

不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素

刘 爽,严昌荣*,何文清,刘 勤

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;2. 农业部旱作节水农业重点开放实验室,北京 100081)

摘要:为探讨耕作措施对旱地农田土壤呼吸的影响,采用动态气室法在山西寿阳地区对秸秆还田、免耕覆盖、浅旋耕、常规耕作4种耕作措施下玉米生长季土壤呼吸及影响因子进行了测定和分析。结果表明,4种耕作措施下土壤呼吸速率的日和季节变化规律明显,均呈单峰型,呼吸速率的日峰值出现在11:30—13:30,呼吸速率的季节峰值出现在7月上旬至中旬。浅旋耕、秸秆还田、常规耕作、免耕覆盖措施整个生长季平均土壤呼吸速率分别为2.82、2.77、2.64 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和2.49 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,处理间无显著差异。研究结果还显示土壤温度和湿度是影响旱地农田土壤呼吸的主要因子,二者分别解释了土壤呼吸季节变化的55%—78%,20%—43%。4种措施下土壤呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 值在2.19—3.07之间,大小依次为免耕覆盖>浅旋耕>秸秆还田>常规耕作。对水分的敏感性依次为免耕覆盖>秸秆还田>浅旋耕>常规耕作。

关键词:旱地;耕作措施;土壤呼吸;土壤温度;土壤湿度

Soil respiration and it's affected factors under different tillage systems in dryland production systems

LIU Shuang, YAN Changrong*, HE Wenqing, LIU Qin

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Dryland Farming and Water-saving Agriculture, MOA, Beijing 100081, China

Abstract: In this study, we measured the soil respiration rate with a closed chamber method under 4 different tillage treatments, which are all straw returned and incorporated by tillage (ASRT), no-till with straw mulching (NTSM), shallow rotary till treatment (SRT) and conventional tillage (CT), in Shouyang Dryland Farming Experimental Station. We conducted these investigations the effects of these four tillage managements combined with other the factors on soil respiration rate during the growth period for maize. The results showed that soil respiration rates have daily and seasonal regular changes under all tillage treatments, which showed a single peak curve. The daily maximum of soil respiration rate occurred at 11:30—13:30, and the maximum value of seasonal soil respiration rate occurred from the first to middle of July. During the growth period, the average of soil respiration rates of the SRT, ASRT, NTSM and CT were 2.82, 2.77, 2.64 and 2.49 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively. The result also indicated that soil temperature and moisture are two key factors that affect the soil respiration rate in the dryland field, which could explain 55%—78%, 20%—43% of the seasonal variation, respectively. The Q_{10} of four treatments were 2.19—3.07 and NTSM > SRT > ASRT > CT. The water sensitivity is NTSM > ASRT > SRT > CT.

Key Words: dryland; tillage treatment; soil respiration; soil temperature; soil moisture

土壤呼吸是陆地生态系统土壤和大气之间 CO_2 交换的重要组成部分,占整个陆地生态系统总呼吸量的2/3以上,在全球碳循环中起着关键作用^[1-2]。在陆地生态系统中,农田生态系统占据重要地位,由于受自然

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD29B01);国家“十一五”863 资助项目(2006AA100220);国家基础性工作专项“中国农业气候资源数字化图集编制”资助项目

收稿日期:2009-03-25; 修订日期:2009-06-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yancr@ieda.org.cn

因素和人为活动的影响较大,如耕作措施、施肥、灌溉等的影响,农田土壤呼吸在空间、时间上的变化十分复杂^[3-5]。探索农田生态系统中土壤呼吸的变化规律及控制机理对明确减缓土壤有机碳分解的对策和措施以及评估全球碳收支具有重要的指导意义。

随着我国农业水资源紧缺问题的日益严峻,一些防止土壤退化、减少土壤侵蚀、增加土壤蓄水的环境友好型耕作技术,如少免耕、秸秆覆盖等技术在我国一些地区得到运用^[6-8]。同时这些耕作技术作为一种增汇措施,对于减少温室气体排放、增加农田土壤有机质的作用也逐渐成为国内外学者关注的热点问题^[9-12]。已有研究表明,秸秆还田措施可以调节土壤物理环境,促进微生物的代谢,提高土壤呼吸速率^[13];少免耕则能够明显的降低土壤呼吸作用,增加农田土壤固碳能力^[14]。但是针对不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸的对比研究还比较少。因此,本试验研究了山西旱作农田不同耕作措施下土壤呼吸的特点和主要影响因子,试图分析两个问题:(1)不同耕作措施下(秸秆还田、免耕覆盖、浅旋耕和常规耕作)旱地农田土壤呼吸速率的日和季节变化的规律;(2)土壤温度和湿度对旱地农田土壤呼吸的影响。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地点位于山西省寿阳县宗艾镇,地理位置为北纬 37°51',东经 113°05',海拔 1130m。属中纬度暖温带半干旱大陆气候,年平均温度 7.4℃,年降雨量 474mm,年蒸发量 1714mm,干燥度在 1.1—1.2 之间。试验地土壤为褐土,轻壤,土层深厚,耕层土壤有机质含量为 2.57g/kg,全 N 1.04 g/kg,全 P 0.79 g/kg,碱解氮 106.4 mg/kg,有效磷 4.97 mg/kg,有效钾 117.2 mg/kg,pH 为 8.4。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,分别为秸秆还田,免耕覆盖,浅旋耕和常规耕作(表 1)。每个处理 3 次重复,小区面积为 10m×6m=60m²。一年一熟,种植作物为春玉米,品种为强盛 31 号,2008 年 4 月 25 日播种,10 月 10 日收获。

表 1 试验处理描述

Table 1 Description of different treatments

代码 Code	处理 Treatment	具体措施 Description of treatments
ASRT	秸秆还田 All straw returned and incorporated by tillage	秋季收获后,利用机械将全部秸秆直接翻耕到 0—20cm 的土壤中,翌年春天机械浅耙镇压后人工播种
NTSM	免耕覆盖 No-till with straw mulching	秋季收获后,将全部秸秆直接覆盖在农田表面,翌年春天人工免耕播种
SRT	浅旋耕 Shallow rotary till treatment	秋季收获后,将全部秸秆直接覆盖在农田表面,翌年春天机械浅旋耕(5cm)后人工进行播种
CT	常规耕作 Conventional tillage	秋季收获后,将全部秸秆移出,然后在冬前进行机械深翻,深度为 20cm 左右,翌年春天机械浅耙镇压后人工进行播种

1.3 观测指标和方法

1.3.1 土壤呼吸测定

采用动态密闭气室红外 CO₂分析仪(IRGA)法,测定仪器型号为美国 Li-6400 便携式气体分析系统和 Li-6400-09 土壤呼吸室,测定方法主要参考韩广轩等^[11]。玉米行距和株距分别为 60 cm、30cm,测定时提前 24h 将 PVC 圈嵌入 1/2 株行距交叉处土壤中,PVC 圈为直径 10cm,高 4cm 的聚乙烯圆柱体,嵌入土壤 2cm,每个处理 3 个重复,在整个观测过程中 PVC 圈埋设位置保持不变。其中免耕覆盖处理在埋设 PVC 圈时将表层秸秆移开,避免秸秆对土壤呼吸速率的直接影响。日变化测定为白天每隔 2 h 测定 1 次,夜间每隔 3 h 测定一次。季节变化测定为整个玉米生长季,2008 年测定时间为 4 月 25 日、5 月 26 日、7 月 3 日、8 月 8 日、9 月 11 日、10 月 10 日,均在 08:00—10:00 点之间测量,有研究指出该时间段测定值最为接近 24h 平均值,具有较好的代表性^[15]。

1.3.2 土壤温度测定

在土壤呼吸测定的同时,在 PVC 圈附近选择 1 个点将土壤热电偶探针(Li-6400-09TC)插入 10cm 深度土壤测定土壤温度。

1.3.3 土壤湿度测定

在土壤呼吸测定的同时,每个小区采用梅花点取样,3 个重复,取样深度为 0—10cm,用烘干法测定土壤含水量。

1.3.4 计算和数据分析

所有的统计分析在 SPSS13.0 软件中进行。为分析土壤温度和土壤呼吸的关系,采用 $R_s = ae^{bT}$ 指数函数进行拟合^[16], R_s 为土壤呼吸速率, T 为土壤温度, a, b 为待定参数。采用 $Q_{10} = e^{10b}$ 对 Q_{10} 土壤呼吸的温度敏感性进行计算。

2 结果和分析

2.1 土壤呼吸动态变化

2.1.1 不同耕作措施下土壤温度和土壤呼吸日变化

图 1 为 2008 年 8 月 8—9 日 4 种耕作措施下农田土壤(10cm)温度和土壤呼吸的 24h 日变化曲线。可以看出,4 种耕作措施下土壤温度和土壤呼吸存在明显的日变化规律,均表现为单峰型。秸秆还田措施土壤呼吸速率峰值出现在 13:30,峰值最高,其它 3 种措施的峰值均出现在 11:30,最小值则出现在 04:30 左右;土壤(10cm)温度最大值较土壤呼吸的出现明显延迟现象,其峰值主要出现在 15:30 左右,最小值出现在 04:30—07:30。4 种耕作措施下 10cm 土壤温度在 19.5—25.5℃ 之间波动,土壤呼吸速率在 $3.42\text{--}6.08\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间变化,土壤呼吸速率日变化受土壤温度的影响较大,二者变化趋势基本一致。不同处理间土壤呼吸速率存在显著差异,方差分析表明,秸秆还田较常规耕作措施能显著促进土壤呼吸速率的提高($P < 0.05$)。

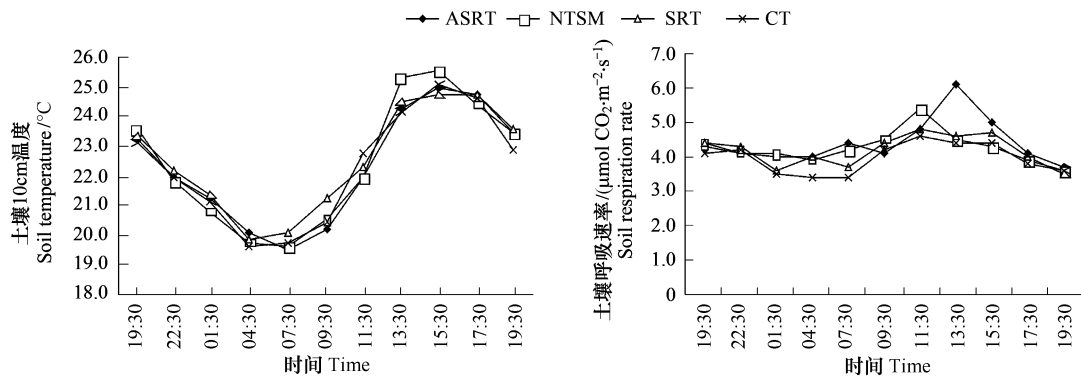


图 1 不同耕作措施下土壤温度和土壤呼吸的日变化

Fig.1 Diurnal variations of soil temperature and soil respiration rate under different tillage

2.1.2 不同耕作措施下土壤呼吸季节变化

4 种耕作措施下农田土壤呼吸的季节变化规律基本一致,也均呈现单峰型的变化趋势(图 2)。4 月下旬玉米播种前农田土壤呼吸速率均较低;5 月上旬至 6 月下旬随着气温的回升,玉米迅速生长,土壤生物活动旺盛,土壤呼吸开始逐渐增大,7 月上旬至中旬各措施下土壤呼吸均达到峰值;此后土壤呼吸逐渐减弱,8 月中旬各处理土壤呼吸速率迅速降低,至 10 月上旬玉米收获期时达到最低。

玉米整个生长季中,不同耕作处理间土壤呼吸速率存在一定的差异,但方差检验显示处理间差异并不显著($P < 0.05$)。平均土壤呼吸速率依次表现为浅旋耕 > 秸秆还田 > 常规耕作 > 免耕覆盖。浅旋耕和秸秆还田措施下土壤呼吸速率平均达到 $(2.82 \pm 0.76)\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $(2.77 \pm 0.79)\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,浅旋耕措施在耕作过程中对土壤产生强烈扰动,促进了土壤有机质的分解,土壤呼吸速率整体表现较高;秸秆还田措施则提高了土壤有机质的数量和质量,增加了土壤微生物量,同样提高了土壤有机质的分解。免耕覆盖措施下

平均土壤呼吸速率为 $(2.49 \pm 0.77) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,明显降低了旱地农田土壤的呼吸速率,在7—8月份土壤呼吸旺季时表现尤为突出,较浅旋耕和秸秆还田措施平均降低12.6%。

2.2 土壤呼吸与环境因子的关系

2.2.1 土壤温度对土壤呼吸的影响

为探讨土壤温度与土壤呼吸之间的关系,国内外学者一般采用线性模型、二次方程、指数模型等多种方法进行拟合^[16],本试验结果中 $R_s = ae^{bt}$ 指数函数拟合效果最好。通过对整个玉米生长季观测数据的拟合(表2),可以看出,土壤(10cm)温度是影响本地区不同耕作措施下土壤呼吸的主要因素,其解释了土壤呼吸季节变化的55%—78%;4种处理中,浅旋耕和免耕覆盖下土壤温度和土壤呼吸的相关性最高,常规耕作措施最低。从土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 来看,4种耕作措施下温度敏感性系数在2.19—3.07之间,依次为免耕覆盖>浅旋耕>秸秆还田>常规耕作。

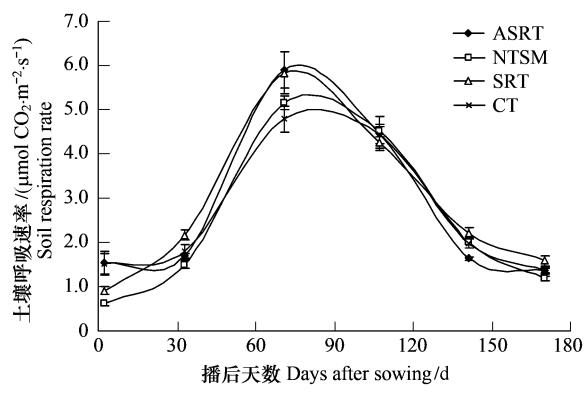


图2 不同耕作措施下土壤呼吸的季节变化
Fig.2 Seasonal variations of soil respiration rate under different tillage

注:图中误差线为标准误差

表2 土壤呼吸与土壤温度的关系方程参数以及土壤呼吸的温度敏感性系数

Table 2 Fitted equation parameters of soil respiration rate with soil temperature and temperature sensitivity of soil respiration rate (Q_{10})						
耕作措施类型 Type of tillage managements	a	b	R^2	样本数 n Number of measurement	P	土壤呼吸温度 敏感性系数 Q_{10} Temperature sensitivity of soil respiration Q_{10}
秸秆还田 ASRT	0.696	0.082	0.62	48	<0.01	2.27
免耕覆盖 NTSM	0.352	0.112	0.77	52	<0.01	3.07
浅旋耕 SRT	0.458	0.100	0.78	54	<0.01	2.73
常规耕作 CT	0.611	0.079	0.55	54	<0.01	2.19

2.2.2 不同耕作措施下土壤湿度对土壤呼吸的影响

对于干旱地区的农田土壤来说,除土壤温度外,土壤湿度也是影响土壤呼吸的一个重要因素^[11]。如果只考虑土壤湿度的因素,其与土壤呼吸的拟合方法较多且差别比较大(表3),除常规措施外,其他3种耕作措施下均呈现指数关系。可以看出,本地区土壤(0—10cm)湿度是影响不同耕作措施下土壤呼吸的一个重要因素,其解释了土壤呼吸季节变化的20%—43%。4种耕作措施下,土壤湿度对土壤呼吸的影响基本一致,均随着土壤湿度增加而降低。其中免耕覆盖措施下土壤湿度变化最小,平均土壤湿度最高,与土壤呼吸的相关性也最高,说明该措施下土壤呼吸对水分敏感性最强,其次为秸秆还田和浅旋耕措施,常规耕作措施下土壤呼吸与水分的相关性最弱,相关系数仅为0.20。

表3 土壤呼吸与土壤湿度的关系方程

Table 3 Fitted equation parameters of soil respiration rate with soil moisture					
耕作措施类型 Type of tillage managements	平均土壤湿度/% Average soil moisture	拟合方程 Fitted equation	R^2	样本数 n Number of measurement	P
秸秆还田 ASRT	15.67	$R_s = 18.87e^{-0.136w}$	0.34	18	<0.01
免耕覆盖 NTSM	16.35	$R_s = 24.24e^{-0.159w}$	0.43	18	<0.01
浅旋耕 SRT	16.10	$R_s = 9.49e^{-0.096w}$	0.26	18	<0.05
常规耕作 CT	15.16	$R_s = -2.85\ln(w) + 10.6$	0.20	18	<0.05

3 讨论与结论

3.1 不同耕作措施下土壤呼吸的动态变化

许多研究结果显示,一般情况下,森林、草原以及湿地等的土壤呼吸速率呈现单峰型特点,农田土壤呼吸日和季节变化规律大多数也如此^[10],孟凡乔等在华北平原玉米地试验中指出土壤呼吸在春季缓慢升高,峰值出现在温度较高的7月份,之后逐步回落^[14]。王立刚等在黄淮海平原夏玉米农田中的试验结果显示,日变化峰值出现在13:00左右^[17],王旭等在长白山玉米农田观测的日变化峰值出现在12:00左右,最小值出现在05:00左右^[18]。本研究中4种耕作措施下旱地农田土壤呼吸日和季节变化同样呈现明显的单峰曲线,日变化峰值出现在11:30—13:30,最小值出现在04:30左右,季节变化的峰值出现在7月上中旬。说明尽管各地农田生态系统中土壤呼吸日和季节变化的峰值出现时间有所不同,但土壤呼吸的整体动态规律基本一致,呈现单峰曲线趋势,峰值的差异主要是因为测定时期以及测定区域的不同所造成。

此外,本研究中土壤呼吸速率与土壤(10cm)温度的变化趋势基本吻合,但旱地农田系统中不同耕作措施下土壤(10cm)温度的峰值出现较土壤呼吸峰值的出现均有所延迟,秸秆还田措施下大约滞后2h,浅旋耕、免耕覆盖和常规耕作措施下大约滞后4h,其原因主要是土壤(10cm)温度达到高峰期需要一个热传递过程,该现象在草地、森林^[19]土壤中也有出现,但延迟时间一般在6h左右。

3.2 土壤水热因子对土壤呼吸的影响

对于旱地农田生态系统来说,水热因子是影响其土壤呼吸最为主要的两个因素^[20-21]。长期以来研究者多使用 Q_{10} 来描述土壤呼吸与温度之间的关系, Q_{10} 指温度每升高10℃土壤呼吸速率增加的倍数,表示一个生态系统类型土壤呼吸作用对温度的敏感性。王小国等对旱地全年 Q_{10} 值计算结果显示其平均值为2.74^[20],Raich等综合大量文献发现 Q_{10} 值一般在1.3—3.3之间变化^[22]。本研究结果显示,4种耕作措施下土壤呼吸的温度敏感性系数在2.19—3.07之间,与前人研究一致。旱地农田系统中不同耕作措施下土壤呼吸速率与土壤(10cm)温度呈正相关关系,且存在一定差异,其大小依次为免耕覆盖>浅旋耕>秸秆还田>常规耕作。说明免耕覆盖措施下土壤呼吸对温度的敏感性最强,其次为秸秆还田和浅旋耕措施,3种耕作措施下土壤呼吸均较常规耕作对温度的敏感性有所增强。尽管免耕覆盖条件下土壤呼吸对温度的敏感性最强,但是已有研究多表明免耕覆盖条件下土壤表层温度降低幅度最大,且变异性减小^[23],其土壤呼吸速率表现为最弱。

本研究中4种耕作措施下玉米生长季平均土壤湿度在15.16%—16.35%之间,其与土壤呼吸的相关系数在0.20—0.43之间,除常规耕作措施外,免耕覆盖、秸秆还田以及浅旋耕3种耕作措施均呈现负相关指数关系。一般降水或者土壤水分的增加会促进土壤的呼吸作用^[24],但对于干旱半干旱地区的农田生态系统来说,农田土壤湿度过低时会限制土壤微生物呼吸作用和根系呼吸作用,而土壤水分的增加会导致土壤通透性变差,从而减少土壤中 O_2 的浓度,限制 CO_2 的释放,进而降低土壤的呼吸作用^[25]。本研究显示,旱地农田系统中各措施下土壤呼吸作用受土壤湿度的限制影响明显,随着土壤湿度的增加,土壤呼吸速率有所降低,其中免耕覆盖措施在4中耕作措施中表现最为明显,常规耕作和浅旋耕措施下土壤呼吸受土壤湿度的影响较小。

References:

- [1] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32:1625-1635.
- [2] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential global change. *Biology*, 2000, 6:317-327.
- [3] Martens D A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000,32:361-369.
- [4] FAO. Agriculture: Towards 2015/30. Technical Interim Report April 2000. Rome, Food and Agriculture Organization,2001.
- [5] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2001.
- [6] Wang X B, Cai D X, Hoogmoed W B, Oenema O, Perdok U D. Potential effect of conservation tillage on sustainable land use: a review of global long-term studies. *Pedosphere*, 2006, 16(5):587-595.
- [7] Wang X B, Cai D X, Hoogmoed W B, Oenema O, Perdok U D. Developments in conservation tillage in rainfed regions of North China. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(2):239-250.
- [8] Liu S, Wu X P, Wu H J, Liang E, Cai D X. Influence of different tillage practices during summer fallow on soil moisture in wheat field in

- Luoyang. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(3):292-295.
- [9] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Yang Y, Liu J L, Shi K Q. Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize agricultural ecosystem. Plant and Soil, 2007, 291:15-26.
- [10] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland and ecosystems in China. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3):719-733.
- [11] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Yang Y, Liu J L, Shi K Q. Responses of soil respiration to the coordinated effects of soil temperature and biotic factors in maize field. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3):363-371.
- [12] Wang Y, Wang X B, Liu S, Liang E, Cai D X. Conservation tillage and its effect on soil organic carbon. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3):766-771.
- [13] Zhang Q Z, Wu W L, Wang M X, Zhou Z R, Chen S F. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11):2883-2887.
- [14] Meng F Q, Guan G H, Zhang Q Z, Shi Y J, Qu B, Kuang X. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(6):992-999.
- [15] Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, Jia B R, Wang F Y, Zhou L. Soil respiration in natural mixed (betula platyphylla and populus davidiana) secondary forest and primary broad-leaved Korean pine forest, China. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3):348-354.
- [16] Yan J X, You L F, Yue X F, Li J H. Effect of vegetation change on both soil respiration and its relation to soil temperature and moisture. Journal of Shanxi University, 2008, 31(2):273-278.
- [17] Wang L G, Qiu J J, Li W J. Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer-corn in Huanghuaihai region in China. Soil Fertilizer, 2002, 6:13-17.
- [18] Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, Li F. Comparison of soil respiration in broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai Mountains, China. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6):887-893.
- [19] Ma X M, Zhu B, Han G X, Chen Y G, Gao M R, Zhang Z J. The advance in research of soil respiration. Advance in Earth Sciences, 2004, 19:491-495.
- [20] Wang X G, Zhu B, Wang Y Q, Zheng X H. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5):1960-1967.
- [21] Cai Y, Ding W X, Cai Z C. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12):4274-4280.
- [22] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus, 1992, 44B:81-99.
- [23] Zhang W, Hou L B, Zhang B, Wang G J, Jiang W C, Jia Y. Effects of different cultivation ways on soil physical capability in western semi arid area of Liaoning Province. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3):149-153.
- [24] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. Plant Soil, 1997, 190:127-141.
- [25] Pangle RE, Seiler JR. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO₂ efflux rates in a 2-years-old loblolly pine plantation on the Virginia Piedmont. Environment Pollution, 2002, 116:B85-B96.

参考文献:

- [8] 刘爽,武雪萍,吴会军,梁二,蔡典雄. 休闲期不同耕作方式对洛阳冬小麦农田土壤水分的影响. 中国农业气象, 2007, 28(3):292-295.
- [10] 韩广轩,周广胜,许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望. 植物生态学报, 2008, 32(3):719-733.
- [11] 韩广轩,周广胜,许振柱,杨扬,刘景利,史奎桥. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应. 植物生态学报, 2007, 31(3):363-371.
- [12] 王燕,王小彬,刘爽,梁二,蔡典雄. 保护性耕作及其对土壤有机碳的影响. 中国生态农业学报, 2008, 16(3):766-771.
- [13] 张庆忠,吴文良,王明新,周中仁,陈淑峰. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响. 生态学报, 2005, 25(11):2884-2887.
- [14] 孟凡乔,关桂红,张庆忠,史雅娟,屈波,况星. 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. 环境科学学报, 2006, 26(6):992-999.
- [15] 王旭,周广胜,蒋延玲,贾丙瑞,王凤玉,周莉. 山杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较. 植物生态学报, 2007, 31(3):348-354.
- [16] 严俊霞,尤龙凤,岳晓峰,李洪建. 植被变化对土壤呼吸与土壤温度和水分关系的影响. 山西大学学报, 2008, 31(20):273-278.
- [17] 王立刚,邱建军,李维娟. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究. 土壤肥料, 2002, 6:13-17.
- [18] 王旭,周广胜,蒋延玲,李峰. 长白山红松林阔混交林与开垦农田土壤呼吸作用比较. 植物生态学报, 2006, 30(6):887-893.
- [19] 马秀梅,朱波,韩广轩,陈玉成,高美荣,张中杰. 土壤呼吸研究进展. 地球科学进展, 2004, 19:491-495.
- [20] 王小国,朱波,王艳强,郑循华. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性. 生态学报, 2007, 27(5):1960-1967.
- [21] 蔡艳,丁维新,蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献. 生态学报, 2006, 26(12):4274-4280.
- [23] 张雯,侯立白,张斌,王国骄,蒋文春,贾燕. 辽西易旱区不同耕作方式对土壤物理性能的影响. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3):149-153.