

冬小麦-夏玉米一体化垄作覆盖下农田土壤呼吸变化研究

王同朝, 卫 丽, 田 原, 马 超, 杜园园, 谭 阳

(河南农业大学农学院/河南省作物生长发育调控重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要 农田土壤呼吸释放 CO_2 过程加强是导致全球气候变暖的重要途径。通过大田原位实验,研究了雨养条件下垄作覆盖保护性耕作技术条件对土壤呼吸季节性和作物生育后期日变化的影响。结果表明,冬小麦从越冬期到灌浆期,不同处理的土壤呼吸值均以垄作覆盖值最高,平作覆盖次之,平作的值最小,平作处理与其他处理间均达到极显著差异。灌浆期各处理土壤呼吸值达到最大,分别为 4.95 、 4.69 、 4.4 、 $2.61 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;成熟期各处理间大小顺序依次为:平作覆盖处理>垄作覆盖处理>垄作处理>平作处理,平作覆盖与垄作覆盖分别与其他两个处理间达到极显著差异。玉米不同生育时期垄作覆盖处理土壤呼吸值均高于其他处理,平作处理的值最低,不同生育时期垄作覆盖与平作均达到极显著差异,不同处理在夏玉米抽雄期土壤呼吸值最高,成熟期最低。从冬小麦和夏玉米生长后期土壤温度(X)与土壤呼吸强度(Y)日变化看,两者呈显著线形关系,其直线回归方程分别为: $Y=0.170\ 4X-0.637\ 2$ ($R^2=0.882^{**}$), $Y=0.103\ 9X+1.207\ 3$ ($R^2=0.880\ 2^{**}$)。显然,同传统的种植模式相比,雨养条件下垄作秸秆覆盖保护性耕作技术模式增大了向大气环境释放 CO_2 温室气体的数量。

关键词 冬小麦;夏玉米;垄作覆盖;土壤呼吸

中图分类号 S152.6 文献标志码 A 文章编号:1672-2043(2009)09-1970-05

Dynamic Changes of Soil Respiration on Mulched Bed Planting Under Winter Wheat and Summer Maize Double Cropping Integration

WANG Tong-chao, WEI Li, TIAN Yuan, MA Chao, DU Yuan-yuan, TAN Yang

(College of Agronomy/Henan Key Laboratory of Regulation and Control of Crop Growth and Development, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract The atmospheric CO_2 concentration released by soil respiration from farmlands results in the global temperature increase as well as the changes of worldwide climate. The effect of mulching and bed planting on soil respiration under rain-fed conditions were examined via in-situ experiments with four treatments as mulched bed planting(MBP), pure bed planting(PBP), mulched flat planting(MFP) and pure flat planting(PFP). The results showed that from the initial growth of winter wheat to grain-filling stage MBP had the highest soil respiration, then PBP, MFP and PFP. The soil respiration value reached the maximum at the grain-filling stage with $4.95 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $4.69 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $4.4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and $2.61 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for MBP, MFP, PBP and PFP, respectively. The seasonal and daily changes of soil respiration for summer maize had the similar trends as compared with the whole growing period of winter wheat. Soil temperature was one of key factors that drive the changes of soil respiration. The relationship between soil surface temperature and soil respiration demonstrated significant linear regression at which formulae $Y=0.170\ 4X-0.637\ 2$ ($R^2=0.882^{**}$) and $Y=0.103\ 9X+1.207\ 3$ ($R^2=0.880\ 2^{**}$) were established for winter wheat and summer maize, respectively. Therefore, as compared with traditional flat planting, mulched bed-planting increased the CO_2 release into the atmosphere by enhanced soil respiration under rain-fed conditions.

Keywords winter wheat; summer maize; bed-planting with mulch; soil respiration

收稿日期 2009-02-25

基金项目 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD02A07) 河南省高校科技创新人才支持计划(2009HASTIT006)

作者简介 王同朝(1964—),男,教授,从事旱作节水和保护性耕作技术研究。

通讯作者 卫 丽 E-mail: wtcwrm@126.com

温室气体排放与全球气候变暖已经成为公众和科学界关注的热点之一。大气中温室气体(二氧化碳、氮氧化物、甲烷等)尤其是 CO_2 浓度的不断攀升是全球气候变暖的主要因子。农耕是世界上人类最大规模的活动,巨大而经常性扰动耕层加剧了向大气排放温室气体体积速率^[1]。近年来研究表明,农田土壤呼吸释放 CO_2 是大气温室气体重要输出源^[1-3]。影响土壤呼吸的因素很多,既有温度^[4-5]、湿度^[6-7]、施肥^[8-10]等栽培环境条件的影响,也有植被类型^[14, 7, 11]、土壤动物以及人为因素(如土地利用方式变化)等生物学过程的影响^[12]。温度升高,土壤微生物活性增强,土壤呼吸量也会随之增大,土壤呼吸和土壤温度之间呈现良好的相关关系^[13]。季节间土壤呼吸与土壤温度和土壤含水量均呈显著的指数相关,该变化主要受非生物因子温度和水分变化的调控,而土壤呼吸的昼夜变化则可能主要受植物的生理活动周期性等生物因素的影响^[7]。不同的农作方式可以改变土壤呼吸强度,如耕作方式、排灌条件等不仅改变了地表植被,而且改变了土壤的理化性质(如土壤透气性),从而使土壤有机质含量、微生物的组成和活性、根系生物量等发生改变,从而引起土壤呼吸变化^[2-3, 14]。秸秆还田^[14-15]和垄作秸秆覆盖^[8]均提高土壤呼吸通量。与传统的水旱轮作和淹水作相比,免耕垄作土壤的呼吸强度和纤维素分解强度也明显增强^[16]。

冬小麦-夏玉米一年两熟是我国黄淮海平原区重要的种植方式,垄作覆盖技术是针对该区水分匮乏和粮食高产之间矛盾而研究推广的一种崭新高产节水型保护性耕作模式,我们初步探讨表明其有较好的应用推广前景^[17-19]。基于前人研究,本文从冬小麦-夏玉米周年角度探究农田土壤呼吸释放 CO_2 的季节动态,明确其环境效应,为生产中大面积示范推广奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2006—2007 年在河南农业大学科教园区进行(113°38'39"E, 34°47'51"N)。土质为中壤土,试验前茬种植夏玉米,玉米秸秆粉碎深耕还田。小麦播前土壤有机质含量 $7.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解 N 为 $35.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效 P 为 $25.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效 K 为 $127.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。玉米播前土壤有机质含量为 $8.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解 N 含量为 $59.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效 P 含量为 $28.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效 K 含量为 $129.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因秸秆还田,冬小麦施肥管理

以及气候条件变化的影响,夏玉米播种前土壤养分含量稍有增加。

1.2 试验设计与种植管理

试验设 4 个处理,采用随机完全区组设计,处理分别为垄作覆盖处理(T_1)、垄作处理(T_2)、平作覆盖处理(T_3)、平作处理(T_4),重复 3 次,共 12 个小区,每小区面积为 56 m^2 ,垄距为 70 cm,垄高 15 cm。冬小麦选用半冬性中熟多抗的豫农 201 品种,于 2006 年 10 月 11 日播种,播量为 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。垄上种 3 行小麦,行距为 15 cm,冬小麦的平均行距为 23.3 cm。垄之间(垄沟内)覆盖玉米秸秆。小麦收割后秸秆直接覆盖在垄上,玉米种在垄沟里,垄沟内种植 1 行玉米,夏玉米选用耐密、多抗的郑单 958 品种,于 2007 年 6 月 3 日播种,密度为 $67500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,株距为 21.2 cm,行距为 70 cm。冬小麦、夏玉米整个生育期间不进行灌水,小麦播前撒施俄罗斯生产的复合肥 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N/ $\text{P}_2\text{O}_5/\text{K}_2\text{O}$ 为 16/16/16),冬小麦拔节期追施尿素 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,抽穗期为防治蚜虫喷施农药 1 次,夏玉米拔节期追施尿素 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在大喇叭口期用呋喃丹丢心防治玉米螟。其他管理同大田。

1.3 土壤呼吸和土壤温度测定

用美国 LICOR 公司生产的 LI-8100 于冬小麦越冬期、拔节期、孕穗期、灌浆期、成熟期和夏玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期测定定点行间土壤呼吸,土壤呼吸日变化测定仅在两种冬小麦、夏玉米生育后期各进行 1 次,时间为早上 8:00 至晚上 18:00,每隔 2 h 进行 1 次测定。在土壤呼吸测定前 1 d 于作物行间中央位置,放置预先做好的 PVC 圈(直径 10 cm,高 6 cm)作为土壤呼吸测定室,将它插入土内 2~3 cm 以减少土壤表层微环境因素的干扰,每个样点测定需要 1~2 min。测定同时将 LI-8100 的测温探针插入土壤内 10 cm,同步测定土壤温度。

1.4 试验数据统计分析

本文的方差分析全部用 SAS(9.0)数据处理系统,利用 SigmaPlot(10.0)、Excel(2007)等软件进行分析绘制图表。

2 结果与分析

2.1 小麦不同生育时期土壤呼吸变化

由表 1 可以得出,不同处理的土壤呼吸值在小麦不同生育期内变化较大,小麦越冬期,可能由于地温较低,土壤水分含量不高,不同处理的土壤呼吸值均较低,最高为垄作处理,最低为平作处理,并与其他处

理间差异达到极显著差异水平。随着小麦生育期的进程,气温变暖,植株变大,根系发育逐步健全,不同处理土壤呼吸值逐渐变大,灌浆期土壤呼吸值达到最高,从越冬期到灌浆期,不同处理的土壤呼吸值均以垄作覆盖值最高,平作覆盖次之,平作的值最小,平作处理与其他处理间均达到极显著差异。说明垄作覆盖处理土壤能够保持适宜的温度、水分,增加土壤的通透性,有利于土壤微生物的生命活动及小麦根系的健康生长^[18-19]。在小麦成熟期,各处理间大小顺序依次为:平作覆盖处理>垄作覆盖处理>垄作处理>平作处理,平作覆盖与垄作覆盖分别与其他两个处理间达到极显著差异,最大值与最小值之间相差 $1.63 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

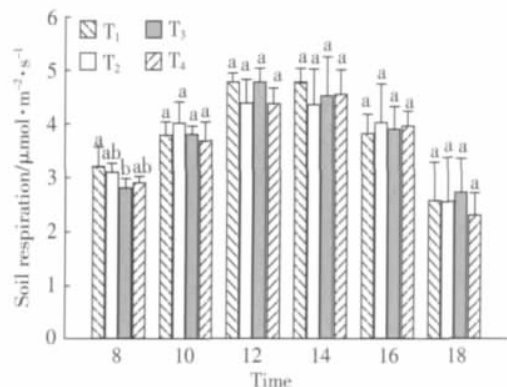
表1 冬小麦不同生育期土壤呼吸值($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)Table 1 Changes of soil respiration at the different growth stages of winter wheat($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

处理 Treatments	越冬期 Winter	拔节期 Jointing	孕穗期 Spike	灌浆期 Grain-filling	成熟期 Maturity
T ₁	1.20aA	2.55aA	4.22aA	4.95aA	3.31aA
T ₂	1.22aA	2.42aA	3.58bB	4.40aA	2.49bB
T ₃	1.01aAB	2.50aA	3.91aAB	4.69aA	3.51aA
T ₄	0.62bB	1.82bB	2.44cC	2.61bB	1.68cC

注:表内各列均值后的不同大小写字母分别表示在概率水平 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 上达到显著和极显著差异,下同。

2.2 小麦生育后期土壤呼吸日变化

从图1可以看出,不同处理土壤呼吸日变化都呈“先增加后减少”的趋势,垄作覆盖与平作覆盖处理的峰值出现在14:00点左右,而垄作与平作处理的峰值前移至12:00左右。这可能是由于土壤温度变化造成的,秸秆覆盖处理对地温增加有一定的缓冲作用,致



柱型图上不同字母表示处理之间差异在概率水平 $P<0.05$ 达到显著差异,柱型图上的棒长短表示标准误差大小,下同。

图1 冬小麦生长后期土壤呼吸的日变化

Figure 1 Daily changes of soil respiration at late growing stage of winter wheat

使高温时段后移,垄作覆盖处理日变化相对平缓,平作处理土壤呼吸强度一直最小。

2.3 玉米不同生育时期土壤呼吸变化

如表2所示,在各生育时期,垄作覆盖处理土壤呼吸值均高于其他处理,平作处理的值最低,不同生育时期垄作覆盖与平作之间均达到极显著差异,不同处理在抽雄期土壤呼吸值最高,成熟期最低。因此,垄作覆盖能明显地提高作物生长后期土壤呼吸值,这表明该处理能够改善玉米根系生长的土壤环境,根系发育健壮,延缓玉米根系的衰老,促进土壤呼吸强度。

表2 夏玉米不同生育时期土壤呼吸值($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)Table 2 Changes of soil respiration at the different growth stages of summer maize ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

处理 Treatments	拔节期 Jointing	大口期 Trumpet	抽雄期 Silking	灌浆期 Grain-filling	成熟期 Maturity
T ₁	4.00aA	4.13aA	4.65aA	4.52aA	2.89aA
T ₂	2.27cC	3.85bcAB	3.75bcBC	3.66bB	2.10bcB
T ₃	3.36bB	4.00abA	4.15bAB	3.88bB	2.41abAB
T ₄	2.02cC	3.63cB	3.55cC	2.90cC	1.81cB

2.4 玉米生育后期土壤呼吸日变化

从图2可以看出,在夏玉米生育后期,不同处理土壤呼吸日变化也呈现“先增后减”的单峰曲线,与小麦生育时期变化趋势相同,垄作覆盖与平作覆盖处理值在14:00点左右达到最大,而垄作与平作处理的最大值出现在12:00左右。秸秆覆盖处理对土壤呼吸强度的“缓冲作用”比较明显,垄作覆盖处理土壤呼吸强度变化幅度小于垄作处理与平作处理。

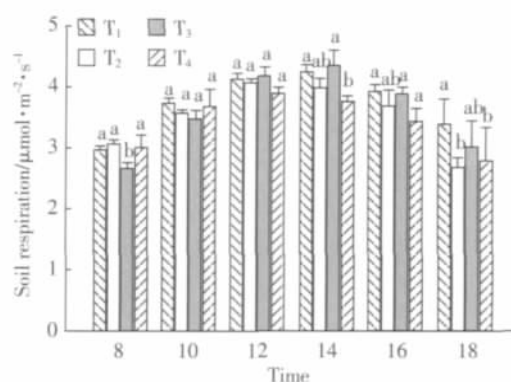


图2 夏玉米生长后期土壤呼吸的日变化

Figure 2 Daily changes of soil respiration at late growing stage of maize

2.5 土壤地表温度与土壤呼吸间的相关性

图3、图4表明,不同处理之间土壤地温日变化与土壤呼吸之间呈极显著的正相关关系。在冬小麦生

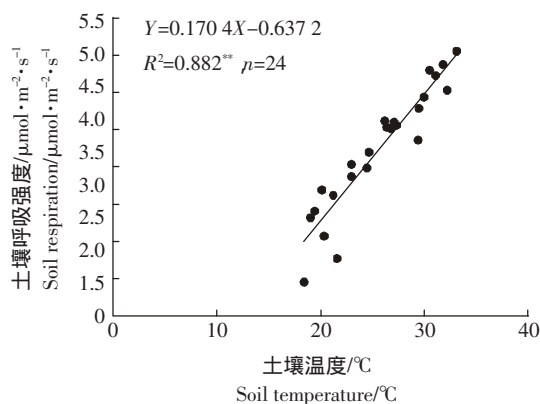


图3 冬小麦生长后期土壤呼吸强度与土壤温度之间的关系
Figure 3 The relationship of the soil ground temperature and the daily change of soil respiration at late growing stage of winter wheat

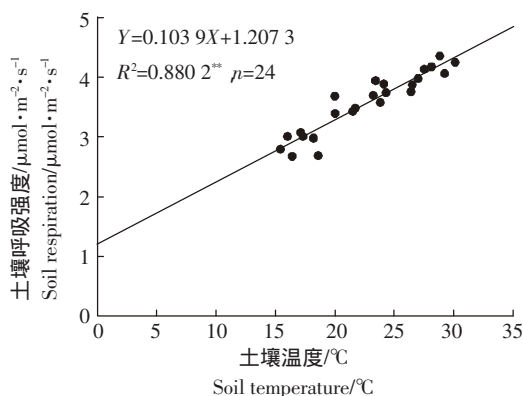


图4 夏玉米生长后期土壤呼吸强度与土壤温度之间的关系
Figure 4 The relationship of the soil ground temperature respiration at late growing stage of summer maize and the daily change of soil

长后期和夏玉米生长后期,测定的土壤温度(X)与土壤呼吸强度(Y)日变化呈简单直线关系,其直线回归方程分别为:

$$Y=0.170\ 4X-0.637\ 2(R^2=0.882^{**})$$

$$Y=0.103\ 9X+1.207\ 3(R^2=0.880\ 2^{**})$$

这说明垄作覆盖条件下,土壤呼吸强度与土壤温度之间有密切的关系,在冬小麦生长后期同夏玉米生长后期相比,单位土壤温度变化对土壤呼吸强度影响稍强些。垄作小麦覆盖处理土壤呼吸强度在14.00达到高值,比对照(平作)增加13%,此时土壤温度分别为30.1℃、28.1℃,垄作覆盖夏玉米生长下具有相似的变化趋势。

3 讨论

土壤呼吸,也称土壤总呼吸,是指土壤中产生 CO_2 的所有代谢作用,包括3个生物学过程(土壤微

生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳矿物质的化学氧化作用)^[20],即包括生物与非生物学的过程。

前人研究结果表明,土壤呼吸强度的季节变化和阶段变化取决于两过程的综合作用,土壤呼吸的季节变化中土壤温度可以解释土壤呼吸变化的56.1%,土壤含水量可以解释土壤呼吸变化的11.1%,而土壤呼吸的昼夜变化则可能主要受植物的生理活动周期性等生物因素的影响^[7]。本试验研究结果也吻合该结论。随着冬小麦和夏玉米生长发育进程的推移,气温升高,在其旺盛生长期土壤呼吸值均高,两作物生长后期土壤呼吸强度的日变化趋势相近,即一天中在12.00—14.00达到峰值,这一结果取决于作物自身发育特点和非生物因子共同调控结果。小麦越冬期间,地温较低,土壤水分含量不高,不同处理的土壤呼吸值均较低。随着小麦生育期的进程,气温变暖,植株变大,根系发育逐步健全,不同处理土壤呼吸值逐渐变大,灌浆期土壤呼吸值达到最高,土壤呼吸强度和土壤温度之间达到极显著的相关关系($R^2=0.882^{**}$)。这表明农田由于受人们活动干扰,其呼吸强度有别于自然生态系统。垄作秸秆覆盖增加农田土壤呼吸强度,冬小麦从越冬期到灌浆期,平作覆盖与垄作覆盖分别与其他两个处理间达到极显著差异,玉米不同生育时期垄作覆盖与平作间达到极显著差异。垄作增大土壤接触空气表面积,有利于加强增温效应,根系的过氧化氢酶、脲酶和转化酶活性增强,提高20~40 cm土层的呼吸强度^[19],垄作秸秆覆盖处理方式增加有效太阳辐射的吸收转化和热量传导,缓和土壤温度变化,延迟日变化中土壤呼吸强度峰值出现,提高土壤C/N和碱性磷酸酶、转化酶、脲酶、呼吸强度^[21],有效的缓冲雨滴直接击打地面,消除了根际土壤的板结现象,显著地改变了土壤的理化性质(土壤透气性),土壤有机质含量、微生物的组成和活性,增加土壤呼吸能力,从而为作物根系的健康生长,延缓植株根系衰老奠定基础。因此,同传统种植方式相比,垄作秸秆覆盖这种崭新的高产节水型保护性耕作模式虽然有利于增强作物自身生理活性的抗逆性,但是也增加向大气环境空间释放二氧化碳量。

从本实验初步结果看,秸秆覆盖改善土壤水分状况会影响土壤呼吸强度,但是没有系统探讨该因子的作用强度,下一步有必要更细致研究水温复合因子对土壤呼吸作用结果,明确采用什么样的垄作秸秆覆盖方式最大限度降低这种模式对温室效应的贡献率,以实现其经济与环境效应的统一。

参考文献:

- [1] 彭少麟, 李跃林, 任海, 等. 全球变化条件下的土壤呼吸效应[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 705-713.
PENG Shao-lin, LI Yue-lin, REN Hai, et al. Progress in research on soil respiration under the global change[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5): 705-713.
- [2] 周晓飞, 张庆国. 不同耕作模式下农田土壤呼吸变化初步研究[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(8): 64-65.
ZHOU Xiao-fei, Zhang Qing-guo. The preliminary study on the changes of soil respiration under the different farmland tillage patterns[J]. *Anhui Agril Scil Bull*, 2007, 13(8): 64-65.
- [3] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 992-999.
MENG Fan-qiao, GUAN Gui-hong, ZHANG Qing-zhong, et al. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6): 992-999.
- [4] 刘尚华, 吕世海, 冯朝阳, 等. 京西百花山区六种植物群落凋落物及土壤呼吸特性研究[J]. 中国草地学报, 2008, 30(1): 78-86.
LIU Shang-hua, LV Shi-hai, FENG Chao-yang, et al. Study on soil and litter respiration characteristics of six communities in Baihua Mountainous Area in West Beijing[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(1): 78-86.
- [5] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 土壤呼吸对温度升高的适应[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2649-2655.
CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo, et al. Acclimatization of soil respiration to warming[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2649-2655.
- [6] Siyan M, Jiquan C, John R B, et al. Biophysical controls on soil respiration in the dominant patch types of an old-growth, mixed-conifer forest[J]. *Forest Science*, 2005, 51(3): 221.
- [7] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较[J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 31-39.
FENG Wen-ting, ZOU Xiao-ming, SHA Li-qing, et al. Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broadleaved forest of Ailao mountains, China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1): 31-39.
- [8] Lichter K, Govaerts B, Six J, et al. Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in a permanent raised-bed planting system in the Highlands of Central Mexico[J]. *Plant and Soil*, 2008, 305(1/2): 237-252.
- [9] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 9-15.
YANG Lan-fang, CAI Zu-cong. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 9-15.
- [10] Michael C T, John R S, Thomas R F. The effects of fertilization on soil respiration in 2-Year-Old *Pinus taeda* L. clones[J]. *Forest Science*, 2008, 54(1): 21.
- [11] 杨刚, 何寻阳, 王克林, 等. 不同植被类型对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响[J]. 土壤通报, 2008(1): 189-191.
YANG Gang, HE Xun-yang, WANG Ke-lin, et al. Effects of vegetation types on soil micro-biomass carbon, nitrogen and soil respiration[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008(1): 189-191.
- [12] 唐燕飞, 王国兵, 阮宏华. 土壤呼吸对温度的敏感性研究综述[J]. 南京林业大学学报, 2008, 32(1): 124-128.
TANG Yan-fei, WANG Guo-bing, RUAN Hong-hua. A review on the sensitivity of soil respiration to temperature[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2008, 32(1): 124-128.
- [13] 孙园园, 李首成, 周春军, 等. 土壤呼吸强度的影响因素及其研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(6): 1738-1739, 1757.
SUN Yuan-yuan, LI Shou-cheng, ZHOU Chun-jun, et al. Research on the factor affecting the soil respiration and its investigation[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, 35(6): 1738-1739, 1757.
- [14] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤CO₂释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 469-472.
QIANG Xue-cai, YUAN Hong-li, GAO Wang-sheng. Effect of crop-residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 469-472.
- [15] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883-2887.
ZHANG Qing-zhong, WU Wen-liang, WANG Ming-xin, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [16] 刘翼浩, 王爱玲. 实行作物秸秆还田促进农业可持续发展[J]. 作物杂志, 1998(5): 1-5.
LIU Yun-hao, WANG Ai-ling. The implementation of crop straw on field to promote sustainable agricultural development[J]. *Crops*, 1998(5): 1-5.
- [17] 王同朝, 卫丽, 王燕. 垄作覆盖对夏玉米产量及生长相关生理参数的影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(4): 109-113.
WANG Tong-chao, WEI Li, WANG Yan. Influence of sowing on ridges and straw mulching system on summer corn yield and growth related physiological parameters[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(4): 109-113.
- [18] 王同朝, 卫丽, 王燕. 夏玉米垄作覆盖对农田土壤水分及其利用影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 129-132.
WANG Tong-chao, WEI Li, WANG Yan. Influence of bed-planting and straw mulching system on soil water and crop using of farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 129-132.
- [19] 王同朝, 王燕, 卫丽. 作物垄作栽培法研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(4): 377-382.
WANG Tong-chao, WANG Yan, WEI Li. Research progress on crop raised-bed planting in China[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(4): 377-382.
- [20] 李玉宁, 王关玉. 土壤呼吸作用和全球碳循环[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 351-357.
LI Yu-ning, WANG Guan-yu. Soil respiration and carbon cycle[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 351-357.
- [21] 李春勃, 范丙全. 麦秸覆盖旱地棉田少耕培肥效果[J]. 生态农业研究, 1995, 3(3): 52-55.
LI Chun-bo, FAN Bing-quan. Effects of straw mulching on soil fertility under minimum tillage system in rainfed cotton field[J]. *Eco-Agriculture Research*, 1995, 3(3): 52-55.