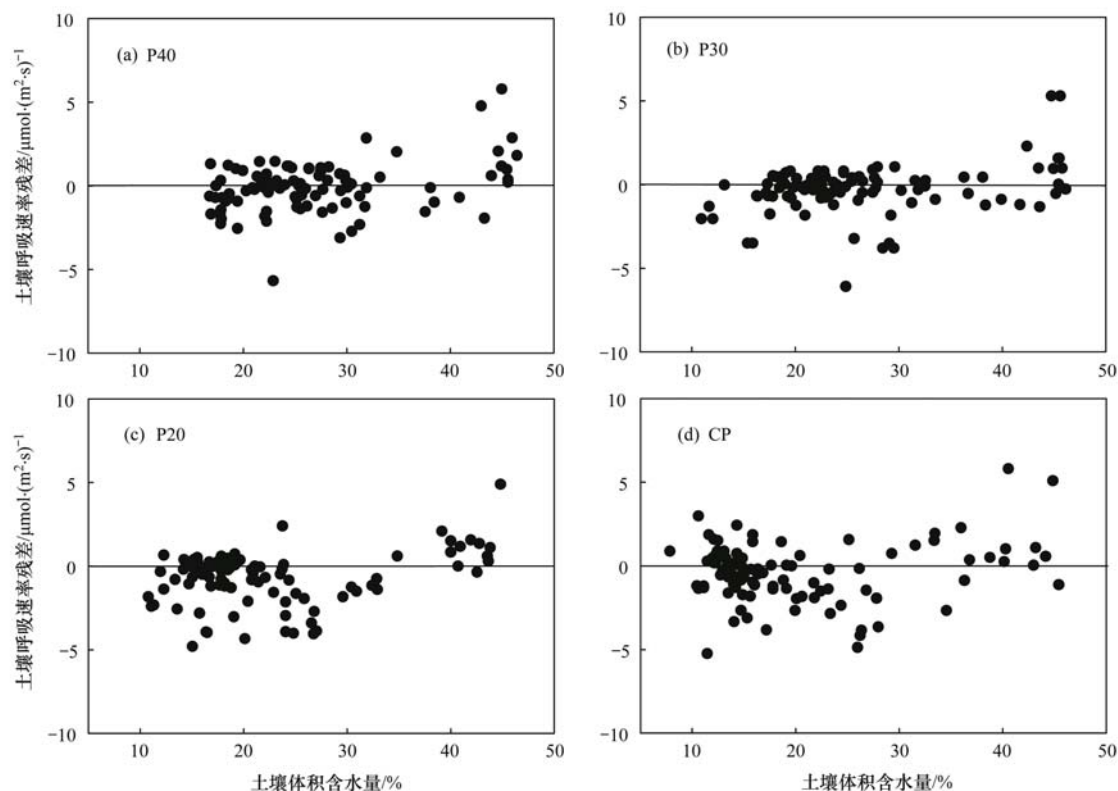


图5 2014~2015年冬小麦全生育期土壤呼吸的残差值与7.6 cm 土层水分的关系

Fig. 5 Relationship of residues values of soil respiration with soil moisture of 7.6 cm soil layer in winter wheat growing season in 2014-2015

几乎相同。

冬小麦田土壤呼吸速率呈现出明显的季节性变化特征,呼吸速率在冬季最低,峰值出现在扬花期前后,这与金皖豫等^[26]和吴杨周等^[27]的研究结果保持一致,冬季土壤温度较低,土壤微生物活动和小麦根系活力受到限制,小麦生长缓慢,导致土壤呼吸微弱^[26];冬小麦在扬花期前后生长最为旺盛,小麦根系活力高^[23],本研究在扬花期前后降雨频繁且温度较高,良好的土壤温湿度有利于土壤微生物活动,土壤呼吸此时达到峰值。冬小麦生长季除返青期至拔节期除外,沟垄集雨处理土壤呼吸速率表现为 $P40 > P30 > P20$,呼吸速率随着垄宽增加而提高 1.2%~18.4%,主要原因是垄宽的增加提高了冬小麦各生育阶段土壤含水量,较好的水分条件有利于小麦对土壤养分的利用,促进根系的生长进而增加根系呼吸^[28],同时较好的水分条件能提高土壤微生物的活性和数量,从而提高异养呼吸^[29]。此外本研究还发现,沟垄集雨种植通过对冬小麦田土壤温度和水分的变化影响土壤呼吸速率,冬小麦生育前期,与平作相比沟垄集雨种植显著提高了土壤呼吸速率,这与上官宇先等^[30]的研究结果相反,可能是土壤和气候条件差异所导致的,本研究中冬小麦生育前期,沟

垄集雨处理的土壤温度和水分均高于 CP, P40 和 P30 的生育期平均呼吸速率高于 P20 和 CP,小麦生长季 P40 和 P30 的 7.6 cm 土层平均土壤含水量显著高于 P20 和 CP,较好水热条件有利于提高小麦根系呼吸和微生物呼吸^[31]。

土壤呼吸与 5 cm 土层温度的相关性高于 10 cm 土层,这与其他试验结果一致^[32,33],这可能与 5 cm 土层土壤微生物更加活跃有关^[32]。本研究中 P20 和 CP 处理与水分的相关性高于 P40 和 P30 处理,并且 P20 和 CP 呼吸的残差值随水分变化的离散度较 P40 和 P30 处理高,说明 P20 和 CP 处理的土壤呼吸速率比 P40 和 P30 更易受到土壤水分的影响,主要原因是 P40 和 P30 处理比 P20 和 CP 的土壤含水量高,土壤水分条件好,当水分不是限制因子时土壤呼吸与温度相关性更高^[34],当土壤水分高于田间持水量或低于土壤凋萎含水量时,土壤呼吸与土壤温度相关性较小,受土壤水分的影响较大^[35]。温度敏感系数(Q_{10} 值)能够较好地描述温度和呼吸之间的关系^[36],本研究 Q_{10} 在 1.61~1.95 之间,前人研究表明土壤呼吸随温度变化的敏感性系数 Q_{10} 值在 1.3~3.3 之间^[9]。本研究中水热双因子的二次方程模型较温度单因子模型可以更好解释呼吸变化,

能解释呼吸变化的 61.7% ~ 74.1%, 这与其他研究并不完全相同^[30,36], 可能是不同的生态系统或不同栽培措施下, 土壤微生物和植物根系对水热因子的响应不同, 但是水热双因子模型比单因子模型能更好地解释土壤呼吸变化, 这与其他研究一致, 说明土壤呼吸季节性变化受到土壤水热因子的共同影响^[36,37].

沟垄集雨种植模式包括垄和沟两个部分, 本研究只对沟中的土壤呼吸及其对水热因子的响应进行了探讨, 而垄上土壤呼吸状况因垄上土壤微环境较为复杂仍需进一步研究.

4 结论

沟垄集雨种植对土壤温度的影响与小麦生育进程密切相关, 在冬小麦苗期和越冬期, 沟垄集雨处理可以提高土壤温度; 沟垄集雨能有效蓄存自然降水, 提高土壤含水量, 且随着垄宽的增加土壤含水量越高. 沟垄集雨种植下的土壤呼吸呈现出明显的季节性变化, 并通过对冬小麦田土壤温度和水分的改变影响土壤呼吸速率, 在苗期阶段土壤呼吸速率显著高于平作处理; 沟垄集雨处理土壤呼吸速率表现为 $P40 > P30 > P20$ (返青-拔节期除外), 呼吸速率随着垄宽增加而提高 1.2% ~ 18.4%. 土壤呼吸速率受到土壤温度和水分的共同影响, 水热双因子二次函数模型可以较好地模拟呼吸变化, 能解释呼吸变化的 61.7% ~ 74.1%.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge, United Kingdom, New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 秦大河, Stocker T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论 [J]. 气候变化研究进展, 2014, **10**(1): 1-6.
Qin D H, Stocker T. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Progressus Inquisitiones de Mutation Climatis, 2014, **10**(1): 1-6.
- [3] 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放 [J]. 第四纪研究, 2003, **23**(5): 493-503.
Li C S, Xiao X M, Frolking S, *et al.* Greenhouse gas emissions from croplands of China [J]. Quaternary Sciences, 2003, **23**(5): 493-503.
- [4] 赵成义. 陆地不同生态系统土壤呼吸及土壤碳循环研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.
Zhao C Y. Study on soil respiration and soil carbon cycle of different terrestrial ecosystem [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2004.
- [5] Tang J W, Baldocchi D D. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components [J]. Biogeochemistry, 2005, **73**(1): 183-207.
- [6] Millard P, Midwood A J, Hunt J E, *et al.* Partitioning soil surface CO₂ efflux into autotrophic and heterotrophic components, using natural gradients in soil $\delta^{13}\text{C}$ in an undisturbed savannah soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(7): 1575-1582.
- [7] Höglberg P, Bhupinderpal-Singh, Löfvenius M O, *et al.* Partitioning of soil respiration into its autotrophic and heterotrophic components by means of tree-girdling in old boreal spruce forest [J]. Forest Ecology and Management, 2009, **257**(8): 1764-1767.
- [8] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(11-12): 1625-1635.
- [9] Ye Q, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains [J]. Plant and Soil, 2001, **237**(1): 15-23.
- [10] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 土壤水分对土壤呼吸的影响 [J]. 林业科学研究, 2009, **22**(5): 722-727.
Deng D Z, Fan Z P, Wang H, *et al.* Influences of soil moisture on soil respiration [J]. Forest Research, 2009, **22**(5): 722-727.
- [11] Guo Q, Wang W, Liu Y, *et al.* Effects of soil moisture and temperature on soil microbial ecological environment and soil respiration in rainfed wheat field [J]. Research on Crops, 2013, **14**(2): 374-381.
- [12] Zhou L M, Li F M, Jin S L, *et al.* How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China [J]. Field Crops Research, 2009, **113**(1): 41-47.
- [13] 严昌荣, 居辉, 彭世琪, 等. 中国北方旱农地区农田水分动态变化特征 [J]. 农业工程学报, 2002, **18**(3): 11-14.
Yan C R, Ju H, Peng S Q, *et al.* Soil moisture dynamic characteristics of dryland field in northern China [J]. Transactions of the CSAE, 2002, **18**(3): 11-14.
- [14] Hu Q, Pan F F, Pan X B, *et al.* Effects of a ridge-furrow micro-field rainwater-harvesting system on potato yield in a semi-arid region [J]. Field Crops Research, 2014, **166**: 92-101.
- [15] Wang Q, Song X Y, Li F C, *et al.* Optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-mulching material for Alfalfa production in rainwater harvesting in semi-arid regions of China [J]. Field Crops Research, 2015, **180**: 186-196.
- [16] C Xiaoli, Pute W, Z Xining, *et al.* Rainfall harvesting and mulches combination for corn production in the subhumid areas prone to drought of China [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2012, **198**(4): 304-313.
- [17] Liu X E, Li X G, Hai L, *et al.* Film-mulched ridge-furrow management increases maize productivity and sustains soil organic carbon in a dryland cropping system [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, **78**(4): 1434-1441.
- [18] 任小龙, 贾志宽, 丁瑞霞, 等. 我国旱区作物根域微集水种植技术研究进展及展望 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, **28**(3): 83-89.
Ren X L, Jia Z K, Ding R X, *et al.* Progress and prospect of research on root-zone water micro-collecting farming for crop in arid region of China [J]. Agricultural Research in the Arid

- Areas, 2010, **28**(3): 83-89.
- [19] 刘艳红. 渭北旱塬微集水种植模式对土壤水分、养分及冬小麦产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- Liu Y H. Effects of soil water content and soil nutrient and wheat growth under micro-catchment cultivation in Weibei [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [20] 高程达, 孙向阳, 曹吉鑫, 等. 土壤二氧化碳通量原位测定方法及装置[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30**(2): 102-105.
- Gao C D, Sun X Y, Cao J X, *et al.* A method and apparatus of measurement of carbon dioxide flux from soil surface *in situ* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, **30**(2): 102-105.
- [21] Zhao H, Wang R Y, Ma B L, *et al.* Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfed ecosystem[J]. Field Crops Research, 2014, **161**: 137-148.
- [22] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨量下沟垄微型集雨种植玉米的水温效应[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(1): 70-77.
- Ren X L, Jia Z K, Chen X L, *et al.* Effect of corn (*Zea mays* L.) water and temperature of ridge and furrow planting of rainfall harvesting under simulated rainfall conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, **41**(1): 70-77.
- [23] 杨姗姗. 集雨节灌种植模式对土壤水温环境和冬小麦生长发育的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- Yang S S. Effects of rainfall harvesting with water-saving irrigation cultivation on soil moisture and temperature environment and growth of winter wheat [D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2014.
- [24] Gan Y T, Siddique K H M, Turner N C, *et al.* Chapter seven-ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. Advances in Agronomy, 2013, **118**: 429-476.
- [25] 李永平, 贾志宽, 刘世新, 等. 旱作农田微集水种植产流蓄墒扩渗特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, **24**(2): 86-90.
- Li Y P, Jia Z K, Liu S X, *et al.* Characteristics of runoff generation, water storage and rainwater distribution under micro-catchment planting in dry-land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, **24**(2): 86-90.
- [26] 金皖豫, 李铭, 何杨辉, 等. 不同施氮水平对冬小麦长期土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(3): 249-257.
- Jin W Y, Li M, He Y H, *et al.* Effects of different levels of nitrogen fertilization on soil respiration during growing season in winter wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, **39**(3): 249-257.
- [27] 吴杨周, 陈健, 胡正华, 等. 水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 280-287.
- Wu Y Z, Chen J, Hu Z H, *et al.* Effects of reduced water and diurnal warming on winter-wheat biomass and soil respiration[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 280-287.
- [28] Li C J, Wen X X, Wan X J, *et al.* Towards the highly effective use of precipitation by ridge-furrow with plastic film mulching instead of relying on irrigation resources in a dry semi-humid area [J]. Field Crops Research, 2016, **188**: 62-73.
- [29] Wei S C, Zhang X P, McLaughlin N B, *et al.* Effect of soil temperature and soil moisture on CO₂ flux from eroded landscape positions on black soil in Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, **144**: 119-125.
- [30] 上官宇先, 师日鹏, 韩坤, 等. 垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸[J]. 生态学报, 2012, **32**(18): 5729-5737.
- Shangguan Y X, Shi R P, Han K, *et al.* The dynamics of soil respiration in a winter wheat field with plastic mulched-ridges and unmulched furrows[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(18): 5729-5737.
- [31] 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 Agriculture Engineering, 2014, **30**(19): 155-165.
- [32] Rowlings D W, Grace P R, Kiese R, *et al.* Environmental factors controlling temporal and spatial variability in the soil-atmosphere exchange of CO₂, CH₄ and N₂O from an Australian subtropical rainforest [J]. Global Change Biology, 2012, **18**(2): 726-738.
- [33] Schauffler G, Kitzler B, Schindlbacher A, *et al.* Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature [J]. European Journal of Soil Science, 2010, **61**(5): 683-696.
- [34] 张延, 梁爱珍, 张晓平, 等. 不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1106-1113.
- Zhang Y, Liang A Z, Zhang X P, *et al.* Priming effects of soil moisture on soil respiration under different tillage practices[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1106-1113.
- [35] 李君剑, 曹杰, 严俊霞, 等. 矿区不同复垦措施下土壤呼吸与环境因子关系的研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(8): 2102-2110.
- Li J J, Cao J, Yan J X, *et al.* Correlation between soil respiration and environmental factors under different reclamation systems in a mining area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(8): 2102-2110.
- [36] 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 fields [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(6): 1916-1925.
- [37] Gao B, Ju X T, Su F, *et al.* Comparison of soil respiration in typical conventional and new alternative cereal cropping systems on the North China Plain [J]. PLoS One, 2013, **8**(11): e80887.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行