

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 13 期 Vol.31 No.13 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 13 期

2011 年 7 月 (半月刊)

目 次

我国东部北亚热带植物群落季相的时空变化	陈效速, 亓孝然, 阿 杉, 等 (3559)
华北低丘山地人工林蒸散的季节变化及环境影响要素	黄 辉, 孟 平, 张劲松, 等 (3569)
东北东部 14 个温带树种树干呼吸的种内种间变异	许 飞, 王传宽, 王兴昌 (3581)
RS 和 GIS 支持的洪河地区湿地生态健康评价	王一涵, 周德民, 孙永华 (3590)
应用光合色素研究广西钦州湾丰水期浮游植物群落结构	蓝文陆, 王晓辉, 黎明民 (3601)
基于不可替代性的青海省三江源地区保护区功能区划研究	曲 艺, 王秀磊, 栾晓峰, 等 (3609)
融雪时间对大卫马先蒿生长和繁殖特性的影响	陈文年, 吴 彦, 吴 宁, 等 (3621)
巴郎山刺叶高山栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 对海拔高度的响应	冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (3629)
宁南半干旱与半干旱偏旱区苜蓿草地土壤水分与养分特征	任晶晶, 李 军, 王学春, 等 (3638)
南岭小坑藜蒴栲栢群落地上部分生物量分配规律	李 根, 周光益, 王 旭, 等 (3650)
放牧对五台山高山、亚高山草甸牧草品质的影响	章异平, 江 源, 刘全儒, 等 (3659)
短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量学特征的影响	 羊留冬, 杨 燕, 王根绪, 等 (3668)
锰胁迫对垂序商陆叶片形态结构及叶绿体超微结构的影响	梁文斌, 薛生国, 沈吉红, 等 (3677)
土荆芥挥发油对蚕豆根尖细胞的化感潜力	胡琬君, 马丹炜, 王亚男, 等 (3684)
喀斯特城市杨树人工林微量元素的生物循环	王新凯, 田大伦, 闫文德, 等 (3691)
大兴安岭林区多孔菌的区系组成与种群结构	崔宝凯, 余长军 (3700)
铜绿微囊藻和斜生栅藻非稳态营养盐限制条件下的生长竞争特性	赵晓东, 潘 江, 李金页, 等 (3710)
陆地棉萌发至三叶期不同生育阶段耐盐特性	王俊娟, 王德龙, 樊伟莉, 等 (3720)
基于模式生物秀丽隐杆线虫的三丁基锡生态毒性评价	王 云, 杨亚楠, 简风雷, 等 (3728)
大庆油田石油开采对土壤线虫群落的影响	肖能文, 谢德燕, 王学霞, 等 (3736)
若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响	吴鹏飞, 杨大星 (3745)
洞庭湖湿地土壤环境及其对退田还湖方式的响应	刘 娜, 王克林, 谢永宏, 等 (3758)
渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水分效应模拟	张社红, 李 军, 王学春, 等 (3767)
黄土丘陵区不同土地利用下土壤释放 N_2O 潜力的影响因素	祁金花, 黄懿梅, 张 宏, 等 (3778)
东北中部地区水稻不同生育时期低温处理下生理变化及耐冷性比较	宋广树, 孙忠富, 孙 蕾, 等 (3788)
硫对成熟期烤烟叶绿素荧光参数的影响	朱英华, 屠乃美, 肖汉乾, 等 (3796)
高温强光对温州蜜柑叶绿素荧光、D1 蛋白和 Deg1 蛋白酶的影响及 SA 效应	 邱翠花, 计玮玮, 郭延平 (3802)
覆膜对土壤-莴苣体系氮素分布和植物吸收的影响	李丽丽, 李非里, 刘秋亚, 等 (3811)
基于空间分带的崇明东滩水鸟适宜生境的时空动态分析	范学忠, 张利权, 袁 琳, 等 (3820)
驯鹿对苔藓植物的选择食用及其生境的物种多样性	冯 超, 白学良 (3830)
北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估	张 彪, 谢高地, 薛 康, 等 (3839)
专论与综述	
冻土甲烷循环微生物群落及其对全球变化的响应	倪永清, 史学伟, 郑晓吉, 等 (3846)
哺乳动物毛被传热性能及其影响因素	郑 雷, 张 伟, 华 彦 (3856)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-07



封面图说: 滇金丝猴是我国特有的世界珍稀动物之一, 属国家一级重点保护物种。仅生活在滇藏交界处的高寒云冷杉林中, 是我国川、滇、黔三种金丝猴中唯一具有和人类一样美丽红唇的金丝猴。手中的松萝是它最喜爱的食物之一。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

许飞,王传宽,王兴昌. 东北东部 14 个温带树种树干呼吸的种内种间变异. 生态学报, 2011, 31(13): 3581-3589.

Xu F, Wang C K, Wang X C. Intra- and inter-specific variations in stem respiration for 14 temperate tree species in northeastern China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3581-3589.

东北东部 14 个温带树种树干呼吸的种内种间变异

许 飞, 王传宽*, 王兴昌

(东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040)

摘要: 采用红外气体分析仪——局部通量测定法于 2009 年 6—10 月原位测定了东北东部山区 14 个温带森林主要组成树种的树干表面 CO_2 通量 (R_w), 旨在量化种内和种间 R_w 的差异, 探索 R_w 随树木直径和季节的变化规律, 为深入理解温带森林生态系统碳循环过程、构建和校验其模型提供基础数据。测定的树种包括: 散孔材阔叶树 (白桦、枫桦、山杨、紫椴、五角槭)、环孔材和半环孔材阔叶树 (春榆、黄菠萝、胡桃楸、蒙古栎、水曲柳)、针叶树 (兴安落叶松、红松、红皮云杉、樟子松)。结果表明: 树种、月份及其交互作用均显著地影响 R_w ($P < 0.001$)。测定期间平均 R_w 波动在 1.32 (黄菠萝)— $3.12 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (兴安落叶松) 之间, 其中环孔材和半环孔材阔叶树的平均 R_w 高于散孔材阔叶树, 而针叶树的平均 R_w 变异较大。各个树种 R_w 的平均值均呈单峰型季节变化模式, 其中 7 月份最高、10 月份最低。 R_w 种内的绝对变异 (标准误, SE) 波动在 0.11 — $0.29 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 相对变异 (变异系数, CV) 波动在 61% (红皮云杉)— 89% (白桦) 之间。各个树种的 R_w 均有随胸径 (DBH) 增大而增加的趋势, 但两者之间的回归模型及其决定系数因树种而异。除了春榆和水曲柳之外 ($P > 0.05$), 其它树种的 R_w 与 DBH 之间的回归关系显著 ($P < 0.05$), 表明 DBH 可作为某些树种 R_w 预测和上推的一个简便实用的指标。这些结果强调了在树干呼吸能力的比较和上推估测时应充分考虑其种内种间差异的重要性。

关键词: 树干表面 CO_2 通量; 季节动态; 胸径; 散孔材; 环孔材; 针叶树

Intra- and inter-specific variations in stem respiration for 14 temperate tree species in northeastern China

XU Fei, WANG Chuankuan*, WANG Xingchang

Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: The stem surface CO_2 flux (R_w) is the major component of tree autotrophic respiration, and represents tree growth activities and metabolism. The R_w variability, however, has not been well quantified for the Chinese temperate forests. The R_w was *in situ* measured for 14 major tree species coexisting in the temperate forests in northeastern China. The species included diffuse-porous species (*Betula platyphylla*, *B. costata*, *Populus davidiana*, *Tilia amurensis*, and *Acer mono*), ring- and semi-ring-porous species (*Ulmus propinqua*, *Phellodendron amurense*, *Juglans mandshurica*, *Quercus mongolica*, and *Fraxinus mandshurica*), and coniferous species (*Larix gmelinii*, *Pinus koraiensis*, *Picea koraiensis*, and *P. sylvestris* var. *mongolica*). The objective of this study was to (1) quantify intra- and inter-specific variations in R_w for the tree species, and (2) examine changes in R_w with tree diameters and seasons in order to mechanistically understand forest carbon cycling and provide solid data for developing and validating the carbon cycling model for the temperate forests. For each tree species, 12—18 trees were randomly sampled to cover as wide DBH (diameter at breast height) range in the stands as possible. A polyvinyl chloride collar (inner diameter 10.4 cm, height 5.0—6.0 cm) was cut and polished to fit the stem surface shape of each sample tree, and installed on the north side at breast height (1.3 m). The collar was

基金项目: “十二五”科技支撑项目 (2011BAD37B01); 林业公益性行业科研专项 (200804001, 201104009-05); 国家自然科学基金 (30625010) 共同资助

收稿日期: 2010-11-29; 修订日期: 2011-03-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangck-cf@nefu.edu.cn

attached with waterproof silicon adhesive to the stem surface that was pretreated without causing any injury of the live tissues, and remained in place throughout the measuring period. An infrared gas exchange analyzer (LI-6400 IRGA) was used to measure the R_w once every month from 08:00 to 17:00 within three to four consecutive sunny days during the period from June to October 2009. Stem temperature at 1 cm depth beneath the bark (T_w) was simultaneously measured with a digital thermometer. Tree species, measuring month and their interactions significantly influenced the R_w ($P < 0.001$). The mean R_w during the measuring period varied from $1.32 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for *P. amurense* to $3.12 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for *L. gmelinii*. The mean R_w for the ring- and semi-ring-porous species was greater than that for the diffuse-porous species, while the mean R_w for the coniferous species varied greatly. The mean R_w for all species showed a unimodal seasonal pattern, with the maximum and minimum occurring in July and October, respectively. The intra-specific mean absolute (standard errors) and relative variations (coefficients of variation) varied from $0.11 - 0.29 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and 61% - 89%, respectively. The R_w tended to increase with *DBH* increasing for all species, but the forms and determination coefficients of the regression models were species-dependent. There were significant relationships between mean R_w and *DBH* ($P < 0.05$) for all species except for *U. propinqua* and *F. mandshurica* ($P > 0.05$), suggesting that *DBH* be a simple and practical proxy for predicting and extrapolating tree- or stand-level R_w . This study highlights the importance of taking the intra- and inter-specific variations in R_w measurements into account in cross-comparing R_w and extrapolating chamber-based R_w measurements to tree- or stand-level estimates.

Key Words: stem surface CO_2 efflux; seasonal dynamics; diameter at breast height; diffuse-porous species; ring-porous species; coniferous species

树木的自养呼吸(包括叶片和木质组织呼吸)可消耗其光合固定碳的 50%—70%^[1],因此在森林碳平衡中具有重要的作用。以往常将叶片呼吸作为树木代谢的主要指标,但近期研究发现,树干的呼吸通量(R_w)占树木自养呼吸的 14%—48%^[2-4],有时超过叶片呼吸通量的贡献^[5]。另外, R_w 还是指示树木生长活力及碳代谢状况的重要物候学指标之一^[6-7]。所以,量化 R_w 的种内种间变异及其控制机理对于深入理解树木碳利用策略和森林碳循环过程、精确估测森林碳通量等具有重要意义。

由于树体高大,测定整株树木的 R_w 难度很大,因此通常是将局部 R_w 测定值以某一转换因子(诸如胸径^[8]、边材体积^[9]等)上推,进而估测整株树木或林分水平的木质组织呼吸通量。然而,局部测得的 R_w 不仅种间差异较大^[10-12],甚至其种内差异也很大^[13-14]。此外,虽然应用 R_w 与树干胸径(*DBH*)之间的关系可估算整株树木或林分水平的 R_w ^[2,4,8],但是这种关系因树种而异。例如:曾小平等^[2]对马占相思、肖复明等^[4]对杉木的研究均报道 R_w 与 *DBH* 呈负相关,而 Meir 和 Grace^[15]则发现 16 种热带树种的 R_w 与 *DBH* 呈正相关。王森等^[16]和石新立等^[17]的研究表明,红松、兴安落叶松和水曲柳也存在类似的 R_w -*DBH* 正相关。此外,以往研究指出, R_w 具有明显的单峰曲线^[6-7,16,18]或双峰曲线^[14,19]季节变化格局,这主要与温度、树干生长速率、活细胞分布^[14]、树干氮含量^[19]、形成层的活动^[20]等的季节变化有关。由此可见,阐明不同树种的 R_w 的种内种间差异、季节变化及其与 *DBH* 的关系有助于减小森林碳收支估算的不确定性。

我国东北森林面积大、碳储量高,在维持陆地生态系统碳平衡中具有重要作用。另外,东北森林地处气候变化显著的中高纬度地区,对气候变化响应敏感^[21],因此气候变化可能会对东北森林碳平衡和生产力产生深远的影响^[11]。虽然 Wang 等^[7]、王森等^[12,16]、石新立等^[17]人测定了兴安落叶松、红松、蒙古栎、水曲柳、紫椴、白桦等树种的 R_w 的时间动态及其影响因子,但是林分尺度 R_w 的合理估算仍然需要以更多森林组成树种 R_w 的种内种间变异规律为基础。本研究以东北东部典型温带森林 14 个特性各异的主要组成树种为对象,旨在量化 R_w 的种内种间差异,探索 R_w 随 *DBH* 和季节的变化规律,为深入理解温带森林碳循环过程、构建和校验其模型提供基础数据。

1 研究方法

1.1 研究地概况

研究地设在黑龙江省帽儿山森林生态站(45°24' N, 127°40' E)。平均海拔 400 m, 平均坡度 10°—15°, 地带性土壤为暗棕色森林土。该地区气候属大陆性季风气候。基于 1989 年至 2009 年的气象观测数据, 年均降水量为 629 mm, 年均蒸发量为 864 mm; 年均气温为 3.1 °C, 1 月份、7 月份的平均气温分别为 -18.5 °C 和 22.0 °C; 无霜期为 120 d—140 d。现有植被是原地带性植被-阔叶红松林经干扰后形成的天然次生林和人工林, 代表着东北东部山区典型的森林类型。有关林分特征和立地状况参见文献^[22]。

1.2 树干呼吸和温度的测定

选择该地区森林中 14 个特性各异的主要组成树种(表 1)为研究对象, 在林分 DBH 检尺的基础上, 按照在 DBH 分布范围内均匀取样的原则, 随机选取生长正常、没有缺陷的样树, 于 2009 年 6—10 月期间(其中红皮云杉为 2009 年 7—10 月)测定其 R_w 。测定前(2009 年 4—5 月), 在选定的样树树干北面离地 1.3 m 处安装高 5.0—6.0 cm、内径 10.4 cm 的 PVC 呼吸环。安装前, 将 PVC 呼吸环的一端打磨成与树干表面相吻合的弧形; 安装时, 小心除去松脱的树皮、苔藓等杂物(但避免伤及树皮活组织), 利用 100% 中性硅酮防水胶将呼吸环固定在树干表面上, 同时测定呼吸环所覆盖的树干表面积, 并保证呼吸环位置在测定期间不变。等呼吸环完全固定后, 采用注水法测定其体积, 用于校正 R_w 。

表 1 测定样树的基本特征

Table 1 Basic characteristics of the sampled trees

树种 Species	树种代码 Species code	树木特性 Tree property	样本数 Sample size	胸径 DBH/cm	
				范围 Range	均值 Mean
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	lys	落叶针叶树	14	11.5—44.3	26.3
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	hs	常绿针叶树	14	7.8—28.7	18.1
红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	ys	常绿针叶树	12	10.1—40.3	24.5
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	zss	常绿针叶树	13	13.4—31.4	22.2
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	bh	散孔材阔叶树	18	9.2—40.0	21.9
枫桦 <i>Betula costata</i>	fh	散孔材阔叶树	14	9.5—35.3	22.2
山杨 <i>Populus davidiana</i>	sy	散孔材阔叶树	14	10.5—43.1	27.7
紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	zd	散孔材阔叶树	12	11.9—40.9	24.7
五角槭 <i>Acer mono</i>	wjq	散孔材阔叶树	14	8.6—37.7	22.6
春榆 <i>Ulmus propinqua</i>	cy	环孔材阔叶树	14	9.9—42.6	24.4
黄菠萝 <i>Phellodendron amurense</i>	hbl	环孔材阔叶树	14	9.3—38.1	23.9
胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	htq	半环孔材阔叶树	16	11.8—50.3	29.0
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	mgl	环孔材阔叶树	13	9.5—53.7	30.2
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	sql	环孔材阔叶树	14	10.6—51.9	30.0

每月中下旬, 在连续晴天的 08:00—17:00 时段内利用 LI-6400 便携式 CO₂/H₂O 分析系统(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)测定 1 轮 R_w 。测定前, 检查并确保呼吸环不漏气; 测定时, 将 LI-6400-09 同化室扣在呼吸环上, 设定同化室内 CO₂ 浓度增量为 5 μmol/mol 时测定记录 1 次, 重复 3 次。与此同时, 在呼吸环上方 3 cm 处用便携式数字温度计(JM624)测定树干 1 cm 深处的温度(T_w)。

1.3 数据分析

本文中的树干呼吸是指单位时间、单位树干表面积释放的 CO₂ 通量(μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹)。由于树干表面的不规则性导致所测定的树干表面积和呼吸环的体积不一, 所以需对实测的 R_w 进行校正^[16-17]。校正采用如下公式:

$$F_c' = \frac{V + V' - \pi (d/2)^2 h}{V} \times \frac{S}{S'} \times F_c$$

式中, F_c' 为校正后的 R_w ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), F_c 为校正前的 R_w ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), V 为系统默认的同化室体积 (991 cm^3), V' 为呼吸环的实际体积 (cm^3), S 为系统默认的同化室面积 (81.7 cm^2), S' 为呼吸环所覆盖的树干表面积 (cm^2), d 和 h 分别为插入呼吸环的同化室的外径和深度 (cm)。

因受测定仪器和人员的限制,不可能对所有被测树种的 R_w 进行同步测定,因此不能直接采用方差分析比较 R_w 的种内种间差异。分析发现 R_w 受 T_w ^[17,23] 和 DBH 的影响,因此在比较 R_w 的种内种间及其季节差异时,将 T_w 和 DBH 作为协变量,采用协方差分析 (ANCOVA),并作 Duncan 显著性差异检验,以便排除 T_w 和 DBH 的影响。另外,将 DBH 按 5 cm 一个径阶进行划分,探索 R_w 随 DBH 的变化规律。所有数据的统计分析均用 SAS 8.0 完成。

2 结果

2.1 树干呼吸的种间和种内变异

协方差分析表明, R_w 的种间差异显著 ($P<0.001$) (表 2), 平均 R_w 波动在 $(1.32\pm0.11)\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (均值 $\pm$ SE, 黄菠萝)— $(3.12\pm0.29)\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (兴安落叶松) 之间 (图 1), 后者是前者的 2.36 倍。总体而言, 环孔材阔叶树 (春榆、蒙古栎和水曲柳, 除黄菠萝外) 和半环孔材阔叶树 (胡桃楸) 的平均 R_w 高于散孔材阔叶树 (白桦、枫桦、山杨和紫椴, 除五角槭外); 针叶树种的 R_w 分异较大, 其中兴安落叶松和红皮云杉的平均 R_w 也均高于散孔材树种, 但红松和樟子松相对较低 (图 1)。

R_w 的种内绝对变异 (标准误, SE) 和相对变异 (变异系数, CV) 均随树种而变化 (图 1), 其中 SE 大小排序基本上与其 R_w 的排序一致, 以黄菠萝的 SE 最小 ($0.11\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 兴安落叶松的最大 ($0.29\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 后者是前者的 2.64 倍。然而, CV 值的变化较小, 波动在 61% (红皮云杉)—89% (白桦) 之间。总体而言, 平均 CV 的大小顺序为: 散孔材阔叶树种 (76%) > 针叶树种 (75%) > 环孔材阔叶树种 (70%)。

2.2 树干呼吸及其种间变异的季节动态

月份及其与树种的交互作用均显著地影响 R_w ($P<0.001$) (表 2)。14 个树种 R_w 平均值呈现明显的单峰季节变化格局 (图 2), 其中 7 月份最高 ($3.31\mu\text{mol}$

表 2 树干呼吸速率影响因子的协方差分析

Table 2 ANCOVA test of the factors affecting stem respiration			
变量 Variable	自由度 df	F	P
树种 Species	13/905	22.3	< 0.001
月份 Month	4/905	44.4	< 0.001
树种×月份 Species×Month	51/905	3.1	< 0.001

树干温度和胸径作为协变量

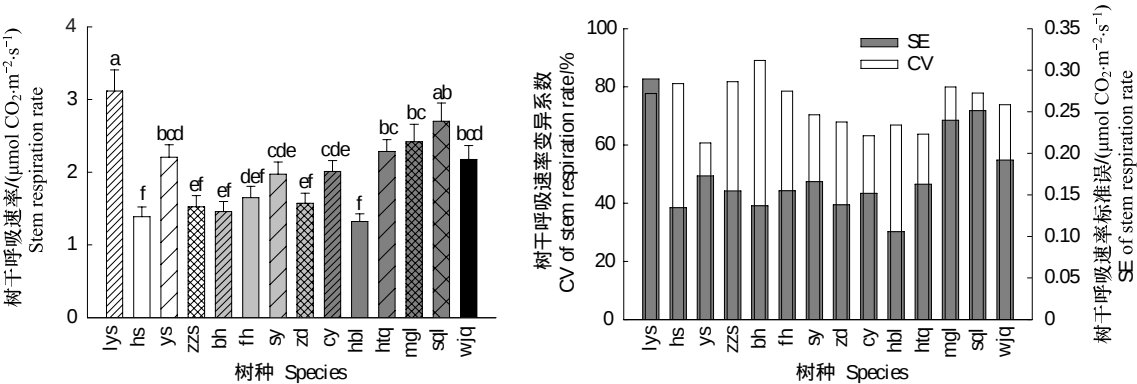


图 1 14 个树种树干呼吸速率及其种内变异

Fig. 1 Stem respiration rates and intra-specific variations for the 14 tree species
树种代码见表 1; 误差线为标准误; a—f 表示 Duncan 显著性差异组别 ($\alpha=0.05$)

$\text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、10 月份最低($0.57 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),前者是后者的 5.81 倍。相应地,种间 R_w 的 SE 也呈现出类似的季节变化趋势,7 月份的平均 SE ($0.13 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)是 10 月份的($0.03 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的 4.33 倍(图 2)。虽然各个月份种间 R_w 的 CV 均超过 50%,但其月际变化较小,波动在 53% (6 月份)—69% (9 月份)之间。

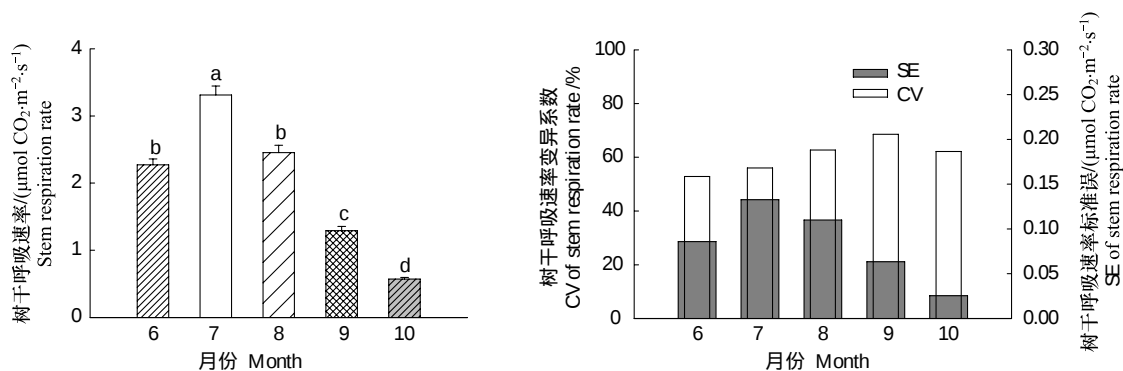


图 2 14 个树种树干呼吸平均速率的月份变化

Fig. 2 Monthly changes in mean rates of stem respiration across the 14 tree species

误差线为标准误; a—d 表示 Duncan 显著性差异组别 ($\alpha=0.05$)

2.3 树干呼吸及其种间变异随胸径的变化

14 个树种的平均 R_w 随径阶的增加而增加(图 3)。径阶间 R_w 差异显著 ($\alpha=0.05$),其中 60—65 cm 径阶的 R_w 平均值($4.01 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)是 5—10 cm 径阶($0.94 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的 4.27 倍。种间 R_w 的 SE 也有类似的随径阶变化的趋势,但以 55—60 cm 径阶的 SE 最大($1.10 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),10—15 cm 径阶的 SE 最小($0.06 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,图 3)。种间 R_w 的 CV 值随 DBH 的变化较小(56%—80%),但总体上有随 DBH 增大而下降的趋势(图 3)。

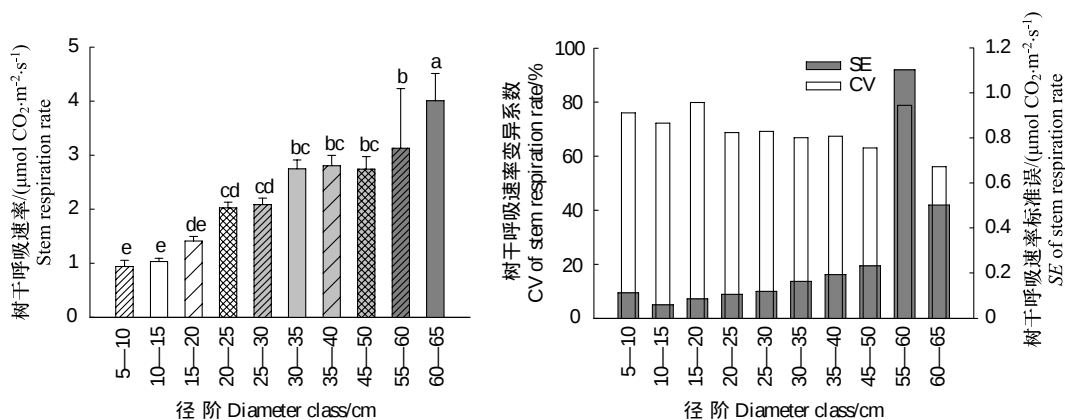


图 3 14 个树种树干呼吸平均速率随胸径径阶的变化

Fig. 3 Changes in mean rates of stem respiration across the 14 tree species with DBH classes

误差线为标准误; a—e 表示 Duncan 显著性差异组别 ($\alpha=0.05$)

测定期间各个树种的平均 R_w 与 DBH 之间的回归关系因树种而异(图 4)。除了春榆和水曲柳之外,其它树种的 R_w 与 DBH 均存在显著的回归关系 ($P < 0.05$),其 R^2 以兴安落叶松的最高(0.76)、胡桃楸的最低(0.31)。针叶树的 R_w 与 DBH 之间呈正相关,阔叶树则多呈二次多项式函数关系(图 4)。各个树种的 R_w - DBH 线性回归方程的斜率差异显著 ($P < 0.05$)。

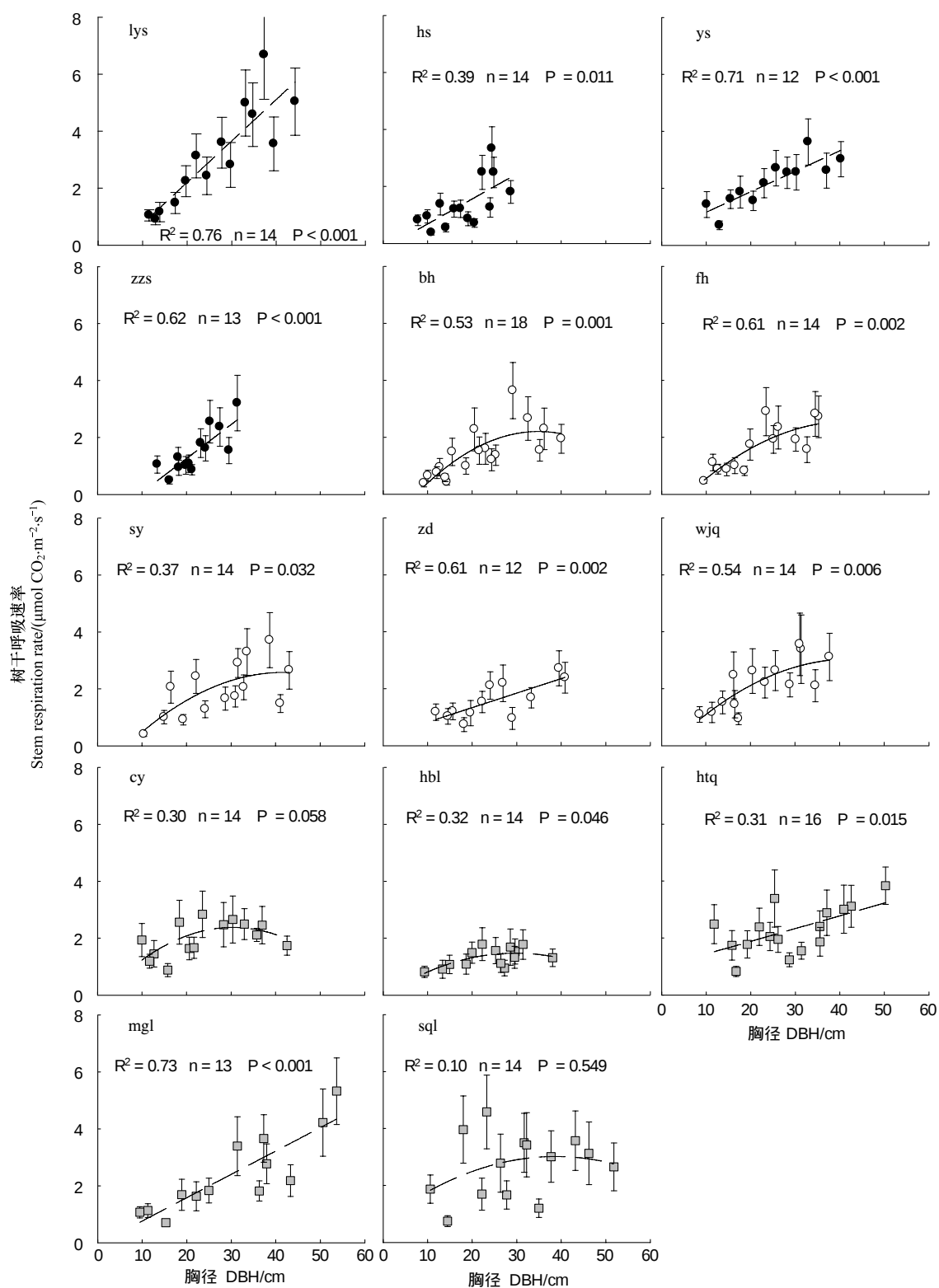


图4 14个树种树干呼吸速率与胸径的关系

Fig. 4 Relationships between stem respiration rate and DBH for the 14 tree species

图中的回归方程为: lys, $y = -0.706 + 0.145x$; hs, $y = -0.196 + 0.088x$; ys, $y = 0.443 + 0.072x$; zzs, $y = -1.118 + 0.119x$; bh, $y = -1.352 + 0.204x - 0.003x^2$; fh, $y = -0.894 + 0.164x - 0.002x^2$; sy, $y = -1.044 + 0.174x - 0.002x^2$; zd, $y = 0.417 + 0.049x$; wjq, $y = -0.298 + 0.158x - 0.002x^2$; cy, $y = -0.160 + 0.167x - 0.003x^2$; hbl, $y = -0.029 + 0.102x - 0.002x^2$; htq, $y = 0.991 + 0.045x$; mgl, $y = -0.054 + 0.082x$; sql, $y = 0.765 + 0.116x - 0.002x^2$; 树种代码见表1; 误差线为标准误差

3 讨论

排除了温度和树干直径的直接影响之后,共存于同一气候条件下特性各异的 14 个温带树种 R_w 的种内种间差异显著(表 2、图 1),这与其它温带树种的研究结果相符^[7,12,16-17]。但是本研究中 R_w 的种间平均差异仅为 1.26 倍(图 1),种内的绝对差异(SE)波动在 $0.11-0.29 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间、相对差异(CV)波动在 61%—89% 之间(图 1)。这个 R_w 的变异性较以往研究的变异性小。Ryan 等^[10]研究松树树干呼吸时发现,生长季(7 月)树干直径相似的两个树种(*Pinus densiflora* 和 *Pinus sylvestris*)的 R_w 差异达 1.5 倍;Sprugel^[13]研究加拿大温哥华冷杉(*Abies amabilis*)时报道,即使是同一树种,其 R_w 的种内变异也可达 10—40 倍。这些结果表明,用局部通量测定结果推算整株树木或林分的树干呼吸时,或在比较不同树种的树干呼吸强度时,均要考虑 R_w 的种内和种间差异,以便减少估测的不确定性。

R_w 是反映树干碳代谢活动的主要指标之一^[24],受树种的遗传特性、环境变化(如温度^[23]、空气湿度^[7]等)、树干蛋白质含量或氮含量、生长状况^[14]、物候^[10]等的综合影响。本研究中,环孔材(除黄菠萝外)和半环孔材阔叶树的 R_w 普遍高于散孔材阔叶树和针叶树(除兴安落叶松外)(图 1),可能是由于环孔材树种的导水能力比散孔材树种和针叶树种的大(半环孔材树种介于其间)^[25],而较高的树干导水率与树木碳同化能力及高生长速率相对应^[26]。作为本地区唯一孑遗植物的环孔材树种,黄菠萝 R_w 较小可能与其生长速率慢、边材较窄有关^[27]。兴安落叶松是温带和寒温带地区唯一的落叶针叶树,在本研究中所处的立地条件湿润肥沃,生长迅速^[28],因而可能导致生长季期间 R_w 较高(图 1)。此外,树皮结构的紧密性也会影响树干表面 CO_2 排放^[29],如白桦、枫桦的树皮结构较致密,可能是影响树干径向 CO_2 向外释放的主要原因之一。深入研究引起 R_w 变异的主要驱动因子,将有助于解释 R_w 的种内种间差异,为建立森林碳循环机理模型提供必要依据。

对于同一树种, R_w 表现为明显的单峰型季节变化模式,生长季的 R_w 显著高于非生长季(图 2),这与以往研究结果一致^[7,14,16,30]。 R_w 的季节变化格局是树木生理活动^[10]和环境因子联合驱动的结果,其中温度的季节变化是其主要驱动因素之一^[12,30]。 R_w 主要由维持活细胞正常生命活动的维持呼吸和提供能量合成新组织的生长呼吸两部分构成^[14],其中维持呼吸主要受温度控制^[1],而生长呼吸与树木生长速率直接相关^[9,13]。本研究区的气候四季分明、物候变化明显。7 月份是高温多雨季节^[17],水热同步的优越环境条件有利于树木的碳代谢活动,也是树木的生长盛期,因而除了较高的维持呼吸之外,其生长呼吸也达到峰值;相反,10 月份落叶树已经落叶,常绿树也进入休眠期,低温抑制了树干的碳代谢^[18],树木的自养呼吸则以维持呼吸为主。也有研究^[19]报道,排除温度效应之后,树干的生长速率和氮含量分别解释了 R_w 季节动态的 51% 和 24%。另外, Wang 等^[7]指出,空气湿度、树干生长速率和树冠投影面积也能部分解释 R_w 的季节动态。

基于树干表面积的 R_w 总体上有随径阶增加而增加的趋势(图 3)^[15-17],这可能与树木的边材宽度^[27]、活细胞分布、氮含量^[14]等因子的共同作用有关。随着树木直径或年龄的增长,其边材宽度增加^[27],从而使生长呼吸量和维持呼吸量均相应增加^[14]。本研究未能测定树干组织中的氮含量,但有研究表明木质组织的活细胞数量与氮含量正相关^[14],因此树干的维持呼吸与其氮含量也存在相关性^[1,19]。然而, R_w 与 DBH 之间的关系因树种而异,其中针叶树种与阔叶树种表现出不同的 R_w - DBH 关系(图 4)。这一结果部分地反映了不同特性树种的碳代谢活动及其控制因子随树木直径生长模式的差异。本研究中所测定的红松和樟子松的 DBH 偏小,这种 R_w - DBH 线性关系对于其大径阶树木是否仍然成立尚需验证。

上述 R_w 与 DBH 之间的关系在森林碳通量估测中具有重要的实践意义。除了春榆和水曲柳之外,其它 12 个树种均存在显著的 R_w - DBH 关系(图 4)。虽然这些回归方程的 R^2 不是太高(波动在 0.31—0.76 之间),可能有更好的补充或替代指标(如树干氮含量^[1]、边材体积^[9]等),但考虑到树干氮含量、边材体积等因子的直接测定比较困难并存在破坏性,而 DBH 不但测定方便准确,而且还是森林调查中最常用的一个指标,因此 DBH 可作为某些树种整株树木或林分水平 R_w 估测的一个实用指标^[8,17]。另外,不同树种表现出不同的 R_w - DBH 关系(图 4),因此应该针对各个树种建立相应的回归方程(即 species-specific 模型);对于诸如春榆、水曲

柳等树种,需要进一步寻求合适的替代指标,以便合理估测其 R_w ;总体上 R_w -DBH 关系的变异性较大,说明除了用 DBH 作为 R_w 估测指标之外,需要进一步探索其它指标(如树冠投影面积^[7]、边材体积^[9]、生长速率^[9,13]等),以便合理上推树木自养呼吸通量,增加估测精度。

4 结论

东北东部温带森林 14 个主要树种的基于树干表面积的 R_w 种内种间差异显著,其中兴安落叶松的 R_w 最高,春榆、蒙古栎、水曲柳、胡桃楸等环孔材和半环孔材阔叶树的 R_w 高于白桦、枫桦、山杨、紫椴等散孔材阔叶树和红松、樟子松等针叶树。平均 R_w 呈现显著的峰值出现在 7 月份的单峰季节变化模式。除了春榆和水曲柳之外,其它树种的 R_w 与 DBH 之间存在显著的回归关系,但回归模型的形式及其决定系数因树种而异,表明 DBH 可作为上推估测某些树种的整株树木或林分水平 R_w 的一个简便实用的指标。

致谢:感谢帽儿山森林生态站提供的野外基础支持。

References:

- [1] Ryan M G. Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 157-167.
- [2] Zeng X P, Peng S L, Zhao P. Measurement of respiration amount in artificial *Acacia mangium* forest in a low subtropical hill forest region of Guangdong. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(4): 420-424.
- [3] Vose J M, Ryan M G. Seasonal respiration of foliage, fine roots, and woody tissues in relation to growth, tissue N, and photosynthesis. *Global Change Biology*, 2002, 8(2): 182-193.
- [4] Xiao F M, Wang S L, Du T Z, Chen L C, Yu X J. Respiration of Chinese fir in plantations in Huitong, Hu'nian Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2514-2519.
- [5] Edwards N T, Hanson P J. Stem respiration in a closed-canopy upland oak forest. *Tree Physiology*, 1996, 16(4): 433-439.
- [6] Edwards N T, Tschaplinski T J, Norby R J. Stem respiration increases in CO₂-enriched sweetgum trees. *New Phytologist*, 2002, 155(2): 239-248.
- [7] Wang W J, Yang F J, Zu Y G, Wang H M, Kentaro T, Kaichiro S, Takayoshi K. Stem respiration of a larch (*Larix gmelinii*) plantation in Northeast China. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(12): 1387-1397.
- [8] Yoda K, Shinozaki K, Ogawa H, Hozumi K, Kira T. Estimation of the total amount of respiration in woody organs of trees and forest communities. *Journal of Biology*, Osaka City University, 1965, 16: 15-26.
- [9] Ryan M G. Growth and maintenance respiration in stems of *Pinus contorta* and *Picea engelmannii*. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20(1): 48-57.
- [10] Ryan M G, Linder S, Vose J M, Hubbard R M. Dark respiration of pines. *Ecological Bulletins*, 1994, 43: 50-63.
- [11] Ryan M G, Gower S T, Hubbard R M, Waring R H, Gholz H L, Cropper W P, Running S W. Woody tissue maintenance respiration of four conifers in contrasting climates. *Oecologia*, 1995, 101(2): 133-140.
- [12] Wang M, Wu Y X, Wu J L. Stem respiration of dominant tree species in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 956-960.
- [13] Sprugel D G. Components of woody-tissue respiration in young *Abies amabilis* (Dougl.) Forbes trees. *Trees*, 1990, 4(2): 88-98.
- [14] Ceschia É, Damesin C, Lebaube S, Pontailler J Y, Dufrêne É. Spatial and seasonal variations in stem respiration of beech trees (*Fagus sylvatica*). *Annals of Forest Sciences*, 2002, 59(8): 801-812.
- [15] Meir P, Grace J. Scaling relationships for woody tissue respiration in two tropical rain forests. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25(8): 963-973.
- [16] Wang M, Ji L Z, Li Q R, Xiao D M, Liu H L. Stem respiration of *Pinus koraiensis* in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 7-13.
- [17] Shi X L, Wang C K, Xu F, Wang X C. Temporal dynamics and influencing factors of stem respiration for four temperate tree species. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 3994-4003.
- [18] Wieser G, Bahn M. Seasonal and spatial variation of woody tissue respiration in a *Pinus cembra* tree at the alpine timberline in the central Austrian Alps. *Trees*, 2004, 18(5): 576-580.
- [19] Maier C A. Stem growth and respiration in loblolly pine plantations differing in soil resource availability. *Tree Physiology*, 2001, 21(16): 1183-1193.

- [20] Catesson A M. Cambial ultrastructure and biochemistry: Changes in relation to vascular tissue differentiation and the seasonal cycle. *International Journal of Plant Sciences*, 1994, 155(3): 251-261.
- [21] Wang C K, Yang J Y. Carbon dioxide fluxes from soil respiration and woody debris decomposition in boreal forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 633-638.
- [22] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3): 9-16.
- [23] Xu M, DeBiase T A, Qi Y. A simple technique to measure stem respiration using a horizontally oriented soil chamber. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(10): 1555-1560.
- [24] Lavigne M B. Differences in stem respiration responses to temperature between balsam fir trees in thinned and unthinned stands. *Tree Physiology*, 1987, 3(3): 225-233.
- [25] Liu X Y, Li J Y, Zhai H B, Zhu G B. Discussion on drought resistance through hydraulic architecture of trees. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(3): 48-54.
- [26] Tyree M T, Velez V, Dalling J W. Growth dynamics of root and shoot hydraulic conductance in seedlings of five neotropical tree species: scaling to show possible adaptation to differing light regimes. *Oecologia*, 1998, 114(3): 293-298.
- [27] Wang X C, Wang C K, Zhang Q Z, Li S Y, Li G J. Growth characteristics of heartwood and sapwood of the major tree species in northeastern China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(5): 102-108.
- [28] Wang C K, Yang J Y, Zhang Q Z. Soil respiration in six temperate forests in China. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 2103-2114.
- [29] Steppe K, Saveyn A, McGuire M A, Lemeur R, Teskey R O. Resistance to radial CO₂ diffusion contributes to between-tree variation in CO₂ efflux of *Populus deltoides* stems. *Functional Plant Biology*, 2007, 34(9): 785-792.
- [30] Lavigne M B, Ryan M G. Growth and maintenance respiration rates of aspen, black spruce and jack pine stems at northern and southern BOREAS sites. *Tree Physiology*, 1997, 17(8/9): 543-551.

参考文献:

- [2] 曾小平, 彭少麟, 赵平. 广东南亚热带马占相思林呼吸量的测定. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 420-424.
- [4] 肖复明, 汪思龙, 杜天真, 陈龙池, 于小军. 湖南会同林区杉木人工林呼吸量测定. *生态学报*, 2005, 25(10): 2514-2519.
- [12] 王森, 武耀祥, 武静莲. 长白山红松阔叶混交林主要树种树干呼吸速率. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 956-960.
- [16] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 肖冬梅, 刘海良. 长白山地区红松树干呼吸的研究. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 7-13.
- [17] 石新立, 王传宽, 许飞, 王兴昌. 四个温带树种树干呼吸的时间动态及其影响因子. *生态学报*, 2010, 30(15): 3994-4003.
- [21] 王传宽, 杨金艳. 北方森林土壤呼吸和木质残体分解释放出的 CO₂ 通量. *生态学报*, 2005, 25(3): 633-638.
- [25] 刘晓燕, 李吉跃, 翟洪波, 朱国彬. 从树木水力结构特征探讨植物耐旱性. *北京林业大学学报*, 2003, 25(3): 48-54.
- [27] 王兴昌, 王传宽, 张全智, 李世业, 李国江. 东北主要树种心材与边材的生长特征. *林业科学*, 2008, 44(5): 102-108.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 13 July, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Spatiotemporal variation of plant community aspections in the north-subtropical zone of eastern China	CHEN Xiaoqiu, QI Xiaoran, A Shan, et al (3559)
Seasonal variations and environmental control impacts of evapotranspiration in a hilly plantation in the mountain areas of North China	HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3569)
Intra- and inter-specific variations in stem respiration for 14 temperate tree species in northeastern China	XU Fei, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (3581)
Assessment of the ecological health of wetlands in Honghe supported by RS and GIS techniques	WANG Yihan, ZHOU Demin, SUN Yonghua (3590)
Phytoplankton community structure in Qinzhou Bay during flood season by analysis of HPLC photosynthetic pigment signatures	LAN Wenlu, WANG Xiaohui, LI Mingmin (3601)
Irreplaceability-based function zoning of nature reserves in the Three Rivers Headwater Region of Qinghai Province	QU Yi, WANG Xiulei, LUAN Xiaofeng, et al (3609)
Effects of snowmelt timing on individual growth and reproduction of <i>Pedicularis davidii</i> var. <i>pentodon</i> on the eastern Tibetan Plateau	CHEN Wennian, WU Yan, WU Ning, et al (3621)
Response of foliar $\delta^{13}\text{C}$ of <i>Quercus spinosa</i> to altitudinal gradients	FENG QiuHong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (3629)
Soil water and nutrient characteristics of alfalfa grasslands at semi-arid and semi-arid prone to drought areas in southern Ningxia	REN Jingjing, LI Jun, WANG Xuechun, et al (3638)
Aboveground biomass of natural <i>Castanopsis fissa</i> community at the Xiaokeng of NanLing Mountain, Southern China	LI Gen, ZHOU Guangyi, WANG Xu, et al (3650)
Impacts of grazing on herbage quality of the alpine and subalpine meadows within Wutai Mountain	ZHANG Yiping, JIANG Yuan, LIU Quanru, et al (3659)
Short-term effects of warming on growth and stoichiometrical characteristics of <i>Abies fabii</i> (Mast.) Craib seedling in Gongga mountain	YANG Liudong, YANG Yan, WANG Genxu, et al (3668)
Manganese stress on morphological structures of leaf and ultrastructures of chloroplast of a manganese hyperaccumulator, <i>Phytolacca americana</i>	LIANG Wenbin, XUE Shengguo, SHEN Jihong, et al (3677)
Allelopathic potential of volatile oil from <i>Chenopodium ambrosioides</i> L. on root tip cells of <i>Vicia faba</i>	HU WanJun, MA Danwei, WANG Yanan, et al (3684)
Contents and cycling of microelements in Karst urban poplar plantations	WANG Xinkai, TIAN Dalun, YAN Wende, et al (3691)
Fungal flora and population structure of polypores in the Great Xingan Mountains	CUI Baokai, YU Changjun (3700)
Growth competition characteristics of <i>Microcystis aeruginosa</i> Kutz and <i>Scenedesmus obliquus</i> (Turp.) Kutz under non-steady-state nutrient limitation	ZHAO Xiaodong, PAN Jiang, LI Jinye, et al (3710)
The characters of salt-tolerance at different growth stages in cotton	WANG Junjuan, WANG Delong, FAN Weili, et al (3720)
Assessment of tributyltin ecotoxicity using a model animal nematode <i>Caenorhabditis elegans</i>	WANG Yun, YANG Yanan, JIAN Fenglei, et al (3728)
Effect of oil exploitation on soil nematode communities in Daqing Oilfield	XIAO Nengwen, XIE Deyan, WANG Xuexia, et al (3736)
Effect of habitat degradation on soil meso- and microfaunal communities in the Zoigê Alpine Meadow, Qinghai-Tibetan Plateau	WU Pengfei, YANG Daxing (3745)
Characteristics of the soil environment of Dongting Lake wetlands and its response to the converting farmland to lake project	LIU Na, WANG Kelin, XIE Yonghong, et al (3758)
Modeling the changes of yield and deep soil water in apple orchards in Weibei rainfed highland	ZHANG Shehong, LI Jun, WANG Xuechun, et al (3767)
Potential soil N_2O emissions and its controlling factors under different land use patterns on hilly-gully loess plateau	QI Jinhua, HUANG Yimei, ZHANG Hong, et al (3778)
Comparison between physiological properties and cold tolerance under low temperature treatment during different growing stages of rice in northeast central region of China	SONG Guangshu, SUN Zhongfu, SUN Lei, et al (3788)
Effect of sulfur on chlorophyll fluorescence of flue-cured tobacco at maturation stage	ZHU Yinghua, TU Naimei, XIAO Hanqian, et al (3796)
Effects of high temperature and strong light on chlorophyll fluorescence, the D1 protein, and Deg1 protease in Satsuma mandarin, and the protective role of salicylic acid	QIU Cuihua, JI Weiwei, GUO Yanping (3802)
Effect of plastic film mulching on the distribution and translocation of nitrogen in soil-lettuce system	LI Lili, LI Feili, LIU Qiuya, et al (3811)
An analysis on spatio-temporal dynamics of suitable habitats for waterbirds based on spatial zonation at Chongming Dongtan, Shanghai	FAN Xuezhong, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (3820)
The bryophyte consumed by reindeers and species diversity of bryophyte in reindeer habitats	FENG Chao, BAI Xueliang (3830)
Evaluation of rainwater runoff storage by urban green spaces in Beijing	ZHANG Biao, XIE Gaodi, XUE Kang, et al (3839)
Review and Monograph	
Advances in methane-cycling microbial communities of permafrost and their response to global change	NI Yongqing, SHI Xuwei, ZHENG Xiaoji, et al (3846)
Heat transfer property of mammal pelage and its influencing factors	ZHENG Lei, ZHANG Wei, HUA Yan (3856)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 13 期 (2011 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 13 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元