

网络出版时间:2012-05-22 16:35

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120522.1635.024.html>

白榆/刺槐不同林型生长季土壤呼吸速率的变化特征

秦娟^{1,2}, 上官周平²

(1 安徽农业大学 资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】分析白榆纯林(BB)、刺槐纯林(CC)及二者不同比例混交林土壤呼吸速率的日变化及月变化特征,探究影响研究区土壤呼吸的主导因子。【方法】利用 LI-8100 土壤碳通量全自动观测系统,测定陕西杨凌试验田栽植的白榆纯林(BB)、刺槐纯林(CC)及二者不同比例(1:1(1B1C),1:2(1B2C)和2:1(2B1C))混交林5种林型生长季的土壤呼吸速率,并利用观测仪附带的土壤温度探针测定地表及地下5,10和15 cm深处的土壤温度,用土壤湿度传感器测定地下10 cm深处的土壤含水量。【结果】白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率在6,7,9月的日变化均呈单峰曲线,峰值出现在午后12:00—15:00,之后逐渐降低,其中混交林1B2C 7,9月土壤呼吸速率峰值高于其他林型,分别为4.193和4.283 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率均表现出明显的月变化规律,7—9月土壤呼吸速率均较高,在5—9月,5种林型中白榆纯林的土壤呼吸速率一直很低,而混交林1B2C始终较高。土壤温度与土壤呼吸速率的变化基本一致,二者表现出强烈的正相关性,其中地下5 cm深处土壤温度与土壤呼吸速率的相关性最好。土壤呼吸与土壤含水量之间的关系表现离散,二者相关性不显著。【结论】在不同林型中,白榆纯林的土壤呼吸速率较低,混交林1B2C一直较高;影响该区白榆、刺槐纯林及不同比例混交林土壤呼吸速率的主要因子是地下5 cm深处的土壤温度,而土壤含水量对土壤呼吸速率影响不明显。

[关键词] 白榆;刺槐;混交林;生长季;土壤呼吸速率

[中图分类号] S718.51⁺6

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)06-0091-08

Variation characteristics of soil respiration rate in *Ulmus pumila*-*Robinia pseudocacia* in different forest types during the growing season

QIN Juan^{1,2}, SHANGGUAN Zhou-ping²

(1 College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The study was done to analyze the daily and monthly variation characteristics of soil respiration rate in pure *Ulmus pumila* forest (BB), pure *Robinia pseudoacacia* forest (CC) and *U. pumila*-*R. pseudoacacia* mixed forests and explore the leading factors affecting soil respiration rate of the study area. 【Method】Five kinds of forest types soil respiration rate were measured by LI-8100 soil carbon flux automatic observing system during the growing season of pure *U. pumila* forest, pure *R. pseudoacacia* forest and *U. pumila*-*R. pseudoacacia* mixed forests with different proportions (1:1 (1B1C), 1:2 (1B2C), and 2:1 (2B1C)) at Yangling district in Shaanxi Province. And the soil temperature at the surface and 5 cm, 10 cm, 15 cm underground and the soil moisture content at 10 cm underground were measured by probes with LI-8100 attached at the same time. 【Result】The daily variation of soil respiration rate

* [收稿日期] 2011-11-24

[基金项目] 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060300);国家林业公益性行业科研专项(200904056);安徽农业大学稳定和引进人才科研资助项目(2010)

[作者简介] 秦娟(1979—),女,陕西华县人,讲师,博士,主要从事植物生理生态研究。E-mail: qjj814@126.com

[通信作者] 上官周平(1964—),男,陕西扶风人,研究员,博士生导师,主要从事植物生态研究。E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

in June, July and September all showed single-peak curve in different types of *U. pumila* and *R. pseudoacacia*. The peak time occurred between 12:00—15:00 in the afternoon and then the soil respiration rates began to decline gradually. The peak value of soil respiration rate of 1B2C in mixed forest was higher than other forest types in July ($4.193 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) and September ($4.283 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). The soil respiration rate showed significant monthly variation and the maximum rate appeared from July to September. From May to September, the soil respiration rate of pure *U. pumila* forest was lower and the mixed forest of 1B2C was higher in the five different forest types. Soil respiration rate varied similarly to soil temperature and they showed a strong positive correlation between them, especially with soil temperature at 5 cm depth. Soil respiration rate and the relationship between soil water content of discrete performance and the relevance between them were not notable. 【Conclusion】 The soil respiration rate of pure *U. pumila* forest was lower and the mixed forest of 1B2C was higher in different forest types. The main factor affecting the soil respiration rate of pure *U. pumila* forest, pure *R. pseudoacacia* forest and *U. pumila*-*R. pseudoacacia* mixed forests was soil temperature at 5 cm depth in the district and the relevance between soil respiration rate and soil moisture content was not notable.

Key words: *Ulmus pumila*; *Robinia pseudoacacia*; mixed forests; growing season; soil respiration rate

土壤呼吸是土壤与大气交换 CO_2 的过程,是陆地生态系统碳循环的一个重要组成部分,也是土壤碳库的主要输出途径。全球土壤是一个巨大的碳库 ($1.394 \times 10^{18} \text{ g}$),是大气 CO_2 的重要来源^[1],而森林土壤碳是全球碳库的重要组成部分,占全球碳库的 73% 左右^[2]。因此,森林生态系统土壤呼吸速率的微小变化,都将引起大气 CO_2 的很大变化,所以研究森林生态系统土壤呼吸速率就显得尤为重要。同时,其也可为全球碳素平衡预算和全球气候变化潜在效应的估计提供最基本的数据^[3-4]。

在全球气候剧烈变化的背景下,由于土壤呼吸对温度、水分变化的敏感性,所以对土壤呼吸的研究受到越来越多的关注。从全球范围来看,对土壤呼吸的研究虽然已涉及到农田^[5-6]、草原^[7]、森林^[8-10]、湿地^[11]、沙地^[12-13]、冻原^[14]等各种生态系统,但就研究地域而言,现有研究大部分集中在中纬度的温带草地和森林。黄土高原是我国生态较为脆弱的地区,近年来开展的生态建设和退耕还林生态工程极大地改善了该区的生态环境,使得该区的养分和碳循环均产生了一些变化。但是,相对于北方森林和南方热带、亚热带森林,有关黄土高原地区混交林生态系统土壤呼吸的研究尚鲜有报道,目前仅见对黄土旱塬裸地^[15]、农田^[16]、草地^[17]、人工林^[18]土壤呼吸的少数研究。为此,本试验以白榆、刺槐林为研究对象,采用 LI-8100 土壤碳通量测量系统,测定并分析白榆(*Ulmus pumila*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)纯林及不同比例混交林土壤呼吸速率的日变化和月变化规律,试图揭示不同林型土壤呼吸的

动态变化规律及其关键影响因子,探讨主要环境因子的动态变化对土壤呼吸的影响,以期深入了解土壤呼吸作用的变化过程及变化机理,从而为黄土高原地区混交林生态系统的碳循环研究提供基础数据,同时也为西部地区退化生态系统的恢复与重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2007-03—2008-09 在陕西杨凌西卜村田间进行。该地区属温带半湿润易旱气候区,年均气温 12.9°C ,年均降雨量 635 mm,6—9 月份降水量占年降水量的 70% 以上,年均蒸发量约 1 800 mm。试验田面积 470 m^2 ,土壤为土垫旱耕人为土,土壤全 N 含量 1.37 g/kg , NH_4^+-N 含量 2.632 mg/kg , NO_3^--N 含量为 1.501 mg/kg 。

1.2 试验设计

2007-03 中旬,将白榆、刺槐 1 年生苗栽植于研究区田间。试验设 3 种栽植处理方式:白榆纯林(BB)、刺槐纯林(CC)和白榆-刺槐混交林(BC),混交林中的白榆、刺槐混交比例分别为 1:1(1B1C)、1:2(1B2C)和 2:1(2B1C)。混交林小区面积为 $7 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,在田间随机排列,采用株间混交(株距 $0.5 \text{ m} \times$ 行距 0.5 m),每处理 3 次重复。为保护试验材料免受边际效应影响,在试验小区四周设置保护行。分别于 2008 年 5—9 月(即植物的生长初期、中期和末期),对白榆、刺槐纯林及混交林小区进行定点观测,主要测定各小区的土壤温度、土壤湿度以及土壤

呼吸速率的日变化和月变化,每处理重复 3 次。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤呼吸速率 采用 LI-8100 土壤碳通量全自动观测系统(Li-Cor,USA)进行观测。观测前 1 天,分别在每个样地中选择 2 个点作为观测样点,一共选择 30 个观测点,每个观测点均选择在林中样地 4 株植物的中间。观测点选定后,在其位置上插入高约 20 cm、直径 10 cm 的 PVC 管调查室以备观测使用,埋置调查室 Collars 时,使其最少露出土壤表面 2 cm,并将测定点土壤隔离圈内的地表植被自土壤表层彻底剪除。为减小插入 PVC 管产生的土壤扰动对观测结果的影响,于 PVC 管插入 24 h 后进行观测。

1.3.2 土壤温度 观测时,将 LI-8100 土壤碳通量全自动观测仪的气室装于安置好的土壤呼吸环(PVC 环)上,在测量土壤呼吸的同时,利用 LI-8100 观测仪附带的土壤温度探针在离气室约 5 cm 范围内选取 1 点,去除上层的凋落物和腐殖质层,将温度计探针插入土层及土层以下 5,10 和 15 cm 处,读数即为地表温度及地下 5,10 和 15 cm 深处的土壤温度(分别记为 T_0 , T_5 , T_{10} 和 T_{15})。观测参数设定:测量时间 5 min,间隔 25 min,相隔 30 min 记录 1 次土壤呼吸速率和土壤温度。

1.3.3 土壤湿度 每次在测定土壤呼吸的同时,沿气室周围选取 3 个点,尽量使其均匀分布于气室的周围,去除上层的凋落物和腐殖质层,利用土壤湿度传感器测定地下 10 cm 处的土壤湿度,取 3 个点的平均值作为该测定点的土壤水分含量(质量分数)。

1.3.4 土壤呼吸日变化 分别于 2008 年 6、7 和 9 月中旬,选取天气晴好的 2 天,对样地的土壤呼吸速率、土壤温度、土壤水分进行连续测定,测定时间为 09:00—18:00,期间每隔 3 h 测定 1 次。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 统计分析软件对试验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并用最小显著差异法(LSD)比较数据间的差异。文中数据为 3 次重复的“平均值±标准差(SD)”。

2 结果与分析

2.1 白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率的日变化

由图 1 可以看出,白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率的日变化呈单峰曲线,峰值出现在 12:00—15:00,之后逐渐降低。6—9 月土壤呼吸速率的日变化为 $1.3\sim 4.3\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。6 月份,由于气温较低,各林地间土壤呼吸速率差异较小,一天中白榆纯林(BB)的土壤呼吸速率始终最低,混交林 1B1C 和 1B2C 的土壤呼吸速率较高。随着气温的升高,土壤呼吸速率逐渐升高,7 和 9 月混交林 1B2C 的土壤呼吸速率达到最大,分别为 4.193 和 $4.283\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,显著高于其他混交处理和 BB($P<0.05$)。到 9 月时,混交林 1B2C 的最高土壤呼吸速率分别较同时间的 CC、2B1C、1B1C 和 BB 增加 22.25%,28.32%,53.65%和 34.56%。

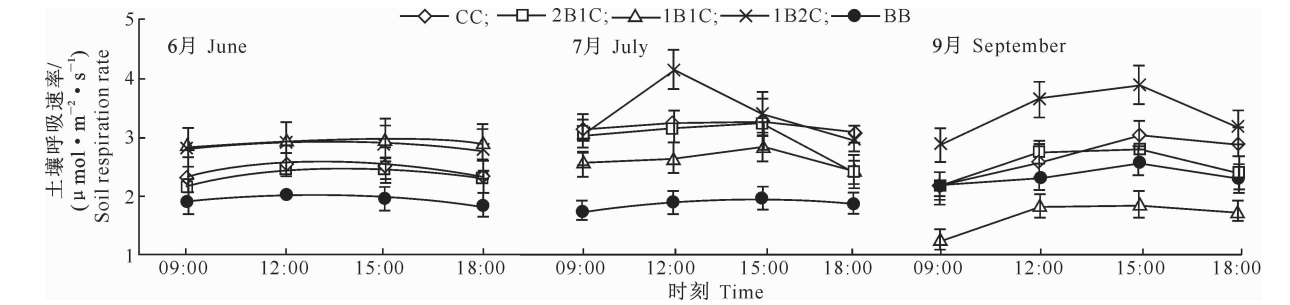


图 1 白榆/刺槐不同林型 6,7 和 9 月土壤呼吸速率的日变化
Fig.1 Daily variation in June,July and September of soil respiration rate of *U. pumila* and *R. pseudoacacia* in different forest types

2.2 白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率的月变化

由图 2 可知,白榆/刺槐不同林型的土壤呼吸速率表现出明显的月变化特征。5 月,外界气温较低,土壤温度也较低,土壤微生物不够活跃,白榆、刺槐林生长比较缓慢,因而土壤呼吸速率均较低。6—7 月,随着气温的升高,土壤温度也有较大提高,此时

植被生长旺盛,根系呼吸强烈,各林型土壤呼吸速率迅速增强。7—9 月,不同林型土壤呼吸速率先后达到最大,直到 9 月下旬气温有所下降,土壤呼吸速率也随之减弱,不同林型 5—9 月土壤呼吸速率的变化范围为 $1.7\sim 4.8\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

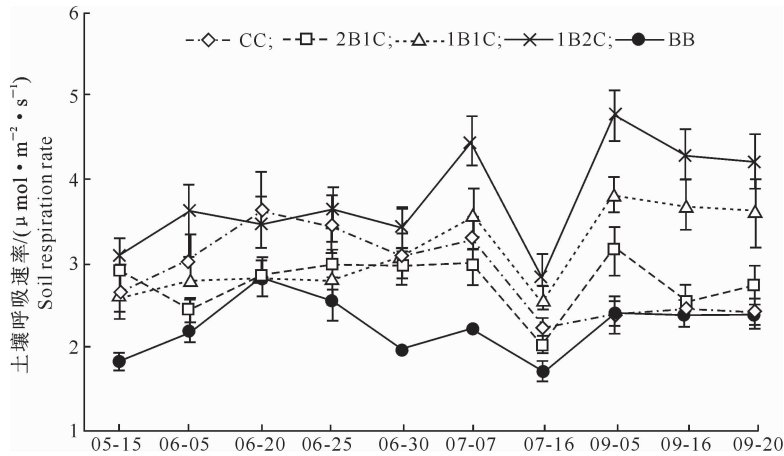


图 2 白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率的月变化(5—9月)

Fig. 2 Variation of soil respiration rate of *U. pumila* and *R. pseudoacacia* in different forest types(from May to September)

图 2 表明,07-16,各林型土壤呼吸速率均降至最低,其中白榆纯林的土壤呼吸速率最低,仅为 $1.706 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;09-05,混交林 1B2C 的土壤呼吸速率达到最大,为 $4.763 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。这可能是由于 7 月份气温较高,导致植物蒸腾作用旺盛、耗水量增加,从而引起土壤含水量降低,土壤呼吸速率也因此下降。图 2 显示,07-07,各林型土壤呼吸速率均有明显增加,这是因为在长时间干旱条件下,07-05 降了雷雨,而干湿交替可能会加速土壤微生物对凋落物的分解,刺激微生物生长^[19],从而导致土壤呼吸速率明显增大。

5—9 月,5 种林型中,白榆纯林的土壤呼吸速率一直最低,而混交林 1B2C 最高,且刺槐纯林也具有

较高的土壤呼吸速率。方差分析可知,混交林 1B2C 的土壤呼吸速率显著大于其他 2 种混交林型和 BB ($P<0.05$),与 CC 差异较小。这是因为刺槐的固氮作用增加了林地土壤的氮素营养,而土壤氮素增加时,可以促进土壤微生物的活动,提高土壤有机质的分解速率,从而提高土壤的呼吸速率。

2.3 白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率与土壤温度的关系

土壤温度是影响土壤呼吸的主要因素,二者的关系表现出明显的规律性,即土壤呼吸随着土壤温度的升高而增加。白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率与不同土层土壤温度的关系如图 3 所示。

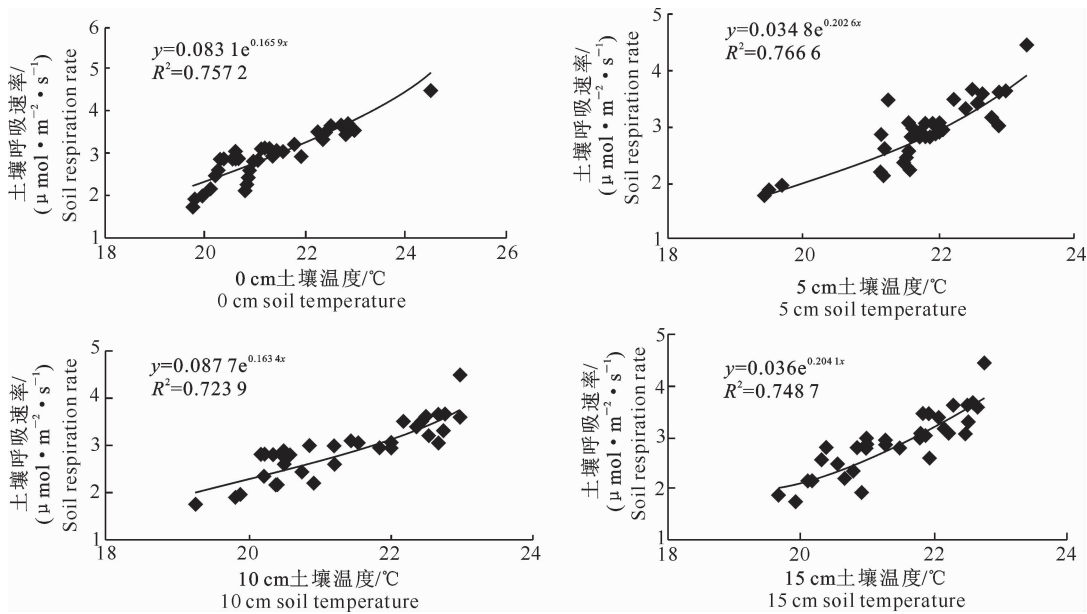


图 3 白榆/刺槐不同林型土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig. 3 Relationship of the soil respiration rate and soil temperature of *U. pumila* and *R. pseudoacacia* in different forest types

由图 3 可知,不同土层土壤温度与土壤呼吸速率的变化均比较一致,两者表现出强烈的正相关性。这表明地表及地下 5,10 和 15 cm 深处的土壤温度解释了不同林型土壤呼吸速率变化的 72.39%~76.66%。其中,地下 5 cm 深处土壤温度对土壤呼吸速率的影响最大,相关性最好,其决定系数为 0.766 6($P<0.01$)。

2.4 白榆/刺槐不同林型土壤呼吸与土壤水分的关系

土壤水分的改变势必影响植物根系的分布、根系呼吸以及土壤微生物群落的组成,进而影响土壤呼吸作用的强弱。由图 4 可知,土壤呼吸与土壤含水量之间的共同变化趋势并不明显,0~10 cm 土层土壤含水量可以解释土壤呼吸变异的 22.99%。水分对土壤呼吸的影响常混杂了其他因素,如土壤温度等,因此土壤呼吸与土壤水分的关系常表现离散,而未表现出明显的规律性,这说明在该研究区除了土壤温度和土壤水分外,其他因素对土壤呼吸的影响也不容忽视。

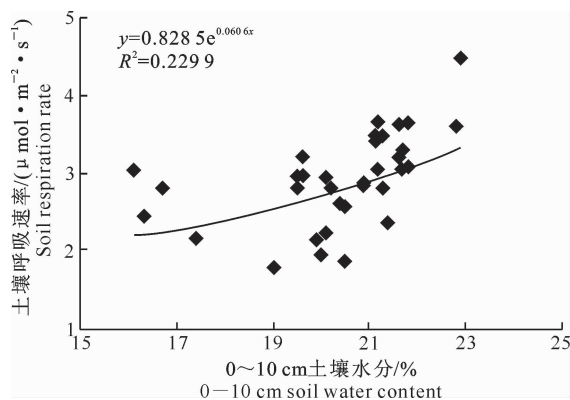


图 4 白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率与 0~10 cm 土层土壤水分的关系
Fig. 4 Relationship between the soil respiration rate and soil water content(0—10 cm) of *U. pumila* and *R. pseudoacacia* in different forest types

3 讨论

本研究表明,5—9 月白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率变化显著,这可能主要是由于受到土壤温度与土壤水分季节变化的宏观调控所致。5 月,外界气温较低,土壤温度也较低,植物根际呼吸较弱,从而致使土壤呼吸速率较低。随着气温的升高,土壤呼吸速率明显升高,在植物的生长盛季(7—9 月)土壤温度达到全年最高,此时植物光合作用最强,因此土壤呼吸速率最大。此后随着气温和土壤温度的

降低,土壤微生物和植物根系的活性逐渐减弱,土壤呼吸速率逐渐减小,所以这一段时间温度是土壤呼吸的主导因子。土壤呼吸的季节变化还受到降雨量的影响,降雨对土壤呼吸的影响因时、因地而不同,同时水分对土壤呼吸的影响也受到温度的制约。在湿润的雨季,降雨会明显抑制土壤呼吸,而在干旱季节,降雨将显著增大土壤呼吸量。水分对土壤呼吸的影响机理包括水分对土壤孔隙中 CO₂ 的替代、对 CO₂ 扩散的阻滞、对微生物活动的刺激和对微生物生物量的影响等^[20]。有研究表明,在北美矮草草原,雨后的土壤呼吸强度可增加 7 倍^[21]。因此在通常情况下,土壤呼吸速率受到温度与水分协同作用的影响。

本研究对 5—9 月白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率日变化的测定表明,不同林型土壤呼吸速率均在一天中的 12:00—15:00 达到最高,之后逐渐下降。这是因为土壤 CO₂ 释放的日变化规律主要受气温变化的影响,CO₂ 排放速率的日均值与气温、地表温度呈显著的相关关系^[22],一天中的最高气温出现在下午 14:00 左右,而土壤呼吸的高峰期则滞后于最高气温,因为真正起作用的是土壤温度而不是气温,所以土壤温度达到高峰期还要经历一个热传递过程。6—7 月,白榆纯林的土壤呼吸速率始终最低,且不同时间段土壤呼吸速率变化较小;在 7—9 月,混交林 1B2C 土壤呼吸速率的峰值显著高于 2 种纯林和其他混交林型。1B2C 混交林土壤呼吸速率显著高于白榆、刺槐纯林,其原因可能是在混交林生态系统中存在着一个相对较大的易分解的碳基库,而不同的混交比例会影响 2 个混交树种各器官中碳素的积累和分配,并且土壤呼吸速率还受到具体研究地点限制性环境因子的较大影响,土壤呼吸速率的这种日变化趋势与地表温度高低变化的出现时刻同步。另外,不同季节的土壤呼吸日变化可能还受到季节性变化显著的土壤有机碳含量和植物物候期等因素的影响^[23],从而使土壤呼吸日变化在不同季节表现出不同的模式。

众多研究表明,温度是影响土壤呼吸的主要因素之一^[24-25]。温度同时对土壤微生物活性及植物的生理活动均有重要影响,在一定范围内,温度的升高可以增强微生物的活性,促进植物根系生长。土壤的 CO₂ 排放量主要是由微生物决定的,植物根系呼吸作用随着根系生长而增强,因而在一定范围内升高温度,能增大土壤 CO₂ 的排放速率^[26]。本研究也证实,白榆/刺槐不同林型土壤呼吸与土壤温度存在

显著相关性,其中地下 5 cm 深处土壤温度与土壤呼吸的相关性最好,且土壤呼吸速率的日最大值与地表温度存在一致性,很多研究也都得到了相同的结论^[25,27]。李明峰等^[28]报道,土壤呼吸日变化与土壤地表温度和气温均有显著的相关性;周洪华等^[29]研究发现,弃耕地、棉田、人工林、草地和天然林的土壤日呼吸速率与大气温度和地表温度存在显著相关性。

土壤水分对土壤呼吸的影响比较复杂。研究表明,在土壤含水量处于较低水平时,植物根系和微生物的代谢活动会随着土壤含水量的增加而增强,土壤呼吸速率与水分表现为显著的线性回归关系;而当土壤含水量比较充足时,土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子^[30];当土壤含水量超过一定的阈值,土壤中的气体扩散会受到影响,凋落物的分解、根呼吸及土壤微生物的活动等均会因缺氧而受到限制,从而降低呼吸作用的强度^[31]。也有研究表明,在不同的土地利用方式下,土壤水分对土壤呼吸的影响也有所不同。如 Reth 等^[32]认为,土壤含水量对草原生态系统的土壤呼吸会产生较大影响,而对森林生态系统没有显著影响;周洪华等^[29]认为,草地、棉田和天然林的土壤呼吸速率与 0~10 cm 土壤水分含量显著相关,弃耕地土壤呼吸速率与 0~20 cm 土壤水分含量显著相关,而人工林与 0~30 cm 土壤水分含量显著相关。还有学者认为,土壤呼吸的变化是由土壤温度和土壤水分等其他因子共同驱动的^[33],因此关于土壤水分与土壤呼吸之间的关系一直难以定性或定量,而且不同地域、不同时间的研究结果也无法比较,这可能是由于不同试验中水分在特定范围或在较小范围内的变化对土壤呼吸的影响不显著所致。Kucera 等^[34]指出,只有在土壤水分达到土壤微生物永久性萎蔫点或者超过了田间持水力的情况下,土壤 CO₂ 释放量才会减少。如果所观测到的土壤水分变化没有超出极端范围,尚不足以影响微生物与植物根系的活动,则难以观测出水分对土壤呼吸的影响。此外,试验中观察到的水分变化范围如果太小,土壤呼吸受水分变化的影响也可能被其他因子的影响或系统误差所掩盖。影响土壤呼吸的因素很多,如温度、水分、土壤孔隙度、土壤养分、植物和微生物的生物多样性等,并且这些因素往往相互作用、相互影响而共同影响土壤的呼吸作用,所以在不同地点、不同时段以及不同的时空尺度上,居于主导地位的因素可能就不一样,尤其当土壤湿度不同时,影响和决定土壤呼吸的机制也会有所变

化^[20]。因此,水分因子的潜在影响也就很难显现出来。本研究中,土壤呼吸与土壤水分的关系也未表现出明显的规律性,可能是因为该研究区植物生长季节降水比较丰富,因此土壤水分不是限制土壤呼吸的主要因子。

土壤呼吸不仅是植物根系和土壤微生物生命活动的集中体现^[35],还是生态系统功能的一个重要过程,通过对土壤呼吸以及与之相关联的参数的测定,还能够估测根系和土壤微生物对气候变化的反应^[36],这对于预测气候变化对土壤呼吸以及全球碳循环的影响具有十分重要的作用。

4 结 论

1)白榆/刺槐各林型土壤呼吸速率在林木生长季内的变化表现出明显的规律性。从 5 月开始,随着气温的升高土壤呼吸速率逐渐增加,7—9 月土壤呼吸速率达到最大,5 种林型中白榆纯林的土壤呼吸速率一直较低,而混交林 1B2C 最高,至 09-05,混交林 1B2C 的土壤呼吸速率达到最大,为 4.763 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,9 月下旬随着气温的降低,土壤呼吸速率逐渐减弱。白榆/刺槐不同林型土壤呼吸速率日变化在 6、7 和 9 月均呈现单峰型曲线,峰值出现在午后 12:00—15:00,之后逐渐降低。在 5 种林型中,7、9 月混交林 1B2C 的土壤呼吸速率均最高,分别为 4.193 和 4.283 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2)土壤温度是影响土壤呼吸速率的主要因子,尤其是地下 5 cm 深处的土壤温度对土壤呼吸速率的影响较大,其决定系数为 0.766 6。土壤水分对土壤呼吸无明显影响,0~10 cm 土层土壤含水量可以解释土壤呼吸变异的 22.99%,这可能是因为该研究区植物生长季节降水较为丰沛,因此土壤水分不是限制当地白榆与刺槐林土壤呼吸速率的主要因子。

[参考文献]

- [1] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 1991, 351: 304-306.
- [2] Sedjo R A. The carbon-cycle and global forest ecosystem [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1993, 70(1): 295-307.
- [3] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Seasonal dynamics of soil respiration and carbon budget of maize (*Zea mays* L.) farmland ecosystem [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(5): 874-879.
- [4] Schaefer D A, Feng W T, Zou X M. Plant carbon inputs and environmental factors strongly affect soil respiration in a subtrop-

- ical forest of southwestern China [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 1000-1007.
- [5] Shi P L, Zhang X Z, Zhong Z M, et al. Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 220-233.
- [6] 张宪洲, 刘允芬, 钟华平, 等. 西藏高原农田生态系统土壤呼吸的日变化和季节变化特征 [J]. *资源科学*, 2003, 25(5): 103-107.
- Zhang X Z, Liu Y F, Zhong H P, et al. Daily and seasonal variation of soil respiration of farmland in the Tibetan Plateau [J]. *Resources Science*, 2003, 25(5): 103-107. (in Chinese)
- [7] Qi Y C, Dong Y S, Liu J Y, et al. Daily variation characteristics of CO₂ emission fluxes and contributions of environmental factors in semiarid grassland of Inner Mongolia, China [J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2005, 48(7): 1052-1064.
- [8] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸 [J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 97-103.
- Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 97-103. (in Chinese)
- [9] 韩天丰, 周国逸, 李跃林, 等. 中国南亚热带森林不同演替阶段土壤呼吸的分离量化 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(9): 946-954.
- Han T F, Zhou G Y, Li Y L, et al. Partitioning soil respiration in lower subtropical forests at different successional stages in southern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(9): 946-954. (in Chinese)
- [10] 孟 春, 王立海, 沈 微. 择伐对小兴安岭地区针阔混交林土壤呼吸温度敏感性的影响 [J]. *林业科学*, 2011, 47(3): 102-106.
- Meng C, Wang L H, Shen W. Effect of sensitivity of soil respiration to soil temperature in a conifer-broadleaf forest in Xiaoxing'an Mountain after select cutting [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(3): 102-106. (in Chinese)
- [11] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 三江平原草甸湿地土壤呼吸和枯落物分解的 CO₂ 释放 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 805-810.
- Yang J S, Liu J S, Sun L N. CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition of meadow marshes in Sanjiang Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 805-810. (in Chinese)
- [12] 陈银萍, 李玉强. 科尔沁沙地不同植物群落土壤呼吸及环境因素分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(3): 122-126.
- Chen Y P, Li Y Q. Soil respiration and its environmental factors in different habitats, Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(3): 122-126. (in Chinese)
- [13] 丁金枝, 来利明, 赵学春, 等. 荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(6): 1594-1603.
- Ding J Z, Lai L M, Zhao X C, et al. Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1594-1603. (in Chinese)
- [14] 孙 轶, 魏 晶, 吴 钢, 等. 长白山高山冻原土壤呼吸及其影响因子分析 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(6): 603-606.
- Sun Y, Wei J, Wu G. Soil respiration and affecting factors on the alpine tundra of Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(6): 603-606. (in Chinese)
- [15] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5217-5224.
- Gao H Y, Guo S L, Liu W Z. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid highland of Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5217-5224. (in Chinese)
- [16] 官 情, 王 俊, 宋淑亚, 等. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1471-1476.
- Guan Q, Wang J, Song S Y, et al. Effects of different mulching measures on winter wheat field soil respiration in Loess Plateau dry land region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1471-1476. (in Chinese)
- [17] 李学章, 邵明安, 魏孝荣, 等. 黄土高原水土蚀交错带水分和密度对人工草地土壤呼吸的影响 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 207-211.
- Li X Z, Shao M A, Wei X R, et al. Effects of water and density on soil respiration in vegetated grassland in wind-water erosion crisscross region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 207-211. (in Chinese)
- [18] 严俊霞, 秦作栋, 李洪建, 等. 黄土高原地区柠条人工林土壤呼吸 [J]. *林业科学*, 2010, 46(3): 1-8.
- Yan J X, Qin Z D, Li H J, et al. Soil respiration characters in a *Caragana* plantation in Loess Plateau region [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(3): 1-8. (in Chinese)
- [19] 杨玉盛, 陈光水, 董 彬, 等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应 [J]. *生态学报*, 2004, 24(5): 953-958.
- Yang Y C, Chen G S, Dong B, et al. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953-958. (in Chinese)
- [20] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响机理 [J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.
- Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972-978. (in Chinese)
- [21] De Jong E, Schappert H J V, Macdonald K B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1974, 54: 299-307.
- [22] Liu S H, Fang J Y, Makoto K. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22: 119-126.
- [23] Liu Q, Edwards N T, Post W M, et al. Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a tempera-

ture deciduous forest [J]. Global Change Biology, 2006, 12: 2136-2145.

[24] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1911-1922.

Zhang L H, Chen Y N, Li W H, et al. Soil respiration in desert ecosystems of the arid region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1911-1922. (in Chinese)

[25] Peng S S, Piao S L, Wang T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(5): 1008-1014.

[26] Zheng Z M, Yu G R, Wang Y S, et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(7): 1531-1540.

[27] 陈妮娜,关德新,金昌杰,等. 科尔沁草甸草地土壤呼吸特征 [J]. 中国草地学报, 2011, 33(5): 82-87.

Chen N N, Guan D X, Jin C J, et al. Characteristics of soil respiration on Horqin Meadow [J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(5): 82-87. (in Chinese)

[28] 李明峰,董云社,齐玉春,等. 锡林河流域羊草群落春季 CO₂ 排放日变化特征分析 [J]. 中国草地, 2003, 25(3): 9-14.

Li M F, Dong Y S, Qi Y C, et al. The analysis of diurnal variation of CO₂ flux in *Leymus chinensis* grassland of Xilin River Basin [J]. Grassland of China, 2003, 25(3): 9-14. (in Chinese)

[29] 周洪华,李卫红,杨余辉,等. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素 [J]. 地理科学, 2011, 31(2): 190-196.

Zhou H H, Li W H, Yang Y H, et al. Soil respiration variant and its effecting factors at different land use in arid land [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(2): 190-196. (in Chinese)

[30] 邱瑞,侯林,袁杰,等. 秦岭火地塘林区油松生长季土壤呼吸研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2011, 39(10): 87-93.

Qiu R, Hou L, Yuan J, et al. Soil respiration of *Pinus tabulaeformis* forest during the growing season at Huoditang Forest Region in the Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2011, 39(10): 87-93. (in Chinese)

[31] Jia B, Zhou G, Wang F, et al. Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67(1): 60-67.

[32] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux: A modified model [J]. Plant and Soil, 2005, 268(1): 21-33.

[33] 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.

[34] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri [J]. Ecology, 1971, 52: 912-915.

[35] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 202-209.

Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(2): 202-209. (in Chinese)

[36] Thierron V, Laudelout H. Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1996, 26: 1142-1148.

(上接第 90 页)

[15] 王雁,陈鑫峰. 心理物理学方法在国外森林景观评价中的应用 [J]. 林业科学, 1999, 35(5): 110-117.

Wang Y, Chen X F. Application of psychophysical method in evaluation of foreign forest landscapes [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(5): 110-117. (in Chinese)

[16] Linlon D L. The assessment of scenery as a natural resource [J]. Scottish Geographical Magazine, 1988, 84(3): 219-238.

[17] Arthur L M. Predicting scenic beauty of forest environments: Some empirical tests [J]. Forest Science, 1977, 23(2): 151-160.

[18] 俞孔坚. 自然风景质量评价研究: BIB-LCJ 审美评判测量法 [J]. 北京林业大学学报, 1988, 10(2): 1-11.

Yu K J. Landscape preference: BIB-LCJ procedure and comparison of landscape preference among different groups [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1988, 10(2): 1-11. (in Chinese)

[19] 胡云云,亢新刚,赵俊卉. 长白山地区天然林林木年龄与胸径的变动关系 [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(11): 38-42.

Hu Y Y, Kang X G, Zhao J H. Variable relationship between tree age and diameter at breast height for natural forests in Changbai Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(11): 38-42. (in Chinese)