

黄土高原不同林龄刺槐林土壤呼吸研究

马景永¹, 张玉珍¹, 周波², 马涛², 张峰², 陈爱华², 高希旺¹, 武鹏艳¹

(1. 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730070)

摘要:采用 LI-8100 开路式土壤呼吸仪对不同林龄(10, 12, 13, 16 a)刺槐林土壤呼吸速率、温度、水分进行了测定。结果表明:(1) 不同林龄刺槐林土壤呼吸速率均呈现明显的日动态和季节动态, 表现出夏季>秋季>冬季;(2) 各林龄刺槐林土壤呼吸速率与大气温度、地表温度、5 cm 土壤温度均有很好的指数关系, 尤其与 5 cm 土壤温度的相关性最好, 且各林龄刺槐林的 Q_{10} 存在差异, 表现为随着林龄的增大, Q_{10} 值也随之增大;(3) 各林龄刺槐林土壤呼吸速率与土壤体积含水量具有很好的线性关系, 且相关性都达到了显著水平($p < 0.05$);(4) 各林龄刺槐林土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度、土壤体积含水量的综合作用也具有很好的相关性, 且都达到了极显著水平($p < 0.01$), 二者共同解释了土壤呼吸变异的 93.8%~98.1%, 且双因素模型远比单因素能够更好地解释刺槐林土壤呼吸速率的变异。

关键词:土壤呼吸; 动态变化; 影响因子; 不同林龄刺槐林

中图分类号:S714.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0098-07

Research on Soil Respiration in Different Ages of *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau

MA Jingyong¹, ZHANG Yuzhen¹, ZHOU Bo², MA Tao²,

ZHANG Feng², CHEN Aihua², GAO Xiwang¹, WU Pengyan¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation of Gansu, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The soil respiration, temperature and moisture in the different forest ages (10, 12, 13, 16 years) of *Robinia pseudoacacia* were determined by using the LI-8100 open-type soil respiration apparatus. The results showed that: (1) the soil respiration rates in different forest ages of locust forest showed a significant diurnal and seasonal dynamics, and followed the seasonal sequence of summer>autumn>winter; (2) there is a good exponential relationship between the three temperatures and the soil respiration rates in different forest ages of locust forest, especially there is the best correlation with soil temperature in 5 cm layer and there are differences in Q_{10} between the different forest ages of locust forest, Q_{10} was associated with the increase of forest ages; (3) a highly significant linear correlations between the soil respiration rate and the soil volumetric water content in the different forest ages of locust forest were observed($p < 0.05$); (4) the comprehensive effect of soil respiration rate and soil temperature in 5 cm depth and soil volumetric water content in the different forest ages of locust forest, has a highly significant linear correlation($p < 0.01$) which can explain soil respiration variation of 93.8%~98.1%, and two-factor model explaining locust forest soil respiration rate variability is better than single-factor model.

Keywords: soil respiration; dynamic variation; influence factor; different ages of *Robinia pseudoacacia*

全球温室效应、气候变暖、环境污染、土地退化等生态问题严重威胁着人类的生存和社会经济的进一步发展,已经成为全球共同关注的焦点问题之一,其中 CO_2 是主要的温室气体,对全球变暖的作用达到了 60%以上^[1]。土壤是一个巨大的碳库,全球每年由土

壤释放出的 CO_2 量已经达到 68 Pg/a,仅次于全球总的初级生产力,等于或高出了全球陆地生态系统的净初级生产力^[2],并且远大于由化石燃料燃烧所排放出的 CO_2 量,是化石燃料燃烧所排放 CO_2 的 10 倍及以上^[3]。土壤碳库的细微改变都能显著地缓解或加重大

收稿日期:2014-08-10

修回日期:2014-09-07

资助项目:甘肃省科技支撑计划“黄土丘陵沟壑区坡耕地、梯田土壤呼吸特征研究”(1204FKCA069);甘肃省水利重点科研计划“陇中坡改梯土壤呼吸特征及水土保持优化技术研究”(2012[255])

第一作者:马景永(1987—),男,甘肃武威人,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:1046455503@qq.com

通信作者:张玉珍(1963—),女,山西朔州人,副教授,主要从事水土保持研究。E-mail:zhangyz@gsau.edu.cn

气中 CO₂ 浓度,继而将会影响到全球气候的改变^[4]。森林是世界上重要的生态系统之一,森林土壤中所储存的有机碳含量在全球碳库中占有非常重要的地位,大约占全球土壤碳总量的 73%^[5],在全球碳的动态平衡中森林土壤起着非常重要的作用。在全球气候变暖和生态环境恶化的背景下,研究森林土壤呼吸速率及其与影响因子的作用机制,对于探究全球 CO₂ 的动态变化以及所产生的影响,具有非常重要的意义。

当前对于森林土壤的研究主要分布在不同植被类型、不同植被的分布区域等的土壤碳排放量以及影响土壤呼吸速率的各种限制性因子(如气候因素、环境因素以及人为因素等)的研究,而对森林林龄的研究却相对比较少。刺槐是西北黄土高原地区重要的造林树种,栽植历史悠久,分布广泛,并且在维护陆地生态平衡等方面起着重要的作用。对刺槐不同林龄生态系统表面 CO₂ 释放的研究,对于评估不同林龄刺槐林生态系统碳收支非常关键,同时对于评估我国西北黄土高原地区森林生态系统在全球碳循环中所起的作用和地位具有很现实的意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省平凉市泾川县田家沟流域,距县城西北部 3 km,107°15′—107°23′E、35°21′—35°27′N,海拔 1 028~1 374 m,相对高差 346 m。该区属黄土高原沟壑区,温带半湿润气候,四季分明,日照充足,夏季炎热,冬季微寒。年平均气温 10.1℃,极端最低气温 -24℃,极端最高气温 40.0℃,太阳总辐射量 542.661 J/cm²,≥10℃积温 2 863℃,年均降水量 514.5 mm,年均蒸发量 1 237.9 mm,最大冻土深 55 cm,相对湿度 70%,日照时数 2 274 h,无霜期 174 d。土壤主要有黄绵土、灰褐土、红胶土,土壤总体表现为钾丰富,缺氮少磷,有机质含量少。植被分为天然植被和人工植被两大类。天然植被以旱生植物为主,主要包括豆科、禾本科、菊科等一百多种。天然残存灌木如紫荆、狼牙刺、沙棘、杜梨、酸枣、枸杞等十多种;人工栽植的植被种类繁多,资源丰富,主要以用材树种和经济树种为主,如刺槐、侧柏、杨、柳、臭椿、榆、楸、泡桐及苹果、梨、桃、杏、花椒等常用造林树种为主。

1.2 土壤呼吸和相关环境因子的测定

本研究采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-8100 开路式土壤呼吸仪,于 2013 年 6 月至 2014 年 1 月在田家沟流域具有代表性的刺槐林进行了不同林龄土壤呼吸速率的测定。每个林龄各设置 1 个样地,样地基本情况见表 1,在每个样地上分别随机设置 5 个重复。将

标准规格的 PVC 土壤隔离环于测定前 1 d 打入土中约 3~4 cm 深,以减少每次测定前安放呼吸室对土壤的扰动,以后每个月的测定在固定土壤圈上进行,并且在每次测定前一天,将测定点土壤隔离圈内的地表植被自土壤表层彻底剪除,尽量不破坏土壤,以减少土壤扰动及根系损伤对测定结果的影响。每次测定于早晨 9:00 开始,然后依次为 11:00,13:00,15:00,17:00,20:00,23:00,2:00,5:00,最终到次日早晨 7:00 结束。土壤隔离环固定不动,每个土壤隔离环重复测定 3 次。

表 1 刺槐不同林龄林分样地基本调查

林龄/ a	平均 胸径/cm	平均 树高/m	地理坐标	高程/ m	密度/ (株·hm ⁻²)
10	8.21	8.33	35°22′16″N 107°21′29″E	1077	3575
12	9.19	8.79	35°22′46″N 107°21′19″E	1076	3669
13	9.85	9.41	35°22′25″N 107°21′24″E	1098	3215
16	11.62	10.64	35°22′58″N 107°21′46″E	1074	3892

测定土壤呼吸速率的同时,分别用 LI-8100 便携式 CO₂ 分析仪自带温度探针和土壤水分计插入各小样方内土壤环的周围,来测定 5 cm 的土壤温度和土壤体积分含水量,每次测定 3 次重复,且从自带的温度计同步测定各时间点的大气温度,而地表温度则用 LI-8100 自动测定。

1.3 数据分析

为探讨 4 个林龄刺槐林土壤呼吸速率与温度的关系,采用指数回归模型进行拟合:

$$R=ae^{bT}$$
 (1)

式中:R——土壤呼吸速率;T——温度(℃);a,b——待定参数。

Q₁₀采用指数关系模型进行计算:Q₁₀=e^{10b},其中 b 为模型为 R=ae^{bT} 中的 b 值。

为探讨 4 个林龄刺槐林土壤呼吸速率与土壤水分的关系,采用线性回归模型进行拟合:

$$R=aW+b$$
 (2)

式中:R——土壤呼吸速率;W——土壤体积分含水量;a,b——待定参数。

为探讨 4 个林龄刺槐林土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸速率的共同影响,采用双因素关系模型进行拟合:

$$R=aT+bW+c$$
 (3)

式中:R——土壤呼吸速率;T——温度(℃);W——土壤体积分含水量;a,b,c——待定参数。

所有数据利用 SPSS 11.5 (SPSS, Chicago, IL, USA) 软件和 Excel 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 四个林龄刺槐林土壤呼吸的日变化动态

由图1可知,夏季和秋季各林龄刺槐林土壤呼吸速率的昼夜变化规律基本一致,都表现为昼高夜低,且昼夜变化都为单峰型曲线。一般从早上9:00开始,随着土壤温度的升高,土壤呼吸速率逐渐增大,在11:00—15:00时达到最大值,随后土壤温度逐渐下降,土壤呼吸速率也相应减小,次日5:00—7:00时达到最小值。

夏季10,12,13,16 a土壤呼吸速率昼夜变化范围分别为:2.19~1.54,2.99~2.13,4.03~3.25,4.94~3.98 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。日平均土壤呼吸速率分别为1.78,2.54,3.67,4.49 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其大小依次为:10 a<12 a<13 a<16 a;土壤呼吸速率昼夜变化幅度分别为:36.6%,33.9%,21.2%,21.9%,变化幅度依

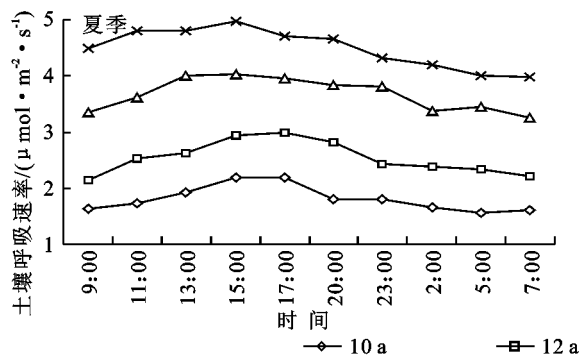


图1 夏季、秋季各林龄刺槐林土壤呼吸速率昼夜变化

2.2 四个林龄刺槐林土壤呼吸的季节变化动态

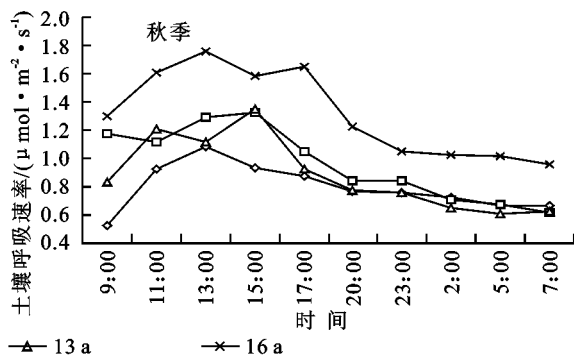
由图2可以看出,土壤呼吸速率在各季节间存在明显差异。10,12,13,16 a刺槐林夏季的土壤呼吸速率最大,其次是秋季,冬季的土壤呼吸速率最小,且夏季的土壤呼吸速率远大于秋季和冬季。其原因是:研究的刺槐林生态系统,夏季日辐射能量高,日照时数长,日照百分率大。同时,植物在夏季较其他季节来说,生产力最强,处于生长顶峰时期,使得通过光合作用同化产生干物质的量最多,并远大于植物因呼吸作用放出的C量,因此在植物根系及土壤中聚集了大量的C。又因为夏季土壤水热条件优越,土壤微生物活动剧烈,植物根系分解速度快,促使土壤以较快的速度排放CO₂。秋、冬季节土壤呼吸速率最小的原因是植物在此时处于生长末期或休眠期,基本停止生长,同时环境状况也不及夏季优越,制约了土壤生物的活动,从而使土壤呼吸速率在秋、冬两季较小。

2.3 土壤呼吸速率与环境因子的关系

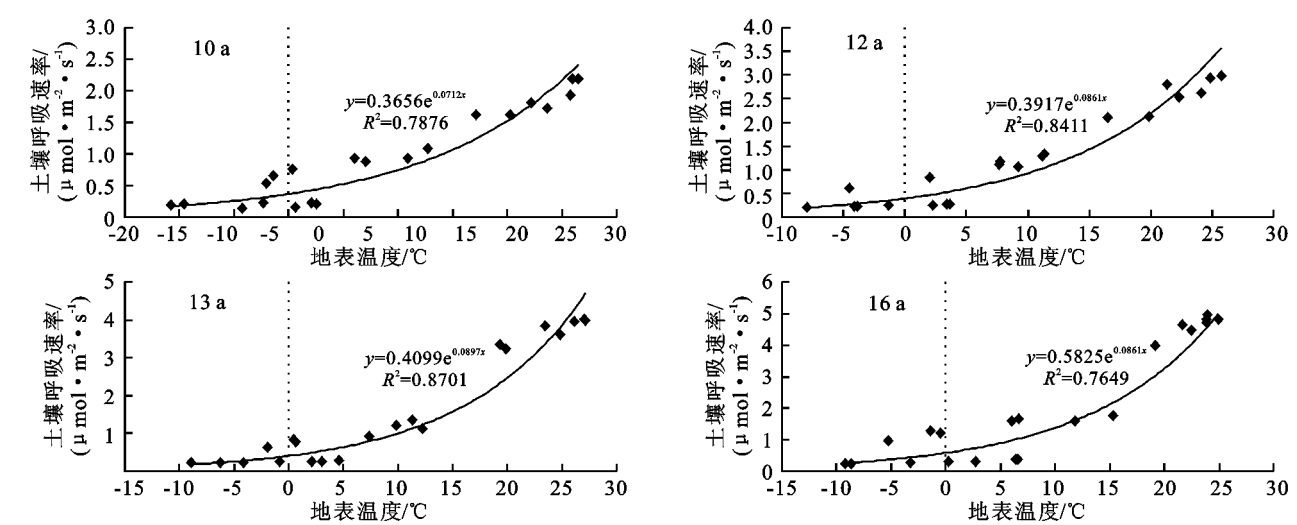
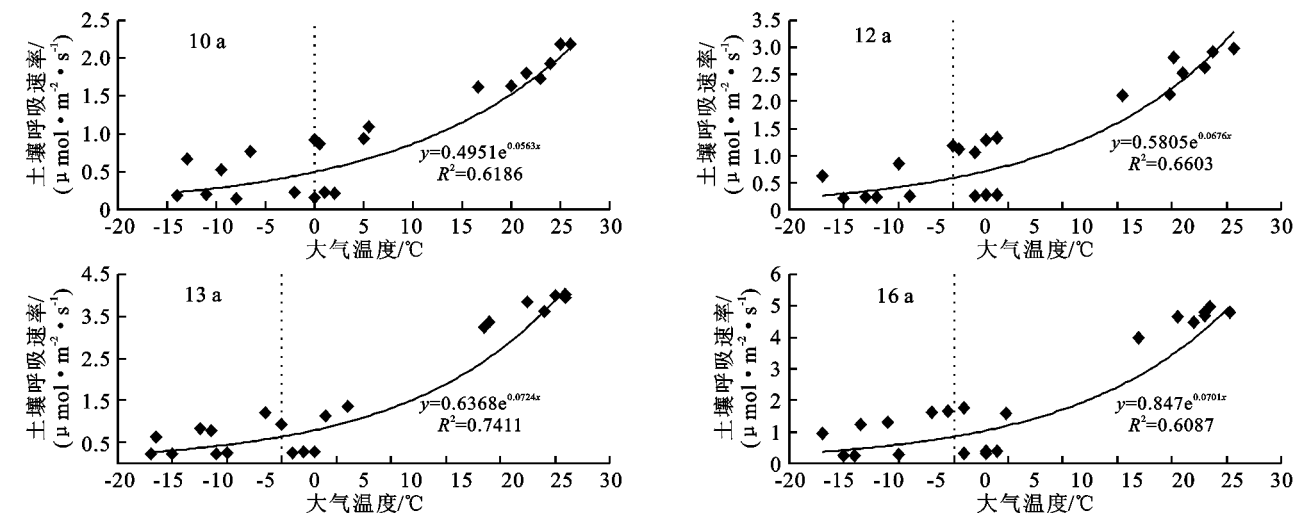
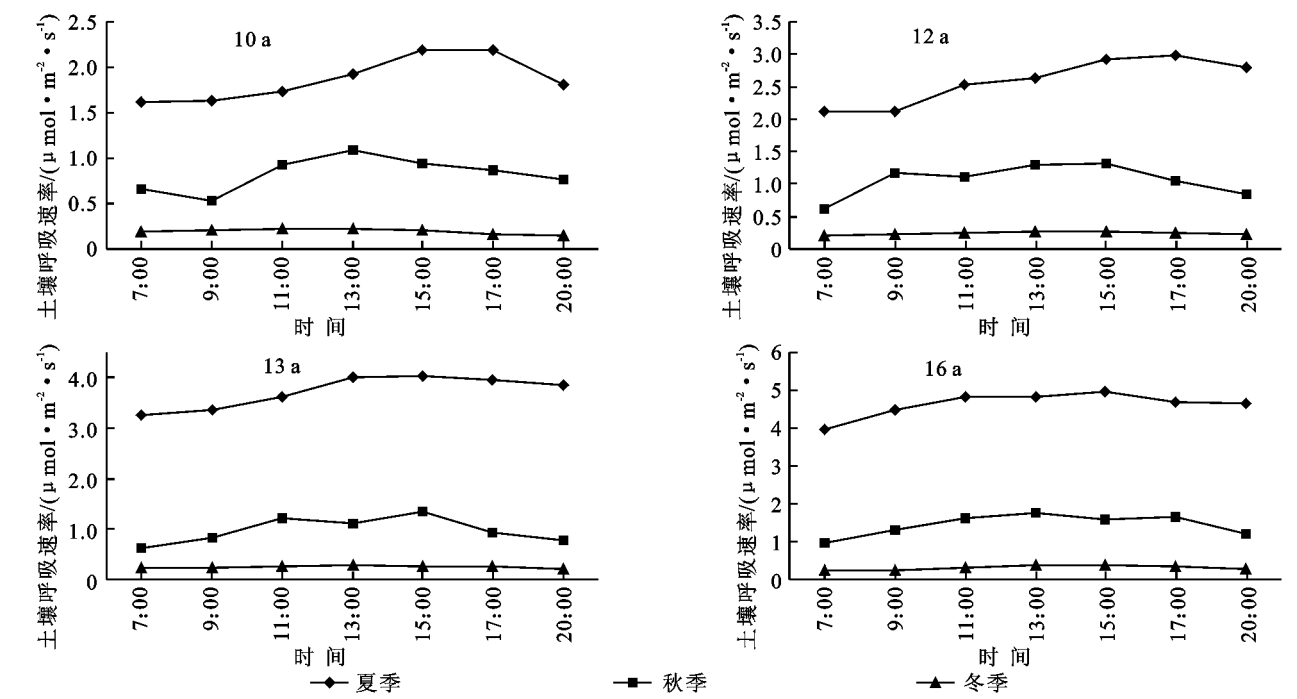
2.3.1 土壤呼吸速率与温度的关系 4个林龄刺槐林土壤呼吸速率与大气温度、地表温度和5 cm土壤温度均有很好的指数关系(图3,4,5)。由表2可

次为:13 a<16 a<12 a<10 a。经方差分析可知,4个林龄刺槐林地土壤呼吸速率昼夜变化的差异达到了极显著($p<0.01$)。经多重分析比较可知,10,12,13,16 a刺槐林的土壤呼吸速率的差异都显著。

秋季10,12,13,16 a土壤呼吸速率昼夜变化范围分别为:1.09~0.53,1.32~0.61,1.35~0.61,1.76~0.96 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。日平均土壤呼吸速率分别为0.79,0.96,0.88,1.32 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其大小依次为:10 a<13 a<12 a<16 a;土壤呼吸速率昼夜变化幅度分别为:70.4%,73.7%,84.2%,60.9%,变化幅度依次为:16 a<10 a<12 a<13 a。经方差分析可知,4个林龄刺槐林地土壤呼吸速率昼夜变化的差异达到了极显著($p<0.01$)。经多重分析比较可知,16 a刺槐林地的土壤呼吸速率与10,12,13 a刺槐林地的土壤呼吸速率差异显著,10,12,13 a刺槐林地的土壤呼吸速率差异不显著。



知,4个林龄刺槐林土壤呼吸速率与大气温度、地表温度和5 cm土壤温度的相关性都达到了极显著($p<0.01$),且大气温度、地表温度、5 cm土壤温度和土壤呼吸速率的拟合度都非的好,其中拟合度最好的是5 cm土壤温度,其次是地表温度和大气温度。4个林龄刺槐林土壤呼吸速率与5 cm土壤温度的 R^2 达到了0.843,0.944,0.975,0.923,说明5 cm土壤温度能够解释土壤呼吸速率变异百分比分别是84.3%(10 a),94.4%(12 a),97.5%(13 a),92.3%(16 a),平均达到92.1%,这与5 cm土壤温度能够较为客观地反映植物根系与土壤微生物活动的环境有关;4个林龄刺槐林土壤呼吸速率与地表温度的 R^2 分别为:0.788,0.841,0.87,0.765,说明地表温度能够解释土壤呼吸速率变异百分比分别是78.8%(10 a),84.1%(12 a),87%(13 a),76.5%(16 a),平均为81.6%;而4个林龄刺槐林地土壤呼吸速率与大气温度的 R^2 分别为:0.619,0.66,0.741,0.609,说明大气温度能够解释土壤呼吸速率变异百分比分别是61.9%(10 a),66%(12 a),74.1%(13 a),60.9%(16 a),平均为65.7%。



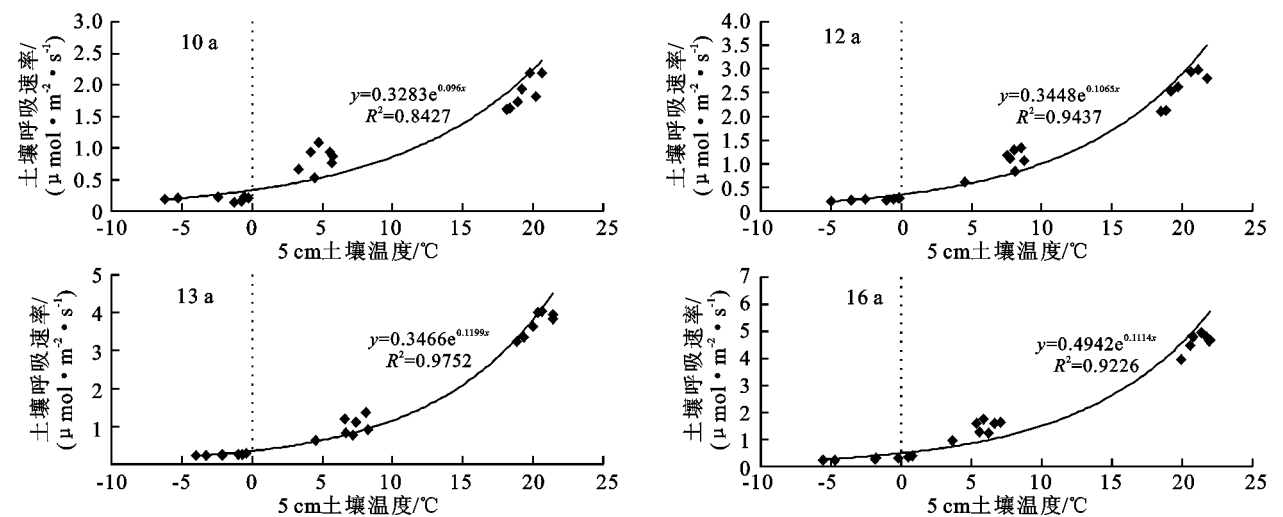


图 5 不同林龄刺槐林土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度的关系

另外表示温度与土壤呼吸速率关系的另一个重要参数是 Q_{10} 。 Q_{10} 为温度敏感性指数,表示温度每升高 10°C ,土壤呼吸速率所增加的倍数, Q_{10} 越高表明土壤呼吸速率对温度的依赖性越大^[6]。本文就不同林龄刺槐林的大气温度、地表温度、5 cm 土壤温度和土壤呼吸速率的 Q_{10} 关系进行了探讨,结果见表 2。

表 2 不同林龄刺槐林土壤呼吸速率与大气温度、地表温度、5 cm 土壤温度的关系

林分	温度值	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>F</i>	<i>p</i>	Q_{10}
10 a	大气温度	0.495	0.056	0.619	30.82	0.00	1.75
	地表温度	0.366	0.071	0.788	70.44	0.00	2.03
	5 cm 土壤温度	0.328	0.096	0.843	101.74	0.00	2.61
12 a	大气温度	0.581	0.068	0.660	36.93	0.00	1.97
	地表温度	0.392	0.086	0.841	100.57	0.00	2.36
	5 cm 土壤温度	0.345	0.106	0.944	318.70	0.00	2.89
13 a	大气温度	0.637	0.072	0.741	54.40	0.00	2.05
	地表温度	0.410	0.090	0.870	127.28	0.00	2.46
	5 cm 土壤温度	0.347	0.120	0.975	746.43	0.00	3.32
16 a	大气温度	0.847	0.070	0.609	29.56	0.00	2.01
	地表温度	0.583	0.086	0.765	61.82	0.00	2.36
	5 cm 土壤温度	0.494	0.111	0.923	226.61	0.00	3.03

从表 2 中可以看出,10,12,13,16 a 刺槐林中随着林龄的增加大气温度的 Q_{10} 分别为:1.75,1.97,2.05,2.01;地表温度的 Q_{10} 分别为:2.03,2.36,2.46,2.36;5 cm 土壤温度的 Q_{10} 分别为:2.61,2.89,3.32,3.03。4 个林龄刺槐林中 5 cm 土壤温度的 Q_{10} 值均大于地表温度和大气温度的,说明土壤呼吸对 5 cm 土壤温度的变化最为敏感,与其相关性也最好,其次是地表温度和大气温度。另外,在 4 个林龄刺槐林之间,除了 13 a 的 Q_{10} 大于 16 a 的 Q_{10} 外,一般随着林龄的增大, Q_{10} 值也随着增大。

2.3.2 土壤呼吸速率与土壤湿度的关系 土壤水分也是影响土壤呼吸的重要因子。由图 6 可以看出,土壤呼吸速率与土壤体积含水量具有很好的线性关系,土壤体积含水量可以解释 4 个林龄刺槐林土壤呼吸

速率的百分比分别为:50.4%(10 a),47.6%(12 a),19.4%(13 a),45.2%(16 a)。同时,线性模型在低含水量的拟合效果要好于高含水量的拟和效果,含水量较低时,土壤呼吸的散点都聚集在曲线附近,随着含水量的升高,散点渐渐发散开来,这可能是在低于田间持水量时,水分直接影响土壤微生物的生长、可溶性有机物扩散以及微生物与底物的接触,从而强烈影响土壤呼吸。

2.3.3 土壤呼吸速率与温度、湿度的关系 以上研究的是土壤呼吸与温度和土壤体积含水量单个因子之间的相关关系,但土壤湿度总是和土壤温度一起对土壤呼吸产生影响。有研究表明:土壤呼吸变异中至少有 60% 来自于土壤温度和水分的共同作用^[7]。土壤温度和土壤水分的相互作用使得土壤呼吸与

两者之间的关系变得复杂化,特别在野外条件下的土壤呼吸测定,所测得的土壤呼吸实际上是许多因

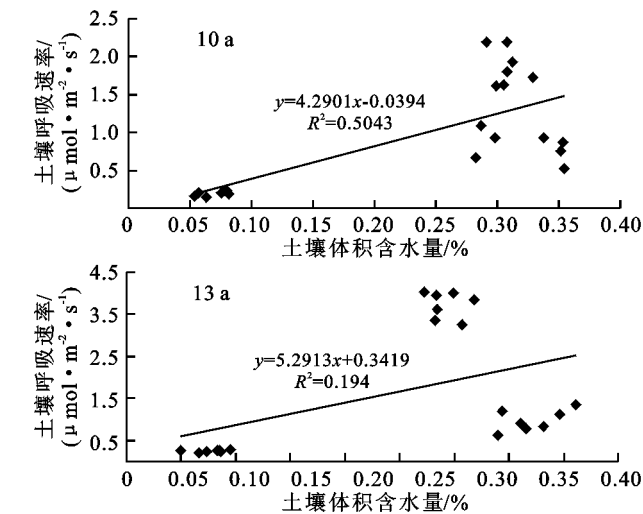


图 6 不同林龄刺槐林土壤呼吸速率与土壤体积分含水量的关系

通过以上分析得知,土壤呼吸与 5 cm 土壤温度的相关性最好,故选择 5 cm 土壤温度和土壤体积分含水量作为变量,对土壤呼吸速率做多元线性回归分析。从分析的结果中,我们可以得到不同林龄刺槐林土壤呼吸速率和温度、水分的关系模型(表 3)。

表 3 不同林龄刺槐林土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度、土壤体积分含水量的关系

林分	回归方程	R^2	p
10 a	$y=0.275+0.714W+0.070T$	0.938	0.00
12 a	$y=0.532-1.135W+0.119T$	0.964	0.00
13 a	$y=0.797-2.925W+0.185T$	0.981	0.00
16 a	$y=0.689-0.936W+0.197T$	0.974	0.00

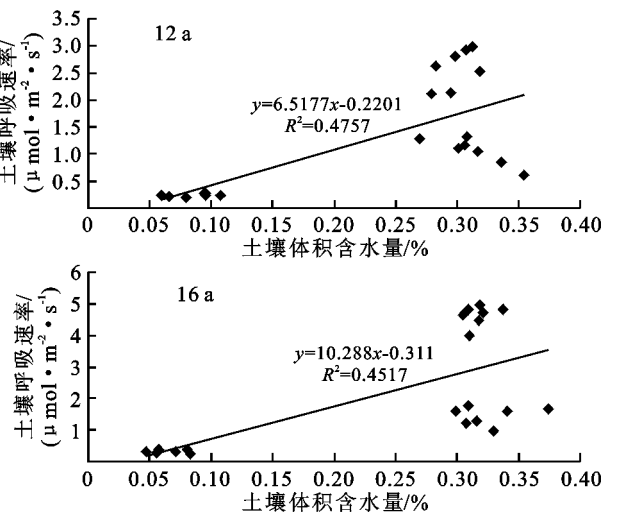
结果表明,4 个林龄刺槐林土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度、土壤体积分含水量的综合作用具有很好的相关性,且都达到了极显著水平($p<0.01$)。4 个林龄刺槐林土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度、土壤体积分含水量的 R^2 分别为:0.938,0.964,0.981,0.974。说明 5 cm 土壤温度和土壤体积分含水量的多元回归模型可共同解释土壤呼吸变异的 93.8%~98.1%,且双因素模型远远比单因素能够更好地解释刺槐林土壤呼吸速率的变异。

3 结论与讨论

3.1 土壤呼吸速率的变化动态

土壤呼吸速率具有显著的昼夜变化特征。本研究中各林龄刺槐林土壤呼吸速率的昼夜变化规律基本一致,都表现为昼高夜低,且昼夜变化都为单峰型曲线,这与其他学者的研究结果一致。严俊霞等^[9]对黄土高原柠条人工林土壤呼吸的研究发现土壤呼吸的昼夜变化特征比较明显,最大值出现在 14:00 左

右,最低值出现在凌晨;同时龚斌等^[10]对中亚热带森林土壤呼吸研究发现:不同类型的森林土壤呼吸昼夜变化均为单峰型曲线,且土壤呼吸在白天的变化幅度较大,而夜间变化幅度较小,土壤呼吸的最大值大概出现在 11:00—14:00。



右,最低值出现在凌晨;同时龚斌等^[10]对中亚热带森林土壤呼吸研究发现:不同类型的森林土壤呼吸昼夜变化均为单峰型曲线,且土壤呼吸在白天的变化幅度较大,而夜间变化幅度较小,土壤呼吸的最大值大概出现在 11:00—14:00。

另外,世界上所有的森林类型均已测定了土壤呼吸的季节变化,且大多研究均发现土壤呼吸在夏季最高,而在冬季最低。本研究中不同林龄刺槐林土壤呼吸的季节变化模式也与此类似,并与我国亚热带其他研究相似。如张劲松等^[11]对华北地区的某一刺槐林的研究发现,刺槐林土壤呼吸具有明显的季节变化特征,全年呈现出单峰变化趋势。具体表现为,1—3 月土壤呼吸速率较低,从 4 月开始逐渐上升,直到 7 月达到最大值,而后开始逐渐下降,直至 11 月约降低至 1—3 月时的水平,并保持到 12 月。

3.2 温度对土壤呼吸速率的影响

温度是影响土壤呼吸速率的重要因子。土壤呼吸速率会随着温度的升高而增加,从而将导致土壤中碳的损失,并且会进一步加剧全球变暖的趋势。本研究中,土壤呼吸速率与大气温度、地表温度都呈显著指数关系($p<0.01$)。大气温度解释了土壤呼吸速率变化的 60.9%~74.1%,而地表温度解释了土壤呼吸速率变化的 76.5%~87%。地表温度对土壤呼吸速率的影响大于大气温度。这与尉海东等^[12]关于中亚热带 3 种主要人工林的土壤呼吸动态研究结果相似。

5 cm 土壤温度是影响土壤呼吸速率的另一重要因素。大气温度的变化会引起 5 cm 土壤温度变化,进而会影响到植物根系呼吸作用、土壤微生物活动、凋落物和土壤中有有机质分解等方面,因此土壤呼吸速

率也会随着5 cm土壤温度的变化而变化。当其他环境因子不是最主要的影响因子时,土壤呼吸速率和5 cm土壤温度之间的相关性非常高。本研究表明,不同林龄刺槐林的土壤呼吸速率与5 cm土壤温度为极显著指数关系($p < 0.01$),5 cm土壤温度解释了土壤呼吸速率变化的84.3%~97.5%,明显大于大气温度和地表温度的,这与其他学者的研究结果一致。吴仲民等^[13]对热带森林进行研究发现,土壤呼吸速率与5 cm土壤温度的关系为极显著指数关系;周存宇等^[14]对鼎湖山针阔叶混交林进行研究发现,土壤呼吸速率与大气温度、地表温度、5 cm土壤温度等都呈现显著的指数关系,且5 cm土壤温度能够解释土壤呼吸变异的百分比明显大于地表温度和大气温度的。

Q_{10} 一般在1.3~3.3变化,其中值为2.4^[2]。本研究表明,不同林龄林分土壤呼吸速率对于增温的响应是不同的,即在不同的林龄林分具有不同的 Q_{10} 。大气温度与土壤呼吸速率的 Q_{10} 分为:1.75~2.05。地表温度与土壤呼吸速率的 Q_{10} 为:2.03~2.46。5 cm土壤温度与土壤呼吸速率的 Q_{10} 为:2.61~3.32。土壤呼吸速率与3个温度值的 Q_{10} 都落入1.3~3.3区间,这与国内外的研究基本一致。Dorr等^[15]在对德国的一个草地和一个山毛榉—云杉林进行的多年研究发现, Q_{10} 的变化范围为1.4~3.1,在湿润的年份较低,干燥的年份较高。彭家中等^[16]对祁连山青海云杉土壤呼吸的研究发现,大气温度、地表温度和5 cm土壤温度的 Q_{10} 值分别为2.67,2.23,4.17。

3.3 土壤湿度对土壤呼吸速率的影响

土壤湿度和土壤呼吸速率的关系具有不确定性,土壤湿度通常会对植物的根系分布和呼吸作用、微生物活性等产生影响,从而会对土壤呼吸速率产生影响。一般用于模拟土壤湿度与土壤呼吸速率之间关系的模型很多,但差异却很大,常见的有线性、对数、指数以及二次方等^[17]。由于土壤湿度的测定方法多种多样,同时影响土壤呼吸速率的因素也很多,从而导致了土壤湿度与土壤呼吸之间的关系非常复杂,不同研究者的研究结果差异很大。但土壤湿度和土壤呼吸速率之间的关系也不是毫无规律可寻的,一般在一定含水量范围内土壤呼吸速率随着含水量的增大而增大,在土壤含水量接近土壤田间持水量的范围内,土壤呼吸量最高,而土壤含水量达到饱和时或处于萎蔫含水量时,土壤呼吸则会停止^[18]。本研究表明,土壤呼吸与土壤湿度具有很好的线性关系($p < 0.05$),说明该林地土壤湿度对土壤呼吸的影响也很重要。

3.4 土壤温度、土壤湿度共同对土壤呼吸速率的影响

土壤温度和土壤湿度不仅仅单独对土壤呼吸起作

用,通常在自然环境中,土壤呼吸往往受二者共同作用。由于根系呼吸和微生物呼吸是土壤呼吸的两个重要组成部分,而这两部分常常受温度和水分的很大影响,所以在一般情况下这两种呼吸作用都会随着温度和水分的增大而增大。但这种增大趋势并不是无限的,当温度和水分处于对土壤呼吸不利的条件下时,土壤呼吸往往会减小甚至停止。有研究者发现土壤温度和湿度可以共同解释土壤呼吸变异中的60%以上^[19]。

本研究表明,土壤温度、土壤湿度共同解释了土壤呼吸变化的比例分别为:93.8%(10 a),96.4%(12 a),98.1%(13 a),97.4%(16 a),双因素回归模型很好地解释了土壤呼吸速率的季节变化。这与国内外其他学者的研究结果一致。Rey等^[20]对栋树矮林研究发现,温度和湿度共同解释了土壤呼吸年变化的91%。Keith^[21]观察到土壤温度、土壤和凋落物湿度解释了胶树林土壤呼吸变化的97%。杨玉盛等^[22]对某一森林生态系统研究发现,土壤呼吸变异的80%~96%可以用土壤温度与湿度共同解释,且土壤温度和湿度与土壤呼吸之间的相关性均达到极显著水平,也就是说温度和水分共同影响着土壤的呼吸作用。

参考文献:

- [1] Malhi Y, Grace J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(8):332-337.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus B, 1992, 44(2):81-99.
- [3] Fernandez I J, Son Y, Kraske C R, et al. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4):1115-1121.
- [4] 刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J].生态学报,1997,17(5):469-476.
- [5] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298:156-159.
- [6] 史宝库,金光泽,汪兆洋.小兴安岭5种林型土壤呼吸时空变异[J].生态学报,2012,32(17):5416-5428.
- [7] 尉海东.中亚热带三种人工林生态系统碳贮量及土壤呼吸研究[D].福州:福建农林大学,2005:39-50.
- [8] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountain[J]. Plant and Soil, 2001, 237(1):15-23.
- [9] 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.

- [6] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, 28(3): 323-344.
- [7] Wood J. The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models [D]. Leicester: University of Leicester, 1996.
- [8] Ritter P. A vector-based slope and aspect generation algorithm [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1987, 53(8): 1109-1111.
- [9] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications [J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5(1): 3-30.
- [10] 刘学军, 张平. DEM 坡度、坡向有效尺度范围 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2008, 33(12): 1254-1258.
- [11] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性 [J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 824-830.
- [12] 邓仕虎, 杨勤科. DEM 采样间隔对地形描述精度的影响研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2010, 26(2): 23-26.
- [13] Vaze J, Teng J, Spencer G. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(10): 1086-1098.
- [14] 陈楠. 基于地形因子信息量的数字高程模型分辨率的选择: 以黄土高原的研究为例 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(6): 692-695.
- [15] 胡鹏. 新数字高程模型: 理论、方法、标准和应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2007: 46-64.
- [16] 李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000: 60-72.
- [17] 汤国安, 刘学军, 房亮, 等. DEM 及数字地形分析中尺度问题研究综述 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2006, 31(12): 1059-1066.
- [18] Famiglietti J S, Rudnick J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hill slope transects: Rattlesnake Hill, Texas [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1): 259-281.
- [19] Western A W, Grayson R B, Bloch G, et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(3): 797-810.
- [20] 牟乃夏, 刘文宝, 王海银. ArcGIS 10 地理信息系统教程 [M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [21] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度制图图中坡度分级方法的比较研究 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 157-160, 192.
- [22] 陈楠. DEM 分辨率变化对坡度误差的影响 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(5): 594-598.

(上接第 104 页)

- [10] 龚斌, 王凤玉, 张继平, 等. 中亚热带森林土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的关系 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1275-1281.
- [11] 张劲松, 孟平, 王鹤松, 等. 华北石质山区刺槐人工林的土壤呼吸 [J]. *林业科学*, 2008, 44(2): 8-14.
- [12] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带 3 种主要人工林的土壤呼吸动态 [J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2006, 35(3): 272-277.
- [13] 吴仲民. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 416-423.
- [14] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(4): 23-27.
- [15] Dörr H, Münnich K O. Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone [J]. *Tellus B*, 1987, 39(1-2): 114-121.
- [16] 彭家中, 常宗强, 冯起. 温度和土壤水分对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(3): 165-169.
- [17] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [18] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant and Soil*, 1997, 190(1): 127-141.
- [19] 李凌浩, 陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸 [J]. *生态学杂志*, 1998, 17(4): 45-51.
- [20] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 851-866.
- [21] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains [J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(1): 15-23.
- [22] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应 [J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 583-591.