

小尺度范围内植被类型对土壤呼吸的影响

严俊霞^{1,2}, 李洪建^{1*}, 汤亿¹, 张义辉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)

摘要: 2005~2007年用红外气体分析仪在太原天龙山自然保护区对油松、草地和灌木地的土壤呼吸进行了测定。结果表明, 3个样地的土壤呼吸具有明显的季节变化特点, 夏秋季高、冬春季低。土壤呼吸的年(3~12月)平均值分别为 (3.58 ± 2.50) 、 (3.82 ± 2.75) 和 $(4.42 \pm 3.38) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ($p > 0.05$)。3~12月土壤 CO_2 释放在 $854.9 \sim 1\,297.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 之间, 年间和样地之间的土壤 CO_2 释放量均无显著差异。3个样地土壤呼吸与土壤温度的指数方程均为极显著($p < 0.01$), R^2 值在0.61~0.81之间; Q_{10} 值在2.60~4.50之间, R_{10} 值在 $1.70 \sim 3.02 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 之间。3种植被条件下土壤呼吸与土壤水分的关系均不显著($p > 0.05$), 最大的 R^2 值仅0.12; 但是, 用土壤温度 $> 10^\circ\text{C}$ 时的数据进行分析时, 土壤呼吸与土壤水分的关系显著($p < 0.05$)。4个双变量复合关系方程的 R^2 值大部分在0.7以上, 最高达0.91。

关键词: 土壤呼吸; 土壤温度和水分; 关系模型; 植被类型; 小尺度; 山区

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3121-09

Effect of Vegetation Types on Soil Respiration Characteristics on a Smaller Scale

YAN Jun-xia^{1,2}, LI Hong-jian¹, TANG Yi¹, ZHANG Yi-hui¹

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Soil respiration was measured from April 2005 to December 2007 using a LICOR-6400-09 chamber connecting a LiCor-6400 portable photosynthesis system at 3 sites with same elevation and soil texture but different vegetation types. The results indicated that seasonal trend of soil respiration showed a distinct temporal change with the higher values in summer and autumn months and the lower values in winter and spring. Annual means (March to December) of soil respiration for 3 the sampling sites were (3.58 ± 2.50) , (3.82 ± 2.75) and $(4.42 \pm 3.38) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ($p > 0.05$), respectively. Released annual amount (March to December) of CO_2 efflux from 3 sites was from 854.9 to $1\,297.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and the amount was no difference between sites and among years. The fitted exponential equations of soil respiration and soil temperature for 3 sites were all significant with the R^2 from 0.61 to 0.81, and the Q_{10} and R_{10} calculated from fitted parameters of the equations ranged from 2.60 to 4.50, and from 1.70 to $3.02 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. The relationships between soil respiration and soil water content were not significant for all 3 sites with a maximum R^2 of the regression equations only 0.12 ($p > 0.05$). However, when the soil temperature was above 10°C , the relationships between soil respiration and soil water content was significant ($p < 0.05$). Four combined regression equations including soil temperature and soil water content could be used to model relationships between soil respiration and both soil temperature and soil water content together, with the R^2 most above 0.7, and maximum of 0.91.

Key words: soil respiration; soil temperature and moisture; correlation models; vegetation types; smaller scale; mountain area

土壤呼吸是控制陆地生态系统碳平衡的主要过程之一^[1,2], 由于土壤呼吸在时间和空间尺度上表现出极大的可变性, 给准确量化不同尺度下土壤 CO_2 的释放量以及土壤呼吸与环境因子的关系带来困难^[3~5]。在全球尺度上土壤呼吸研究包括从苔原到赤道的各种生态系统^[1], 土壤呼吸表现出明显的地带性特点, 同时在小尺度范围内受地形地貌^[3]、植被^[6]、土壤质地^[7]以及土地利用方式^[8~10]等因素的影响, 土壤呼吸亦表现出明显的空间变化特征^[4, 11]。土壤呼吸时间尺度上的日变化、季节变化、年际变化主要受土壤温度和土壤水分控制; 在空间尺度上生物因子如根密度、生物量、有机质质量^[12~15]、植被特性以及土壤质地^[7]可能是影响土壤呼吸的主要因素。由于影响土壤呼吸的因素很多, 同时由于各因素

之间的相互联系和作用, 准确区分各环境因子对土壤呼吸的影响非常重要。

山区随着海拔高度的变化, 植被类型、土壤质地表现出垂直地带性特征, 从而使得不同海拔生态系统的土壤呼吸有很大差异。同时, 即使在海拔高度和土壤类型相同的条件下, 植被类型也不一定相同, 然而对非均质植被条件的土壤呼吸的比较研究, 特别是对小尺度范围内植被变化对土壤呼吸的影响方面的研究鲜有报道。

收稿日期: 2008-12-12; 修订日期: 2009-04-08

基金项目: 山西省自然基金项目(2008021036-2); 山西省农业攻关项目(2008-03-11075); 山西大学基金项目

作者简介: 严俊霞(1976~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为生态系统碳氮循环, E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hongli@sxu.edu.cn

本研究以海拔高度、土壤质地相同的 3 种不同植被(油松、草地、灌木)的样地为对象,对其土壤呼吸以及土壤温度和土壤水分进行了 3a 的定位测定,目的是:①了解 3 种植被类型下的土壤呼吸的季节、年际变化有无差异;②分析土壤呼吸与环境因子的关系在 3 个样地间是否存在差异;③比较 3 种植被条件下土壤呼吸的温度敏感性参数 Q_{10} 和 10℃时的基础土壤呼吸 R_{10} 值,研究环境因子对它们的影响程度.

1 材料与方法

1.1 试验地

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.年平均降水量 478.4 mm;最大、最少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.年平均气温 10℃,最高月平均气温 23℃,出现在 7 月;最低月平均气温 -6.4℃,出现在 1 月.

天龙山自然保护区的森林群落主要分布于海拔 1355 m 以上的各类地形中,区内主要植被类型的建群种见文献[16].研究涉及的 3 种植被类型特点见表 1.①油松(*Pinus tabulaeformis*)地.为天然次生油松林.海拔 1 443 m,林龄在 30 a 左右,盖度约 65%左右,树高 3.7 m,胸径 12 cm.密度 3 200 株/ hm^2 .林下主要植物有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、杠柳(*Periploca sepium*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等.地表松针凋落物明显,厚度 2 ~ 3 cm.油松是该海拔高度下的主要植被类型,面积占本区森林总面积的 70% 以上.②草地.海拔 1 443 m,与油松地相邻,面积约 200 m^2 左右,为林间草地.以细叶苔草为主,还有铁杆蒿、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)等.③灌木.海拔 1 442 m,建群种以沙棘(*Periploca sepium*)为主,高度约 1.8 m,另有杠柳(*Periploca sepium*)、黄刺玫和黄栌(*Cotinus coggygria*)等.草本植物有铁杆蒿和野艾蒿等.面积约 120 m^2 左右.3 个样地土层厚度均在 50 cm 以上,坡度 1° ~ 2°,坡向南,平行排列.

表 1 3 个土壤呼吸测定样地的特征

Table 1 Characteristics of the three sampling sites for soil respiration measurement

样地	海拔 /m	土壤 类型	土层厚 度/cm	土壤容重 / $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	田间持水量 /%	有机质 /%
林地	1443	砂粘土	> 50	1.29 ± 0.06	23.07 ± 1.23	3.15 ± 0.41
草地	1443	砂粘土	> 50	1.38 ± 0.05	22.24 ± 1.04	4.51 ± 0.58
灌木地	1442	砂粘土	> 50	1.37 ± 0.04	21.15 ± 0.31	1.58 ± 0.66

1.2 试验过程

土壤呼吸速率用 LI-6400 便携式光合作用系统连接 6400-09 标准箱室测定,时间从 2005 年 4 月 ~ 2007 年 12 月,每月测定 2 ~ 3 次.在 3 个样地内选取一个具有代表性的区域,每年开始时测定随机放置 3 ~ 5 个、间隔 2 ~ 3 m 的 PVC 环,环内没有活体植物,凋落物保持原状,土壤呼吸测定方法详见文献[17].10 cm 深度的土壤温度用 LI-6400 系统的土壤温度探针测定.2006 和 2007 年增加 5、15 cm 深度的土壤温度测定.土壤水分用烘干法测定,在 PVC 环附近用土钻挖取 10 cm 深度的土壤,装入土盒,带回实验室称重烘干(105℃),求土壤含水量(干土重,%),3 次重复.此外,每年 12 月测定结束后,将 PVC 环内的土体全部挖出,测定土壤有机质(10 cm 深度).0 ~ 10 cm 深度的土壤容重和田间持水量用环刀法测定.

1.3 数据处理

方差分析检验样地之间土壤呼吸(R_s)、土壤温度(T_s)和土壤水分(W_s)均值的差异程度.线性或非线性方程分析土壤呼吸与土壤温度或土壤水分之间的单因素关系;用土壤温度和呼吸指数关系方程($R_s = a e^{b T_s}$)的拟合系数计算土壤呼吸的温度敏感性指数($Q_{10} = e^{10b}$)值和 10℃时的基础土壤呼吸($R_{10} = a e^{10b}$)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复合关系模型.具体分析方法见文献[17].

2 结果与分析

2.1 土壤温度、土壤水分和土壤呼吸的季节变化及年土壤呼吸总量

2.1.1 季节变化

油松、草地和灌木 3 个样地 10 cm 深度土壤温度的季节变化表现为冬春季较低、夏秋季较高的趋势,基本为对称的抛物线型[图 1(a)].最低值出现在春季或冬季,在 0℃左右;最高值出现在 7 月,在 20℃左右.2005、2006 和 2007 年油松、草地和灌木土壤温度的平均值(表 2)分别为(平均值 $\pm$ 标准差,下同):(11.16 ± 5.77)、(10.83 ± 6.12)和(10.11 ± 6.40)℃;(11.90 ± 6.24)、(11.95 ± 7.23)和(11.67 ± 7.70)℃;(12.17 ± 6.59)、(12.29 ± 6.61)和(11.07 ± 7.16)℃.3 个样地 3 年的土壤温度之间差异不显著(表 2)(p 为 0.84、0.9 和 0.80).油松、草地和灌木 3a 土壤温度的总平均值分别为(10.69 ± 6.04)、(11.84 ± 6.99)和(11.85 ± 6.72)℃,样地间的总平均

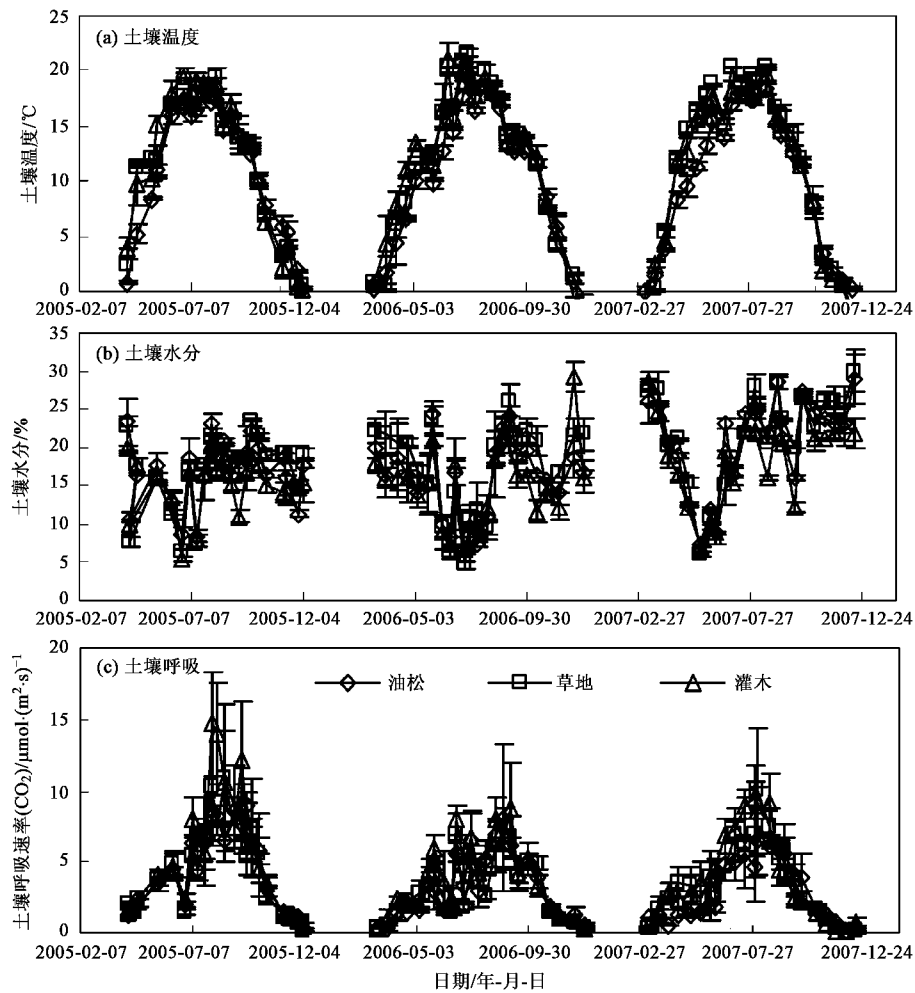


图 1 3 个样地土壤温度、土壤水分和土壤呼吸的季节变化

Fig.1 Seasonal changes of soil temperature at 10 cm depth and soil moisture over top 10 cm and soil CO₂ efflux in the 3 sites

表 2 测定年份土壤温度、土壤水分和土壤呼吸的平均值 ¹⁾				
Table 2 Mean values of soil temperature, soil water content and soil respiration over three years				
样地	年份	土壤温度/℃	土壤水分/%	土壤呼吸速率(CO ₂)/μmol·(m ² ·s) ⁻¹
林地	2005	11.16 ± 5.77a	16.88 ± 4.27a	4.57 ± 2.84a
	2006	10.83 ± 6.12a	15.86 ± 4.95a	3.28 ± 2.26ab
	2007	10.11 ± 6.40a	20.98 ± 6.09b	2.94 ± 2.17b
	2005 ~ 2007	10.69 ± 6.04A	17.89 ± 5.56AB	3.58 ± 2.50A
草地	2005	11.90 ± 6.24a	16.94 ± 4.78a	4.75 ± 3.22a
	2006	11.95 ± 7.23a	17.31 ± 5.83a	3.16 ± 2.13a
	2007	11.67 ± 7.70a	21.53 ± 6.69b	3.64 ± 2.70a
	2005 ~ 2007	11.84 ± 6.99A	18.60 ± 6.12B	3.82 ± 2.75A
灌木地	2005	12.17 ± 6.59a	15.13 ± 3.73a	5.53 ± 4.26a
	2006	12.29 ± 6.61a	15.11 ± 5.18a	3.90 ± 2.54a
	2007	11.07 ± 7.16a	18.95 ± 5.77b	3.89 ± 3.07a
	2005 ~ 2007	11.85 ± 6.72A	16.39 ± 5.23A	4.42 ± 3.38A

1)平均值后面的字母为 Duncan 多重均值检验结果,小写和大写字母分别表示同一样地间 3 a 的比较和 3 个样地 3 a 平均值的比较结果,相同字母表示在 0.05 概率水平上无显著差异

值无显著差异($p > 0.05$).3 个样地 3 a 土壤温度全部测定数据(207 个)的平均值为(11.46 ± 6.58)℃.

3 个样地 0 ~ 10 cm 深度的土壤水分表现出明显的“干-湿-干”交替的特点[图 1(b)].降水之后土壤

水分增加,但是如果较长时间没有降雨,土壤水分会迅速降低.研究区属于半干旱区,春夏之交的 5~7 月土壤干旱经常发生.测定的 3a 中有 2a 的 6、7 月出现土壤干旱情况.2005、2006 和 2007 年油松、草地和灌木土壤水分的平均值(表 2)分别为(16.88 ± 4.27)%、(15.86 ± 4.95)% 和 (20.98 ± 6.09)%;(16.94 ± 4.78)%、17.31 ± 5.83)% 和 (21.53 ± 6.69)%;(15.13 ± 3.73)%、(15.11 ± 5.18)% 和 (18.95 ± 5.77)%.2007 年的土壤水明显高于其它 2 个年份.3 个样地土壤水分 2005 和 2006 年之间没有差异($p>0.05$),2007 年与 2005、2006 年间差异显著($p<0.05$).3 个样地 3 年土壤水分的总平均值分别为(17.89 ± 5.56)%、(18.60 ± 6.12)% 和 (16.39 ± 5.23)%,年间土壤水分总体差异显著(p 为 0.03、0.017 和 0.015).3a 土壤水分全部测定数据(207 个)的平均值为(17.63 ± 5.70)%.

3 个样地土壤呼吸的季节变化与土壤温度的季节变化基本一致[图 1(c)].土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度季节变化的控制,土壤呼吸的最小值出现在冬季或春季, < 1 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,最大值出现在夏季,可达 10 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 以上[图 1(c)].此外,夏季干旱对土壤呼吸亦有一定影响,虽然这种现象仅出现在个别测定日,但是它可导致土壤呼吸明显降低.与本区位于海拔较低的其它样地相比^[17],3 个样地受土壤水分胁迫的程度较小.2005、2006 和 2007 年油松、草地和灌木的土壤呼吸的平均值(表 2)分别为(4.57 ± 2.84)、(3.28 ± 2.26)、(2.94 ± 2.17)、(4.75 ± 3.22)、(3.16 ± 2.13)、(3.64 ± 2.70)和 (5.53 ± 4.26)、(3.90 ± 2.54)、(3.89 ± 3.07)

$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,样地 3 个测定年之间土壤呼吸的平均值没有显著差异(p 为 0.069、0.137 和 0.177).油松、草地和灌木的 3 个测定年土壤呼吸的总平均值分别为(3.58 ± 2.50)、(3.82 ± 2.75)和(4.42 ± 3.38) $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,样地间土壤呼吸差异不显著.3 年土壤呼吸全部测定数据(207 个)的平均值为(3.94 ± 2.91) $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$.

3 种植被条件下土壤温度、土壤水分和土壤呼吸的均值差异不显著,表明 3 种植被条件下的土壤呼吸以及影响土壤呼吸的环境因子没有因为植被不同发生明显变化.3 个样地的土壤呼吸具有明显的季节变化特点,变化趋势基本一致.简单相关分析表明,3 个样地土壤呼吸速率之间的相关性均为极显著,相关系数在 0.87~0.92 之间.这一结果表明,3 个样地的土壤呼吸受到共同的环境因子,即土壤温度和土壤水分的影响.

2.1.2 土壤呼吸量

用各月测定的土壤呼吸平均值作为测定月土壤呼吸的日平均值,用该值乘以对应月的天数求得各月土壤 CO₂ 释放量,相加可得 3~12 月(2005 年为 4~12 月)的土壤 CO₂ 释放量(表 3).从表 3 可以看出,3 个样地土壤 CO₂ 的 3~12 月释放量在 854.9~1 297.2 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 之间.方差分析表明,3 个样地 3 年土壤 CO₂ 释放量之间无显著差异($p>0.05$),同时 3 个样地土壤 CO₂ 总释放量之间也无显著差异($p>0.05$).这一结果表明,在本测定样地内土壤温度和土壤水分的年际变化以及 3 个样地植被之间的差异对土壤 CO₂ 释放量影响不大.

表 3 3 个样地的土壤 CO₂ 释放量

Table 3 Annual amount of CO₂ efflux of the 3 sites in 2005, 2006 and 2007, respectively

样地	年份	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计
林地	2005	—	57.0	80.3	99.4	184.0	253.3	239.8	145.5	42.5	14.0	1 115.8
	2006	13.5	48.3	87.7	95.9	139.9	217.2	157.6	93.1	33.9	29.7	916.8
	2007	37.1	30.6	44.9	90.3	172.5	185.2	162.0	90.3	31.6	10.5	854.9
草地	2005	—	69.0	83.1	98.0	200.3	299.6	215.5	131.7	35.5	4.8	1 137.5
	2006	14.3	57.3	107.7	112.7	110.6	167.2	164.6	104.4	27.9	19.2	886.0
	2007	32.9	94.3	94.1	117.5	213.4	263.5	154.1	66.2	19.7	3.4	1059.1
灌木	2005	—	57.7	95.8	110.9	214.3	376.3	259.7	131.4	35.5	15.6	1 297.2
	2006	22.1	71.6	134.3	143.5	170.3	211.9	188.9	81.8	29.5	10.6	1 064.5
	2007	33.9	82.9	101.3	160.9	262.8	291.0	117.5	58.5	14.5	14.6	1 137.9
平均		25.6	63.2	92.1	114.3	185.3	251.7	184.4	100.3	30.1	13.6	1 052.2

2.2 土壤呼吸与土壤温度和水分的关系模型

2.2.1 土壤呼吸与土壤温度的关系模型

表 4 为土壤呼吸与土壤温度的指数关系模型.

可以看出,3 个样地 3 个测定年份土壤呼吸与土壤温度关系模型的决定系数 R^2 值差别不大,在 0.60~0.81 之间,关系方程均达极显著水平,说明 3 个

样地土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度的控制,土壤水分对土壤呼吸的影响较小,指数方程可以很好地解释土壤呼吸与土壤温度的关系.

表 4 3 个样地土壤呼吸与土壤温度之间的关系方程

Table 4 Relationships between soil respiration and soil temperature in 2005, 2006 and 2007 for three sites						
样地	年份	<i>n</i>	拟合方程	<i>R</i> ²	<i>Q</i> ₁₀	<i>R</i> ₁₀
林地	2005	22	$R_{405} = 0.888\ 2e^{0.122\ 5\ T_s}$	0.703 2	3.40	3.02
	2006	24	$R_{406} = 0.660\ 2e^{0.120\ 9\ T_s}$	0.739 1	3.35	2.21
	2007	23	$R_{407} = 0.538\ 5e^{0.132\ 4\ T_s}$	0.771 4	3.76	2.02
	2005~2007	69	$R_{405-07} = 0.661\ 9e^{0.127\ 3\ T_s}$	0.720 3	3.57	2.36
草地	2005	22	$R_{405} = 0.704e^{0.130\ 3\ T_s}$	0.605 4	3.68	2.59
	2006	24	$R_{406} = 0.744\ 7e^{0.095\ 7\ T_s}$	0.605 6	2.60	1.94
	2007	23	$R_{407} = 0.377\ 9e^{0.150\ 5\ T_s}$	0.764 9	4.50	1.70
	2005~2007	69	$R_{405-07} = 0.575\ 8e^{0.125\ 9\ T_s}$	0.642 9	3.52	2.03
灌木	2005	22	$R_{405} = 0.942\ 2e^{0.116\ 4\ T_s}$	0.664 6	3.20	3.02
	2006	24	$R_{406} = 0.674\ 1e^{0.117\ 8\ T_s}$	0.712 1	3.25	2.19
	2007	23	$R_{407} = 0.493\ 7e^{0.145\ 4\ T_s}$	0.808	4.28	2.11
	2005~2007	69	$R_{405-07} = 0.657\ 5e^{0.128\ 3\ T_s}$	0.720 2	3.61	2.37
合计		207	$R_s = 0.633\ 9e^{0.126\ 7\ T_s}$	0.685 9	3.55	2.25

利用指数方程得到的 *Q*₁₀ 值在 2.60~4.50 之间,大多数在 3.3~3.7 之间;土壤温度 10℃ 时的土壤呼吸值 *R*₁₀ 在 1.70~3.02 μmol·(m²·s)⁻¹ 之间,大多数在 2.0~2.5 μmol·(m²·s)⁻¹ 之间(表 4).当把 3 个样地 3 a 测定的所有数据作为整体进行分析时 *Q*₁₀ 值为 3.55, *R*₁₀ 值为 2.25 μmol·(m²·s)⁻¹. *Q*₁₀ 值大于全球平均水平 2.4 的中位值^[1],而 *R*₁₀ 值接近于大

多数研究的报道值^[18].
为了分析不同温度区间土壤呼吸和土壤温度的关系以及土壤温度对 *Q*₁₀ 值的影响,将测定数据分为 <10℃ 和 >10℃ 分别进行分析.结果(表 5)表明土壤温度 <10℃ 时,土壤呼吸与土壤温度的关系极显著, *Q*₁₀ 值从 4.38 升至 10.65;当土壤温度 >10℃ 时,草地的土壤呼吸与土壤温度的关系不显著,而在其它 2 个样地显著,但是 *R*² 值明显低于 10℃ 以下的 *R*² 值.同时可以看出低温时的 *Q*₁₀ 值较高,高温时的 *Q*₁₀ 值较低.

2.2.2 土壤呼吸与土壤水分的关系

表 6 是土壤呼吸与土壤水分的直线和指数拟合方程.与土壤呼吸与土壤温度的关系相比,土壤呼吸与土壤水分的决定系数 *R*² 值均很小,土壤呼吸与土壤水分的关系均不显著,说明在这 3 个样地内土壤呼吸受土壤水分的影响很小,土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度季节变化的影响.这是因为在季节尺度上分析土壤水分和土壤呼吸的相关关系时,土壤温度对土壤呼吸的影响也包含在其中.比如春季开始测定和冬季测定结束时,由于受秋季降水的影响 3 个样地的土壤水分一般较好,但是此时的土壤呼吸却很低,显然是土壤温度限制了土壤水分对土壤呼吸的作用,但是在夏季,土壤温度虽然很高,受土壤水分影响土壤呼吸值可能会很低.

表 5 2005~2007 年土壤温度大于和小于 10℃ 时的土壤呼吸与温度的关系方程以及 *Q*₁₀、*R*₁₀ 值¹⁾

Table 5 Regression equations between soil respiration and soil temperature when the soil temperature was less than and more than 10℃ and <i>Q</i> ₁₀ , <i>R</i> ₁₀ values								
样地	土壤温度 < 10℃				土壤温度 > 10℃			
	拟合方程	<i>R</i> ²	<i>Q</i> ₁₀	<i>R</i> ₁₀	拟合方程	<i>R</i> ²	<i>Q</i> ₁₀	<i>R</i> ₁₀
林地	$R_s = 0.593\ 9e^{0.147\ 8\ T_s}$	0.57**	4.38	2.60	$R_s = 1.633\ 6e^{0.068\ 7\ T_s}$	0.10*	1.99	3.25
草地	$R_s = 0.397\ 8e^{0.236\ 6\ T_s}$	0.60**	10.65	4.24	$R_s = 2.728e^{0.030\ 9\ T_s}$	0.03	1.36	3.72
灌木地	$R_s = 0.554\ 1e^{0.166\ 3\ T_s}$	0.55**	5.28	2.92	$R_s = 1.797\ 2e^{0.067\ T_s}$	0.13**	1.95	3.51

1) * 表示在 0.05 水平上显著; ** 在 0.01 水平上显著,下同

表 6 3 个样地土壤呼吸与土壤水分之间的关系方程

Table 6 Relationships between soil respiration and soil moisture in 2005, 2006 and 2007 for three sampling sites					
样地	时间	<i>n</i>	直线方程 ¹⁾	指数方程	
林地	2005	22	$R_s = 0.265\ 2\ W_s + 0.09(0.158\ 7)$	$R_s = 1.299\ 4e^{0.058\ 5\ W_s}(0.0874)$	
	2006	24	$R_s = 0.084\ 8\ W_s + 1.931\ 9(0.034\ 6)$	$R_s = 2.107\ 8e^{0.009\ 3\ W_s}(0.002\ 9)$	
	2007	23	$R_s = 0.062\ 1\ W_s + 1.640\ 2(0.030\ 3)$	$R_s = 1.946\ 8e^{0.002\ 5\ W_s}(0.000\ 3)$	
	2005~2007	69	$R_s = 0.070\ 1\ W_s + 2.322\ 1(0.024\ 4)$	$R_s = 2.383\ 7e^{0.004\ 5\ W_s}(0.000\ 8)$	
草地	2005	22	$R_s = 0.176\ 5\ W_s + 1.756\ 7(0.068\ 7)$	$R_s = 1.918\ 1e^{0.032\ 3\ W_s}(0.021\ 9)$	
	2006	24	$R_s = 0.058\ 4\ W_s + 2.150\ 4(0.025\ 6)$	$R_s = 2.611\ 9e^{-0.006\ 4\ W_s}(0.001\ 8)$	
	2007	23	$R_s = -0.036\ 2\ W_s + 4.415(0.008)$	$R_s = 9.095\ 8e^{-0.066\ 2\ W_s}(0.111\ 5)$	
	2005~2007	66	$R_s = 0.027\ 1\ W_s + 3.320\ 7(0.003\ 6)$	$R_s = 4.321\ 7e^{-0.028\ 2\ W_s}(0.024\ 7)$	
灌木	2005	22	$R_s = 0.289\ 9\ W_s + 1.141(0.06)$	$R_s = 1.958\ 7e^{0.045\ 2\ W_s}(0.03)$	
	2006	24	$R_s = 0.023\ 8\ W_s + 3.538\ 1(0.00)$	$R_s = 4.062\ 2e^{-0.023\ W_s}(0.02)$	
	2007	23	$R_s = -0.086\ 7\ W_s + 5.538(0.03)$	$R_s = 9.036\ 5e^{-0.068\ 5\ W_s}(0.12)$	
	2005~2007	69	$R_s = -0.005\ 3\ W_s + 4.502\ 4(0.00)$	$R_s = 5.480\ 6e^{-0.036\ 6\ W_s}(0.04)$	
合计		207	$R_s = 0.022\ 7\ W_s + 3.538\ 7(0.002)$	$R_s = 3.960\ 5e^{-0.021\ 6\ W_s}(0.014\ 9)$	

1) 括号中的值为回归方程的 *R*² 值

为了进一步分析土壤水分对土壤呼吸的影响, 同样将 3 a 的测定数据分为 $< 10^{\circ}\text{C}$ 和 $> 10^{\circ}\text{C}$ 这 2 个数据段进行分析. 结果发现(表 7), 当土壤温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 时, 土壤水分对土壤呼吸的影响显著, 当土壤温度 $< 10^{\circ}\text{C}$ 时, 土壤水分对土壤呼吸的影响不显著(表 7). 这一结果表明, 土壤水分对土壤呼吸的影响主要在土壤温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 之后, 此时植物的生理活动开始, 随着土壤水分的增加, 土壤呼吸增高. 而土壤温度低于 10°C 时, 土壤呼吸随土壤水分的增加而降低, 说明低温时土壤水分对土壤呼吸的抑制作用. 说明不同时段土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的影响不同.

表 7 土壤温度大于和小于 10°C 时土壤呼吸与水分的关系方程				
Table 7 Regression equations between soil respiration and soil water content when the soil temperature was less than and more than 10°C				
样地	土壤温度 $< 10^{\circ}\text{C}$		土壤温度 $> 10^{\circ}\text{C}$	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
林地	$R_s = -0.024\ 1\ W_s + 1.979$	0.01	$R_s = 1.958\ 8e^{0.050\ 9\ W_s}$	0.41**
草地	$R_s = -0.070\ 2\ W_s + 2.824\ 4$	0.05	$R_s = 1.951\ 8e^{0.049\ 2\ W_s}$	0.36**
灌木地	$R_s = -0.060\ 6\ W_s + 2.520\ 7$	0.07	$R_s = 3.085\ 7e^{0.035\ 4\ W_s}$	0.12**

表 8 土壤呼吸与土壤温度和水分的相关系数和分别控制温度(水分)后土壤呼吸与水分(温度)的相关系数 ¹⁾						
Table 8 Correlation coefficients of CO_2 efflux against soil temperature(or SWC) and partial correlation coefficients for controlling soil temperature(or SWC)						
样地	年份	n	土壤呼吸与土壤温度的相关系数		土壤呼吸与土壤水分的相关系数	
			简单相关	偏相关	简单相关	偏相关
林地	2005	19	0.78(0.000)	0.88(0.000)	0.40(0.066)	0.72(0.000)
	2006	24	0.77(0.000)	0.93(0.000)	0.19(0.383)	0.83(0.000)
	2007	25	0.85(0.000)	0.95(0.000)	0.18(0.425)	0.81(0.000)
草地	2005	19	0.72(0.000)	0.88(0.000)	0.26(0.239)	0.74(0.000)
	2006	24	0.63(0.001)	0.90(0.000)	0.16(0.456)	0.83(0.000)
	2007	25	0.83(0.001)	0.91(0.000)	-0.09(0.686)	0.69(0.000)
灌木	2005	19	0.67(0.001)	0.75(0.000)	0.25(0.251)	0.50(0.020)
	2006	24	0.70(0.001)	0.86(0.000)	0.05(0.820)	0.70(0.000)
	2007	25	0.84(0.000)	0.88(0.000)	-0.16(0.460)	0.51(0.016)

1)括号中为 p 值

3 讨论

3.1 土壤呼吸的季节和年际变化

与大多数生态系统土壤呼吸的季节变化规律相一致, 本研究中 3 个样地的土壤呼吸具有明显的季节变化特点, 春、冬季土壤呼吸较低, 夏、秋季土壤呼吸较高. 夏秋季的土壤呼吸值 $[10\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 以上]是春季 $[0.2\sim 0.5\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 左右]的几十倍

2.2.3 土壤呼吸与土壤温度和水分复合关系

由于不同时段土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的影响不同, 低温时土壤温度对土壤呼吸的影响较大, 而高温时土壤水分对土壤呼吸有较大影响, 因此为了减小 2 个变量对土壤呼吸的相互作用, 用偏相关分析分析土壤呼吸与土壤温度和水分的关系. 结果表明, 与简单相关系数相比, 偏相关系数(表 8)均得到较大提高. 这一结果表明土壤呼吸受土壤温度和土壤水分的共同影响.

尽管土壤呼吸与土壤温度的单变量关系模型可以很好地预测土壤呼吸的季节变化, 但是其拟合的关系方程均忽视了土壤水分因素的作用. 因此为了能更好地研究土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的共同影响, 用 4 个双变量复合模型进行土壤呼吸与土壤温度和水分复合关系分析^[15, 17, 19]. 可以看到(表 9), 与土壤温度与土壤呼吸或者土壤水分与土壤呼吸的单因素关系方程的相关程度相比, 双变量方程的复相关系数均得到较大的提高, 方程可以解释土壤呼吸季节变化的 57%~91%, 这一结果说明, 包括土壤温度和水分的双变量方程可以更好地预测土壤呼吸.

以上, 在正常土壤水分条件下, 土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度的控制, 夏季干旱时期土壤水分控制土壤呼吸, 不同季节土壤呼吸的差异主要与土壤温度、土壤水分的季节差异有关, 这一规律与温带地区其他的研究结果相一致^[20].

土壤呼吸的年际变化主要受降水量及其分配的影响, 降水量大小直接影响土壤水分进而影响土壤呼吸, 同样量的降水, 出现在夏季对土壤呼吸的影响

表 9 3 个样地土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的复合关系方程¹⁾

Table 9 Combined relationships between soil respiration and soil temperature as well soil moisture

样地	年份	n	线性关系	
			$R_s = a(T_s \times W_s) + b$	$R_s = a + bT_s + cW_s$
林地	2005	19	$R_s = 0.023\ 5(T_s \times W_s) + 0.175\ 4(0.84^{**})$	$R_s = -5.007 + 0.399T_s + 0.304W_s(0.81^{**})$
	2006	24	$R_s = 0.019\ 9(T_s \times W_s) + 0.077\ 5(0.82^{**})$	$R_s = -4.587 + 0.361T_s + 0.25W_s(0.87^{**})$
	2007	23	$R_s = 0.013\ 4(T_s \times W_s) + 0.242\ 6(0.88^{**})$	$R_s = -3.663 + 0.329T_s + 0.156W_s(0.91^{**})$
草地	2005	19	$R_s = 0.025(T_s \times W_s) - 0.065\ 6(0.75^{**})$	$R_s = -6.884 + 0.46T_s + 0.364W_s(0.78^{**})$
	2006	24	$R_s = 0.016\ 1(T_s \times W_s) + 0.201\ 9(0.76^{**})$	$R_s = -5.71 + 0.322T_s + 0.29W_s(0.82^{**})$
	2007	23	$R_s = 0.013\ 8(T_s \times W_s) + 0.506\ 3(0.70^{**})$	$R_s = -4.595 + 0.371T_s + 0.181W_s(0.84^{**})$
灌木地	2005	22	$R_s = 0.031\ 1(T_s \times W_s) - 0.071(0.63^{**})$	$R_s = -6.799 + 0.475T_s + 0.433W_s(0.59^{**})$
	2006	24	$R_s = 0.021\ 9(T_s \times W_s) + 0.207\ 1(0.75^{**})$	$R_s = -5.259 + 0.390T_s + 0.288W_s(0.74^{**})$
	2007	23	$R_s = 0.018\ 5(T_s \times W_s) + 0.359\ 7(0.72^{**})$	$R_s = -3.999 + 0.426T_s + 0.168W_s(0.78^{**})$
样地	年份	n	非线性关系	
			$R_s = aT_s^b W_s^c$	$R_s = ae^{bT_s} W_s^c$
林地	2005	19	$R_s = 0.032T_s^{0.71} W_s^{1.14}(0.86^{**})$	$R_s = 0.041e^{0.13T_s} W_s^{1.08}(0.84^{**})$
	2006	24	$R_s = 0.063T_s^{0.77} W_s^{0.77}(0.77^{**})$	$R_s = 0.025e^{0.15T_s} W_s^{1.10}(0.91^{**})$
	2007	23	$R_s = 0.051T_s^{0.59} W_s^{0.88}(0.65^{**})$	$R_s = 0.055e^{0.14T_s} W_s^{0.73}(0.84^{**})$
草地	2005	19	$R_s = 0.024T_s^{0.93} W_s^{1.06}(0.87)$	$R_s = 0.018e^{0.15T_s} W_s^{1.23}(0.77^{**})$
	2006	24	$R_s = 0.033T_s^{0.81} W_s^{0.92}(0.89)$	$R_s = 0.010e^{0.14T_s} W_s^{1.36}(0.90^{**})$
	2007	23	$R_s = 0.188T_s^{0.67} W_s^{0.42}(0.57^{**})$	$R_s = 0.062e^{0.16T_s} W_s^{0.55}(0.79^{**})$
灌木地	2005	22	$R_s = 0.115T_s^{0.67} W_s^{0.78}(0.72^{**})$	$R_s = 0.047e^{0.13T_s} W_s^{1.06}(0.78^{**})$
	2006	24	$R_s = 0.029T_s^{1.04} W_s^{0.85}(0.82^{**})$	$R_s = 0.017e^{0.16T_s} W_s^{1.22}(0.87^{**})$
	2007	23	$R_s = 0.056T_s^{1.16} W_s^{0.47}(0.87^{**})$	$R_s = 0.137e^{0.16T_s} W_s^{0.41}(0.82^{**})$

1)括号中为 R^2 值

较大,而出现在春、冬季则对土壤呼吸的影响很小. Borken 等^[21]在德国 2 个地点的研究表明,土壤呼吸具有年际变化特点,夏季的土壤干旱可以使土壤呼吸减小 $160 \sim 260\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 他们认为,土壤呼吸的年际变化在持水能力较差和植被盖度较小的土壤中更为明显,因为在相同条件下植被、土壤类型以及持水能力可以减低干旱发生的可能性. Epron 等^[15]在法国南部对一个森林生态系统 6a 的研究表明,土壤呼吸的季节变化趋势随土壤温度和水分的变化而变化,土壤呼吸的最大值出现在 8 月,夏季的土壤干旱使土壤呼吸明显下降,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 等^[22]的研究也表明,土壤呼吸存在明显的年际变化,其主要原因也是夏季土壤水分. Gaumont-Guay 等^[23]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的年际变化的原因大多数归因于夏季土壤水分的差异^[13, 24],与夏季土壤水分对土壤呼吸的作用增加有关.

本研究的 3 个样地土壤呼吸的年际变化差异不大,环境因子的年际变化也没有明显的差异,可能与 3 个样地海拔较高,蒸发、蒸腾作用较小有关. 此外,3 个测定年除夏季个别测定日外 3 个样地的土壤水分均没有明显干旱,这可能是年际变化差异不大的

一个原因. 因此了解土壤呼吸的年际变化仍需要进行长期的研究,包括不同降水年的土壤呼吸测定,从而深入分析土壤呼吸差异的真正原因.

3.2 土壤呼吸量

油松、草地和灌木 3 个测定年土壤呼吸的平均值分别为 (3.58 ± 2.50) 、 (3.82 ± 2.75) 和 $(4.42 \pm 3.38)\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,样地间差异不显著,与其他地区报道的结果一致^[3, 20, 25, 26]. 年土壤 CO_2 释放量(3 ~ 12 月)从 $854.9 \sim 1\ 297.2\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,平均值为 $1\ 052.2\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,这一结果与其他地区的研究结果基本相一致^[3, 22, 28, 29]. 3 个样地间 3 ~ 12 月土壤 CO_2 释放量的差异不显著,各样地土壤呼吸的年际变化差异亦不显著,其原因可能是:①样地间植被的差异并没有导致环境因子发生显著改变;②土壤水分的年际变化尤其是夏季年际降水量的差异较小.

3.3 土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的影响

土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸的 2 个主要因素,土壤呼吸的季节变化大部分时段受控于土壤温度的季节变化,同时夏季土壤水分特别是土壤干旱对土壤呼吸有明显的控制作用. 3 个样地土壤呼吸与土壤温度的关系可以用指数关系方程表示,方程均为极显著水平;土壤呼吸与土壤水分的关系不显著,与土壤水分关系微弱. 但是当以 10°C (土壤

10 cm 温度)为界把全部测定数据分为 2 段进行分析发现,温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 时土壤水分与土壤呼吸的关系显著,而土壤温度 $< 10^{\circ}\text{C}$ 时,关系不显著,说明土壤水分对呼吸的影响只是在温度较高时才起作用。

指数关系方程可以很好地预测土壤呼吸的季节变化,其先决条件是土壤水分对土壤呼吸没有胁迫影响^[30].许多研究表明,在分析土壤温度和土壤呼吸的关系时,剔除土壤水分胁迫时测定的数据后,它们的相关性提高^[7, 17, 26, 28, 31].本研究中 3 个样地土壤水分对土壤呼吸的抑制作用出现在个别测定日,剔除这些测定日的数据后二者的相关性均得到提高.如剔除 2005 年 6 月 25 日的数据后,指数方程的决定系数分别从 0.70、0.61、0.66(表 4)上升至 0.81、0.72、0.78.

降水同样对土壤呼吸有较大的影响^[20, 23, 28],在分析土壤呼吸与土壤温度的关系时,为了减小降水对土壤呼吸的影响,往往剔除降水后测定的土壤呼吸值^[20].在本研究区域,生长季 0 ~ 10 cm 深度的土壤水分很少超过田间持水量(WHC)水平,土壤饱和对土壤呼吸的抑制作用不明显,但是雨后土壤呼吸增加的现象存在,主要出现在夏季土壤水分干旱以后的降水,测定中土壤呼吸的高值大部分是雨后的测定值.但是雨后土壤呼吸增加的现象在土壤温度较低的冬、春季降水对土壤呼吸增加不明显。

包含土壤温度和土壤水分的复合关系模型可以很好地预测土壤呼吸^[12, 15, 19, 26, 32].Epron 等^[15]用 3 种模型(指数、阿列纽斯、幂函数)对土壤呼吸与土壤温度、水分关系的研究表明,当把土壤水分作为一个线性变量加入土壤呼吸与温度的关系方程中,方程的决定系数 R^2 值从 0.56 左右提高到 0.72.本研究结果表明,加入土壤水分变量后,与指数关系方程的决定系数相比,4 个复合方程的决定系数得到一定程度的提高,但水分不是线性变量,与其他学者的研究结果一致^[3, 19, 26, 32].

3.4 土壤温度和土壤水分对 Q_{10} 的影响

Q_{10} 值是土壤温度增加 10°C 时土壤呼吸增加的倍数,是一个表征土壤生物化学代谢活动的重要参数.研究表明,一年中的 Q_{10} 值不是常数,而是随温度的增加和水分的减低而减小^[12, 26, 33].用油松、草地和灌木样地 3 a 的土壤呼吸指数关系方程拟合参数计算的土壤呼吸的温度敏感性指数(Q_{10} 值)分别为 3.57、3.52 和 3.61,差异不大;用 3 个样地 3 a 的全部测定数据计算的 Q_{10} 值为 3.55;均大于全球 2.4

的中位值^[1].油松、草地和灌木地 10°C 时的基础土壤呼吸值(R_{10} 值)分别为 2.36、2.03 和 2.37 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,差异也不大;用 3a 中 3 个样地全部数据计算的 R_{10} 值为 2.25 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,接近于丹麦农田生态系统的 R_{10} 值^[18].将 3a 的测定数据以 7 月底为界分成两部分时,油松、草地和灌木地 8 月以前的 Q_{10} 值(2.76、2.29、2.61)小于 8 月之后的 Q_{10} 值(4.56、5.21、4.83),而 R_{10} 值差异不大[2.01、2.04、2.32 和 2.78、2.21、2.63 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$].Gaumont-Guay 等^[23]得出同样的结论,出现这种现象的原因与春末、夏初土壤的低水分对土壤呼吸抑制有关.在本研究测定的 3 个样地内,2007 年土壤水分最好, Q_{10} 值亦相对较大,与上述研究结论相一致. Q_{10} 不是恒定值,而是随土壤温度的季节变化而变化^[30, 33].Janssens 等^[33]在丹麦一个 80 a 林龄的林地对不同土壤温度时段和所对应的土壤呼吸值的分析表明,随土壤温度的增加 Q_{10} 值减小.Yuste 等^[20]在比利时的研究也表明, Q_{10} 值冬季最大,春秋次之,夏季最小.Lloyd 等^[30]发现在较冷的气候条件下具有较大的 Q_{10} 值。

尽管 3 个样地之间的植被完全不同,但是土壤呼吸及其与环境因子的关系均没有很大差异,表明在小尺度范围内植被类型的变化对土壤呼吸的影响程度不会发生质的变化,因此在山区进行土壤呼吸测定时,对于测定样点的选择在较小的尺度内可以不考虑植被类型对土壤呼吸的影响,应当首先考虑环境因子的垂直梯度变化如土壤质地对土壤呼吸的影响,其次考虑植被对土壤呼吸的影响,这样既可以减少野外工作量而又不至于影响测定数据的可靠性。

4 结论

3 年土壤呼吸的定位研究表明,在小尺度范围内,3 种不同植被条件下的土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的影响没有显著性差异.土壤呼吸的季节变化均受土壤温度季节变化的影响.但是,土壤水分特别是夏季土壤干旱对土壤呼吸也有明显的抑制作用.土壤呼吸与土壤温度的指数关系可以很好的预测土壤呼吸的季节变化, R^2 值在 0.60 ~ 0.81 之间, Q_{10} 值大多数在 3.3 ~ 3.7 之间, R_{10} 在 2.0 ~ 2.5 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 之间.根据实测的土壤呼吸值计算的 3 ~ 12 月的土壤 CO_2 释放在 854.9 ~ 1 297.2 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 之间,平均值为 1 052.2 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,3 种植被间差异不显著.用包含土壤温度和土壤水分的

双变量复合关系方程可以更好地预测土壤呼吸的季节变化,方程的 R^2 值绝大多数在 0.70 以上.研究结果对进一步认识陆地生态系统碳循环过程,特别是山区高海拔地区土壤呼吸以及生态系统碳平衡计算具有一定意义.

致谢:感谢郭陆、刘菊、荣燕美等同学的野外工作.

参考文献:

[1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, **44B**: 81-99.

[2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 7-20.

[3] Kang S, Doh S, Lee D, *et al.* Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1427-1437.

[4] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**: 199-209.

[5] Khomik M, Arain M, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**: 244-256.

[6] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration in *Picea abies* stands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 1625-1635.

[7] Dilustro J, Collins B, Duincan L, *et al.* Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **204**: 85-95.

[8] Melling L, Hatano R, Goh K J. Soil CO₂ flux from three ecosystems in tropical peatland of Sarawak, Malaysia[J]. *Tellus*, 2005, **57B**: 1-11.

[9] 吴建国,张小泉,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局[J]. *环境科学*, 2003, **24**(6): 23-32.

[10] 王小国,朱波,王艳强,等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. *生态学报*, 2007, **27**(5): 1960-1968.

[11] 黄湘,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河中下游怪柳群落土壤碳通量及其影响因子分析[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 1934-1940.

[12] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 35-45.

[13] Epron D, Farque L, Lucot E, *et al.* Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content[J]. *Ann For Sci*, 1999, **56**: 221-226.

[14] Epron D, Dantec V, Dufrene E, *et al.* Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest[J]. *Tree Physiology*, 2001, **21**: 145-152.

[15] Epron D, Ngao J, Granier A. Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six-year study[J]. *Ann For Sci*, 2004, **61**: 499-505.

[16] 程占红,张金屯,陈廷贵. 山西天龙山植被及植物资源[J]. *山地学报*, 2000, **18**(3): 226-230.

[17] Li H J, Yan J X, Yue X F, *et al.* Significance of soil temperature

and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 490-503.

[18] Soegaard H, Jensen N O, Boegh E, *et al.* Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modeling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **114**: 153-173.

[19] Jia B, Zhou G, Wang Y, *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**: 60-76.

[20] Yuste C J, Janssens I A, Carrara A, *et al.* Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest[J]. *Tree Physiology*, 2003, **23**: 1263-1270.

[21] Borken W, Xu Y, Davidson E, *et al.* Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests[J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 1025-1216.

[22] Savage K E, Davidson E A. Interannual variation of soil respiration in two New England forests[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**: 337-350.

[23] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, *et al.* Influence of temperature and drought on seasonal and interannual variation of soil, bole and ecosystem respiration in a boreal aspen stand [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**: 203-219.

[24] Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growing ponderosa pine forests[J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 1183-1194.

[25] Subke J, Reichstein M, Tenhunen J. Explaining temporal variation in soil CO₂ efflux in a mature spruce forest in southern Germany[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**: 1467-1483.

[26] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**: 687-696.

[27] Vincent G, Shahriari A R, Lucot E, *et al.* Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 2527-2535.

[28] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V. *et al.* Annual variation in the soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 851-866.

[29] Wu J, Guan D, Wang M, *et al.* Year-round soil and ecosystem respiration in a temperate broad-leaved Korea Pine forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **223**: 35-44.

[30] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, **8**: 315-323.

[31] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, *et al.* Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**: 220-235.

[32] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 217-227.

[33] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest[J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 911-918.