

川西亚高山林区三种土地利用方式
下土壤呼吸动态及组分区分褚金翔¹, 张小全^{2,*}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要:采用动态密闭气室法 (IRGA) 对川西亚高山林区云杉 (*Picea likiangensis* var. *balfouriana*) 人工林、农地和冷杉 (*Abies faxoniana*) 原始林的土壤呼吸日变化及季节变化进行了测定, 计算了土壤呼吸 3 个组分的值。结果表明, (1) 云杉人工林中根系呼吸占林地总呼吸的 22%, 冷杉原始林为 29%; (2) 土壤呼吸速率的日变化和季节变化均与 10cm 地温的变化相一致; (3) 由于本地区土壤水分不是限制因子, 因此温度成为影响土壤释放 CO₂ 的最关键因素, 云杉人工林矿质土壤呼吸随温度变化的 Q_{10} 值为 2.44, 农地为 1.82, 冷杉原始林为 2.73; (4) 云杉人工林年呼吸 CO₂ 总量为 43.93 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中 72% 来自于矿质土壤排放, 6% 来自于枯落物分解; 农地年呼吸 CO₂ 总量为 26.07 t·hm⁻²·a⁻¹, 主要来自矿质土壤; 冷杉原始林年呼吸 CO₂ 总量为 33.95 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中 61% 来自于矿质土壤排放, 10% 来自于枯落物分解。

关键词: 亚高山林区; 土地利用/覆盖; 土壤呼吸

文章编号: 1000-0933(2006)06-1693-08 中图分类号: Q948.112, S154.1, S714.5 文献标识码: A

Dynamic and fractionalization of soil respiration under three different land use/covers in the subalpine region of western Sichuan Province, China

CHU Jin-Xiang¹, ZHANG Xiao-Quan^{2,*} (1. Institute of Agro-Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; 2. Institute of Forest Ecology and Environment, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (6): 1693 ~ 1700.

Abstract: Carbon cycling is one of the most important processes in forest ecosystem and it is closely related to the energy flux. With recognizing the environmental effects caused by atmospheric carbon dioxide, there has been a surge of renewed interest in the carbon cycling in soil. Soil respiration is the loss of carbon from soils as a result of both microbial activities and root respiration. Soil temperature plays an important part in determining soil respiration rates.

The study focused on the responses of soil respiration rate to soil temperature in 3 land use/covers in the subalpine region of western Sichuan, China. Soil respiration and its daily and seasonal changes in *Abies faxoniana* primary forest, and *Picea likiangensis* var. *balfouriana* plantation and cropland were measured by means of closed-chamber IRGA technique. The spruce plantation and cropland were established or transferred from the primary forests in 1960s. Each type has five permanent plots. Within each plot, three sub-plots have been set up, one with litter being removed away and one with root being cut by trench method. The different treatment of the sub-plots allows us to estimate the respiration respectively from root, litter and mineral soil. Results show that CO₂ emission from root system accounted for 22% of the total emission from land surface of the spruce plantation and 29% in the primary fir forest. The respiration rate from the spruce plantation and primary fir stand reach the peak in August,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40271109)

收稿日期: 2005-02-19; **修订日期:** 2005-11-12

作者简介: 褚金翔 (1979 ~), 男, 山东五莲人, 博士, 主要从事农业气象学研究. E-mail: chujx1168@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoquan@forestry.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40271109)

Received date: 2005-02-19; **Accepted date:** 2005-11-12

Biography: CHU Jin-Xiang, Ph.D., mainly engaged in agriculture meteorology. E-mail: chujx1168@126.com

while it comes forth early in July in cropland because of the farming works.

Since soil moisture is not a limiting factor, CO_2 emission was mainly controlled by temperature. There were significant correlations between soil respiration rate and soil temperature at 10cm depth. Q_{10} for respiration of mineral soil was 2.44, 1.82 and 2.73 respectively for spruce plantation, cropland and primary fir stand. The annual CO_2 emission rate from spruce plantation was $43.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, of which 72% was from mineral soil and 6% from litters. An efflux of $26.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ from cropland was observed, most of which was released from mineral soil. The annual CO_2 emission from primary fir stand was around $33.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, of which 61% was from mineral soil and 10% from litter.

Key words: subalpine; land use/cover; soil respiration

土壤呼吸作用是陆地生态系统碳循环的主要环节之一,也是人类活动影响导致全球气候变化的关键生态学过程^[1]。在全球变化日益受到关注的今天,土壤呼吸作为土壤碳的重要输出途径,其研究与准确测定已经成为全球变化研究中的关键问题之一。

国外很早就开展了森林土壤呼吸研究^[2],而国内这方面研究很少,仅在温带草原^[3]、温带森林^[4-6]等地开展过。本文通过对川西亚高山林区 3 种相关联的土地利用和覆盖方式下的土壤呼吸日动态及季节动态的测定,研究分析了土地利用和土地覆盖变化对土壤呼吸的影响。加强了对土壤呼吸与环境因子关系的认识,为生态系统的持续发展和健康管理提供科学依据,也为我国及全球土壤呼吸和碳平衡估算提供基础资料。

1 研究地点与研究方法

1.1 研究地区概况

研究地区位于四川省理县米亚罗林区,北纬 $31^{\circ}47'$,东经 $102^{\circ}42'$,海拔 3242 ~ 3323m,属于青藏高原向四川盆地过渡的高山峡谷区。夏季温凉多雨,冬季寒冷干燥,1 月均温为 -8°C ,7 月均温为 12.6°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 1200 ~ 1400 $^{\circ}\text{C}$,年降水量为 600 ~ 1100mm,年蒸发量为 1000 ~ 1900mm,属季风性山地气候。成土母岩主要为千枚岩、板岩和白云岩等残坡积风化物,土壤为山地棕壤。该地区原生植被为冷杉原始林(*Abies faxoniana*),20 世纪后半叶,由于大规模的采伐活动,原生植被被破坏殆尽,主要为云杉人工林和天然次生林,主要乔木有川西云杉(*Picea likiangensis* var *balfouriana*)、鳞皮冷杉(*Abies squamata* Mast)和红桦(*Betula albo-sinensis* Burkii)等;主要灌木有悬钩子(*Rubus*)、疏花槭(*Acer laxiflorum*)、红毛五加(*Acanthopanax giraldii* Harms)、散生木竹子(*C. divaricatus*)、扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*)、紫花卫矛(*Euonymus porphyreus*)、川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)等;草本主要有唐松草(*Thalictrum*)、蟹甲草(*Cacalia*)、冷蕨(*C. montana* (Lam.) Bernh.)、苔草(*Carex*)和禾本科多属等。原始林中乔木以岷江冷杉(*Abies faxoniana*)为主,混有少量的川西云杉(*Picea likiangensis* var *balfouriana*)和红桦(*Betula albo-sinensis* Burkill),主要灌木有悬钩子(*Rubus*)、疏花槭(*Acer laxiflorum*)、红毛五加(*Acanthopanax giraldii* Harms)、散生木竹子(*C. divaricatus*)等,草本主要有唐松草(*Thalictrum*)、蟹甲草(*Cacalia*)等^[7]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 研究地点设在四川省理县米亚罗镇山脚坝村,选取相似立地条件的云杉人工林(*Picea likiangensis* var *balfouriana*)、农地和冷杉原始林(*Abies faxoniana*)3 种土地利用和覆盖类型,在每个类型中设置 5 个样地,基本情况见表 1。云杉人工林为 20 世纪 60 年代初原始林采伐后人工更新而成,单林层结构,灌草稀少。农地为 20 世纪 60 年代初原始林采伐开垦而成,过去以种植洋芋、莴笋为主,从 1999 年开始改种大白菜。为区分矿质土壤呼吸、根系呼吸和枯落物层呼吸,每样地设置 3 个 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的样方。第 1 个样方去掉枯落物层(A_0 层),使表土层裸露;第 2 个样方沿四周下切 70cm,斩断所有根系,再用塑料布将样方与四周隔离,最后返土回填;第 3 个样方保持原状作为对照。农地中设置 2 个 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的样方,在第 1 个样方中种植大白菜;第 2 个样方为空白对照样地,空白样地同步进行中耕、施肥和喷洒农药等工作。

1.2.2 土壤呼吸速率及相关气象因子的测定 土壤呼吸速率测定采用动态密闭气室红外 CO_2 分析法

(IRGA),测定仪器为 LI-6400(LI-COR, Lincoln, Nebraska USA)配 LI-6400-09 土壤呼吸叶室(Soil chamber)。在每次测定时,提前 24h 将测定基座(Soil collar)嵌入土壤中,每块样方安放 3 个。观测地区的枯落物层较厚且坡度较大,为保证仪器安放平稳,采用基座为直径 10cm、高 10cm 的聚氯乙烯圆筒,嵌入地表平均深度约为 8cm。同时将基座内的绿色植物齐地剪掉,并尽可能不扰动地表的凋落物。经过 24h 的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了由于安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率的波动^[8]。观测在 2004 年植物生长季(5~10 月份)进行,每月观测 1 次,共观测 5 次。在每个观测日,从 6:00 到 18:00,每隔 2h 测定 1 次。

测定土壤呼吸速率的同时,用 LI-6400 同步测定 10cm 地温和近地表气温(距地表面 10 cm 的气温)。

表 1 各类型基本情况

Table 1 Characteristics of different sites

林地类型 Site type	海拔 Elevation (m)	坡向 Slope face	坡度 Slope gradient (°)	平均树高 Mean height (m)	平均胸径 Diameter at breast height(cm)	林分密度 Stand density (trees·hm ⁻²)	郁闭度 Canopy cover
20 世纪 60 年代云杉人工林 Spruce plantation	3323	NW52	20	14.3	15.8	1860	0.9
农地 Cropland	3252	SW27	8				
冷杉原始林 Primary fir	3242	SW30	18	36.7	46.2	587	0.9

1.2.3 土壤呼吸各组分的计算

(1)云杉林和冷杉林中土壤呼吸各组分的计算 土壤呼吸,也称土壤总呼吸,是指未扰动林地表面总的 CO₂ 排放,主要包括根系呼吸、矿质土壤呼吸和枯落物分解排放 3 个部分^[3]。为得到上述各部分呼吸速率,首先计算每个样地各样方的平均值,根据下式计算各样地各部分的呼吸速率:

$$R_t = R_e - R_{dt} \quad (1)$$

$$R_l = R_e - R_{rs} \quad (2)$$

$$R_e = R_t - R_l - R_{dt} = R_{dt} + R_{rs} - R_l \quad (3)$$

式中, R_e 、 R_t 和 R_l 分别为根系呼吸速率、矿质土壤呼吸速率和枯落物分解排放速率; R_e 为林地表面总的 CO₂ 排放速率,即在对照样方地表测定的 CO₂ 排放速率; R_{rs} 为去除地表枯落物层样方的呼吸速率,代表根系呼吸和矿质土壤呼吸的速率; R_{dt} 为断根样方呼吸速率,代表矿质土壤呼吸和枯落物分解排放的速率。

(2)农地中土壤呼吸各组分的计算 在种植大白菜样地中观测到的地表总的 CO₂ 排放速率值即为农地总呼吸速率,在空白对照样地中观测到的 CO₂ 排放速率值即为矿质土壤呼吸速率,根系呼吸速率即为以上两个观测值的差值。

1.2.4 呼吸量的计算 根据理县(位于米亚罗南偏东 58km,海拔 1833mm)气象观测站 1971~2000 年的逐月平均近地表气温资料,按照海拔每升高 100m,气温下降 0.6℃的原理,计算出实验地区的月平均近地表气温,结合枯落物分解排放速率与近地表气温的关系,计算出枯落物的分解排放量。并根据 2004 年的观测数据建立了米亚罗地区近地表气温与 10cm 地温的关系:

$$y = 3.3924e^{0.0664x} \quad R^2 = 0.8077 \quad (4)$$

式中, y 为 10cm 地温; x 为近地表气温,利用该公式计算出实验地区月平均 10cm 地温,结合矿质土壤呼吸速率与 10cm 地温的函数关系,计算出矿质土壤呼吸量。再根据枯落物排放、矿质土壤呼吸量和根系呼吸占土壤总呼吸的百分比计算根系呼吸量和总呼吸量。

2 结果与分析

2.1 根系呼吸占土壤总呼吸的比例

2.1.1 云杉林和冷杉林根系呼吸占土壤总呼吸的比例 由于断根之后根系不会立即死亡,仍会存在呼吸,随着根系的逐渐死亡,根系呼吸速率也会慢慢降低,完全死亡之后根系呼吸速率降至最低,但同时伴随着死亡根

系的分解,从而释放出 CO_2 [9]。因此(1)式计算的结果不代表真正的根系呼吸,根系呼吸会被低估。理论上,断根样方根系全部死亡时,根系呼吸为零,但由于根系死亡不是同时发生,此时有一部分死根已处于分解状态,使由(1)式计算的结果不能完全反映根系的呼吸。

从测定结果可看出(图 1),由于在断根初期,断根样方呼吸速率较大,(1)式计算的结果较低,随着断根样方根系的死亡,(1)式计算结果逐渐增大,到一定时间,根系的死亡和死根的分解达到一定程度,(1)式计算结果到达最大值。假定不同时期根系呼吸在土壤总呼吸中所占比例相同,以(1)式计算结果到达最大值时,其所占土壤总呼吸的比例最接近根系呼吸在土壤总呼吸中占的实际比例,由此反推其它时期的根系呼吸速率。

根据断根样方和对比样方呼吸速率的连续测定,(1)式计算结果占土壤总呼吸的百分比随断根时间的变化如图 2,由此可推出云杉人工林和冷杉原始林分别在断根后约 127d 和 79d,(1)式计算结果达最大,此时根系呼吸速率分别占土壤总呼吸的 22% 和 29%。

2.1.2 农地中根系呼吸占土壤总呼吸的比例 农地在闲置阶段只有矿质土壤呼吸,在作物生长季包括根系呼吸和矿质土壤呼吸。观测发现,在生长季,种植大白菜的样地的地表 CO_2 排放速率和对照样地的速率差异不显著(表 2)。

2.2 土壤呼吸日变化

由图 3 可以看出,3 个样地土壤总呼吸及其各部分的日变化与 10cm 地温的日变化趋势基本一致。但云杉人工林和冷杉原始林的 10cm 地温变化幅度不大,在观测时段内变化均未超过 1°C ,土壤总呼吸及其各部分的变化幅度也很小。而农地由于可以接受太阳光直射,10cm 地温值升高趋势很明显,土壤总呼吸速率变化也较大。

2.3 土壤呼吸的季节动态

云杉人工林和冷杉原始林的土壤总呼吸速率及根系呼吸和矿质土壤呼吸速率均在 5、6、7 月份逐渐上升,在 8 月份到达顶峰,随后开始逐渐下降,与两个样地 10cm 处地温的季节变化趋势一致。而农地土壤总呼吸速率的最高值在 7 月份出现,早于 10cm 处的地温,这与 7 月份农民进行的耕地、施肥等活动有直接关系见图 4。

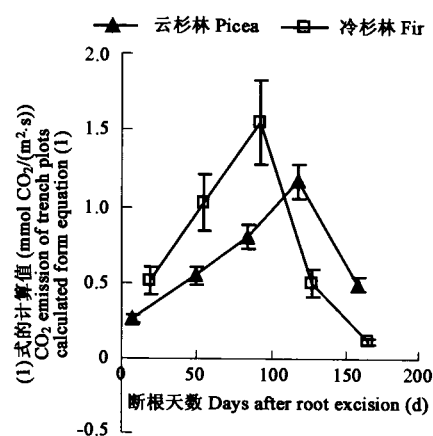


图 1 断根后不同时期(1)式计算值的变化

Fig.1 Changes of CO_2 emission of trenced plots calculated from equation (1) at different times after root excision

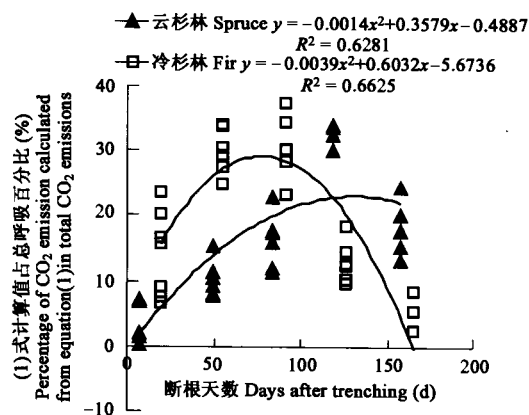


图 2 断根后不同时期(1)式计算值占总呼吸百分比的变化

Fig.2 Changes of percentage of CO_2 emission Calculated from equation (1) in total CO_2 emissions at different time after trenching

表 2 作物生长期农地地表 CO_2 排放速率的观测值

Table 2 CO_2 emission rate on cropland surface in growth period ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^①

观测日期 Observation date	样地表面 CO_2 排放速率 CO_2 emission rate on cropland surface	
	种菜的样地 Planting plot	对对照样地 Contrast plot
2004 年 5 月 29 日 May.29,2004	2.95 (0.84)	2.54 (0.69)
2004 年 7 月 10 日 Jul.10,2004	4.61 (1.66)	4.23 (1.57)
2004 年 8 月 14 日 Aug.14,2004	5.18 (0.78)	5.01 (0.30)
2004 年 9 月 17 日 Sep.17,2004	2.92 (0.36)	3.09 (0.63)
2004 年 10 月 27 日 Oct.27,2004	1.91 (0.37)	2.10 (0.43)

①采用 5 个重复的平均值,括号内的数值为标准差 Average value for 5 replicates and the numbers in the parenthesis are standard errors

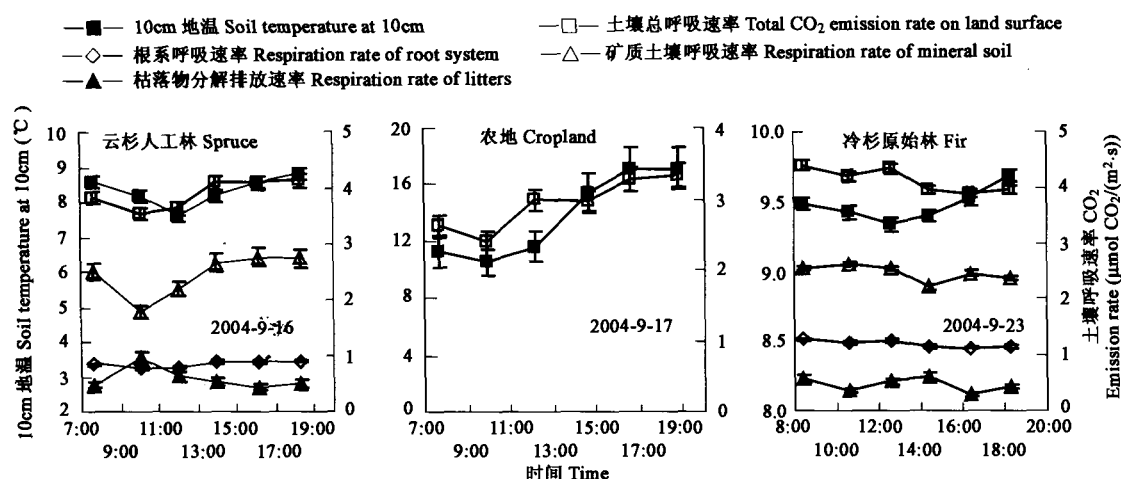


图3 云杉人工林、农地、冷杉原始林土壤呼吸各部分的速率及 10cm 地温的日变化(采用 5 个重复的平均值)

Fig.3 The daily dynamic of soil respiration rate and soil temperature at 10cm depth of spruce, cropland and fir (average value for 5 replicates)

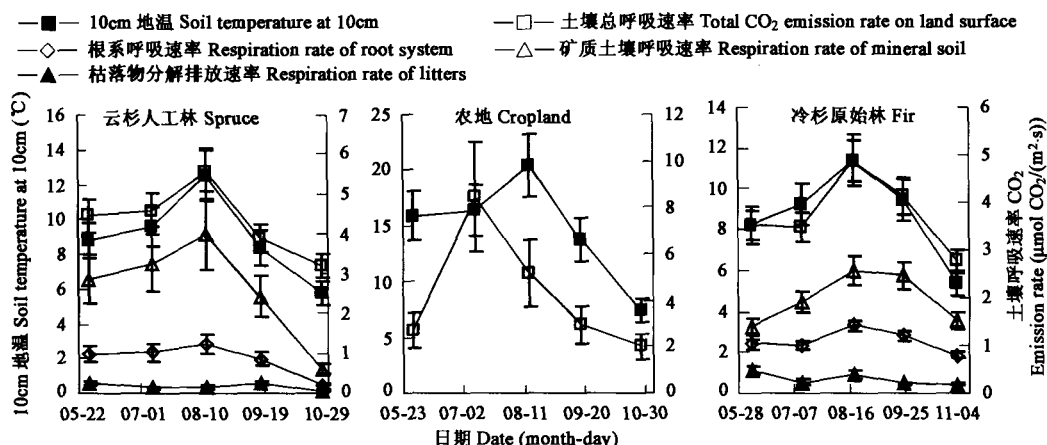


图4 云杉人工林、农地、冷杉原始林土壤呼吸速率及 10cm 地温的季节动态(采用 5 个重复的平均值)

Fig.4 The seasonal dynamic of soil respiration rate and soil temperature at 10cm soil depth of spruce, cropland and fir (average value for 5 replicates)

2.4 土壤呼吸与温度的关系

通过对实验数据的分析表明,矿质土壤呼吸速率与 10cm 处地温相关性显著,具体结果见图 5。根据其相关关系可以计算出:当温度由 5℃ 升到 15℃ 时,3 种样地类型的 Q_{10} 值分别为:云杉人工林,2.44;农地,1.82;冷杉原始林,2.73。

对实验的数据进行分析同样表明枯落物分解排放速率与近地表气温呈显著指数相关关系(图 6)。

2.5 土壤呼吸量

根据已经建立的矿质土壤呼吸速率与 10cm 处地温的相关模型、枯落物分解排放速率与近地表气温的相关方程及根系呼吸量在各种林地类型中所占的比例,把研究地区的月平均 10cm 地温值和月平均近地表气温值分别代入方程,得到云杉人工林、农地和冷杉原始林每月及全年的土壤总呼吸量及各分量。云杉人工林土壤总呼吸 CO_2 量为 $43.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,农地为 $26.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,冷杉原始林为 $33.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中矿质土壤呼吸量,云杉人工林中为 $31.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占总量的 72%;冷杉原始林中为 $20.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占 61%,说明川西亚高山林区土壤总呼吸以矿质土壤呼吸为主。云杉林中根系呼吸的量为 $9.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占 22%,

冷杉林中为 $9.84\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 占 29%。两个样地中枯落物分解排放的量均最少, 云杉林中为 $2.62\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 占 6%; 冷杉林中为 $3.23\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 占 10%。

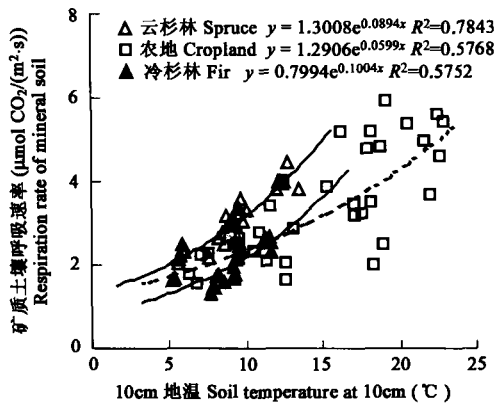


图5 云杉人工林、农地、冷杉原始林矿质土壤呼吸速率与 10cm 地温的相关曲线

Fig.5 Relationship between CO_2 emission rate of mineral soil and soil temperature at 10cm of spruce, cropland and fir

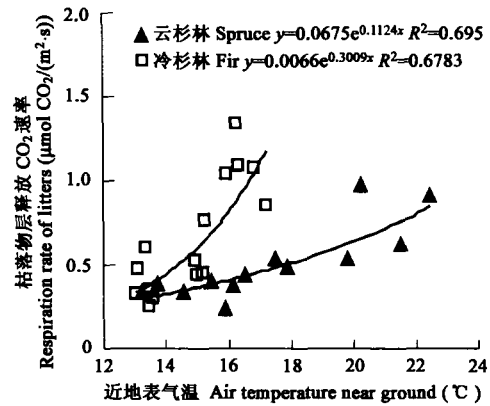


图6 云杉人工林和冷杉原始林枯落物分解释放 CO_2 速率与近地气温的相关性曲线

Fig.6 Curves of correlation between respiration from litters and air temperature near ground in spruce and fir land

3 讨论

(1) 云杉人工林和冷杉原始林的根系呼吸占土壤总呼吸的比例是用壕沟样方法测得, 较其它方法测得的价值偏低。Behera 等利用成分综合法在热带雨林地区测得根系呼吸占土壤总呼吸的 50.5%^[10]; D9 π 等利用同位素标记法在以月为尺度 Fagus/Picea 森林生态系统测定根系呼吸占土壤总呼吸的 40%^[11]。近年来国际上有一定数量的关于根系呼吸的区分测定方面的论文发表, 李凌浩等人通过对其进行总结发现: 在北方高纬度生物群区, 活根系呼吸占土壤呼吸总量的比例在极地苔原高达 50% ~ 93%, 北方林在 62% ~ 89% 之间; 在温带地区, 阔叶林这一比例估计为 33% ~ 50%, 针叶林在 35% ~ 62% 之间, 温带草原为 17% ~ 40%; 对于农田, 这一比例稍小, 一般在 12% ~ 38% 之间, 主要是由于作物活根系的保持时间较短^[12]。由于目前将根系呼吸从土壤总呼吸中分离出来在技术上一直比较困难^[9], 本文用对照样地的地表总排放值减掉断根样地的地表总排放值来计算根系呼吸的值, 由于斩断后的根系在观测期间内的 CO_2 释放量都不会降低到零, 所以观测结果会低于实际值^[9]。同时, 在计算根系呼吸的量时假设根系呼吸所占的比例在全年保持不变, 而实际是会改变的^[9], 这也对观测结果造成一定的影响。

(2) 在测量农地呼吸速率时, 发现种植大白菜的样地和空白对照样地的地表 CO_2 排放速率大小相近。这是因为在大白菜幼苗期根系较少, 根系呼吸量很小, 与空白样地差别不明显; 而随着大白菜的生长, 大白菜的叶片逐渐对地表起到一定的遮盖作用, 阻止了部分太阳光照射到地表, 也就使得晴天时种植大白菜样地的地表温度没有空白样地地表温度高, 此时由地表升温造成土壤微生物活动及有机质分解的提高没有空白地剧烈, 但是缺少的部分由根系呼吸进行了补偿。同时, 由于受实验条件的限制, 只能在晴天观测, 这就使得两个样地的观测值没有显著差异。

(3) 3 块样地土壤呼吸速率的日变化及季节变化趋势均与他人的研究结果类同^[4,5]。即白天高, 晚间低; 夏季高, 冬季低。但是农地的土壤呼吸速率日变化幅度要比人工林和原始林大, 这主要是因为人工林和原始林样地的郁闭度较高, 太阳光不能直接照射到地面, 对地表温度的影响不明显, 不会造成根系呼吸、土壤微生物活动及有机质分解的大幅度提高, 也就不会造成土壤呼吸的大幅度增加^[6], 而农地由于可以直接接受太阳光直射, 地面温度升高比较剧烈, 就使得土壤呼吸速率增加显著。云杉人工林和冷杉原始林样地土壤呼吸速率均在 5、6、7 月份逐渐上升, 在 8 月份达到顶峰, 而农地的土壤呼吸速率在 7 月份已经达到最高水平, 因此

时正是大白菜播种期,土壤的翻耕再加上化肥、有机肥的大量使用使得土壤微生物的活动加强,土壤中有有机物分解加快,从而使土壤呼吸强度迅速增加^[13],这就造成了农地土壤呼吸速率的最高值比 10cm 地温的最高值提前出现。

(4) 土壤温度不仅影响植物地上部分的生理活动,还直接影响土壤微生物的生长繁殖、根系的呼吸等活动。土壤生物活动,特别是土壤微生物活动,对土壤 CO_2 释放具有非常重要的作用。在一定范围内,土壤温度的升高又能改变土壤有机质的物理化学状态,使之更易于分解。当土壤温度过高或过低时,呼吸作用都会受到抑制,反而使地表 CO_2 排放速率降低,因而土壤温度对样地表面 CO_2 排放速率影响最大^[14-16]。

而枯落物分解排放 CO_2 速率与近地表气温的相关性较高,这是因为枯落物层位于土壤表面,近地表气温比 10cm 地温更容易对其造成影响,也就是说,枯落物分解排放 CO_2 速率与近地表气温的相关性要高于与 10cm 地温的相关性^[6]。

(5) 农地的 CO_2 释放量明显低于林地,这主要是因为该农地为 20 世纪 60 年代中期开垦,经过 40a 的种植,大量的碳已经流失,地表 CO_2 释放速率也就必然会降低,这与李凌浩的研究观点相符^[3]。

在 3 个样地中,矿质土壤呼吸量在土壤总呼吸量中占的比例都是最高的,说明该地区土壤总呼吸以矿质土壤呼吸为主。云杉人工林矿质土壤呼吸量又比冷杉原始林的高,这是云杉林中土壤有机质含量明显高于冷杉林所致(表 3)。

表 3 样地土壤有机质含量

Table 3 The content of organic compound in different sites(g/100g)

林地类型 Site type	土壤有机质含量 The content of organic compound					
	0 ~ 10cm	10 ~ 20cm	20 ~ 30cm	30 ~ 40cm	40 ~ 60cm	< 60
云杉人工林 Spruce plantation	10.98	8.42	4.94	5.32	4.13	1.52
冷杉原始林 Primary forest of fir	9.55	7.54	6.01	3.83	2.32	2.13

(6) 土壤呼吸速率与温度模型的建立是依靠的是 5 ~ 10 月份的观测数据,在冬季温度很低时,温度范围就会超过建立模型时的温范围,用该模型来估计会带来误差,但是由于呼吸速率随温度的降低而呈指数下降,冬天温度很低时,土壤呼吸速率非常低,因此对年总呼吸量的影响是非常有限的。

4 结论

(1) 采用壕沟样方法测定并计算得到根系呼吸占土壤总呼吸的比例,云杉人工林为 22%,冷杉原始林为 29%。

(2) 枯落物分解排放速率与近地表气温的变化趋势一致,土壤呼吸速率的日变化与 10cm 地温的变化趋势一致,季节变化趋势与 10cm 地温的变化也保持一致。云杉人工林和冷杉原始林中土壤呼吸强度和 10cm 地温均在 5、6、7 月份逐渐上升,在 8 月份达到顶峰,此后逐渐下降。但由于受到人为耕作活动的影响,农地的土壤总呼吸速率最高值在 7 月份出现,比 10cm 地温最高值提前了 1 个月出现。

(3) 温度是影响土壤呼吸的关键因素,通过实验建立矿质土壤呼吸速率与 10cm 地温之间的函数关系,到得当温度从 5℃ 上升到 15℃ 时的 Q_{10} 值,云杉人工林为 2.44;农地为 1.82;冷杉原始林为 2.73。

(4) 川西亚高山云杉人工林年总 CO_2 呼吸量为 $43.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,农地为 $26.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,冷杉原始林为 $33.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中云杉人工林总呼吸的 72% 来源于矿质土壤呼吸,22% 来源于根系呼吸,6% 来源于枯落物分解排放;农地的总呼吸主要来源于矿质土壤呼吸;冷杉原始林总呼吸的 63% 来源于矿质土壤呼吸,29% 来源于根系呼吸,8% 来源于枯落物分解排放。

References:

- [1] Ciais P, Cramer W, Jarvis P, Kheshgi H, Nobre C, Semenov S, Steffen W. 2000. Global perspective. In Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J and Dokken D J, eds. Land use, land-use change, and forestry. A Special Report of the IPCC. Published for IPCC by the World

- Meteorological Society and UNEP. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 25 ~ 27.
- [2] Gainey P L. Paralled formation of carbon dioxide, ammonia and nitrate in soil. *Soil Sci*, 1919, 7: 293 ~ 311.
- [3] Li L H. Effect of land-use change on soil carbon storage in grassland ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 300 ~ 302.
- [4] Jiang G M and Huang Y X. A study on the measurement of CO₂ emission from the soil of the simulated *Quercus liaotungensis* forest sampled from Beijing mountain areas. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 477 ~ 482.
- [5] Liu S H, Fang J Y and Makoto K. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 119 ~ 126.
- [6] 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. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(2): 8 ~ 13.
- [7] Pang X Y, Liu S Q, Liu Q, *et al*. Influence of plant community succession on soil physical properties during subalpine coniferous plantation rehabilitation in western Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 12(17): 42 ~ 50.
- [8] Yang D, Huang J H, Zhan X M, *et al*. The diurnal dynamic patterns of soil respiration different plant communities in the agro-pastoral ecotone with reference to different measuring methods. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 318 ~ 325.
- [9] Cheng S Y and Zhang X Z. Method and application of separate root respiration and microorganism respiration from total soil respiration. *Advance in Earth Science*, 2003, 18(4): 597 ~ 602.
- [10] Behera N, Joshi S K and Pati D P. Root contribution to total soil metabolism in a tropical forest soil from Orissa. *Indian Forest Ecology Management*, 1990, 36: 125 ~ 134.
- [11] Dorr H and Münich K O. Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone. *Tellus*, 1987, 39B: 114 ~ 121.
- [12] Li L H, Han X G, Wang Q B, *et al*. Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration in grazed grassland in the XILIN river basin. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(1): 29 ~ 32.
- [13] Li G F, Wang Y F and Chen Y. Influence to soil respiration, nitrogen fixation and anti-nitrification made by fermented muck and waste straw. *Journal of Microbiology*, 1996, 16(2): 14 ~ 18.
- [14] Carlyle J C and Than U B A. A biotic controls of soil respiration between an eighteen-year-old *Pinus radiata* stand in South-eastern Australia. *Journal of Ecology*, 1988, 76: 654 ~ 662.
- [15] Kucera C and Kirkham D. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecology*, 1971, 52: 912 ~ 915.
- [16] Bunce J A. Short and long-term inhibition of respiration of carbon dioxide efflux by elevated carbon dioxide. *Annals of Botany*, 1990, 65: 637 ~ 642.

参考文献:

- [3] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 300 ~ 302.
- [4] 蒋高明, 黄银晓. 北京山区辽东栎林土壤释放 CO₂ 的模拟实验研究. *生态学报*, 1997, 17(5): 477 ~ 482.
- [5] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 119 ~ 126.
- [6] 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 CO₂ 释放. *林业科学*, 2003, 39(2): 8 ~ 13.
- [7] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 等. 川西亚高山针叶林植物群落演替对土壤性质的影响. *水土保持学报*, 2003, 12(17): 42 ~ 50.
- [8] 杨晶, 黄建辉, 詹学明, 等. 农牧交错区不同植物群落土壤呼吸的日动态观测与测定方法比较. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 318 ~ 325.
- [9] 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 597 ~ 602.
- [12] 李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计. *植物生态学报*, 2002, 26(1): 29 ~ 32.
- [13] 李桂芳, 王义甫, 陈源. 发酵肥与秸秆还田对土壤呼吸、固氮与反硝化作用的影响. *微生物学杂志*, 1996, 16(2): 14 ~ 18.