

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 **2013**

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 33 卷 第 5 期 2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制..... 王晶苑,张心昱,温学发,等 (1337)
- 工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展..... 梁淑敏,许艳萍,陈 裕,等 (1347)
- 最佳管理措施评估方法研究进展..... 孟凡德,耿润哲,欧 洋,等 (1357)
- 灌木年轮学研究进展..... 芦晓明,梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局..... 王艳兵,德永军,熊 伟,等 (1375)
- 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响..... 裴 斌,张光灿,张淑勇,等 (1386)
- 湖北石首麋鹿昼间活动时间分配..... 杨道德,李竹云,李鹏飞,等 (1397)
- 三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响..... 杨 桦,杨 伟,杨春平,等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征..... 徐佳奕,徐兆礼 (1413)
- 滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解..... 郭绪虎,肖德荣,田 昆,等 (1425)
- 安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌,刘 坤,周守标 (1433)
- 湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇,郭逍宇,赵 霏 (1443)
- 三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子..... 王兆国,王传宽 (1456)
- 不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应..... 周 洁,张志强,孙 阁,等 (1465)
- 不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛莘莘,高玉葆,何兴东 (1475)
- 藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英,胡 锋,罗大庆 (1482)
- 铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征..... 朱永恒,沈 非,余 健,等 (1495)
- 环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 ... 马 驿,彭金菊,王 芸,等 (1506)
- 基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志,高 颖,朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案..... 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等 (1524)
- 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴,何丙辉,湛 芸 (1535)
- 京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究..... 孟 丹,王明玉,李小娟,等 (1545)
- 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素..... 雷泳南,张晓萍,张建军,等 (1559)
- 模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局..... 李明月,王 健,王振兴,等 (1569)
- 铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇,李鹏飞,曾从盛,等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响..... 闫 宁,王晓清,王志丹,等 (1584)

佛手低温胁迫相关基因的差异表达..... 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)

美洲棘蓟马对不同蔬菜寄主的偏好性..... 朱 亮,石宝才,官亚军,等 (1607)

茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)

造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响..... 王 焱,席本野,崔向东,等 (1626)

基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率..... 赵 晨,王 远,谷学明,等 (1636)

研究简报

太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征..... 周 彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)

基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)

薇甘菊萎蔫病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响..... 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204180555

王兆国, 王传宽. 三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子. 生态学报, 2013, 33(5): 1456-1464.

Wang Z G, Wang C K. Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1456-1464.

三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子

王兆国, 王传宽*

(东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040)

摘要:为认知叶片呼吸(R_L)的季节变化格局及其影响因子,以东北东部山区 3 个主要树种(红松 *Pinus koraiensis*、樟子松 *P. sylvestris* var. *mongolica* 和白桦 *Betula platyphylla*)为对象,采用红外气体分析法在 2011 年生长季(常绿树 4 月至 10 月;落叶树 6 月至 9 月)测定了自然条件下叶片气体交换及其相关生理特征的季节变化,探索了 R_L 与空气温度(T_{air})和相关叶片特征之间的关系。结果表明:红松和樟子松基于叶面积的 R_L (R_{L-area})表现为生长季初期和末期较大,而白桦 R_{L-area} 则随生长季进程而逐渐减小。在生长季中, R_{L-area} 与叶片总光合之比的时间动态明显。红松、樟子松 R_{L-area} 与 T_{air} 关系显著,而白桦 R_{L-area} 与 T_{air} 关系不显著;但 3 种树种基于叶质量的 R_L (R_{L-mass})与 T_{air} 均呈显著的指数函数关系。叶片特征(包括可溶性糖、淀粉、氮、比叶面积等参数)也有明显的季节变化。影响 R_L 的叶片特征参数因树种而异,其中可溶性糖浓度对 3 种树种的 R_L 均有显著影响。可见, R_L 的季节变化格局受树木的生长节律、温度和叶片特征的联合控制。

关键词:温度;叶片呼吸;比叶面积;非结构性碳;气体交换

Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species

WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan*

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

Abstract: To understand the factors influencing seasonal variation in leaf respiration (R_L), the leaf gas exchange characteristics and related leaf traits were examined for three tree species in northeastern China. The species were Korean pine (*Pinus koraiensis*), Mongolian pine (*P. sylvestris* var. *mongolica*) and white birch (*Betula platyphylla*). The R_L , net photosynthetic rate, and air temperature (T_{air}) were measured *in situ* with an infrared gas exchange analyzer (LI-6400 IRGA) twice per month throughout the growing season in 2011 (from April to October for the pines; from June to September for the birch). Specific leaf area (*SLA*) was calculated from oven-dried leaf weight and projected leaf area; nonstructural carbohydrates (*NSC*) concentrations were determined by a modified phenol-sulfuric acid method; and leaf nitrogen concentrations were measured by the Kjeldahl method. A stepwise multiple regression procedure was applied to explore the relationships between R_L and leaf traits. The area-based R_L (R_{L-area}) of Korean pine and Mongolian pine peaked in early and late growing seasons, while the R_{L-area} of white birch declined gradually with the growing season proceeding. The ratio of R_{L-area} to total photosynthesis and leaf trait parameters (i. e., soluble sugar concentration, starch concentration, *SLA*, leaf nitrogen concentration) also exhibited seasonal variations for the three species. The R_{L-area} of pines were positively correlated with T_{air} , while that of the birch was not. The mass-based R_L (R_{L-mass}) of the three tree species, however, were all positively related with T_{air} in an exponential function. The leaf trait parameters affecting the R_L varied with species, and the

基金项目:“十二五”科技支撑项目(2011BAD37B01);长江学者和创新团队发展计划(IRT1054);国家林业局重点项目(2006-77)

收稿日期:2012-04-18; 修订日期:2012-10-26

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

soluble sugars concentration significantly influenced the R_L for all the species. These results suggest that seasonal variation in R_L jointly controlled by growth rhythm, temperature and leaf traits.

Key Words: temperature; leaf respiration; specific leaf area; nonstructural carbohydrates; gas exchange

认知植物叶片气体交换的季节变化及其影响因子对精确模拟植被与大气之间的 CO_2 交换十分重要^[1]。叶片光合作用固定的碳中有 30%—80% 通过植物呼吸返回大气,其中很大一部分来自叶片呼吸(R_L)^[2]。例如,王森等^[3]报道 R_L 占东北阔叶红松林生态系统总呼吸的 21%;而 Cavaleri 等^[4]报道 R_L 占哥斯达黎加热带雨林老龄林生态系统总呼吸的 37%。可见, R_L 是森林生态系统碳收支的重要组分,量化 R_L 是估算生态系统呼吸和森林生态系统碳收支不可忽视的内容。

呼吸作用是植物将光合产物氧化释放出 CO_2 的同时,为植物生长和生理功能提供能量的过程,其中包括一系列对温度敏感的生化反应。通常,在一定温度范围内,温度升高 10°C , R_L 增长 1 倍^[5]。因此,气温的季节变化会导致 R_L 明显的季节变化^[6-9,1]。然而,以往研究在将 R_L 外推至生态系统水平时,忽略了 R_L 的季节变化,这可能会导致外推结果产生较大的不确定性^[4]。因此,研究 R_L 的季节变化将有助减少 R_L 尺度上推的不确定性。

R_L 与可溶性糖、叶片氮含量和比叶面积(SLA)等叶片特征关系密切^[1,5,8-11]。例如,不同冠层和功能群之间, R_L 常与叶片氮含量呈正相关关系^[5,9,12-13],这是因为植物的有机氮主要以蛋白质的形式存在,大约 60% 的维持呼吸用于蛋白质的修复和周转^[14]。可溶性糖作为底物也是影响 R_L 的因子^[9,11,15-16]。 R_L 与 SLA 关系的原因尚不十分清楚,Reich 等推测 SLA 较低时,分配给叶片结构组分的生物量大于分配给叶片代谢组分的生物量从而使 R_L 较小^[12]。自然条件下,叶片特征能否影响 R_L 的季节变化、影响多大? 这些问题的回答对于揭示 R_L 季节变化的影响因子有重要意义。

植物呼吸作用(R)和光合作用(P)关系密切, P 为 R 提供底物, R 为 P 提供能量和碳骨架^[17]。同时,两者对温度均很敏感。以往研究表明,在不同的温度环境中,叶片的 R 与 P 之比(R/P)经常保持恒定^[18]。Gifford^[19]的控制实验结果显示,植物的生长温度从 15°C 到 30°C 逐步升高时,整株植物的 R/P 会升高,但 3d 后又恢复到初始大小。因此,如果在气候-碳循环模型中假设 R/P 恒定,这对于预测气候变化情景下森林碳平衡尤为重要^[1]。但是,控制实验中恒定的 R/P 在自然条件下是否存在? 这还需要大量的野外测定来验证。

东北森林占我国森林面积和蓄积量的 1/3 以上,在维持陆地生态系统碳平衡中具有重要作用^[20]。相对于生态系统呼吸的其他组分(如土壤呼吸和树干呼吸)对于 R_L 的研究报道较少。为此,本研究以东北温带森林 3 个主要树种——红松(*Pinus koraiensis*)、樟子松(*P. sylvestris* var. *mongolica*)和白桦(*Betula platyphylla*)为对象,在自然条件下原位测定了 R_L 以及叶片特征的季节变化,旨在探索生长季 R_L 的变化格局及其影响因子,为估算 R_L 通量和构建森林碳循环机理模型提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究地区自然概况

试验地位于黑龙江帽儿山森林生态站($45^\circ24'\text{N}$, $127^\circ40'\text{E}$)。平均海拔 400 m,平均坡度 10° — 15° 。地带性土壤为暗棕色森林土。气候属于大陆性温带季风气候,四季分明,夏季短而湿热,冬季寒冷干燥;年均降水量 629 mm,雨量集中在 7、8 月,年均蒸发量 864 mm,年平均温度 3.1°C 。现有植被是原地带性植被——阔叶红松林受到多次人为干扰后演替成的天然次生林和人工林,代表了东北东部山区典型的森林类型。

1.2 叶片气体交换特征的测定

以帽儿山森林生态站 10 年生红松、樟子松、白桦幼树为对象,每个树种随机选取树高和冠幅相当的样树 4 株,在树冠中部(离地面 1.5—2.0 m 高)向阳方位光照充足处选取健康完整的叶片 4 片(其中红松和樟子松为 1 年生针叶),采用 LI-6400 便携式 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 测定系统及其簇状叶室(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)连体

测定叶片的气体交换特征和气温(T_{air})。测定期间为2011年生长季(常绿树为4月至10月;落叶松为6月至9月);测定频度为每2周1次;测定时刻为晴天上午时段(8:00—11:00)。测定时,叶室内的 CO_2 浓度和温度均与自然条件保持一致,先在光饱和条件下测定叶片的 CO_2 交换速率,即净光合速率(P_N);然后采用黑色不透光袋子对叶片遮光半小时之后,测定其 CO_2 交换速率,即 R_L ^[7]。

1.3 叶片特征的测定

每次气体交换测定结束之后,立即采下该叶片用于测定叶面积和干重,同时在该叶片附近取样,用于测定叶片的化学成分。所有样品置于4℃左右的冷藏箱保存,带回实验室后立即处理。先采用扫描图像处理获得叶面积^[21],之后将样品置于75℃下烘干至恒重,获得叶干重(精度0.0001);采用公式(1)计算得到比叶面积($SLA, \text{m}^2/\text{kg}$):

$$SLA = \text{叶面积} / \text{叶片干重} \quad (1)$$

然后,将样品粉碎,用于化学分析。采用改进的苯酚浓硫酸法测定可溶性糖浓度、淀粉浓度;两者相加即为总非结构性碳水化合物浓度(TNC)。采用凯氏定氮法测定叶片氮浓度。

1.4 数据分析

为了便于与以往研究比较,本研究中的 R_L 、叶片氮浓度、可溶性糖浓度、淀粉浓度、 TNC 分别以基于叶面积($R_{L\text{-area}}, N_{\text{area}}, SS_{\text{area}}, S_{\text{area}}, TNC_{\text{area}}$)和基于叶质量($R_{L\text{-mass}}, N_{\text{mass}}, SS_{\text{mass}}, S_{\text{mass}}, TNC_{\text{mass}}$)两种方式表示。利用 SLA 将 $R_{L\text{-area}}$ 转换为 $R_{L\text{-mass}}$,即 $R_{L\text{-mass}} = R_{L\text{-area}} \times SLA$ 。类似的, $N_{\text{area}} = N_{\text{mass}} / SLA$, $SS_{\text{area}} = SS_{\text{mass}} / SLA$, $S_{\text{area}} = S_{\text{mass}} / SLA$, $T_{\text{area}} = TNC_{\text{mass}} / SLA$ 。因为呼吸光合比常用来作为描述叶片的碳平衡的指标^[17],为此,本研究还计算了 $R_{L\text{-area}}$ 占叶片总光合的比例 $[R_{L\text{-area}} / (R_{L\text{-area}} + P_N)]$ 。

R_L 与 T_{air} 之间的关系采用如下指数模型拟合:

$$R_L = ae^{\beta \times T_{\text{air}}} \quad (2)$$

式中, a 和 β 为回归方程系数。 R_L 的温度系数(Q_{10})采用如下公式计算:

$$Q_{10} = e^{10\beta} \quad (3)$$

在分析 R_L 与叶片特征的关系时,为排除温度对 R_L 的影响,先进行了 R_L 与 T_{air} 的回归分析,然后采用多元逐步回归方法,建立了该残差与叶片特征之间的统计模型。所有统计分析均采用SPSS 18.0完成。

2 结果

2.1 叶片呼吸速率及其占总光合速率比例的季节变化

3种树种的 $R_{L\text{-area}}$ 均有明显的季节变化,但变化格局因树种而异(图1)。红松和樟子松 $R_{L\text{-area}}$ 季节变化相似,在生长季初期(4月下旬;5月下旬)和末期(8月下旬;9月上旬)分别出现两个峰值。而白桦 $R_{L\text{-area}}$ 最大值出现在6月上旬,随后呈逐渐减小的趋势。红松和樟子松 $R_{L\text{-mass}}$ 在整个生长季的变化幅度显著小于 $R_{L\text{-area}}$,而白桦 $R_{L\text{-mass}}$ 的季节变化与其 $R_{L\text{-area}}$ 相似。 $R_{L\text{-area}}$ 的总体平均值分别为:红松($0.66 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) < 白桦($0.84 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) < 樟子松($1.18 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); $R_{L\text{-mass}}$ 的总体平均值分别为:红松($4.56 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) < 樟子松($5.81 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) < 白桦($16.46 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)(图1)。

3种树种净光合速率(P_N)季节变化均呈单峰曲线,但峰值大小及其出现时间有差异(图1)。3种树种 $R_{L\text{-area}} / (R_{L\text{-area}} + P_N)$ 季节变化格局因树种而异。红松和樟子松 $R_{L\text{-area}} / (R_{L\text{-area}} + P_N)$ 季节变化相似,均在4月下旬出现一个峰值,5月上旬迅速下降到一个低值,一直稳定到9月份,10月份有所升高。白桦 $R_{L\text{-area}} / (R_{L\text{-area}} + P_N)$ 的季节变化不大,整体呈现逐渐减小的趋势(图1)。

2.2 叶片特征的季节变化

3种树种 SS_{area} 从4月开始持续下降,至7月降到最低值;之后,白桦持续增大至落叶,而红松和樟子松增至10月上旬达到最大值,随后又下降。白桦 SS_{mass} 的季节变化格局与 SS_{area} 相似,而红松和樟子松 SS_{mass} 在6月降到最低值,之后一直增大(图2)。

红松和樟子松的 S_{area} 和 TNC_{area} 的季节变化呈双峰曲线(图2):从4月开始一直增大,至5月或6月达到

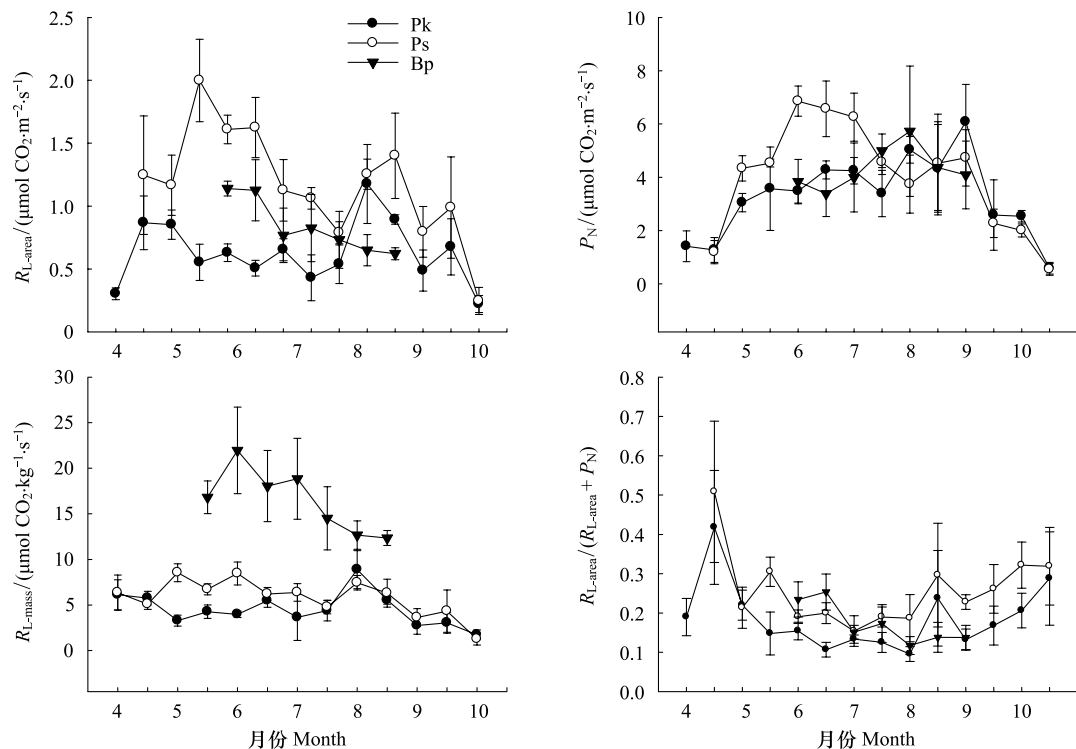


图1 红松(Pk)、樟子松(Ps)和白桦(Bp)基于叶面积($R_{L\text{-area}}$)和叶质量的叶片呼吸速率($R_{L\text{-mass}}$)、净光合速率(P_N)及 $R_{L\text{-area}}/(R_{L\text{-area}} + P_N)$ 的季节变化(平均值 \pm 标准偏差)($n=4$)

Fig. 1 Seasonal variation in area-based ($R_{L\text{-area}}$) and mass-based leaf respiration rates ($R_{L\text{-mass}}$), net photosynthetic rates (P_N), and $R_{L\text{-area}}/(R_{L\text{-area}} + P_N)$ for Korean pine (Pk), Mongolian pine (Ps) and white birch (Bp) (Mean \pm SD) ($n=4$)

最大值,之后迅速减小,至7月降到最低值,之后增大至10月上旬,随后又下降。白桦的 S_{area} 和 TNC_{area} 在生长季初期达到最大值,之后开始下降,至7月降到最低值,之后略有增大(图2)。3种树种 S_{mass} 和 TNC_{mass} 的季节变化格局与 S_{area} 和 T_{area} 相似,但是红松和樟子松 S_{mass} 和 TNC_{mass} 在10月下旬没有下降趋势(图2)。

红松和樟子松的 N_{area} 季节变化呈双峰曲线,而 N_{mass} 的季节变化幅度较小。白桦 N_{area} 和 N_{mass} 在整个生长季均呈下降趋势。红松和樟子松 SLA 季节变化幅度较小(图3),总体呈现出生长季初期和末期较低、中期较高的时间格局(图3)。

2.3 叶片呼吸速率与温度和叶片特征参数之间的关系

红松、樟子松的 $R_{L\text{-area}}$ 与 T_{air} 均呈显著的指数关系(图4);而白桦两者之间的关系不显著($R^2=0.12$, $P=0.081$), $R_{L\text{-area}}$ 有随着 T_{air} 而升高的趋势。然而,3种树种的 $R_{L\text{-mass}}$ 与 T_{air} 均存在显著的指数关系(图4),其平均 $R^2(0.35)$ 比 $R_{L\text{-area}}$ 与 T_{air} 关系的平均 $R^2(0.20)$ 高。3种树种 $R_{L\text{-area}}$ 的温度敏感系数(Q_{10})依次为:樟子松<白桦<红松;基于叶质量的 R_L 的温度敏感系数(Q_{10})依次为:樟子松<红松<白桦(表1)。

表1 3种树种基于叶面积($R_{L\text{-area}}$)和叶质量的叶片呼吸速率($R_{L\text{-mass}}$)对空气温度(T_{air})的敏感系数(Q_{10} ,平均值(标准偏差), $n=4$)

Table 1 Air temperature coefficients of area-based ($R_{L\text{-area}}$) and mass-based leaf respiration rates ($R_{L\text{-mass}}$) for the three tree species (Q_{10} , mean (SD), $n=4$)

树种 Species	$R_{L\text{-area}}-T_{\text{air}}$	$R_{L\text{-mass}}-T_{\text{air}}$
红松 <i>P. koraiensis</i>	1.51 (0.32)	1.78 (0.52)
樟子松 <i>P. sylvestris</i>	1.25 (0.03)	1.33 (0.04)
白桦 <i>B. platyphyllo</i>	1.42 (0.48)	1.88 (0.78)

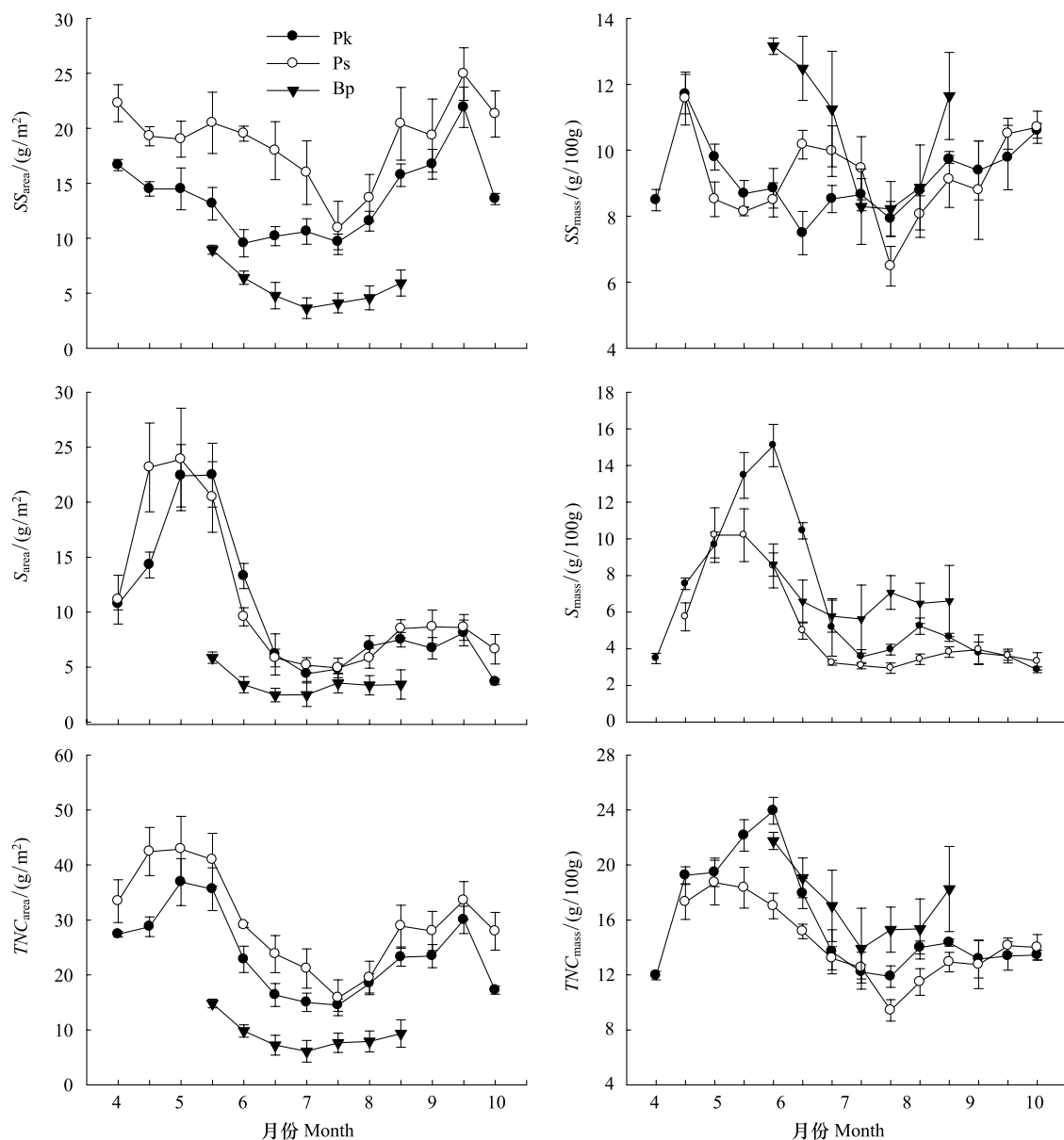


图2 红松(Pk)、樟子松(Ps)和白桦(Bp)基于叶面积和叶质量的可溶性糖浓度(SS_{area} 、 SS_{mass})、淀粉浓度(S_{area} 、 S_{mass})、总非结构性碳水化合物浓度(TNC_{area} 、 TNC_{mass})的季节变化(平均值 \pm 标准偏差)($n=4$)

Fig. 2 Seasonal variation in area-based and mass-based concentrations of soluble sugar (SS_{area} , SS_{mass}), starch (S_{area} , S_{mass}), and total nonstructural carbohydrate in leaf (TNC_{area} , TNC_{mass}) for Korean pine (Pk), Mongolian pine (Ps) and white birch (Bp) (Mean \pm SD) ($n=4$)

3 种树种 R_{L-area} 与叶片特征参数之间的关系因树种而异(表2)。红松 R_{L-area} 与 SS_{area} 和 SLA 呈显著的正相关关系;樟子松 R_{L-area} 与 SS_{area} 和 S_{area} 呈显著的正相关关系;白桦 R_{L-area} 与 SS_{area} 呈显著的正相关关系。3 种树种 R_{L-area} 与叶片氮浓度之间均无显著关系。

3 讨论

3.1 叶片呼吸与空气温度的关系

R_L 对温度的响应是温度和植物生理活动共同作用的结果^[7,23]。短时间内呼吸速率随着温度呈指数升高;但在长期时间尺度上,温度对呼吸作用的驯化使其与温度之间的指数关系发生改变^[23]。本研究中,2 种常绿树种的 R_{L-area} 与 T_{air} 均存在显著的指数关系,但落叶树白桦的 R_{L-area} 与 T_{air} 之间的关系不显著(图4),而3

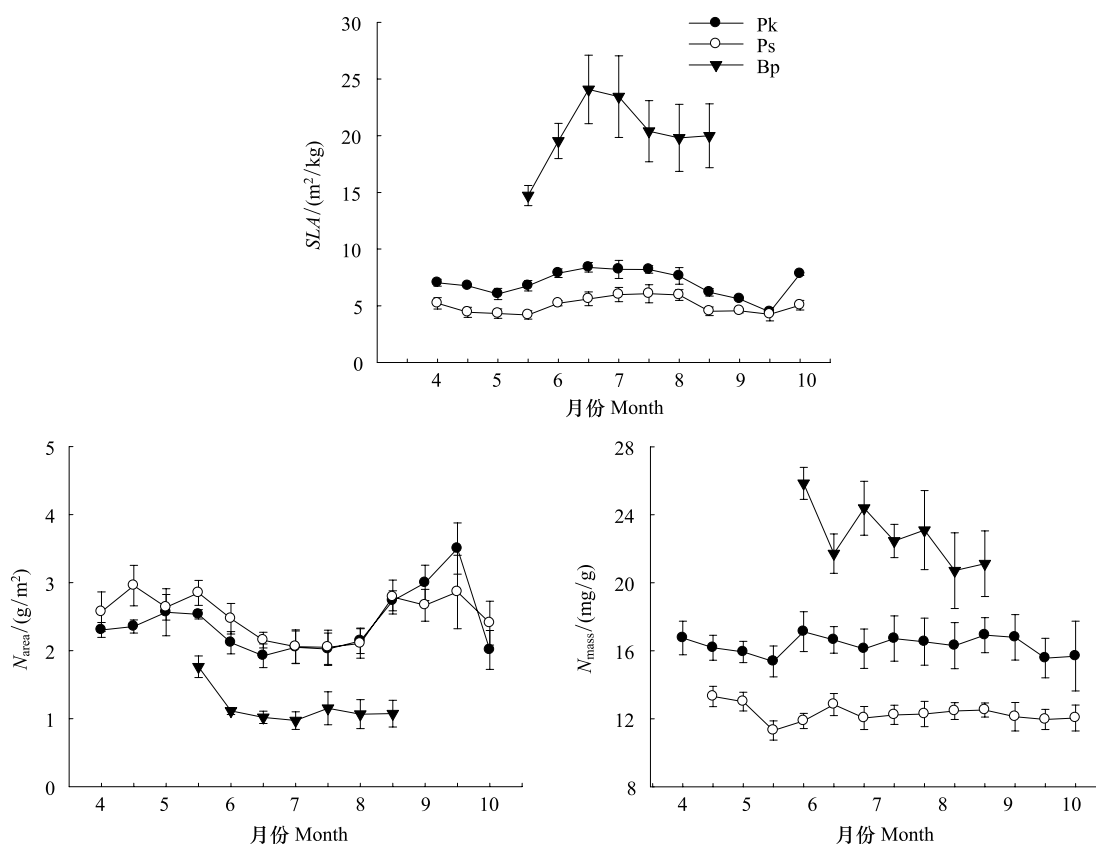


图3 红松(Pk)、樟子松(Ps)和白桦(Bp)比叶面积(SLA)、基于叶面积(N_{area})和叶质量的叶片氮浓度(N_{mass})的季节变化($n=4$)

Fig. 3 Seasonal variation in specific leaf area (SLA), area-based (N_{area}) and mass-based concentrations of leaf nitrogen (N_{mass}) for Korean pine (Pk), Mongolian pine (Ps) and white birch (Bp) (Mean \pm SD) ($n=4$)

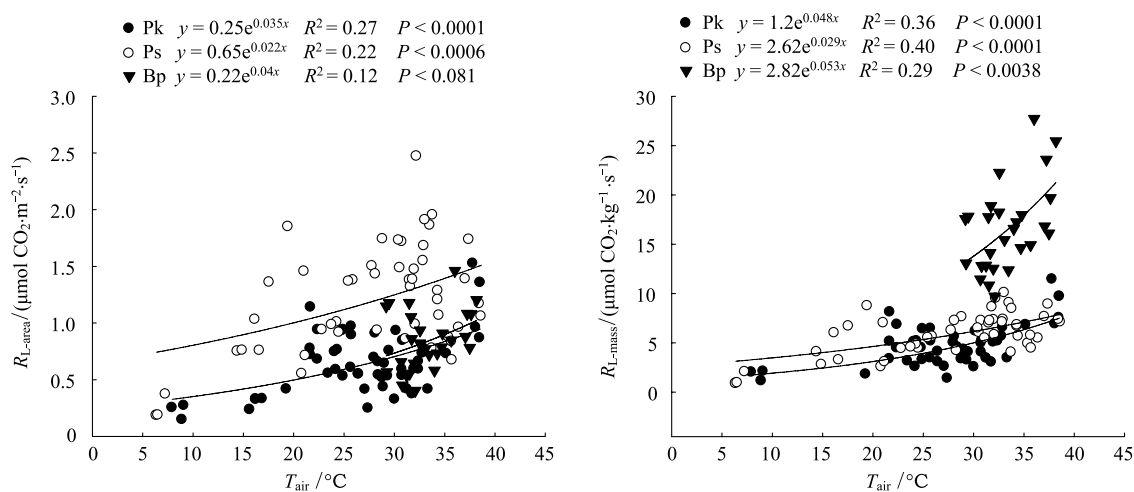


图4 红松(Pk)、樟子松(Ps)和白桦(Bp)基于叶面积(R_{L-area})和叶质量的叶片呼吸速率(R_{L-mass})与空气温度(T_{air})的关系

Fig. 4 The relationship between the area-based (R_{L-area}) or mass-based leaf respiration rates (R_{L-mass}) and air temperature (T_{air}) for Korean pine (Pk), Mongolian pine (Ps) and white birch (Bp)

种树种的 R_{L-mass} 与 T_{air} 的关系却都显著(图4)。导致这种现象的原因可能是:可溶性糖、淀粉(图2)、氮、 SLA (图3)等叶片特征的季节变化间接地影响了 R_L ^[11],从而使 R_L 与温度的关系复杂化。尤其是白桦 SLA 随季节而发生的很大波动(图3),可能掩盖了 R_{L-area} 与 T_{air} 的关系。此外,当温度升高到一定程度,随着温度对酶的

限制作用解除,底物有效性成为影响呼吸的主导因子^[23]。白桦 R_L 的测定时期间(6月至9月),正是本地高温高湿的生长盛期,因而底物对白桦 $R_{L\text{-area}}$ 的影响可能增大(表2)。

表2 3种树种基于叶面积的呼吸速率($R_{L\text{-mass}}$)与叶片特征参数之间的多元逐步回归统计模型(排除气温的影响)

Table 2 Stepwise multiple regression models between leaf-area-based respiration rates ($R_{L\text{-mass}}$) and leaf traits for the three tree species by excluding the effect of air temperature on $R_{L\text{-mass}}$

树种 Tree species	样本数 N	a	b	c	d	R^2	P
红松 <i>P. koraiensis</i>	50	-1.696	0.064		0.116	0.26	0.001
樟子松 <i>P. sylvestris</i>	49	-0.873	0.026	0.035		0.48	<0.001
白桦 <i>B. platyphylla</i>	27	-0.544	0.1			0.60	<0.001

回归方程形式: $R_{L\text{-area}}$ 与气温回归的残差 = $a+b \times SS_{\text{area}}+c \times S_{\text{area}}+d \times SLA$;式中 SS_{area} 、 S_{area} 、 SLA 分别代表可溶性糖浓度、淀粉浓度和比叶面积;叶片氮浓度的影响不显著($P>0.05$); a 、 b 、 c 、 d 为回归系数

本研究中 R_L 温度的敏感系数(Q_{10})均小于2,低于以往研究^[14](表1)。以往研究表明, R_L 对温度季节变化的驯化可能会削弱其对温度的敏感性^[23]。本研究是以季节时间尺度计算 Q_{10} 值,而 Tjoelker 等^[15]则是以小时时间尺度计算 Q_{10} 值。另外,3种树种基于叶面积和叶质量的 Q_{10} 值有差异,这可能与 SLA 的季节变化有关。Bolstad 等研究了18种阔叶树种 R_L -温度响应方程,其中部分树种也出现了同样类似的结果^[24]。这些研究结果表明,在利用 Q_{10} 上推 R_L 时,不但要考虑到 R_L 的表达单位,而且要考虑到 Q_{10} 值的时间尺度。

3.2 叶片呼吸与叶片特征的关系

研究叶片特征与 R_L 的关系,不仅可以揭示叶片特征对 R_L 的影响,还可以利用叶片特征的测定预测 R_L ^[9,16-17]。本研究测定的 $R_{L\text{-area}}$ ($0.22\text{--}2.00 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)与王森等报道的温带乔木树种 $R_{L\text{-area}}$ 的范围($0.20\text{--}1.90 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)相符^[3]。红松的 $R_{L\text{-area}}$ 和 $R_{L\text{-mass}}$ 在本研究测定的3种树种中均最小,这可能是因为红松生长较慢。

不同树种之间 R_L 的差异与叶片结构(如 SLA)和叶片生理特征(如 NSC)有关。本研究中,影响 R_L 的叶片特征包括可溶性糖浓度、淀粉浓度和 SLA ,但其中各种组分对 R_L 的贡献程度因树种而异(表2)。这与前人的控制实验^[7,15]和野外测定^[9,11]结果相符。可溶性糖作为植物呼吸作用的底物与 R_L 关系密切^[11,13,15-16],外加底物可以促进呼吸^[10,25]。叶片厚度的变化(即 SLA)也会影响可溶性糖的浓度,进而影响 R_L 。尽管前人研究表明, R_L 与组织氮含量关系密切^[5]。但本研究结果却表明,在整个生长季3种树种 R_L 均不受 N_{area} 的显著影响。这与 Xu 和 Griffin^[9]的研究结果相符。他们报道,北美红栎(*Quercus rubra*)标准化到20℃的 R_L 的季节变化与 N_{area} 无关,并推断生长季中,很多其他需要呼吸产物的生理过程可能掩盖了氮与维持呼吸的关系^[9]。另外,细胞内呼吸酶占总蛋白质含量的比例很小,特别是在氮丰富的生态系统,呼吸作用几乎不会受氮有效性的影响^[26]。

3.3 叶片呼吸的季节变化

通常 R_L 包括了生长呼吸和维持呼吸两个组分^[2],其主要影响因子不同。生长呼吸与树木生长速率直接相关^[27],而维持呼吸主要受温度控制^[5]。随生长季进程和树木生长节律的变化, R_L 组分也发生相应的变化,从而导致 R_L 具有明显的季节动态(图1)。对于2种常绿树种而言,4月上旬,虽然叶片可能为了防止低温的侵袭和促进早春的快速生长而积累的可溶性糖浓度较高(图2),但由于气温过低而限制酶的活力,从而使其 R_L 较低。随着气温的升高,酶活力的限制逐渐被解除,使底物(可溶性糖和淀粉)成为 R_L 的主要限制因子(表2),从而使 R_L 在5月出现一个峰值(图1和图2)。6月至8月份, R_L 随可溶性糖浓度的降低而呈下降趋势。在生长季末期(9月份),随气温的降低, NSC 浓度有升高趋势(图2),可利用的底物增多, R_L 因对低温的驯化响应而增大^[16];另外,常绿树种在进入休眠期之前一些需要呼吸提供能量的运输过程也可促使 R_L 增大^[2]。10月下旬, R_L 因低温对酶活性的限制而再度降低。除了上述温度、树木生长节律和底物的影响之外, SLA 的季节变化(图3)可能是导致白桦和2种常绿树种 R_L 季节变化格局不同的主要原因。

3.4 叶片呼吸与光合之间的平衡

本研究显示,3 种树种的叶片呼吸与叶片总光合之比($R_{L\text{-area}}/(R_{L\text{-area}} + P_N)$)波动在 0.10—0.51 之间,意味着叶片光合作用固定的碳中有 10%—51% 通过叶片呼吸直接返回大气。这与 Gratani^[28] 等对地中海常绿树种叶片呼吸与光合速率之比的季节变化范围(0.11—0.45)相符。可见, R_L 是树木碳收支不可忽视的一部分。

从碳收支角度看,叶片呼吸(R)和光合(P)是密切相关、但效果相反的两个生理过程。两者对温度均很敏感,敏感程度不同。因而在短期时间尺度上,温度的改变会导致 R/P 的改变^[17-19]。然而,一些控制实验表明,随着处理时间的延长,温度对 R 和 P 的驯化作用会使 R/P 达到动态平衡^[29]。但是,我们发现在自然条件下,3 种树种 $R_{L\text{-area}}/(R_{L\text{-area}} + P_N)$ 在整个生长季并不恒定,这与 Ow 等^[1] 的研究结果相符。本研究中气温较低的生长季初期和末期 $R_{L\text{-area}}/(R_{L\text{-area}} + P_N)$ 较高(图 1),可能是由于低温对 P 的限制作用大于对 R 的限制、底物的积累对 P 的负反馈作用而对 R 的正反馈效应(表 2)等因素造成的。此外,植物生长发育过程中的许多其他的生理过程(如生长、运输等)同样需要 R 提供呼吸产物,加上一些限制 P 的环境因子(如光照、水分养分有效性等)的协同作用导致了 R/P 的季节变化。总之,在一定温度范围内, R 与 P 可以维持平衡;当温度超过或者低于植物的最适温度范围时, R 与 P 之间的平衡可能会被打破^[30]。因此,气候-碳循环模型假设 R/P 恒定时要谨慎^[31]。

4 结论

红松和樟子松 $R_{L\text{-area}}$ 的季节变化格局相似,表现为生长季初期和末期较高;而白桦则随生长季进程而呈现逐渐下降趋势。这是树木的生长节律、温度和叶片特征联合作用的结果。生长季中 $R_{L\text{-area}}/(R_{L\text{-area}} + P_N)$ 不是恒定的,而表现出明显的季节动态。红松、樟子松 $R_{L\text{-area}}$ 与 T_{air} 呈显著的指数函数关系,而白桦 $R_{L\text{-area}}$ 与 T_{air} 关系不显著;但 3 种树种 $R_{L\text{-mass}}$ 与 T_{air} 均呈显著指数函数关系。可溶性糖浓度、淀粉浓度以及 SLA 是影响 R_L 的主要叶片特征,其中可溶性糖是关键因子之一。这些结果对于精确估算森林生态系统碳通量具有重要意义。致谢:帽儿山森林生态站提供野外基础支持。

References:

- [1] Ow L F, Griffin K L, Whitehead D, Walcroft A S, Turnbull M H. Seasonal variation in foliar carbon exchange in *Pinus radiata* and *Populus deltoides*: respiration acclimates fully to changes in temperature but photosynthesis does not. *Global Change Biology*, 2010, 16 (1): 288-302.
- [2] Amthor J S. The McCree-de Wit-Penning de Vries-Thornley respiration paradigms: 30 years later. *Annals of Botany*, 2000, 86 (1): 1-20.
- [3] Wang M, Liu Y Q, Hao Z Q, Wang Y S. Ecosystem respiration in broad leaved Korean pine forest of Changbai Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (10): 1789-1795.
- [4] Cavaleri M A, Oberbauer S F, Ryan M G. Foliar and ecosystem respiration in an old-growth tropical rain forest. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31 (4): 473-483.
- [5] Ryan M G. Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications*, 1991, 1 (2): 157-167.
- [6] Körner C, Larcher W. Plant life in cold environment. In: *Plants and Temperature Symposium of Society of Experimental Biologists*, the Company of Biologists Limited, Cambridge, UK, 1988.
- [7] Atkin O K, Holly C, Ball M C. Acclimation of snow gum (*Eucalyptus pauciflora*) leaf respiration to seasonal and diurnal variations in temperature: the importance of changes in the capacity and temperature sensitivity of respiration. *Plant, Cell and Environment*, 2000, 23 (1): 15-26.
- [8] 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.
- [9] Xu C Y, Griffin K L. Seasonal variation in the temperature response of leaf respiration in *Quercus rubra*: foliage respiration and leaf properties. *Functional Ecology*, 2006, 20 (5): 778-789.
- [10] Noguchi K, Terashima I. Different regulation of leaf respiration between *Spinacia oleracea*, a sun species, and *Alocasia odora*, a shade species. *Physiologia Plantarum*, 1997, 101 (1): 1-7.
- [11] Lee T D, Reich P B, Bolstad P V. Acclimation of leaf respiration to temperature is rapid and related to specific leaf area, soluble sugars and leaf nitrogen across temperate deciduous tree species. *Functional Ecology*, 2005, 19 (4): 640-647.
- [12] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S, Vose J M, Volin J C, Gresham C, Bowman W D. Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen,

- specific leaf area and leaf life-span; a test across biomes and functional groups. *Oecologia*, 1998, 114 (4): 471-482.
- [13] Turnbull M H, Whitehead D, Tissue D T, Schuster W S F, Brown K J, Griffin K L. Scaling foliar respiration in two contrasting forest canopies. *Functional Ecology*, 2003, 17 (1): 101-114.
- [14] Penning de Vries F W T. The cost of maintenance processes in plant cells. *Annals of Botany*, 1975, 39 (1): 77-92.
- [15] Tjoelker M G, Reich P B, Oleksyn J. Changes in leaf nitrogen and carbohydrates underlie temperature and CO₂ acclimation of dark respiration in five boreal tree species. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22 (7): 767-778.
- [16] Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B, Zytewiak R. Coupling of respiration, nitrogen, and sugars underlies convergent temperature acclimation in *Pinus banksiana* across wide-ranging sites and populations. *Global Change Biology*, 2008, 14 (4): 782-797.
- [17] Dewar R C, Medlyn B E, Mcmurtrie R E. Acclimation of the respiration/photosynthesis ratio to temperature: insights from a model. *Global Change Biology*, 1999, 5 (5): 615-622.
- [18] Gifford R M. Plant respiration in productivity models: conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbon-cycle research. *Functional Plant Biology*, 2003, 30 (2): 171-186.
- [19] Gifford R M. Whole plant respiration and photosynthesis of wheat under increased CO₂ concentration and temperature long-term vs. short-term distinctions for modelling. *Global Change Biology*, 1995, 1 (6): 385-396.
- [20] 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.
- [21] Xiao Q, Ye W J, Zhu Z, Chen Y, Zheng H L. A simple non-destructive method to measure leaf area using digital camera and Photoshop software. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (6): 711-714.
- [22] Amthor J S. Respiration and crop productivity. Springer-Verlag, New York, 1989.
- [23] Atkin O K, Tjoelker M G. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in Plant Science*, 2003, 8 (7): 343-351.
- [24] Bolstad P V, Mitchell K, Vose J M. Foliar temperature-respiration response functions for broad-leaved tree species in the southern Appalachians. *Tree Physiology*, 1999, 19 (13): 871-878.
- [25] Atkin O K, Day D A. A comparison of the respiratory processes and growth rate of selected Australian alpine and related lowland plant species. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1990, 17 (5): 517-526.
- [26] Amthor J S. Respiration in a future, higher-CO₂ world. *Plant, Cell and Environment*, 1991, 14 (1): 13-20.
- [27] 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.
- [28] Gratani L, Varone L, Catoni R. Relationship between net photosynthesis and leaf respiration in Mediterranean evergreen species. *Photosynthetica*, 2008, 46 (4): 567-573.
- [29] Loveys B R, Atkinson L J, Sherlock D J, Roberts R L, Fitter A H, Atkin O K. Thermal acclimation of leaf and root respiration: an investigation comparing inherently fast- and slow-growing plant species. *Global Change Biology*, 2003, 9 (6): 895-910.
- [30] Campbell C, Atkinson L, Zaragoza-Castells J, Lundmark M, Atkin O K, Hurry V. Acclimation of photosynthesis and respiration is asynchronous in response to changes in temperature regardless of plant functional group. *New Phytologist*, 2007, 176 (2): 375-389.
- [31] Rustad L. Matter of time on the prairie. *Nature*, 413 (6856): 578-579.

参考文献:

- [3] 王淼, 刘亚琴, 郝占庆, 王跃思. 长白山阔叶红松林生态系统的呼吸速率. *应用生态学报*, 2006, 17 (10): 1789-1795.
- [21] 肖强, 叶文景, 朱珠, 陈瑶, 郑海雷. 利用数码相机和 Photoshop 软件非破坏性测定叶面积的简便方法. *生态学杂志*, 2005, 24 (6): 711-714.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 5 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
- Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
- A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
- Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
- Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
- Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
- Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethytidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
- Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
- The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
- Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
- Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
- Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
- An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
- Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
- Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
- Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
- Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
- Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade	MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment	LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C,N and P distribution of <i>Schima superba</i> seedlings in response to simulated nitrogen deposition	LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields	WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)

Resource and Industrial Ecology

Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of <i>Zizania latifolia</i> Turcz. plants are affected by <i>Ustilago esculenta</i> infection	YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron(<i>Citrus medica</i> L. var. <i>sarcodactylis</i> Swingle)	CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
Hosts preference of <i>Echinothrips americanus</i> Morgan for different vegetables ...	ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants	YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of <i>Populus tomentosa</i> seedlings	WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach	ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)

Research Notes

Characteristics of precipitation distribution in <i>Pinus tabulaeformis</i> plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain	ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing	JIA Baoqun (1654)
Effects of <i>Mikania micrantha</i> wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in <i>Mikania micrantha</i> H. B. K.	WANG Ruilong, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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 33 卷 第 5 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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 90.00 元