

土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响

严俊霞^{1,2}, 秦作栋³, 张义辉¹, 李洪建^{1,*}

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 3. 山西省科学技术厅, 太原 030001)

摘要:用 LI-COR 6400-09 土壤呼吸测定系统, 在太原天龙山自然保护区对油松林的土壤呼吸进行了 4a 测定。结果表明, 土壤呼吸具有明显的季节变化特点, 最大值出现在 8 月份, 在 $6 \sim 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间, 最小值出现在 12 月份和 3 月份, 在 $0.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 左右。2005、2006、2007 和 2008 年土壤呼吸 CO_2 的年平均值分别为 (4.71 ± 3.74) 、 (3.08 ± 2.91) 、 (2.96 ± 2.58) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 (2.12 ± 1.54) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 4a 的 CO_2 总平均值为 (3.27 ± 2.95) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。4 个测定年土壤呼吸的平均值总体差异显著。4 个测定年土壤 CO_2 释放 C 量分别为 1103.5、882.8、918.4 g m^{-2} 和 666.3 g m^{-2} , 总 C 平均值为 892.8 g m^{-2} , 具有明显的年际差异。指数方程可以很好的表达土壤呼吸与 10 cm 深度土壤温度的关系, R^2 值 4a 分别为 0.39、0.60、0.68 和 0.71, Q_{10} 值分别为 3.10、4.41、4.05 和 5.18, 用 4a 全部数据计算的 Q_{10} 值为 4.31。土壤水分对土壤呼吸的作用较弱, R^2 值 4a 分别仅为 0.31、0.25、0.13 和 0.02, 但是夏季土壤干旱对土壤呼吸的抑制作用非常明显, 可使土壤呼吸下降 50% 以上。夏季土壤干旱是导致土壤呼吸年际变化的主要原因。4 个包括土壤温度和水分的双变量模型均可以很好地模拟土壤呼吸的季节变化, 拟合方程的 R^2 值从 0.58 到 0.79。

关键词:土壤呼吸; 土壤温度和水分; 关系模型; 油松林; 山西高原

文章编号: 1000-0933(2009)12-6366-11 中图分类号: S154, S181 文献标识码: A

Effect of soil temperature and moisture on soil CO_2 efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest

YAN Jun-Xia^{1,2}, QIN Zuo-Dong³, ZHANG Yi-Hui, LI Hong-Jian^{1,*}

1 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 The ShanXi Science and Technology Department, Taiyuan 030001, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6366 ~ 6376.

Abstract: Soil respiration was measured in a pine (*Pinus tabulaeformis*) forest in Tianlong mountain area near Taiyuan city for a period of about four years from April 2005 to December 2008. The purpose was to investigate both seasonal and interannual variations and relationships between soil respiration and both soil temperature and soil moisture. The CO_2 efflux was found to exhibit pronounced seasonal variations mainly controlled by the soil temperature. The highest CO_2 efflux values were between 6 to 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in August whereas the CO_2 lowest values were about 0.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in winter and early spring. For the four years (2005 – 2008) the mean annual rate of soil respiration was (4.71 ± 3.74) , (3.08 ± 2.91) , (2.96 ± 2.58) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and (2.12 ± 1.54) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively. The four-years overall mean was (3.27 ± 2.95) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. The difference in the mean annual soil respiration for the four individual years was distinct. The cumulative annual respiration C was 1103.5, 882.8, 918.4 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ and 666.3 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, respectively, for the four years (2005, 2006, 2007 and 2008).

The relationships between soil respiration and soil temperature at 10 cm depth could be described by exponential

基金项目: 山西省青年科技研究基金资助项目(2008021036-2); 山西省农业攻关基金资助项目(2008-03-11075); 山西省留学基金资助项目; 山西大学校基金资助项目

收稿日期: 2008-09-01; **修订日期:** 2009-06-01

致谢: 感谢汤亿、郭陆、刘菊、荣燕美等同学的野外工作。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongli@sxu.edu.cn

equation, with a determination coefficient (R^2) of 0.39, 0.60, 0.68 and 0.71, respectively, for 2005, 2006, 2007 and 2008. Compared hereto, the soil moisture dependence on soil respiration was less pronounced giving annual R^2 -values of 0.31, 0.25, 0.13 and 0.02, respectively for the four years. This indicates that soil water content, taken on its own, was less effective than soil temperature to predict the annual course in soil respiration. In the summer months, however, distinct effect of drought was found to reduce the soil respiration by 50%. To be able to predict both the soil moisture and soil temperature dependency four two-variable linear/non-linear models were developed. By use of those models it was possible to predict the soil respiration as function of both temperature and soil moisture, with a R^2 ranging from 0.58 to 0.79.

Key Words: soil respiration; soil temperature and moisture; correlation model; *Pinus tabulaeformis* forest; Shanxi Plateau

土壤呼吸是陆地生态系统向大气释放 CO_2 的主要过程,也是全球碳循环的最大通量之一^[1],准确估算不同生态系统的土壤 CO_2 释放量对于了解陆地生态系统碳循环和碳平衡研究都具有非常重要的意义。森林生态系统中,土壤呼吸占总呼吸量的 2/3 以上^[2,3]。研究表明,全球气候变暖对森林生态系统的影响比其它生态系统更为明显^[4],因为森林生态系统具有发育良好的有机层和凋落物层,他们对土壤温度和水分变化的响应更为敏感^[5],因此对森林生态系统土壤呼吸的研究一直受到关注^[6]。在全球尺度上,受气温、降水量地带性的影响,土壤呼吸表现出地带性特征^[7]。在区域尺度上,受地形、地貌、土壤等因素的影响,土壤呼吸表现出明显的区域变化特征^[8~11]。因此研究不同自然条件下森林生态系统的土壤呼吸对于准确估算区域 CO_2 排放量具有非常重要的意义。

油松(*Pinus tabulaeformis*)属暖温性常绿针叶林,广泛分布于我国华北地区。山西高原是华北地区油松分布最广泛、最具代表的区域,主要分布于海拔 800 ~ 1800 m 的山地^[12],占山西林地总面积的 30% 以上。然而,目前有关油松林地土壤呼吸的研究报道较少,长时间监测的研究更少。笔者曾对该地区油松林地的土壤呼吸进行过一年的研究^[13],但是土壤呼吸的年际变化规律、不同年份的季节变化规律及其与环境因子的关系,都存在很大的不确定性,需要深入研究。本文通过 4a 的定位观测,旨在:(1)了解油松林土壤呼吸的季节、年际变化;(2)估算油松林的土壤呼吸总量及其年际变化;(3)建立土壤呼吸与土壤温度和水分的关系模型,分析土壤呼吸与环境因子的关系。从而为山西高原乃至黄土高原东部地区的森林土壤 CO_2 释放量的准确估算提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于距太原市约 30 km 的天龙山自然保护区,面积约 2.6 万 hm^2 ,海拔 780 ~ 1470 m。区内气候属暖温带半干旱大陆性季风气候。据试验区附近的晋源气象站 1971 ~ 2000 年的气象记录,年平均降水量为 478.4 mm;最大、最小年平均降水量分别为 1995 年的 808.6 mm 和 1972 年的 256.6 mm;降水量年内分配不均,主要集中在 7、8、9 月份。区内四季分明,年平均气温 10 $^{\circ}\text{C}$,最高月平均气温 23 $^{\circ}\text{C}$,出现在 7 月份;最低月平均气温为 -6.4 $^{\circ}\text{C}$,出现在 1 月份。

天龙山自然保护区森林群落主要分布于海拔 1350 m 以上的各类地形中。植被总盖度 90% 以上。油松是主要的乔木群系^[14],其次为白皮松(*Pinus bungeana*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)。森林的生境特点为:郁闭度 0.9 左右,灌木层盖度 10% 左右,草本层盖度 10% 左右。土壤为山地褐土,土层厚度不一,50 ~ 100 cm 左右。试验地海拔 1390 m,坡向北,坡度 2 ~ 3 $^{\circ}$ 。试验用林为 30 ~ 60 a 林龄的天然次生林,平均胸径(15.56 $\pm$ 4.95) cm,树高(13.7 $\pm$ 2.3) m。林木密度 1125 株/ hm^2 。林下植物主要有蚂蚱腿子(*Myrica dioica*)和绣线菊(*Spiraea fritschiana*),盖度不足 5%。林下松针凋落物明显,厚度 2 ~ 3 cm。样地土层厚度大于 50 cm,土壤的容重为(1.38 $\pm$ 0.03) g cm^{-3} ,土壤持水量(干土重%)为(20.82 $\pm$ 2.16)%,有机质含量为(1.76 $\pm$ 0.40)%。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤呼吸测定

土壤呼吸采用 LI-6400 便携式光合作用系统连接 6400-09 箱室测定。在测定区域随机选取 3 个固定点, 间距约 2~3 m, 放置 3 个 PVC 环测定土壤呼吸。土壤呼吸测定一般在 10:00~11:00 之间进行, 每个 PVC 环测定 1 次, 3 个循环, 共 9 个数据, 取其平均值作为日土壤呼吸值。详细的测定方法见文献^[13]。测定时间从 2005 年 4 月至 2008 年 12 月。每年 3 月上旬(2005 年为 4 月上旬)开始, 12 月上旬结束。除 12 月份每月测定 1 次, 其余月测定 2~3 次。2005、2006、2007 和 2008 年分别测定 21、24、23 次和 16 次。

1.2.2 环境因子测定

10 cm 深度的土壤温度用系统自带的土壤温度探针测定。在测定土壤呼吸的同时, 将温度探针垂直插入 PVC 环附近 10 cm 深的土体, 系统自动记录土壤温度。此外, 2007 年和 2008 年对 5、15 cm 深度的土壤温度也进行了测定。

用烘干法(105 °C)测定 0~10 cm 深度的土壤水分。测定土壤呼吸的同时在 PVC 环附近用土钻挖取 0~10 cm 深度的土壤, 测定含水量, 3 个重复。

1.2.3 数据分析

方差分析用于检验样地年际之间土壤呼吸(R)、土壤温度(T)和土壤水分(W)均值是否存在差异。用线性或非线性方程分析土壤呼吸与土壤温度或土壤呼吸与土壤水分之间的单因素关系; 用土壤呼吸和土壤温度的指数关系方程的拟合系数计算土壤呼吸的温度敏感性指数(Q_{10} 值); 用线性和非线性关系方程拟合土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的双变量关系模型。具体分析方法参见文献^[13]。

2 结果与讨论

2.1 土壤温度、水分和土壤呼吸的季节及年际变化

图 1 是油松林地土壤温度(图 1 A)、土壤水分(图 1 B)和土壤呼吸(图 1 C)的季节变化趋势图。与其他地区的研究结果相一致, 土壤温度、土壤水分和土壤呼吸均具有较为明显的季节变化^[15~19]。土壤温度的季节变化特征最为明显(图 1 A), 大致以 7 月底为界, 基本为对称的“铃”型。土壤温度的最低值出现在 12 月份和 3 月份, 在 0 °C 左右; 最高值出现在 6 月下旬到 8 月上旬之间, 约 17~19 °C。除受降水和干旱等气候因素影响, 土壤温度有较小的波动外, 4 个测定年土壤温度的季节变化和年际变化的差异不大。10 cm 深度的土壤平均温度分别为: (11.99 ± 5.18) °C (2005)、(10.95 ± 6.08) °C (2006)、(10.26 ± 6.06) °C (2007) 和 (9.99 ± 6.12) °C (2008)(表 1), 4 个测定年土壤温度的平均值没有明显差异($P = 0.71$), 4a 土壤温度的总平均值为 (10.84 ± 5.81) °C。

与土壤温度的季节变化不同, 土壤水分的季节变化规律性不强, 具有明显的波动特点(图 1 B)。降水后土壤水分增加, 若较长时间没有降水, 土壤水分明显降低, 有时甚至降低到凋萎含水量以下。土壤水分季节变化规律的年际差异比较明显。2005 年春季土壤水分较低, 夏秋季明显增加, 一直维持到测定结束的 12 月份; 2006 年则表现为早春土壤水分较高、春末夏初较低、仲夏和秋季较高的趋势; 2007 年由于上一年冬季和年初的降水量较大, 春季土壤水分超过田间持水量水平(测定时部分还有积雪), 随着气温回升, 加之长期没有降水, 6 月上旬土壤水分下降至最低值。之后, 受降水影响, 土壤水分开始上升, 一直保持在较高水平; 2008 年的情况与其它年份相反, 受上年高土壤水分和春季、初夏降水的影响, 6 月中旬之前土壤水分一直维持在较高水平, 但是由于夏季的降水较少且分布均匀, 夏秋季节土壤水分也没有明显升高, 整个测定年土壤水分呈逐渐降低的趋势(图 1 B)。4 个测定年土壤水分的变化具有共同特点: 春末夏初土壤水分具有明显的下降趋势, 持续时间和下降程度取决于夏季降水到来的时间和降水强度。2005、2006、2007 和 2008 年土壤水分的平均值分别为: (14.43 ± 4.97)%、(13.71 ± 5.92)%、(19.76 ± 7.35)% 和 (17.35 ± 5.67)% (表 1), 总平均值为 (16.24 ± 6.49)%。4a 土壤水分的平均值总体差异极显著($P = 0.004$), 但是年际间土壤水分差异程度不同(表 1)。2007 年的土壤水分平均值最高, 与 2005 年和 2006 年的土壤水分差异显著; 2008 年的土壤水分与其他 3 个年份的土壤水分没有明显差异。

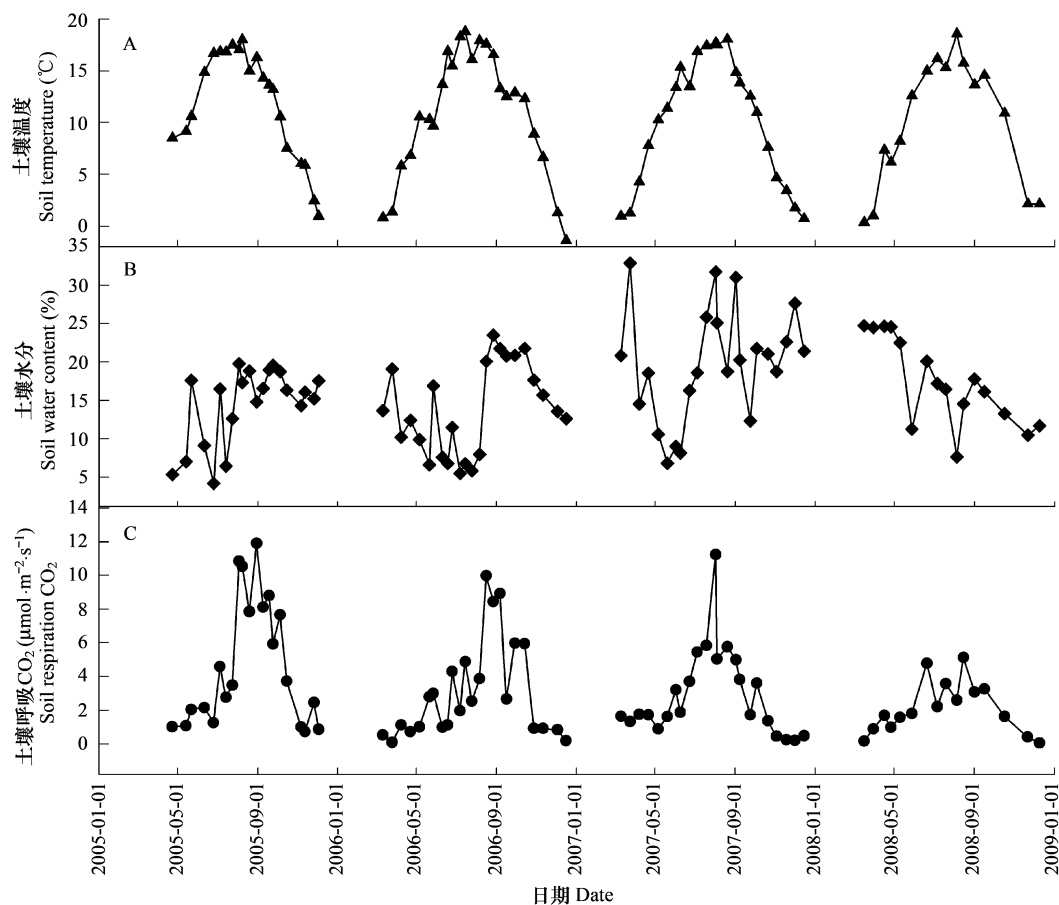


图1 2005、2006、2007 和 2008 年土壤温度(A)、土壤水分(B)和土壤呼吸(C)的季节变化

Fig. 1 Temporal variations of soil temperature (A), soil water content (B) and soil respiration (C) in 2005, 2006, 2007 and 2008

土壤呼吸表现出明显的季节变化特点(图1 C)。3月上旬,土壤温度较低,尽管此时土壤水分一般较高,但是土壤呼吸 CO_2 仍维持在较低水平($0.3 \sim 1.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间);3月中下旬土壤温度开始上升,尽管土壤水分下降,但是土壤呼吸 CO_2 增加到 $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 左右;6月下旬或7月上旬,土壤温度达最大值,但是由于此时一般为夏季干旱时期,降水量相对较少,土壤水分较低,土壤呼吸虽有一定程度增加,并没有达到最大值。8月上、中旬雨季来临,降水量增加,土壤呼吸 CO_2 达到峰值($6 \sim 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 左右)。之后,尽管土壤水分仍保持较高水平,但是随着土壤温度的下降,土壤呼吸 CO_2 速率降至10月上旬的 $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 左右;11月到12月份,土壤温度接近 0°C ,土壤呼吸 CO_2 亦降至约 $0.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的最小值。表明土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度的变化影响,但是土壤水分特别是夏季的土壤水分对土壤呼吸的作用也非常明显。

4个测定年土壤呼吸具有较大的年际变化,2005、2006、2007 和 2008 年土壤呼吸 CO_2 的平均值分别为 (4.71 ± 3.74) 、 (3.08 ± 2.91) 、 (2.96 ± 2.58) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 (2.12 ± 1.54) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (表1),总平均值为 (3.27 ± 2.95) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。方差分析表明,4a间的土壤呼吸差异显著($P = 0.048$),但年间的差异不同。2005 和 2008 年的土壤呼吸差异显著,2005、2006 和 2007 年差异不显著,2006、2007、2008 年差异不显著(表1)。2005 和 2006 年的土壤呼吸平均值大于后2a的值,具有不对称特点:7月份之前总体较低,8月份之后土壤呼吸明显增加;2007 和 2008 年则具有较为明显的对称特点:除2007 年8月2日的最大值外,盛夏和秋初没有明显的呼吸增加现象。2008 年的夏季降水较少,7月份和8月份的土壤水分小于其他3个年份,土壤呼吸亦小于其他年份。

本研究测定的油松林地的土壤呼吸 CO_2 平均值从 $(2.12 \pm 1.54) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 到 $(4.71 \pm 3.74) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,

接近于大多数研究报道的值。如 Khomik 等在加拿大安大略 (Ontario) 中部对北方混交林土壤呼吸 2a 的测定结果表明, 土壤呼吸 CO_2 在 $0.5 \sim 6.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间^[16]; Rey 等在意大利中部矮橡树林测得的年土壤呼吸 CO_2 平均值为 $2.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, CO_2 变化范围在 $1.35 \sim 7.03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ^[20]。Vincent 等测定的 9 个森林土壤呼吸 CO_2 平均值从约 $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 到 $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ^[21]。Subke 等在德国南部一个成熟云杉林地测定的土壤呼吸 CO_2 为 $0.43 \sim 5.15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 最大值在 7 月份^[22]。Kang 等对韩国一个温带硬木林土壤温度 17°C 时测得的最大土壤呼吸 CO_2 为 $7.32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ^[8]。

4 个测定年土壤温度没有明显差异, 土壤呼吸的年际差异主要与降水及其分布不同而导致的土壤水分 (尤其是夏季的土壤水分) 不同有关, 如 2008 年的 6 月的土壤水分最高, 土壤呼吸值也最大, 分别是 2005、2006 和 2007 年的 2.8、2.2 倍和 1.6 倍; 同年 8 月份的水分最低, 土壤呼吸也最低, 分别是 2005、2006 和 2007 年同月的 38%、52% 和 53%。因此夏季土壤水分差异可能是土壤呼吸年际差异的主要原因之一。其他地区的研究也有类似的报道。Epron 等^[23] 在法国南部对一个森林生态系统 6a 的研究表明, 土壤呼吸具有明显的季节和年际变化特点, 夏季的土壤干旱使土壤呼吸明显下降, 他们认为降水量及其分布的差异是引起土壤呼吸年际变化的主要原因。Savage 和 Davidson^[24] 的研究也表明, 土壤呼吸年际变化的主要原因是夏季土壤水分的差异造成的。Gaumont-Guay 等^[25] 认为, 干旱在解释土壤呼吸和生态系统呼吸年际变化中扮演非常重要的作用。森林生态系统土壤呼吸年际变化的原因大多数归因于夏季土壤水分的差异^[23~25], 与夏季土壤水分对土壤呼吸的作用增加有关。但是深入了解土壤呼吸的年际变化仍需要进行长期的, 包括不同降水年的土壤呼吸测定。

表 1 4 个测定年土壤温度、土壤水分和土壤呼吸的平均值

Table 1 Mean value of soil temperature, soil water content and soil respiration over four years

年份 Year	n	T ($^\circ\text{C}$) *	W (%) *	R ($\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) *
2005	21	$11.99 \pm 5.18\text{a}$	$14.43 \pm 4.97\text{a}$	$4.71 \pm 3.74\text{a}$
2006	24	$10.95 \pm 6.08\text{a}$	$13.71 \pm 5.92\text{a}$	$3.08 \pm 2.91\text{ab}$
2007	23	$10.26 \pm 6.06\text{a}$	$19.76 \pm 7.35\text{b}$	$2.96 \pm 2.58\text{ab}$
2008	16	$9.99 \pm 6.12\text{a}$	$17.35 \pm 5.67\text{ab}$	$2.12 \pm 1.54\text{b}$
2005 ~ 2008	84	10.84 ± 5.81	16.24 ± 6.49	3.27 ± 2.95

* Duncan 多重检验结果, 平均值后有相同字母表示在 0.05 水平上差异不显著 Test result of Duncan's multiple range; the mean value followed by same letter is not significant at the 0.05 level

2.2 土壤呼吸总量及年际变化

本研究土壤呼吸的测定时间大多在 10:00 左右。Rey 等认为早晨的土壤呼吸可以近似代表土壤呼吸的日平均值^[20]。对本区其它植被土壤呼吸的测定结果也得以证明这一点^[13]。为此, 本研究用测定值代替 24h 的土壤呼吸平均值。由于各月的土壤呼吸测定次数不同, 用土壤呼吸的月平均值作为该月的日平均值, 用该值乘以对应月的天数, 即可得出月土壤呼吸总量, 相加即为年土壤呼吸总量, 其中 1 月、2 月份的值用 3 月初和 12 月份的平均值代替 (表 2)。可以看出, 4 年土壤 CO_2 释放量具有明显的季节和年际变化特点。冬春季最低, 夏季最高, 秋季次之。同时夏季土壤干旱月的土壤呼吸量也很低。就年际来讲, 2008 年土壤呼吸 C 最低, 为 666.3 g m^{-2} , 2005 年土壤呼吸 C 最大, 为 1103.5 g m^{-2} , 接近 2008 年 2 倍。4a 各月的最大土壤 CO_2 释放量 2008 年出现在 6 月份, 其余年份均出现在 8 月份。土壤呼吸的年际变化主要受降水及其分配引起的土壤水分变化所决定, 年际间夏季的降水差异是造成土壤呼吸年际变化的主要原因。土壤呼吸的年际差异主要是由于 6~9 月份土壤呼吸的差异造成的。如 2008 年 8~9 月的土壤释放量只有其他年份的 50%, 夏秋季的低土壤水分是主要原因。Borken 等^[9] 在德国的研究也表明, 夏季的土壤干旱可以使土壤呼吸 C 减小 $160 \sim 260 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

本地区油松林地的土壤 CO_2 年释放 C 量从 666.3 到 $1103.5 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 与所报道的结果相一致。如 Davidson 等测得的马萨诸塞州 (Massachusetts) 温带混交林两个样地的土壤呼吸 C 量为 530 g m^{-2} 和 850

g m^{-2} ^[26]。Buchmann 在德国 4 个挪威杉林测定的土壤呼吸平均值 C 为 $710 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[27]; Wu 等在中国长白山地区红松林测定的土壤呼吸 C 为 $1017 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[3]。Khomik 等两个测定年份在加拿大安大略 (Ontario) 中部测得的 3 个阔叶林的土壤呼吸 C 量分别在 $767 \sim 911 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $815 \sim 935 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间^[16]; Rayment 和 Jarvis 在北方森林 8 个样地测定的 CO_2 释放 C 量为 $152 \sim 1310 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均值为 $896.1 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[28]。

表 2 2005、2006、2007 和 2008 年月土壤呼吸 C 量 (g m^{-2})

Table 2 Monthly C totals (g m^{-2}) of soil respiration calculated from field measurements in 2005, 2006, 2007 and 2008

年份 Year	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Dec.	12 月 Nov.	合计 Total
2005	17.4	17.4	10.6	32.2	50.2	53.3	116.4	330.7	237.0	183.1	27.2	28.0	1103.5
2006	12.3	12.3	10.5	29.3	73.1	66.6	100.8	239.1	182.3	110.9	28.9	16.7	882.8
2007	26.8	26.8	47.8	54.4	40.8	91.3	181.7	236.3	109.4	80.3	11.2	11.6	918.4
2008	9.7	9.7	17.2	41.8	54.5	149.0	93.4	124.4	98.8	52.7	12.8	2.3	666.3
2005 ~ 2008	16.6	16.6	21.5	39.4	54.7	90.1	123.1	232.6	156.9	106.8	20.0	14.7	892.8

2.3 土壤呼吸与环境因子的关系

2.3.1 与土壤温度的关系

图 2 是 4 个测定年土壤呼吸与土壤温度关系的散点图。可以看出,土壤温度较低时,土壤呼吸的变化幅度较小,土壤温度较高时,土壤呼吸的变化幅度明显增加,这一结果与其它学者的研究结果相一致^[29, 30]。相关分析表明,土壤呼吸的季节变化与土壤温度季节变化呈显著指数正相关,拟合方程的决定系数 R^2 值 4a 分别为 0.39 (2005)、0.60 (2006)、0.68 (2007) 和 0.71 (2008); 4a 的全部数据得到的 R^2 值为 0.59。2005、2006、2007 和 2008 年土壤呼吸的敏感性指数 (Q_{10}) 值分别为 3.10、4.41、4.05 和 5.18, 4a 全部数据计算的 Q_{10} 为 4.31。为了了解不同时段土壤温度对土壤呼吸影响的差异,笔者将全部测定数据按生长期 (5 月初至 9 月底) 和非生长期 (其余月份) 进行分段分析。结果表明,非生长期土壤温度对土壤呼吸作用明显, Q_{10} 值为 6.50 ($R^2 = 0.44, n = 34$), 而生长期土壤温度对土壤呼吸的作用不明显, Q_{10} 值为 3.06 ($R^2 = 0.18, n = 50$), 非生长期的 Q_{10} 值明显大于生长期, 即低温时的 Q_{10} 值大于高温时的 Q_{10} 值。Janssens 和 Pilegaard 将全年测定的土壤呼吸数据根据温度值分为 12 个子数据段后分析发现, 土壤温度较低时的 Q_{10} 值高于高温时的值, 变化范围为 1.3 ~ 23.1, 最低的 Q_{10} 值出现在土壤水分干旱的秋季^[30]。在本研究区, 春末夏初一般土壤水分相对较低, 土壤水分抑制土壤呼吸, 进而影响 Q_{10} 值。剔除低于田间持水量的 1/3 条件下的土壤呼吸测定值进行的分析表明, 4 年计算的 Q_{10} 值从 3.10、4.41、4.05 和 5.18 增加到 3.72、5.65、4.30 和 6.01, 进一步表明了土壤水分对 Q_{10} 值的影响。

本研究得到的 Q_{10} 值大于全球范围各种生态系统土壤呼吸 Q_{10} 值的中位值 2.4^[7], 但是与大多数文献的报道结果相一致。如, Davidson 等在温带阔叶林不同的研究地点得到的 Q_{10} 值在 3.45 ~ 5.6 之间^[26]。Gaumont-Guay 等在加拿大的北方白杨群落得到的 Q_{10} 值 3 个年份分别为 4.1、3.7 和 3.6, 具有明显的年际变化特点^[25]。王小国等^[18] 在四川盆地对不同土地利用方式下的土壤呼吸研究表明, 不同月林地、草地和旱地的 Q_{10} 值分别为 1.25 ~ 3.23、1.43 ~ 3.48 和 1.54 ~ 3.68 之间, 冬季的 Q_{10} 值大于夏季。王旭等在长白山测得的红松林的 Q_{10} 值分别为 3.07^[31]。

土壤温度测定深度对土壤呼吸敏感指数有较大影响。研究表明, 随土壤深度增加 Q_{10} 和 R_{10} 值增大。Khomik 等用 2、5、10、15 cm 和 20 cm 深度的土壤温度值与所测定的土壤呼吸值拟合所得的 Q_{10} 值从 3.6 增加到 12.7^[16]。Borken 等发现, 当土壤温度从 0 增加到 10 cm 时, Q_{10} 值从 1.95 上升至 3.50^[9]。因为在同一地点, 土壤温度的变化幅度随土壤深度的增加减少, 因此所计算的 Q_{10} 值随深度增大。本研究中, 2007 年最大的 Q_{10} 值对应的测定深度为 10 cm, 2008 年为 15 cm。2008 年 Q_{10} 值随土壤的测定深度增加表现出增高趋势, 而 2007 年没有这种趋势 (表 3)。

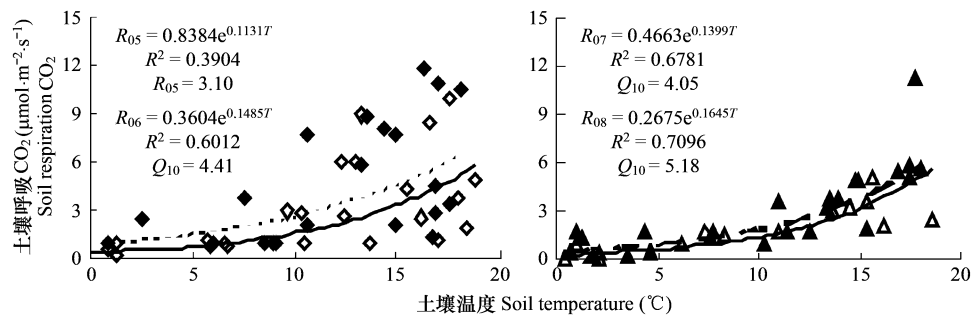


图2 土壤呼吸 CO₂ 和土壤温度的关系散点图

Fig. 2 Scatter plots of relations between soil respiration and soil temperature

◆、◇、▲和△分别代表2005、2006、2007和2008年的实测数据,细点线、细实线、粗点线和粗实线分别为2005、2006、2007和2008年的指数拟合曲线 ◆, ◇, ▲ and △ represent measured data, respectively, in 2005, 2006, 2007 and 2008, and the thin dot line, the thin solid line, the thick dot line and the thick solid line in the figure represent the fitted exponential functions, respectively, for 2005, 2006, 2007 and 2008 data

表3 不同土壤深度的 Q₁₀ 值

Table 3 The Q₁₀ values from soil temperature at different depths

年份 Year	5 cm 深度 Depth		10 cm 深度 Depth		15 cm 深度 Depth	
	R ² *	Q ₁₀	R ²	Q ₁₀	R ²	Q ₁₀
2007	0.62	3.12	0.68	4.05	0.55	3.24
2008	0.74	5.12	0.71	5.18	0.74	5.70

* 拟合方程的 R² Determination coefficients of the fitted equations

2.3.2 与土壤水分的关系

土壤水分及其季节变化对土壤呼吸、R-T 关系都具有重要影响。与土壤呼吸与温度的关系相比,土壤呼吸与土壤水分的相关性较弱。2005、2006、2007 和 2008 年土壤呼吸与土壤水分关系方程的 R² 值分别为 0.31, 0.25、0.13 和 0.02,明显低于土壤呼吸与土壤温度关系的 R² 值(表 4),说明在本区油松林地土壤水分对土壤呼吸的作用小于土壤温度的作用。

虽然整个测定期土壤水分对土壤呼吸的影响不如温度对土壤呼吸的影响明显,但是春末、夏初土壤水分干旱以及降水对土壤呼吸的影响仍然明显可见。观测表明,当土壤温度基本保持不变的条件下,土壤水分减至 10% 时,土壤呼吸可减低 50%。夏季土壤呼吸的低值均出现在低土壤水分时期。夏季土壤干旱后的降水对土壤呼吸有着很大影响。2005 年土壤呼吸 CO₂ 的最大值出现在 242d(11.91 μmol m⁻² s⁻¹),次最大值在 215d(10.85 μmol m⁻² s⁻¹)和 220d(10.54 μmol m⁻² s⁻¹);2006 年土壤呼吸 CO₂ 的最大值出现在 228d(9.99 μmol m⁻² s⁻¹),次最大值在 249d(8.93 μmol m⁻² s⁻¹)和 239d(8.46 μmol m⁻² s⁻¹);2007 年土壤呼吸 CO₂ 的最大值在 213d(11.24 μmol m⁻² s⁻¹)。这些较大的土壤呼吸值与测定前 1~2 日内有降水出现有关。2005 年 8 月土壤呼吸较高与雨后测定次数较多有一定关系。由于不同时段土壤水分对土壤呼吸的影响程度不同,将 4 年的全部测定数据分成长期和非生长期分别进行分析,结果表明土壤水分对土壤呼吸的影响在生长期更为明显,(R² = 0.38, P = 0.000),而非生长期不显著(R² = 0.01, P = 0.55)。说明土壤温度对呼吸的影响主要在土壤温度较低的非生长期,而土壤水分对土壤呼吸的作用主要发生在生长期。关于土壤干旱和降雨对土壤呼吸影响的报道较多^[17, 20, 25, 27, 32]。干旱时降雨通过控制表层土壤水分来影响土壤呼吸,因为表层是土壤微生物活动最为剧烈的场所。即使在海洋气候条件下,夏季土壤水分也可能成为影响土壤呼吸的主要因素^[29]。但是雨后土壤呼吸增加的机理仍不清楚。主要原因有以下几种:含碳化合物分解的增加以及微生物群落的生长^[9];细根代谢活动的提高^[25];光合作用的增加^[33]等。有关降雨后土壤呼吸增加的原因、持续时间以及大小仍需作进一步的研究^[29]。

表 4 不同年份土壤呼吸与土壤水分之间的关系方程

Table 4 Regression relations between soil respiration and soil moisture in different measurement years

	年份 Year				
	2005	2006	2007	2008	2005 ~ 2008
<i>n</i>	21	24	23	16	84
关系方程	$R = 0.419 W - 1.3343$	$R = 0.2469 W - 0.3047$	$R = 0.1272 W + 0.4498$	$R = -0.0374 W + 2.7715$	$R = 0.1289 W + 1.181$
Correlation equations	$R^2 = 0.31$	$R^2 = 0.25$	$R^2 = 0.13$	$R^2 = 0.02$	$R^2 = 0.08$

2.3.3 与土壤温度和土壤湿度的复合关系

野外条件下测定的土壤呼吸实际上反映的是土壤温度、土壤水分以及其它生物因子对土壤呼吸综合作用的结果。在分析土壤呼吸与土壤温度的关系时,剔除受土壤水分胁迫的测定数据后,二者的相关系数增加,说明土壤水分对土壤呼吸的影响存在^[13,34]。无论是土壤呼吸与土壤温度的关系模型,还是土壤呼吸与土壤水分的单因素关系模型都或多或少忽略了另外因素的作用^[6,17,29,35]。本研究中,笔者用 2 个线性两个非线性 4 种双变量复合模型对土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的复合关系进行了分析,公式如下:

$$\text{线性模型} \quad R = a + b (T W) \quad (1)$$

$$R = a + b T + c W \quad (2)$$

$$\text{非线性模型} \quad R = a T^b W^c \quad (3)$$

$$R = a e^{bT} W^c \quad (4)$$

式中, R 为土壤呼吸 CO_2 速率 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); a, b, c 均为拟合系数; T, W 分别为实测的土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$) 和土壤水分 (%)。

与单因子模型相比,4 种复合模型的决定系数 R^2 值均有一定程度的提高,土壤温度和土壤水分能够解释土壤呼吸季节变化的 58% ~ 79%,表明用复合方程预测土壤呼吸时准确性提高(表 5),与许多研究者的结果相一致^[18,23,32,35,36]。2 个线性方程相对比较简单,便于使用,指数幂函数型更具有物理意义。

表 5 土壤呼吸与土壤温度及土壤水分的复合关系方程

Table 5 Combined relationships between soil respiration and soil temperature as well soil moisture

年份 Year	<i>n</i>	线性关系 Linear relationship		非线性关系 Non-linear relationship	
		$R = a (T \times W) + b$	$R = a + b T + c W$	$R = a T^b W^c$	$R = a e^{bT} W^c$
2005	21	$R = 0.0318 (T \times W) - 0.7218$	$R = -7.220 + 0.445T + 0.457W$	$R = 0.019T^{0.831}W^{1.248}$	$R = 0.031e^{0.126T}W^{1.216}$
		$R^2 = 0.72$	$R^2 = 0.69$	$R^2 = 0.70$	$R^2 = 0.75$
2006	24	$R = 0.0236 (T \times W) - 0.3298$	$R = -4.511 + 0.309T + 0.301W$	$R = 0.035T^{0.966}W^{0.765}$	$R = 0.025e^{0.177T}W^{0.965}$
		$R^2 = 0.80$	$R^2 = 0.73$	$R^2 = 0.69$	$R^2 = 0.74$
2007	23	$R = 0.0099 (T \times W) + 0.6721$	$R = -3.818 + 0.349T + 0.163W$	$R = 0.051T^{0.803}W^{0.704}$	$R = 0.103e^{0.145T}W^{0.501}$
		$R^2 = 0.75$	$R^2 = 0.79$	$R^2 = 0.58$	$R^2 = 0.72$
2008	16	$R = 0.0133 (T \times W) - 0.0104$	$R = -1.249 + 0.23T + 0.62W$	$R = 0.014T^{0.941}W^{1.003}$	$R = 0.008e^{0.188T}W^{1.163}$
		$R^2 = 0.70$	$R^2 = 0.73$	$R^2 = 0.76$	$R^2 = 0.70$
2005 ~ 2008	84	$R = 0.019 (T \times W) + 0.0827$	$R = -3.778 + 0.361T + 0.193W$	$R = 0.034T^{0.922}W^{0.801}$	$R = 0.042e^{0.161T}W^{0.798}$
		$R^2 = 0.60$	$R^2 = 0.57$	$R^2 = 0.62$	$R^2 = 0.70$

图 3 是实测值与用 4 种关系方程(指数、乘积型、幂函数和指数幂函数型)得到的预测值的残差随时间的变化图。可以看出,除个别时段误差较大外,大部分误差在 $\pm 2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 范围内。4 个方程 2007 和 2008 年的预测效果均好于其他 2 个年份,可能与这两年的土壤水分相对稳定有关。总体来看,2 个非线性模型预测的结果可靠性更大。同时可以看出,用指数函数预测土壤呼吸时,低水分条件下过高估计呼吸值,而在高水

分时过低估计土壤呼吸值(图3),因为指数函数主要用于在土壤水分不成为土壤呼吸的限制因素时表达二者的关系^[34],在干旱或半干旱的黄土高原地区用指数方程表达土壤呼吸与温度的关系时,应当剔除土壤水分胁迫时测定的数据^[13]。根据土壤呼吸的单因素模型(*T-R*模型、*W-R*模型)以及混合模型预测土壤呼吸的结果可以看出,用双变量模型预测土壤呼吸可以克服指数模型在土壤水分较低时对土壤呼吸的高估和土壤水分较高时对土壤呼吸的低估。

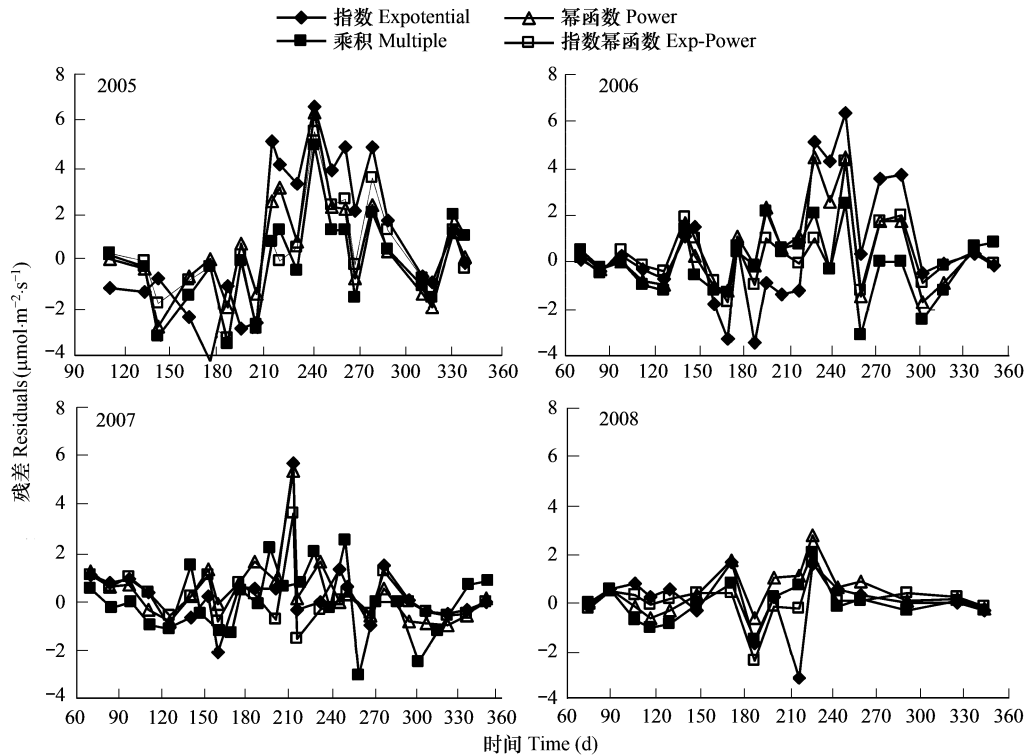


图3 土壤呼吸 CO_2 残差随时间的变化趋势

Fig. 3 Course of the residuals of soil respiration over the season

3 结论

本区油松林地的土壤呼吸具有明显的季节变化,呈冬、春季较低,夏秋季较高的特点。夏季的低土壤水分对土壤呼吸具有明显的抑制作用。4个测定年份土壤呼吸 CO_2 的年平均值分别为: (4.71 ± 3.74) 、 (3.08 ± 2.91) 、 (2.96 ± 2.58) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 (2.12 ± 1.54) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。4a的土壤呼吸 CO_2 总平均值为 (3.27 ± 2.95) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。土壤呼吸的年际变化明显,4个测定年土壤 CO_2 释放C量分别为1103.5(2005)、882.8(2006)、918.4(2007) g m^{-2} 和666.3(2008) g m^{-2} ,最大年的土壤呼吸量约是最小年的2倍。

土壤呼吸与土壤温度的关系可以用指数函数关系表示。土壤温度的季节变化可以解释土壤呼吸季节变化的39%(2005)、60%(2006)、67%(2007)和71%(2008)。与土壤呼吸的季节变化与土壤温度的季节变化的关系相比,土壤呼吸与土壤水分的关系相对较弱,土壤水分仅解释土壤呼吸季节变化的10%~30%。生长期土壤水分对土壤呼吸有较大影响,非生长期土壤温度起主导作用。夏季的土壤水分差异是导致土壤呼吸年际变化的主要因素。

与单因素关系方程相比,4个双变量复合方程均可以很好的预测土壤呼吸的季节变化,土壤温度和土壤水分可以解释土壤呼吸季节变化的58%~79%。用复合关系函数预测土壤呼吸,可避免用指数函数在土壤水分较低时对土壤呼吸的高估和土壤水分过高时的低估。

References:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7—20.
- [2] Griffis T J, Black T A, Gaumont-Guay D, Drewitt G B, Nesic Z, Barr A G, Morgenstern K, Kljun N. Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(3-4): 207—223.
- [3] Wu J, Guan D, Wang M, Pei T, Han S, Jin C. Year-round soil and ecosystem respiration in a temperate broad-leaved Korean Pine forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(1-3): 35—44.
- [4] Lindroth A, Grelle A, Moren A S. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 1998, 4(4): 443—450.
- [5] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396(6711): 570—572.
- [6] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667—677.
- [7] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44(2): 81—99.
- [8] Kang S, Doh S, Lee D, Lee D, Jin V L, Kimball J. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1427—1437.
- [9] Borken W, Xu Y, Davidson E A, Beese F. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8(12): 1205—1216.
- [10] Tang J, 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. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 183—207.
- [11] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(3): 199—209.
- [12] Scientific complex survey team of loess plateau, Chinese academic of science. *Vegetation resources and their utilization in Loess Plateau area*. Beijing: Publication House of China Science, 1991. 16—20.
- [13] Li H J, Yan J X, Yue X F, Wang M B. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(3): 490—503.
- [14] Cheng Z H, Zhang J T, Chen T G. A study on vegetation resources in Tianlong Mountain, Shanxi Province. *Journal Mountain Science*, 2000, 18(3): 226—230.
- [15] Chang Z Q, Shi Z M, Feng Q, Su Y H. Temporal variation of soil respiration on sloping pasture of Heihe River basin and effects of temperature and soil moisture on it. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1603—1606.
- [16] Khomik M, Arain M, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1-4): 244—256.
- [17] Law B E, Kelliher F M, Baldocchi D D, Anthoni P M, Irvine J, Moore D, Van Tuyl S. Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forest during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 110(1): 27—43.
- [18] Wang X G, Zhu B, Wang Y Q, Zhen X H. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1960—1969.
- [19] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Yang Y, Liu J L, Shi K Q. Spatial heterogeneity of soil respiration and contribution of root respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural field. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5254—5261.
- [20] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, Parri I D, Jarvis P G, Valentini R. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 851—866.
- [21] Vincent G, Shahriari A R, Lucot E, Badot P, Epron D. Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2527—2535.
- [22] Subke J, Reichstein M, Tenhunen J. Explaining temporal variation in soil CO₂ efflux in a mature spruce forest in southern Germany. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(11): 1467—1483.
- [23] Epron D, Ngao J, Granier A. Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six year study. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(6): 499—505.
- [24] Savage K E, Davidson E A. Interannual variation of soil respiration in two New England forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(22),

337—350.

- [25] Gaumont-Guay D, Andrew Black T, Griffis T J, Barr A G, Jassal Morgensten K, Jass R S, Nesic Z. Influence of temperature and drought on seasonal and interannual variation of soil, bole and ecosystem respiration in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140 (1-4): 203—219.
- [26] Davidson E A, Belt E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217—227.
- [27] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11-12): 1625—1635.
- [28] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (1): 35—45.
- [29] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology*, 2003, 23(18): 1263—1270.
- [30] Janssens I, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 911—918.
- [31] Wang X, Zhou G S, Jian Y L, Li F. Comparison of soil respiration in broad-leaved Korea pine forest and reclaimed cropland in Changbai mountains, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(6): 887—893.
- [32] Flanagan L B, Johnson B G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(3-4): 237—253.
- [33] Moyano F, Kutsch W L, Rebmann C. Soil respiration fluxes in relation to photosynthetic activity in broad-leaf and needle-leaf forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(1): 135—143.
- [34] Gaumont-Guay D, Andrew Black T, Griffis T J, Barr A G, Jassal R S, Nesic Z. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1-4): 220—235.
- [35] Jia B, Zhou G, Wang Y, Wang F, Wang X. Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67(1): 60—76.
- [36] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains. *Plant and Soil*, 2001, 237(1): 15—23.

参考文献:

- [12] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区植物资源及其合理利用. 北京:中国科学技术出版社, 1991. 16~20.
- [14] 程占红, 张金屯, 陈廷贵. 山西天龙山植被及植物资源. *山地学报*, 2000, 18(3): 226~230.
- [15] 常宗强, 史作民, 冯起, 苏永红. 黑河流域山区牧草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1603~1606.
- [18] 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): 1960~1968.
- [19] 韩广轩, 周广胜, 徐振柱, 杨杨, 刘景利, 史奎桥. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献. *生态学报*, 2007, 27(12): 5254~5261.
- [31] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 李峰. 长白山红松阔叶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.