

# 毛白杨人工林生长季根呼吸特征研究

郭 健<sup>1</sup>,康永祥<sup>1\*</sup>,夏国威<sup>2</sup>,周 威<sup>1</sup>,邢振杰<sup>1</sup>,王 富<sup>1</sup>,王玉东<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2. 中国林业科学研究院 林业研究所,北京 100091)

**摘要:**阐明渭河沿岸区 2 块不同年龄毛白杨人工林根呼吸特征及其环境因子之间的关系。2014 年 5—10 月,利用 Li-6400 设备结合挖壕法测定退耕还林后 40 年毛白杨人工林(样地 I)及退耕 5 a 毛白杨与 84K 杨混交林(样地 II)的生长季根呼吸速率动态变化与地下 10 cm 处土壤温湿度。结果表明,2 块样地的生长季根呼吸速率变化具有明显的月动态,月均值变化趋势均呈单峰曲线;样地 I 与样地 II 的根呼吸生长季平均贡献率分别为 25.64%、25.26%,根呼吸速率月均变化范围分别为 0.48~1.44  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、0.38~1.18  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,生长季均值分别为 0.87、0.79  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;样地 I 与样地 II 的根呼吸速率与其对应土壤温度呈极显著的相关关系( $p<0.01$ ),地下 10 cm 处的  $Q_{10}$  值分别为 4.22 和 4.45,样地 I 根呼吸速率与土壤湿度无显著相关关系( $p>0.05$ ),样地 II 土壤呼吸速率与土壤湿度间有显著的负相关关系。影响 2 块样地的根呼吸速率的最主要因子是土壤温度,样地 I 根呼吸速率的温度敏感性小于样地 II。

**关键词:**挖壕法;土壤温湿度;毛白杨;生长季;根呼吸

**中图分类号:**S718.51      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)02-0015-05

Characteristics of Root Respiration in Growing Period of *Populus tomentosa* Plantations

GUO Jian<sup>1</sup>, KANG Yong-xiang<sup>1\*</sup>, XIA Guo-wei<sup>2</sup>, ZHOU Wei<sup>1</sup>, XING Zhen-jie<sup>1</sup>, WANG Fu<sup>1</sup>, WANG Yu-dong<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The study was to clarify the characteristics of root respiration and its relationship with environmental factors in growing period of *Populus tomentosa* plantations with different ages in the region of Weihe River. Root respiration rates and temperature-humidity of soil at 10 cm depth in growing period in 40-year-old *P. tomentosa* plantation (sample plot I) and 5-year-old *P. tomentosa* + 84K plantation (sample plot II) after returning farmland to forest were measured by trenching and Li-6400 system from May to October in 2014. Results showed that the root respiration rates had a significant monthly dynamic changes with unimodal curves in sample plot I and II. The average contributions of root respiration rates of plot I and II were 25.64% and 25.26%, respectively. The average monthly rates of root respiration ranged 0.48~1.44  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and 0.38~1.18  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . The average rates in growing period were 0.87 and 0.79  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . The relationships between root respiration and soil temperature at 10 cm depth could be described by exponential equations in the sample plot I and II, and the  $Q_{10}$  value were 4.22 and 4.45, respectively. There was no significant correlation between root respiration and soil moisture in the sample plot I, but in the sample plot II, there was significant and negative correlation among them. Main factor affecting the root respiration was soil temperature at 10 cm depth in two sample plots. Root respiration in sample plot I was lower in temperature sensitivity than in sample plot II.

收稿日期:2015-04-08 修回日期:2015-05-29

基金项目:国家公益性行业项目“陕西、宁夏森林生态系统系统服务功能定位观测与评估技术”(200704005/WB06)。

作者简介:郭 健,男,硕士研究生,研究方向:森林景观动态监测。E-mail:497722248@qq.com

\* 通信作者:康永祥,男,博士,教授,研究方向:森林生态与树木学。E-mail:yxkang@nwafu.edu.cn

**Key words:** trenching; soil temperature-humidity; *Populus tomentosa*; growing period; root respiration

土壤呼吸是指未扰动土壤中产生 CO<sub>2</sub> 的所有代谢过程<sup>[1]</sup>,是碳循环的主要通量过程,主要包括植物根呼吸、土壤微生物呼吸和土壤表面凋落物呼吸 3 个过程<sup>[2]</sup>,其中根呼吸是土壤碳源的重要组成部分,对土壤碳循环影响显著。

20 世纪 80 年代开始,根呼吸对全球气候变化的重要影响引起了国内外研究学者的关注,影响根呼吸的环境因子、根系呼吸的变化特点及根呼吸占土壤总呼吸的比例等一系列问题成为了研究热点。目前,国内外关于林木根呼吸的测定方法主要有根系移除法(root removal)、挖壕法(trenching)、离体根法(*in vitro* root method)、树干环割(tree girdling)、同位素示踪法(isotopic methods)和根系生物量外推法(regression technique)等几种方法<sup>[3-4]</sup>,但由于试验对象、因素与条件上的差异,研究结果也不一致。综合研究表明,根呼吸占土壤总呼吸的比例一般在 30%~70%<sup>[2,5]</sup>甚至 10%~90%<sup>[6]</sup>,对土壤呼吸的总平均贡献率为 48%<sup>[3]</sup>。因此,根呼吸的重要性是不言而喻的,对根呼吸进一步精确的测定也是十分必要的。

我国人工林的面积居世界首位,杨树(*Populus* ssp.)是我国人工速生丰产林的主要造林树种之一,对其生态系统呼吸的研究具有重要意义<sup>[7]</sup>。但就目前来说,国内就杨树人工林土壤呼吸的研究基本都还是集中在碳通量估计、环境因子与物理性因素影响<sup>[8-9]</sup>及土壤呼吸特征变化<sup>[10]</sup>等方面,而关于杨树人工林在不同生长阶段土壤呼吸各组分差异,尤其是根呼吸方面差异的研究少之又少。因此,本试验选取退耕 40 a 毛白杨(*Populus tomentosa*)人工林与退耕 5 a 毛白杨与 84 杨混交林(*P. tomentosa*+84K)为研究对象,一块为成熟的毛白杨人工林,一块为幼龄林,采用挖壕法进行试验处理,利用 Li-6400 设备测定土壤表面 CO<sub>2</sub> 通量,其目的是为了研究退耕时间不同,生长阶段不同的毛白杨人工林根呼吸对土壤呼吸的总贡献及其与环境因子的关系,为更准确评估研究区域杨树人工林的土壤碳收支及

森林生态碳循环与碳平衡提供参考。

## 1 研究区概况

研究区位于陕西省周至县富仁乡渭兴村西北农林科技大学渭河试验站(34°12'N, 108°17'E),研究区域平均海拔 416 m,气候类型为暖温带大陆性季风气候。区域年均日照时为 2 024.4 h,年均日照率为 46%,年均气温 14.9℃,年均降雨量为 660~800 mm,年均相对湿度 72%,全年无霜期 255~270 d(陕西省周至县气象局资料)。

在研究区中选取退耕 40 a 毛白杨人工林(面积为 263 m×58 m)和退耕 5 a 毛白杨与 84K 杨混交林(面积为 190 m×50 m)2 种土地利用类型为研究对象,并在每种土地利用条件下各设置 3 个 20 m×20 m 的固定样地。退耕 40 a 毛白杨人工林中的样地设为样地 I,乔木郁闭度为 0.7,林下灌木主要为喜阴悬钩子(*Rubus mesogaeus*)和小蜡(*Ligustrum sinense*),草本主要为燕麦(*Avena sativa*)、雀麦(*Bromus japonicus*)、刺儿菜(*Cirsium setosum*)、平车前(*Plantago depressa*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、红花酢浆草(*Oxalis corniculata*)和荠菜(*Capsella bursa-pastoris*)等灌草总盖度为 0.9;退耕 5 a 毛白杨与 84K 杨混交林中的样地设为样地 II,乔木郁闭度为 0.5,灌木层有稀疏的杨树幼苗,草本植物主要是雀麦、茜草(*Rubia cordifolia*)、小白酒草(*Conyza canadensis*)和蒿属(*Artemisia L.*)等灌草总盖度为 1.0。2 种土地利用类型概况与土壤理化性质见表 1、表 2。

## 2 研究方法

### 2.1 样点处理

2013 年 11 月在 2 片林分的 3 块样地内分别随机设置 2 个内径 10 cm、高度 20 cm 的 PVC 土壤环,将其嵌入到土壤中,深度 10 cm,地上部分高度 10 cm。同时要保持土壤环在试验期间位置固定不变。

表 1 研究区植被概况

Table 1 Vegetation survey of research area

类型	树种	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度
样地 I	毛白杨优良无性系 <i>Populus tomentosa</i>	40	23.16±2.23	27.91±3.57	625	0.7
样地 II	毛白杨+84k 杨 <i>P. tomentosa</i> +84k	5	6.57±1.01	8.56±2.21	600	0.5

注:树高和胸径的数据为均值±标准差。

表2 研究区土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties in research area

深度/cm	样地 I		样地 II	
	总碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH值	总碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH值
0~10	26.63±3.32	7.1	10.07±1.95	7.3
10~20	13.89±2.40	7.4	6.31±1.38	7.5
20~30	10.46±1.74	7.4	4.61±1.73	7.4
30~40	6.12±2.10	7.3	3.03±1.56	7.4

注:总碳的数据为均值±标准差。

根据根呼吸在土壤总呼吸中的构成,设置1个处理,1个对照,重复3次。用挖壕法进行斩断根系的处理,以土壤环圆点为中心,设置长宽各40 cm的样方,在样方的边缘进行挖壕,保持中间的土壤部分尽量不动,斩断周围所有的植物根系,再用厚塑料板隔开,连接处用胶带密封,然后按顺序回填原土壤,以阻止根系再次向样方内部生长,并定期清除地面植被;对照组不做任何处理。处理完毕之后,在无人为干扰下放置6个月时间(2013年11月至2014年4月),保证切斷的根系彻底死亡。

## 2.2 土壤呼吸速率测定

利用Li-6400设备测定土壤表面CO<sub>2</sub>通量。2014年5—10月,每月10、11号与20、21号左右分别选择连续非阴雨天气的条件下进行测量(测量1 d,重复1 d),每天测量时间为8:00—17:00,共9 h。测量期间,以1.5 h为时间单位,在样地I和样地II分别测量1组样点,每组每个样点进行3次重复测定,交替循环进行。在测量土壤呼吸速率的同时,测量并记录该样点距土壤表面10 cm处的土壤温度与湿度。

## 2.3 土壤取样及化学性质测定

2014年5月—2014年10月,分别在2片样地的样点附近选定取土点,每片样地选取3个点。利用土钻在设定好的0~10、10~20、20~30 cm及30~40 cm这4个不同深度进行土壤取样,并将土壤及时收集在塑封袋中,带回实验室进行下一步处理。

选取通风良好的室内场所,将采集的土壤样品按照编号放在对应的白纸上进行自然风干,切记要避免阳光曝晒,剔除土壤中的凋落物残渣、植物根系和小石块等杂物。风干完毕后,将土壤样品进行研磨,直至用200目筛网将土样全部过滤为止,用塑封袋将土壤密封,用于测定土壤pH值及土壤总碳等性质。

利用总有机碳分析仪测定土壤中总碳含量,进行3次以上重复,并计算数值标准差;将土壤样品配成待测溶液,利用pH计测定,重复多次取平均值。

## 2.4 根呼吸速率计算

设定处理组的测量值为R<sub>1</sub>,对照组的测量值为

R<sub>2</sub>;土壤呼吸速率为R<sub>S</sub>,根呼吸速率为R<sub>root</sub>。故根据土壤呼吸组分可知:土壤呼吸R<sub>S</sub>=R<sub>2</sub>,根呼吸R<sub>root</sub>=R<sub>2</sub>-R<sub>1</sub>

## 2.5 数据处理

利用SPSS18.0统计分析软件对根呼吸数据进行相关性分析和差异性比较,采用Sigma Plot12.0和Excel数据处理软件完成作图。根据以往研究,用Q<sub>10</sub>表达根呼吸速率对土壤温度变化的敏感程度,采用指数方程<sup>[11]</sup>进行计算:

$$R_{root} = ae^{bT},$$

$$Q_{10} = e^{10b}$$

式中:R<sub>root</sub>为根呼吸速率[μmol/(m<sup>2</sup>·s)];T为土壤温度(℃);a、b为待定参数,其中a为0℃时的根呼吸速率<sup>[12]</sup>,或称之为基础呼吸,b为温度反应系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 根呼吸的月动态变化

2014年5—10月,退耕后2片林地的根呼吸速率的月动态变化如图1所示,可知2片样地根呼吸速率变化趋势基本一致,都呈单峰曲线。随着5月份的气温回升,林木根系进入生长季,根呼吸速率逐渐开始升高,到7月份升至峰值,然后逐渐回落,与所测定的地下10 cm土壤温度变化趋势相似,土壤温度峰值出现的时间与根呼吸速率峰值出现时间也达到一致。

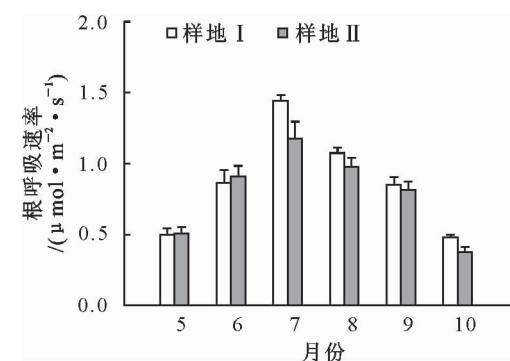


图1 根呼吸速率月变化

Fig. 1 Monthly variations of root respiration rate

### 3.2 根呼吸对土壤呼吸的贡献率

计算得出,样地I根呼吸速率生长季均值为

0.87  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 月均最大值为 1.44  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 出现在 7 月份, 月均最小值为 0.48  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 出现在 10 月份, 生长季平均贡献率为 25.64%, 变化范围为 21.59%~28.56%; 样地 II 根呼吸速率生长季均值为 0.79  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 月均最大值为 1.18  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 出现在 7 月份, 月均最小值为 0.38  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 出现在 10 月份, 生长季平均贡献率为 25.26%, 变化范围为 22.37%~27.38%。生长季根呼吸速率上相比, 样地 I 大于样地 II, 2 片林地土壤呼吸速率差异极显著 ( $p < 0.01$ )。

### 3.3 根呼吸与土壤温度、土壤湿度的关系

通过相关性分析(表 3), 样地 I 与样地 II 的土壤呼吸速率与土壤温度(地下 10 cm)均呈极显著相关( $p < 0.01$ )且呈指数相关(图 2), 利用指数模型公式计算得出 2 片样地的  $Q_{10}$  值分别为 4.22 和 4.45。样地 II 与土壤湿度呈显著负相关( $p < 0.05$ ), 样地 I 与土壤湿度无相关性。

表 3 根呼吸速率与土壤温湿度的相关关系( $n=36$ )

Table 3 Correlation coefficients between root respiration and temperature-humidity of soil( $n=36$ )

呼吸速率	土壤温度/℃	土壤湿度
样地 I	0.854 **	-0.279
样地 II	0.894 **	-0.404 *

注: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ 。

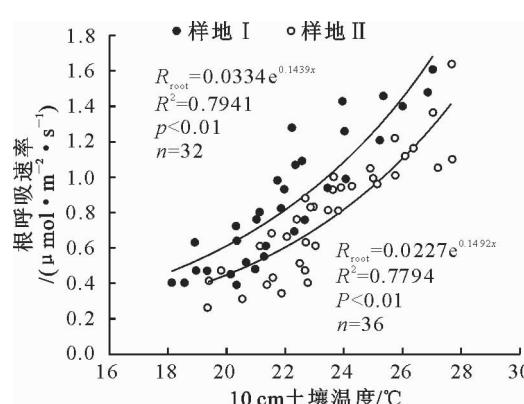


图 2 根呼吸速率与土壤温度的关系

Fig. 2 Relationships of root respiration rate and soil temperature

## 4 结论与讨论

林木根呼吸有明显的季节变化,一般生长季节较高,休眠季节较低<sup>[3,13-15]</sup>。本研究中,5 月份开始,温度的升高导致微生物活动剧烈,促进根系生长旺盛,根呼吸逐渐升高,在 7 月份达到最高,之后开始逐月下降,整个生长季呈单峰曲线变化,这与 Ebert、Lenz<sup>[16]</sup>在关于苹果树根呼吸和朱凡<sup>[17]</sup>等在马尾松人工林根呼吸的研究结果相似。王小国<sup>[18]</sup>

等在关于人工楷柏混交林根呼吸的研究中,根呼吸速率在 5、6 月份达到最高,这可能与各研究试验地气候状况不同和植被生长节律差异有关<sup>[19]</sup>。

国内外关于根呼吸贡献率的研究结果不尽相同,本研究中 2 片样地的生长季根呼吸对土壤呼吸的平均贡献率分别为 25.64%、25.26%, 低于根呼吸对土壤呼吸的总平均贡献率 48%, 但是与王小国<sup>[18]</sup>等利用挖壕法对于根呼吸的研究结果(33.19%)接近。原因可能在于,虽然在试验过程中对样点附近植被进行了定期清理,但在不扰动土壤结构的情况下,无法排除掉土壤中残留活根释放的  $\text{CO}_2$ , 造成了在计算的时候对根呼吸大小的低估。

大多数研究显示,对土壤呼吸速率影响最大的因子是土壤温度与土壤湿度<sup>[20-23]</sup>,但是也有研究认为,土壤呼吸速率与土壤湿度之间并没有显著的相关关系,两者相关系数很小<sup>[23-24]</sup>。本次研究中,2 片样地的根呼吸速率与其对应的地下 10 cm 土壤温度均呈极显著相关,利用指数模型进行回归分析后,通过指数方程计算得出温度敏感性指数  $Q_{10}$  值分别为 4.22 和 4.45,说明在本研究中土壤温度是控制根呼吸速率发生变化的限制因子,根呼吸速率随温度的升高呈指数增加,这与 Atkin<sup>[25]</sup>的研究结果一致。在土壤湿度方面,2 片样地中样地 I 与对应土壤温度相关关系不显著( $p > 0.05$ ),样地 II 与对应土壤温度呈显著负相关( $p < 0.05$ ),刘文娟<sup>[26]</sup>,孟平<sup>[27]</sup>等的研究也表明土壤湿度与土壤呼吸相关关系不明显。这可能与研究区域的年均降水量少且降水时间无明显有重要关系,另外一方面挖壕法也对根系对土壤水分的吸收有一定影响。因此,关于土壤湿度对根呼吸的影响亟需更进一步的研究与解释。

在土壤总碳含量方面,样地 I 显著大于样地 II ( $p < 0.05$ ),这是因为退耕还林后,土壤有机质在植被恢复 5 a 以上开始明显增加<sup>[28]</sup>, Paul<sup>[29]</sup>等利用来自全球 43 个研究的 204 个地点关于造林后土壤碳变化的数据,采用年龄权重平均得出,在造林后初始 5 a, 土壤碳下降约 31.64%,之后会逐年增加。这都说明退耕还林会对土壤有机质产生重要影响,而土壤有机质含量变化会影响根系生物量的变化,且土壤呼吸呈正相关<sup>[30]</sup>,因此,进一步说明退耕还林这种人为活动也会对根呼吸产生影响。

研究表明,样地 I 和样地 II 的生长季根呼吸速率均具有明显的季节变化,变化特征呈先升高后降低的单峰曲线,最大值出现在 7 月份,最小值出现在 10 月份,2 块样地根呼吸速率生长季均值分别为 0.87  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和 0.79  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 最大值分别为 1.44  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和 1.18  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,

最小值分别为 $0.48\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $0.38\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,生长季根呼吸速率上相比,样地Ⅰ大于样地Ⅱ,差异极显著( $p<0.01$ );2块样地生长季根呼吸平均贡献率分别为为25.64%和25.26%,变化范围为21.59%~28.56%和22.37%~27.38%,差异不显著。

样地Ⅰ和样地Ⅱ的生长季根呼吸速率与其各自对应的地下10 cm土壤温度呈极显著的指数关系, $Q_{10}$ 值分别为4.22和4.45。样地Ⅰ根呼吸速率与地下10 cm土壤湿度之间无相关关系,样地Ⅱ根呼吸速率与地下10 cm土壤湿度呈显著负相关( $p<0.05$ )。

## 参考文献:

- [1] LUNDEGARDH H. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth[J]. Soil Sci., 1927, 23: 417-453.
- [2] RAICH W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44(B): 81-99.
- [3] HANSON P J, EDWARDS N T, GARTEN C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations [J]. Biogeochemistry, 2000, 48, 115-146.
- [4] 杨玉盛,董彬,谢锦升,等.林木根系呼吸测定方法进展[J].植物生态学报,2004,28(3):426-434.  
YANG Y S, DONG B, XIE J S, et al. A review of tree root respiration: significance and methodologies [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(3): 426-434. (in Chinese)
- [5] RUNION G B, CURL E A, ROGERS H H, et al. Effects of freeair CO<sub>2</sub> enrichment on microbial populations in the rhizosphere and philosophers of cotton[J]. Agr. For Meteorol., 1994, 70: 117-130.
- [6] STRIEGL R G, WICKLAND K P. Effects of a clear-cut harvest on soil respiration in a jack pine-lichen woodland[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28: 534-539.
- [7] 彭镇华,王妍,任海青,等.安庆杨树林生态系统碳通量及其影响因子研究[J].林业科学研究,2009,22(2):237-242.  
PENG Z H, WANG Y, REN H Q, et al. Research on the variation of carbon flux and the relationship of environmental factors and carbon flux of *Populus* forest ecosystem in the reaches of Yangtze River in Anqing[J]. Forest Research, 2009, 22(2): 237-242. (in Chinese)
- [8] 刘斌,鲁邵伟,高东,等.物理性环境因素对淮北地区杨树人工林土壤呼吸的影响[J].西部林业科学,2014,43(6):148-153.  
LIU B, LU S W, GAO D, et al. Effects of physical environmental factors on soil respiration of planted poplar forest in North Plain of Huaihe River[J]. Journal of West China Forestry Science, 2014, 43(6): 148-153. (in Chinese)
- [9] 谭炯锐,查同刚,张志强,等.土壤温湿度对北京大兴杨树人工林土壤呼吸的影响[J].生态环境学报,2009,18(5):2308-2315.  
TAN J Y, ZHA T G, ZHANG Z Q, et al. Effects of soil tem-
- perature and moisture on soil respiration in a poplar plantation in Daxing District, Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5): 2308-2315. (in Chinese)
- [10] 唐洁,汤玉喜,王胜,等.洞庭湖区滩地杨树人工林土壤呼吸动态分析[J].湖南林业科技,2009,36(2):10-12.  
TANG J, TANG Y X, WANG S, et al. Dynamic analysis on soil respiration of *Populus* plantation on beach land in Dongting Lake[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2009, 36(2): 10-12. (in Chinese)
- [11] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J].生态学报,2004,24(4):831-836.  
CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 831-836. (in Chinese)
- [12] GRAICE J, RAYMENT. Respiration in the balance [J]. Nature, 2000, 404: 819-820.
- [13] EDWARDS N T. Root and soil respiration responses to ozone in *Pinus taeda* L. seedlings [J]. New Phytologist, 1991, 118: 315-321.
- [14] 杨玉盛,陈光水,王小国,等.中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响[J].生态学报,2005,25(7):1684-1690.  
YANG Y S, CHEN G S, WANG X G, et al. Response of soil CO<sub>2</sub> efflux to forest conversion in subtropical zone of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1684-1690. (in Chinese)
- [15] 刘建军,王得祥,雷瑞德,等.秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与CO<sub>2</sub>释放[J].林业科学,2003,39(2):8-13.  
LIU J J, WANG D X, LEI R D, et al. Soil respiration and release of carbon dioxide from natural forest of *Pinus tabulaeformis* and *quercus aliena* var. *acuteserrata* in Qinling Mountains [J]. Scientia Silvae Sinica, 2003, 39(2): 8-13. (in Chinese)
- [16] EBERT G, LENZ F. Annual course of root respiration of apple trees and its contribution to the CO<sub>2</sub> balance [J]. Gartenbauwissenschaft, 1991, 56: 130-133.
- [17] 朱凡,王光军,田大伦,等.马尾松人工林根呼吸的季节变化及影响因子[J].林业科学,2010,46(7):36-41.  
ZHU F, WANG G J, TIAN D L, et al. Seasonal variation of root respiration and controlling factors in *Pinus mansoniiana* plantation[J]. Scientia Silvae Sinica, 2010, 46(7): 36-41. (in Chinese)
- [18] 王小国,朱波,高美荣,等.川中丘陵区人工桤柏混交林根呼吸对土壤总呼吸的贡献[J].山地学报,2009,27(3):270-277.
- [19] 陈光水,杨玉盛,王小国,等.格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态与影响因素[J].生态学报,2005,25(8):1941-1947.  
CHEN G S, YANG Y S, WANG X G, et al. Root respiration in a natural forest and two plantations in subtropical China: seasonal dynamics and controlling factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 1941-1947. (in Chinese)
- [20] BURTON A J, PREGITZER K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugarmaple and red pine [J]. Tree Physiol, 2003, 23: 273-280.

(下转第44页)

- Forest Region [J]. Journal of Northwest Forest University, 2008, 23(5): 164-167. (in Chinese)
- [6] 张志,田昕,陈尔学,等.森林地上生物量估测方法研究综述 [J].北京林业大学学报,2011,33(5):144-150.
- ZHANG Z, TIAN X, CHEN E X, et al. Research review of forest aboveground biomass estimation methods [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011 (5): 144-150. (in Chinese)
- [7] WANG C K. Biomass allometric equations for 10 curing tree species in Chinese temperate forests [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 222: 9-16.
- [8] 李海奎,雷渊才,曾伟生.基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J].林业科学,2011,47(7):7-12.
- LI H K, LEI Y C, ZENG W S. Study of forest vegetation carbon based on forest inventory data in China [J]. Journal of Forestry Science, 2011, 47(7): 7-12. (in Chinese)
- [9] 唐守正,郎奎建,李海奎.统计和生物数学模型计算(forstat 教程) [M].北京:科技出版社,2009:268-290.
- [10] 冯宗炜,王效科,吴刚.中国森林生态系统的生物量和生产力 [M].北京:科学出版社,1999.
- [11] 常昆.导算一元立木材积表的技术方法 [J].林业资源管理, 1977(1): 1-10.
- [12] 孟宪宇.测树学 [M].北京:中国林业出版社,2006.
- [13] 菊花,张明铁,张秋良.大青山人工油松单木生物量模型的研究 [J].内蒙古农业大学学报,2010,31(3):60-65.
- JU H, ZHANG M T, ZHANG Q L. The biomass model research of artificial *Pinus tabulaeformis* of Daqing Mountain [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2010, 31(3): 60-65. (in Chinese)
- [14] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest
- biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [15] 郑立生,李海奎.模型形式和地域对落叶松地上生物量预测的影响 [J].林业资源管理,2013(2):83-88.
- ZHENG L S, LI H K. The impact on larch aboveground biomass prediction of model forms and geographical [J]. Forest Resources Management, 2013(2): 83-88. (in Chinese)
- [16] 李海奎,雷渊才.中国森林植被生物量和碳储量评估 [M].北京:中国林业出版社,2010.
- [17] 曾伟生.全国立木生物量建模方法研究 [D].北京:中国林科学院,2011.
- [18] 胥辉.一种生物量模型构建的新方法 [J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2001,29(3):35-40.
- XU H. A new approach to the development of biomass model [J]. Journal of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. : Nat. Sci. Ed., 2001, 29(3): 35-40. (in Chinese)
- [19] 韩中庚.数学建模实用教程 [M].北京:高等教育出版社, 2012:194-214.
- [20] 曾伟生,骆期邦,贺东北.论加权回归与建模 [J].林业科学, 1999, 35(5): 5-11.
- ZENG W S, LUO Q B, HE D B. Weighted regression theory and modeling [J]. Forestry science, 1999, 35(5): 5-11. (in Chinese)
- [21] 郎璞玲.建立在固定样地上的林分生长线性联立方程组模型研究 [J].北京林业大学学报,2007,29(1):37-41.
- LANG P M. Based on fixed sample stand growth of linear simultaneous equations model study of the earth [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(1): 37-41. (in Chinese)
- [22] 吕勇,唐代生.林木材积与生物量的相关性探讨 [J].中南林业调查规划,1997,16(2):13-15.

(上接第 19 页)

- [21] BURTON A J, PREGITZER K S, RUESS R W, et al. Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes [J]. Oecologia, 2002, 131: 559-568.
- [22] QI Y, XU M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO<sub>2</sub> efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada Mountains [J]. Plant and Soil, 2001, 237(1): 15-23.
- [23] 李凌浩,王其兵,白永飞,等.锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究 [J].植物生态学报,2000,24(6):680-686.
- LI L H, WANG Q B, BAI Y F, et al. Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin River basin as affected by over-grazing and climate [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(6): 680-686. (in Chinese)
- [24] 陈述悦,李俊,陆佩玲,等.华北平原麦田土壤呼吸特征 [J].应用生态学报,2004,15(9):1552-1560.
- CHEN S Y, LI J, LU P L, et al. Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9): 1552-1560. (in Chinese)
- [25] ATKIN O K, EDWARDS E J, LOVEYS B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming [J]. New Physiologist, 2000, 147: 141-154.
- [26] 刘文娟,李春友,张劲松,等.华北低山丘陵区石榴-小麦间作系统的土壤特征研究 [J].西北林学院学报,2012,27(3):17-22.
- LIU W J, LI C Y, ZHANG J S, et al. Soil respiration of *Punica granatum*-*Triticum aestivum* intercropping system in hilly area of Northern China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3): 17-22. (in Chinese)
- [27] 孟平,李春友,张劲松,等.石榴-绿豆间作系统土壤呼吸及其影响因子研究 [J].西北林学院学报,2014,29(2):66-70.
- MENG P, LI C Y, ZHANG J S, et al. Soil respiration of *Punica granatum*-*Phaseolus radiatus* intercropping system in hilly area of Northern China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2): 66-70. (in Chinese)
- [28] 彭文英,张科利,陈瑶,等.黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究 [J].自然资源学报,2005,20(2):272-278.
- PENG W Y, ZHANG K L, CHEN Y, et al. Research on soil quality change after returning farmland to forest on the Loess sloping croplands [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20 (2): 272-278. (in Chinese)
- [29] PAUL K I, POLGLASE P J, NYAKUENGAMA J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1-3): 241-257.
- [30] CHEN S T, HUANG Y, ZOU J W, et al. Modeling inter-annual variability of global soil respiration from climate and soil properties [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150 (4): 590-605.