

林窗对川西亚高山云杉人工林土壤呼吸的影响*

杨开军^{1,2} 熊莉¹ 杨万勤^{1,2} 贺若阳¹ 李志杰¹ 庄丽燕¹ 谭波¹ 徐振锋^{1,2**}

¹四川农业大学生态林业研究所, 四川省林业生态工程重点实验室 成都 611130

²四川农业大学高山森林生态系统定位研究站, 长江上游生态安全协同创新中心 成都 611130

摘要 为了解林窗对川西亚高山粗枝云杉 (*Picea asperata*) 人工林土壤呼吸的影响, 采用CO₂通量全自动监测系统对川西亚高山粗枝云杉人工林林窗和林内土壤呼吸及土壤温度、水分进行为期两年的连续观测, 比较分析林窗和林内环境因子和土壤呼吸速率的变化. 结果表明: 川西亚高山粗枝云杉人工林林窗和林内的土壤温度、土壤水分和土壤呼吸速率均具有显著的季节动态. 在生长季节(4-10月), 林窗效应使土壤温度、土壤水分和土壤呼吸速率较林内分别增加了48.8%、19.3%和18.6%; 而冬季(11月-翌年3月)两种环境之间并无显著差异. 林窗和林内土壤呼吸速率和土壤温度均呈显著指数相关 ($P < 0.01$), 与土壤水分呈显著线性相关 ($P < 0.05$). 林窗和林内的土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 分别为2.46和3.01. 综上所述, 林窗效应对川西亚高山森林土壤呼吸具有显著刺激作用, 且有明显的季节动态特征. (图3表1参33)

关键词 川西亚高山; 林窗; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤水分; Q_{10} 值

CLC S718.5

Effects of forest gap to soil respiration in a subalpine *Picea asperata* plantation of western Sichuan*

YANG Kaijun^{1,2}, XIONG Li¹, YANG Wanqin^{1,2}, HE Ruoyang¹, LI Zhijie¹, ZHUANG Liyan¹, TAN Bo¹ & XU Zhenfeng^{1,2**}

¹Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering of Sichuan Province, Institute of Ecology & Forest, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

²Long-term Research Station of Alpine Forest Ecosystems and Collaborative Innovation Center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract To understand the effect of artificial forest gap on soil respiration of subalpine *Picea asperata* plantation, a two-year experiment was conducted in a subalpine artificial *P. asperata* plantation of western Sichuan. Soil respiration and soil temperature and moisture were monitored continuously for two years by Li-cor 8100. Soil respiration rate in the forest gap and the enclosed forest exhibited a similar seasonal dynamic pattern. Soil respiration rate ranged from 0.18 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ to 6.86 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in the forest gap and from 0.28 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ to 5.54 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in the enclosed forest. During the growing season, compared with that of the enclosed forest, soil temperature, moisture and soil respiration rate was 48.8%, 19.3% and 18.6%, respectively, higher in the gap. However, there were no significant differences for those during the wintertime. Soil respiration rate had a significantly exponential correlation with soil temperature and a linear correlation with soil moisture. The temperature sensitivity (Q_{10}) of soil respiration was 2.46 in the gap and 3.01 in the enclosed forest. In conclusion, forest gaps have positive effects on soil temperature, moisture and respiration rate, and such gap effects are dependent on the season.

Keywords western Sichuan subalpine forest gap; soil respiration; soil temperature; soil moisture; Q_{10}

土壤呼吸是指土壤释放CO₂的所有代谢过程, 包括3个生物学过程(土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸和根呼吸)和1个化学氧化过程(土壤矿化)^[1]. 土壤呼吸是陆地生态系统中仅

次于植物光合作用的碳通量过程, 占整个生态系统呼吸量的60%-90%, 是生态系统碳循环的重要组成部分^[2-3], 更是调控全球碳循环和气候变化的关键过程. 森林土壤呼吸是陆地生态系统土壤呼吸的重要组成部分, 其动态变化将对全球碳平衡产生深远的影响, 全球森林过度采伐和其他土地利用变化导致土壤CO₂释放的增加, 占过去两个世纪来因人类活动释放的CO₂总量的一半^[4]. 森林生态系统土壤呼吸的微小变化不仅会引起大气中CO₂浓度的明显改变, 更会影响森林贮存碳能力^[4], 因而在整个森林生态系统碳平衡估算中具有重要意义.

收稿日期 Received: 2015-10-30 接受日期 Accepted: 2015-11-23

*国家自然科学基金项目(31570445、31570601和31500509)和中国博士后科学基金项目(2013M540714、2014T70880)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31570445, 31570601 and 31500509), and the China Postdoctoral Science Foundation Project (2013M540714, 2014T70880)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: sicaxzf@163.com)

川西亚高山森林是我国第二大林区的主体,同时也是长江上游重要的生态屏障.川西亚高山针叶林经过数十年采伐后,迹地上大量种植的人工云杉纯林和部分自然恢复形成的次生林取代了原本繁茂的天然林^[5].由于受自然或人为的干扰,川西亚高山森林中形成了许多面积不等的林窗,导致森林林窗的土壤温湿度^[6]、土壤微生物活性^[7]以及地下根生物量^[8]等较林内环境发生了明显变化,导致土壤呼吸产生差异.此外,林窗大小^[9]、不同森林类型林窗^[8,10]也会影响两种环境之间的土壤呼吸差异.这些因子的微小变化都会对森林土壤呼吸造成极大的改变,造成川西亚高山森林碳源-汇格局发生改变.因此,研究林窗对森林土壤呼吸的影响机制,了解川西亚高山森林碳源-汇格局,对我们有效提高森林碳汇效应缓解森林土壤碳排放具有重大意义.目前有关川西亚高山森林林窗的研究主要关注土壤微生物^[11]、凋落物分解^[12-13]和土壤理化性质^[14]等,而忽视了林窗效应对川西亚高山人工林土壤呼吸影响.本研究选取川西亚高山粗枝云杉人工林,对其土壤呼吸速率和土壤温度、土壤水分进行连续两年的测定,分析比较川西亚高山粗枝云杉人工林林窗、林内土壤呼吸速率与环境因子的关系,以期对川西亚高山森林土壤碳源-汇格局对全球气候变化的影响提供一定的科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域和研究样地概况

本研究区域位于四川省阿坝州理县毕棚沟自然保护区(102°53'-102°57'E, 31°14'-31°19'N,海拔2 458-4 619 m).地处青藏高原与四川盆地的过渡地带,属丹巴-松潘半湿润气候.该区域内年平均温度为2-4℃,最高气温23.7℃,最低温度-18.1℃,年均降水量850 mm,降雨主要分布在6-9月.受低温限制以及地质灾害的频繁影响,研究区域土壤发育经常受阻且发育缓慢,使研究区域以锥形土、冲积土和初育土为主,受地质灾害影响较小的平缓区域则以淋溶土为主.

粗枝云杉人工林是20世纪50年代林采伐后人工栽植的人工林,树龄约为60年.近几年,由于病虫害及自然因素(例如风雪等)等干扰导致一些植株死亡或折损,而后人工移除形成林窗.林内灌木主要有悬钩子(*Rubus corchorifolius*)、三颗针(*Berberis sargentiana*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)和接骨木(*Sambucus williamsii*)等.草本主要有东方草莓(*Fragaria orientalis*)、铁线莲(*Clematis florida*)和蟹甲草(*Parasenecio forrestii*)等.林窗下多以多年生草本植物为主,主要有东方草莓(*Fragaria orientalis*)、羊茅(*Festuca ouina*)、毛茛(*Ranunculus japonicus*)等.表层土壤(0-20 cm)有机碳、全氮、全磷和pH分别为88.5 g/kg、7.8 g/kg、0.4 g/kg和6.4.

1.2 试验样地设置

2012年11月中旬,在选定的粗枝云杉人工林样地中,选取了地形、坡向、海拔等立地条件基本一致的林窗3个(面积约100 m²).在每个林窗中心选择1个3 m × 3 m的小样方,每个样地按着对角线均匀设置5个PVC环(直径20 cm,高6 cm,平行地表插入土壤约3 cm),为实验组;同时每个林窗相对应林下设置1个3 m × 3 m对照样方,每个样地按着对角线设置5

个PVC环,为对照组.在测量的前一天整齐地剪去环内所有植物的地上部分,不干扰试验内的土壤.每次测定,在每个小样方内测定土壤呼吸数据平均作为一个实验样本数据,共3个重复.

1.3 土壤呼吸、土壤温度和土壤水分测定

土壤呼吸通量采用Li-8100土壤碳通量自动测量系统(Li-Cor, Inc, NE, USA)测定.土壤呼吸测定从2012年11月中旬开始至2014年10月中旬,平均每个月观测一次,每次测定9:00-12:00完成.采用Li-8100所附带的土壤温度探针测定地下5 cm土壤温度和水分传感器测定水分(体积含水量,%).

1.4 统计分析

所有的统计分析在SPSS 13.0软件中进行,采用Student-*t*检验相同测定时间不同处理间土壤温度、水分和呼吸速率差异性. One-way ANOVA检验土壤温度和土壤水分与不同季节之间的显著性差异.回归分析检验土壤呼吸与土壤温度和水分的关系.所有统计的显著性水平均为 $P = 0.05$.用Sigmaplot11.0软件制图.

土壤呼吸与温度间关系采用指数模型:

$$R_s = ae^{bt}, Q_{10} = e^{10b}$$

土壤呼吸与土壤水分的关系采用线性模型:

$$R_s = cw + d$$

式中: R_s 为土壤呼吸; t 为土壤温度; w 为土壤水分; a 、 b 、 c 、 d 为模型参数. Q_{10} 表示土壤呼吸的温度敏感性.

2 结果与分析

2.1 林窗和林内土壤温度和土壤水分

林窗与林内的土壤温度季节动态基本一致,均表现为从3月开始上升到8月达到最大值,随后又下降的单峰曲线,季节变化显著($P < 0.01$,图1A).生长季节(4-10月)时,林窗和林内土壤温度最大值分别为20.35℃和14.35℃,均出现在8月,平均温度分别为13.59℃和9.13℃.冬季(11月-翌年3月)时,林窗和林内平均土壤温度分别为0.30℃和0.20℃,差异不显著.

川西亚高山粗枝云杉人工林林窗环境和林内对照下土壤水分规律相对于土壤温度变化较为复杂,但两种处理的土壤水分变化存在相似的季节模式($P < 0.01$,图1B).林窗和林内对照土壤水分分别在3.5%-60.0%和2.6%-45.0%范围变动.在生长季节,林窗和林内土壤水分平均值分别为40.2%和33.7%;在冬季,林窗和林内的土壤水分平均值分别为15.0%和14.5%.林窗和林内土壤水分最大值均出现在雨季(6-9月),最小值均出现在1-2月.整个测定时期,林窗使土壤水分增加了13.7%.

2.2 林窗和林内土壤呼吸速率

从图2可以看出,无论是林窗还是林内,土壤呼吸速率均表现出明显的季节变化特征($P < 0.01$).深冬时期(1-2月),土壤呼吸速率降到最低,随着春季温度回暖,土壤呼吸速率也逐渐升高,在生长旺盛时期(7-8月)达到最大值.林窗和林内土壤呼吸速率月平均值变化范围分别在0.18-6.86 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和0.28-5.54 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间.生长季节,林窗和林内的土壤呼吸速率分别为4.02 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和3.39 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,林窗土

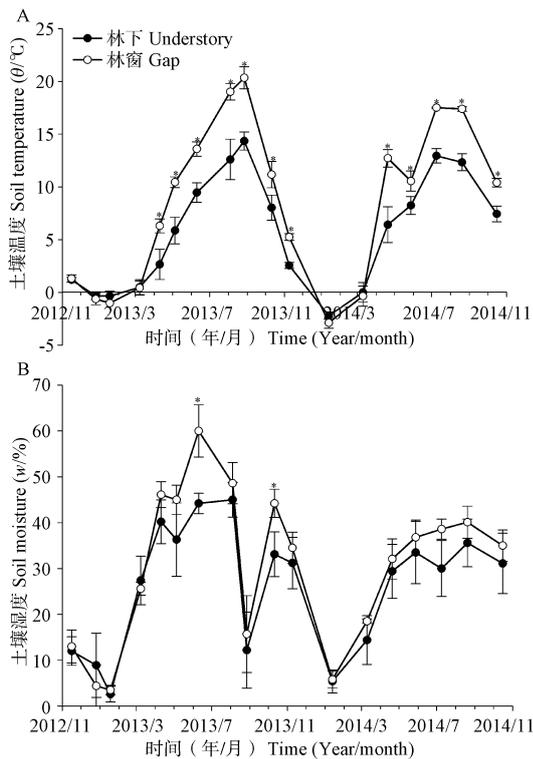


图1 川西亚高山粗枝云杉人工林林窗环境和林内对照土壤温度和土壤水分动态变化。* $P < 0.05$ 。

Fig. 1 Dynamics of soil temperature and soil moisture in the gap and understory of *P. asperata* plantation of western Sichuan. * $P < 0.05$.

壤呼吸速率显著高于林内土壤呼吸速率, 林窗土壤呼吸速率较林内提高了18.6%。冬季时, 土壤呼吸速率分别为 $0.82 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $0.94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 差异不显著。总体上来看, 林窗土壤呼吸速率比林内对照土壤呼吸速率提高14.4%, 这主要来自生长季节的贡献(图2)。

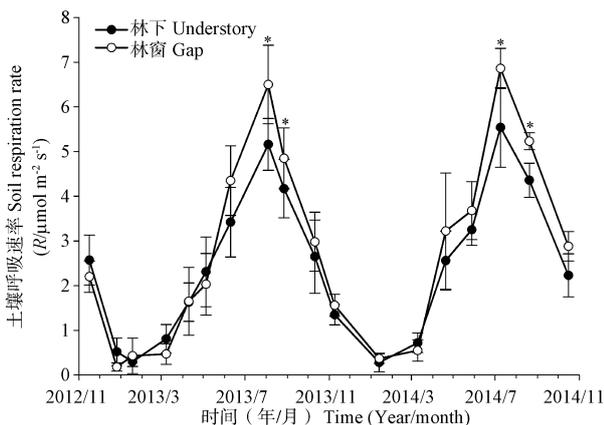


图2 川西亚高山粗枝云杉人工林林窗环境和林内对照土壤呼吸速率季节动态。* $P < 0.05$ 。

Fig. 2 Seasonal dynamics of soil respiration rate of the gap and understory in a subalpine *P. asperata* plantation of western Sichuan. * $P < 0.05$.

2.3 土壤温度、土壤水分与土壤呼吸速率关系

林窗和林内土壤温度与土壤呼吸速率均成极显著相关 ($P < 0.01$, 图3A), 土壤温度和土壤呼吸速率在季节变化上

有很好的 consistency, 随着土壤温度的增加土壤呼吸速率增强。指数模型能很好地拟合土壤呼吸速率与土壤温度之间关系(图3A), 土壤温度分别可以解释林窗和林内85.2%和85.6%的土壤呼吸变化。林窗和林内的土壤呼吸速率与土壤水分均呈显著线性相关 ($P < 0.05$, 图3B)。土壤水分分别可以解释林窗和林内34.4%和30.8%的土壤呼吸变化。此外, 林窗明显地降低了土壤呼吸的温度敏感性 (Q_{10}), 林内土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 比林窗高出22.4%(表1)。

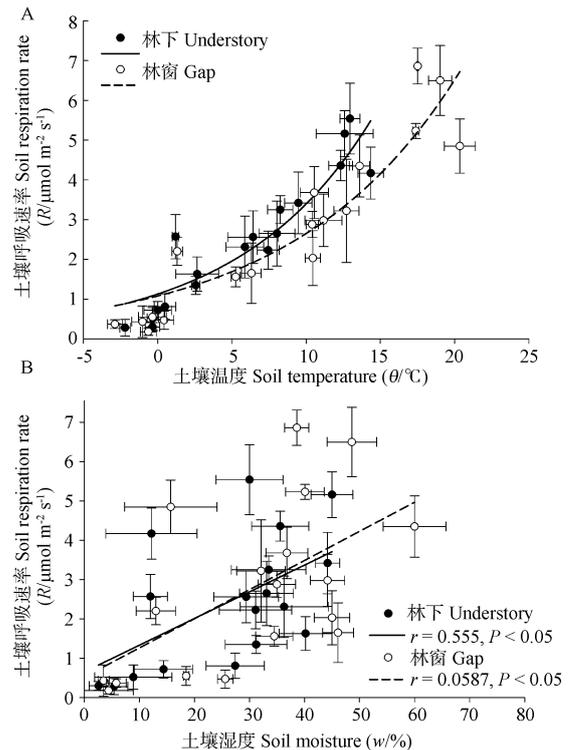


图3 土壤温度 (A)、土壤水分 (B) 与土壤呼吸速率之间的关系。

Fig. 3 The relationship of soil respiration with soil temperature (A) and soil moisture (B).

表1 土壤呼吸与温度指数回归模型

Table 1 The exponential regression model of soil respiration and soil temperature

处理 Treatment	Q_{10}	N	P	R^2
林窗 Gap	2.46 (0.28)	18	< 0.001	0.852
林内 Understory	3.01 (0.35)	18	< 0.001	0.856

3 讨论

尽管土壤呼吸受多种因子的综合影响, 但温度和水分是影响土壤呼吸最主要的影响因子^[15]。土壤温度通过影响植物根系生长和地下微生物活动来影响土壤呼吸, 是影响土壤呼吸的一个非常重要的因子^[16]。本研究中, 不管是林窗还是林内土壤呼吸速率均随着土壤温度的升高而升高, 且成极显著的指数关系。在川西亚高山地区, 温度是限制土壤呼吸的重要因子^[17]。本研究表明, 川西亚高山粗枝云杉人工林林窗和林内的土壤呼吸速率受控于土壤温度, 并与5 cm地温呈极显著的指数关系。这与熊莉等人研究的土壤呼吸速率与5 cm地

温关系结果^[18]一致。土壤水分是影响土壤呼吸的另一个重要因子,主要通过影响微生物的生理过程以及底物和氧气的扩散进而调控土壤呼吸^[19],通常认为,在干燥条件下CO₂通量较小,在中等土壤水分条件时最大。在野外测量结果表明土壤水分只有在最低和最高条件下才会抑制土壤呼吸速率^[20]。Brokaw等研究表明,林窗内的空气和土壤表面水分比林内低,但到距地表数厘米的土壤下层林窗内土壤水分就较林内的高^[21]。本研究同样发现林窗土壤水分大于林内土壤水分,这可能有以下两个原因造成:第一,林窗形成以后,林窗内的树木根系均相应死亡,林窗中生长的灌木杂草有效降低表层土壤水分蒸发^[22],而林内蒸腾作用更为强烈,从而引发林内土壤水分低于林窗;第二,由于没有林冠截留,林窗有效降水的输入明显高于林内,这也可能造成林窗土壤水分偏高。本研究中,尽管土壤水分与土壤呼吸速率之间成显著的线性关系,但在季节动态上表现复杂。已有一些研究也发现,土壤呼吸速率与土壤水分的关系比较复杂,主要是由于土壤呼吸各组分对水分变化不敏感^[23-24]。从统计分析来看,川西亚高山土壤呼吸季节动态主要受控于土壤温度。本研究只考虑了林窗中温度和水分对土壤呼吸速率的影响,对林窗内土壤微生物呼吸和根呼吸缺乏一定的研究,这方面在今后需加强研究。

林窗是介于林冠和全光环境之间的一个中间类型^[25],林窗不仅能影响光在森林内部的停留时间,改变森林林窗土壤温湿度、凋落物和粗木质残体的分解速率^[13, 26]、土壤有机质含量^[27],同时也会影响冬季雪被覆盖厚度^[12]和地下根系生物量^[8],使林窗对森林土壤呼吸的影响机制变得更为复杂。本研究发现,生长季林窗土壤呼吸速率较林内提高了18.6%,在8月土壤呼吸速率达到最大值。生长季林窗土壤呼吸速率、土壤温度和土壤水分均高于林内对照。原因在于林窗适宜的温度和充足的水分为林窗灌草植物的生长和土壤微生物的繁殖提供了良好的条件,提高了生长季林窗土壤呼吸速率。张良辉对不同林分结构云杉人工林研究发现,由于早期初植密度过大,导致林分郁闭度过大,林下仅有少量草本和灌木植物,而林窗拥有更多的灌草植物和土壤动物^[28]。这可能对林窗土壤呼吸的增加有一定贡献。此外,林窗导致的地下根系生物量分布变化也可能对土壤呼吸造成显著影响。Suchewaboripont等对桦树-橡树原始森林研究发现,森林林内根系生物量是林窗的1.7倍,林窗内土壤根系呼吸显著低于林内^[8]。然而本研究所在的川西亚高山高海拔地区,受立地条件和森林结构的限制,粗枝云杉人工林林内根系呼吸并不一定比林窗根系呼吸强烈。周义贵等对川西亚高山林窗土壤的研究表明,林窗显著提高各季节土壤有机碳含量和微生物生物量碳^[27]。这为微生物的繁殖和呼吸提供了丰富的营养源,增强了林窗土壤呼吸速率。同时,林窗土壤矿质氮显著大于林内^[29],有利于土壤微生物繁殖,进而提高土壤有机质矿化,有利于增强林窗异养呼吸。林窗对凋落物分解影响进而可能影响土壤呼吸。最近研究发现,林窗能显著增加川西亚高山灌木凋落物分解^[13]。Forrester对美国北方阔叶次生林林窗林内粗木质残体分解研究发现,林窗小气候显著增加了林窗温度和含水量,加快了粗木质残体的分解,使林窗碳通量比林内增加了19.7 g kg⁻¹ a⁻¹;冬季,林窗土壤呼吸速率较林内有所

下降,但未达到显著水平^[26]。雪被覆盖产生的热绝缘作用是影响冬季土壤呼吸的重要因素^[30]。川西亚高山地区冬季气候寒冷,积雪时间长。前期研究表明,川西亚高山冬季林窗雪被厚度高于林内^[29]。由于林窗和林内形成了不同雪被覆盖特征,冬季土壤呼吸组分及比例与生长季可能有所不同。在冬季低温条件下,林窗和林内植物的根系活动受到抑制,根系呼吸减弱。由于雪被对林窗土壤的保温作用,维持了微生物较高的活性^[31],导致林窗异养呼吸在冬季土壤总呼吸的比例增高。相比林窗较厚的雪层,林内浅薄的积雪不能形成良好的保温层,导致土壤冻融交替循环的次数增加、植物根系死亡率提高以及土壤有机颗粒体的稳定性受到影响,释放更多活性有机碳^[32]。冻融作用的发生提高了林内凋落物的分解,增加了土壤矿质氮和土壤可溶性有机氮含量^[33],为冬季土壤呼吸提高了充足的营养源。

综上所述,川西亚高山粗枝云杉人工林林窗和林内土壤温度、土壤水分和土壤呼吸速率均存在显著的季节变化规律,土壤呼吸速率与土壤温度呈极显著指数相关,与土壤水分呈显著线性相关。与林内相比,短期内林窗(至少在林窗中央)能显著增加土壤温度、土壤水分和土壤呼吸速率,但林窗正效应与季节动态密切相关。

参考文献 [References]

- Singh JS, Gupta SR. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems [J]. *Bot Rev*, 1977, **43** (4): 449-528
- Schlesinger WH, Andrews JA. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48** (1): 7-20
- Hibbard KA, Law BE, Reichstein M, Sulzman J. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73** (1): 29-70
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Trexler MC, Wisniewski J, Solomon AM. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, **263** (5144): 185-190
- 刘庆, 吴彦, 何海. 中国西南亚高山针叶林的生态学问题[J]. 世界科技研究与发展, 2001, **23** (2): 63-69 [Liu Q, Wu Y, He H. Ecological problems of subalpine coniferous forest in the southwest of China [J]. *World Sci-Tech Res Dev*, 2001, **23** (2): 63-69]
- 李志萍. 川西亚高山云杉人工林林窗对不同时期土壤微生物生物量与酶活性的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2014 [Li ZP. Effects of forest gap on soil microbial biomass and soil enzyme at different periods in a subalpine *Picea asperata* plantation of western Sichuan. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2014]
- 欧江, 刘洋, 张捷, 崔宁洁, 张健, 李建平, 宋小艳, 邓超. 长江上游马尾松人工林土壤铵态氮和硝态氮对采伐林窗的初期响应[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21** (1): 147-154 [Ou J, Liu Y, Zhang J, Cui NJ, Zhang J, Li JP, Song XY, Deng C. Early responses of soil ammonium and nitrate nitrogen to forest gap harvesting of a *Pinus massoniana* plantation in the upper reaches of Yangtze River [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (1): 147-154]
- Suchewaboripont V, Ando M, Iimura Y, Yoshtke S, Ohtsuka T. The effect of canopy structure on soil respiration in an old-growth beech-oak forest in central Japan [J]. *Ecol Res*, 2015, **30**: 867-877

- 9 张艳, 张丹桔, 张健, 杨万勤, 邓长春, 李建平, 李勋, 唐仕姗, 张明锦. 马尾松人工林林窗大小对两种凋落叶难降解物质含量的影响[J]. 植物生态学报, 2015, **39** (8): 785-796 [Zhang Y, Zhang DJ, Zhang J, Yang WQ, Deng CC, Li JP, Li X, Tang SS, Zhang MJ. Effects of forest gap size on litter recalcitrant components of two tree species in *Pinus massoniana* plantations [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, **39** (8): 785-796]
- 10 段存涛. 林隙和温度对温带森林土壤CO₂和N₂O气体排放和氮素净矿化的影响[D]. 西安: 长安大学, 2011 [The influence of gap and temperature on the CO₂ and N₂O emissions and nitrogen and mineralization of temperate forest [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011]
- 11 李志萍, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 苟小林, 熊莉, 殷睿, 黄莉. 川西亚高山森林林窗不同时期土壤转化酶和脲酶活性的特征[J]. 生态学报, 2015, **35** (12): 3919-3925 [Li ZP, Wu FZ, Yang WQ, Xu ZF, Gou XL, Xiong L, Yin R, Huang L. Soil invertase and urease activities at different periods in subalpine forest gap in western Sichuan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (12): 3919-3925]
- 12 徐李亚, 杨万勤, 李哈, 倪祥银, 何洁, 吴福忠. 长江上游高山森林林窗对凋落物分解过程中可溶性碳的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24** (5): 882-891 [Xu LY, Yang WQ, Li H, Ni XY, He J, Wu FZ. Effect of forest gaps on soluble carbon during foliar litter decomposition in an alpine forest in the upper Yangtze river [J]. *Res Envi Yangtze Basin*, 2015, **24** (5): 882-891]
- 13 He W, Wu FZ, Zhang DJ, Yang WQ, Tan B, Wu QQ. The effects of forest gaps on cellulose degradation in the foliar litter of two shrub species in an alpine fir forest [J]. *Plant Soil*, 2015, 1-14
- 14 邓仁菊, 杨万勤, 张健, 胡建利, 冯瑞芳, 简毅, 林静. 川西亚高山森林土壤有机层碳、氮、磷储量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13** (4): 492-496 [Carbon, nitrogen and phosphorus storage in soil organic layer of the subalpine forests in westren Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13** (4): 492-496]
- 15 Raich JW, Potter CS. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochem Cyc*, 1995, **9** (1): 23-36
- 16 Luo YQ, Wan SQ, Hui DF, Wallace LL. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, **413** (6856): 622-625
- 17 罗淑政. 川西亚高山森林土壤呼吸研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014 [Luo SZ. Study on soil respiration of subalpine forests in western Sichuan [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014]
- 18 熊莉, 徐振锋, 杨万勤, 殷睿, 唐仕姗, 王滨, 徐李亚, 常晨晖. 川西亚高山粗枝云杉人工林地上凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. 生态学报, 2015, **35** (14): 4678-4686 [Xiong L, Xu ZF, Yang WQ, Yin R, Tang SS, Wang B, Xu LY, Chang CH. Aboveground litter contribution to soil respiration in a subalpine *dragon spruce* plantation of western Sichuan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (14): 4678-4686]
- 19 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 高等教育出版社, 2007 [Luo YQ, Zhou XH. Soil Respiration and the Environment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007]
- 20 Xu LK, Baldocchi DD, Tang JW. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature [J]. *Global Biogeochem Cyc*, 2004, **18** (4): 187-206
- 21 Brokaw NVL. Gap-phase regeneration in a tropical forest [J]. *Ecology*, 1985, **66** (3): 682-687
- 22 Ostertag R. Belowground effects of canopy gaps in a tropical wet forest [J]. *Ecology*, 1998, **79** (4): 1294-1304
- 23 Adachi M, Bekku YS, Konuma A, Kadir WR, Okuda T, Koizumi H. Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and of two types of plantation in Malaysia [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **210** (1): 455-459
- 24 蒋延玲, 周广胜, 赵敏, 王旭, 曹铭昌. 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用研究[J]. 植物生态学报, 2005, **29** (3): 411-414 [Jiang YL, Zhou GS, Zhao M, Wang X, Cao MC. Soil respiration in broad-leaved and Korean pine forest ecosystems, Changbai mountain, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2005, **29** (3): 411-414]
- 25 梁晓东, 叶万辉. 林窗研究进展(综述)[J]. 热带亚热带植物学报, 2001, **9** (4): 355-364 [Liang XD, Ye WH. Advances in study on forest gaps [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2001, **9** (4): 355-364]
- 26 Forrester JA, Madenoff DJ, Gower ST, Stoffel JL. Interactions of temperature and moisture with respiration from coarse woody debris in experimental forest canopy gaps [J]. *For Ecol Manage*, 2012, **258** (10): 124-132
- 27 周义贵, 郝凯婕, 李贤伟, 范川, 陈栋霖, 刘运科, 王谢. 林窗对米亚罗林区云杉低效林土壤有机碳和微生物量碳季节动态的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25** (9): 2469-2476 [Zhou YG, Hao KJ, Li XW, Fan C, Chen LL, Liu YK, Wang X. Effects of forest gap on seasonal dynamics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in *Picea asperata* forest in Miyaluo of western Sichuan, Southwest China [J]. *Chin Appl Ecol*, 2014, **25** (9): 2469-2476]
- 28 张良辉. 川西亚高山云杉人工林分结构调控下植物与土壤动物多样性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010 [Zhang LH. Understorey plant and soil animal biodiversity of spruce plantation structural adjustment in subalpine of western Sichuan [D]. Chengdu: Sichuan Agriculture University, 2010]
- 29 李志萍, 李维民, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 谭波, 吴庆贵. 川西亚高山森林林窗对不同关键时期土壤硝态氮和铵态氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27** (6): 270-274 [Li ZP, Li WM, Wu FZ, Yang WQ, Xu ZF, Tan B, Wu QG. Effect of forest gap on content of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen at different critical periods of subalpine forest in western Sichuan [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27** (6): 270-274]
- 30 Groffman PM, Driscoll CT, Fahey TJ, Hardy JP, Fitzhugh RD, Tierney GL. Colder soils in a warmer world: a snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **56** (2): 135-150
- 31 McDowell NG, Marshall JD, Hooker TD, Musselman R. Estimating CO₂ flux from snowpacks at three sites in the Rocky Mountains [J]. *Tree Physiol*, 2000, **20** (11): 745-753
- 32 武启骞, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 何伟, 何敏, 赵野逸, 朱剑霄. 季节性雪被对高山森林凋落物分解的影响[J]. 植物生态学报, 2013, **37** (4): 296-305 [Wu QQ, Wu FZ, Yang WQ, Xu ZF, He W, He M, Zhao YY, Zhu JX. Effect of seasonal snow cover on litter decomposition in alpine forest [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, **37** (4): 296-305]
- 33 殷睿, 徐振锋, 吴福忠, 苟小林, 熊莉, 唐仕姗, 谢承瀚, 杨万勤. 川西亚高山森林林窗对季节性冻融期土壤氮动态的影响[J]. 生态学杂志, 2014, **33** (9): 15-21 [Yin R, Xu ZF, Wu FZ, Gou XL, Xiong L, Tang SS, Xie CH, Yang WQ. Effect of forest gaps on soil nitrogen dynamics in seasonal freeze-thaw transition in an alpine forest western Sichuan [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33** (9): 15-21]