

贡嘎山东坡峨眉冷杉林区土壤 CO₂ 排放*

罗 辑 杨 忠 杨清伟

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要 在植物生长季对贡嘎山东坡峨眉冷杉林区三种不同类型土壤排放 CO₂ 过程进行了连续观测, 三种类型土壤 CO₂ 排放存在着显著差异。峨眉冷杉演替林采伐迹地土壤呼吸强度最高, 达 5.89 μmol / m²s CO₂, 在各月份中高低依次为 9 月 > 8 月 > 6 月 > 7 月 > 5 月 > 10 月 > 11 月; 峨眉冷杉林土壤呼吸强度次之, 为 5.76 μmol / m²s CO₂, 在各月份中高低依次为 8 月 > 7 月 > 9 月 > 6 月 > 5 月 > 10 月 > 11 月; 峨眉冷杉演替林土壤呼吸强度最低, 为 3.26 μmol / m²s CO₂, 在各月份中高低依次为 5 月 > 7 月 > 8 月 > 6 月 > 9 月 > 10 月 > 11 月。观测的各种温度指标对土壤 CO₂ 排放有明显的影响, 分析表明, 近地表气温对峨眉冷杉林采伐迹地和演替林土壤 CO₂ 排放影响最大, 10cm 和 5cm 深地温对峨眉冷杉林土壤 CO₂ 排放影响最大。根据观测的土壤呼吸月平均值计算得出土壤 CO₂ 排放的通量估计值, 峨眉冷杉林采伐迹地土壤 CO₂ 排放为 223.91 kg / hm²d, 峨眉冷杉林土壤排放为 218.481 kg / hm²d, 峨眉冷杉演替林土壤 CO₂ 排放为 123.76 kg / hm²d。

关键词 峨眉冷杉林, 土壤呼吸, CO₂ 排放

中图分类号 X221

温室气体增强导致气候变暖。大气中 CO₂ 是摩尔数效率最低的温室气体, 但是它的绝对增加速率高 (355 μl / L × 0.5% / a = 1.78 μl / L a)^[1], 所以它现时的温室作用大约占 60%。现在对全球碳循环中陆生汇和海洋汇的了解还不全面, 1994 年 IPCC 对全球碳平衡所作的评估表明, 对 CO₂ 源汇和大气累积之和存在着未归属的 (1.4 ± 1.5) Gt / a C 的陆生汇^[2]。因此需要充分认识陆地生态系统在全球碳循环中的作用, 特别是对大气中 CO₂ 浓度升高的作用。

森林是陆地生态系统碳循环的主体。大气 CO₂ 浓度升高和气候变暖还会导致一系列的生物生态学效应, 高纬度和高海拔地区生态系统的反应最为敏感。针对上述问题, 我们开展了对峨眉冷杉 (*Abies fabri*) 林区三种不同类型土壤排放 CO₂ 过程的研究。

1 测区自然条件及实验方法

峨眉冷杉林是我国西南亚高山暗针叶林的主要类型之一, 为四川特有的森林类型。三块样地分别位

* 中国科学院“九五”重大项目 (KZ951-A1-301)、特别支持项目 (KZ95T-04-02) 和国家与中国科学院青藏高原研究项目 (KZ951-A1-204) 部分成果。

收稿日期: 1999-03-29; 收到修改稿日期: 1999-12-28

于贡嘎山东坡海螺沟海拔 3000~3100m 的高度上,气候冷湿,属山地寒温带气候类型。研究区保存有原始峨眉冷杉林,1948 年形成的泥石流迹地上出现峨眉冷杉演替林。本研究设置了三块研究样地,样地 1 称为采伐迹地,是峨眉冷杉演替林被采伐后的迹地,样地 2 称为演替林,是峨眉冷杉和冬瓜杨 (*Populus purdomii*) 为优势种的演替林。样地 3 称为峨眉冷杉林,是原始峨眉冷杉林。样地 1 和样地 2 的土壤类型是粗骨土,样地 3 的土壤类型是山地棕色暗针叶林土^[3,4]。

采用美国产 CI-301PS 光合作用测定仪和中国农业机械化研究所用玻璃纤维增强塑料制作的土壤气体采集器,通过闭路方式测定土壤 CO₂ 排放。每块样地设置三个重复观置点,同时观测相关气象因子。1998 年 5 月~1998 年 11 月,每隔 10 天对三块样地做一次 24 小时连续观测。1998 年还用仪器测定群落的净光合速率,并调查了群落的生物量和净初级生产力。植物样和土壤样的含碳量用意大利产 MOD1106 型元素分析仪测定。

2 结果与讨论

2.1 土壤呼吸强度

不同类型土壤呼吸强度存在着明显的差异(见表 1)。采伐迹地土壤呼吸强度最高,CO₂ 平均达 5.89 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,在各月份中高低依次为 9 月 > 8 月 > 6 月 > 7 月 > 5 月 > 10 月 > 11 月,呼吸强度各月份之间变化较大。9 月份最高 CO₂ 为 14.48 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,反映了该月有效光辐射增加,水、热条件较好,有机质分解加快,11 月份最低 CO₂ 为 0.60 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,前者为后者的约 25 倍。峨眉冷杉林土壤呼吸强度次之,CO₂ 平均为 5.76 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,在各月份中高低依次为 8 月 > 7 月 > 9 月 > 6 月 > 5 月 > 10 月 > 11 月,呼吸强度各月份之间变化最小。演替林土壤呼吸强度最低,CO₂ 平均为 3.26 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,各月份中高低依次为 5 月 > 7 月 > 8 月 > 6 月 > 9 月 > 10 月 > 11 月,呼吸强度各月份之间变化不大,5 月份最高 CO₂ 为 6.89 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,反映了群落优势种冬瓜杨萌叶时林下水热条件较好,土壤中各种生物活动增加,11 月份最低 CO₂ 为 1.74 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,前者为后者的约 4 倍。三种类型土壤不同的呼吸强度以及在不同季节的差异反映了各自对季节变化的反应不一。

2.2 土壤呼吸的日变化

图 1 显示 1998 年 7 月 17 至 18 日测得的峨眉冷杉林区土壤呼吸与温度的日变化。结果显示了土壤呼吸与温度变化有相同的变化趋势,但并不完全同步。土壤呼吸的最高值出现在 20:03~22:17。由于 16:36~17:18 下雨,采伐迹地土壤呼吸在 18:08 出现全天最低值,峨眉冷杉林和演替林土壤呼吸在雨中降低到次低点,两者的最低点出现在早晨 4 点左右。峨眉冷杉林土壤呼吸当天平均 CO₂ 为 87 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,是 7 月份的 1.11 倍,演替林土壤呼吸当天平均 CO₂ 为 6.16 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,是 7 月份的 1.16 倍,采伐迹地土壤呼吸当天平均 CO₂ 为 11.51 $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$,是 7 月份的 1.18 倍。观测日降雨量较少,土壤呼吸都高于 7 月份的平均值。峨眉冷杉林区植物生长季降雨量大,晴天很少,降雨时温度下降,土壤呼吸随之降低。在观测日采伐迹地土壤呼吸强度最高,变化最大。

2.3 影响土壤呼吸的因素

各种生态因素对土壤呼吸都有影响,但是它们对不同土壤类型的土壤呼吸作用并不一样。研究区年降水达 1950mm,且集中在 6 月至 9 月,年平均相对湿度在 90% 以上。降雨

表1 1998年峨眉冷杉林区土壤呼吸与相关气象因子测定结果

Table 1 The soil respiration and the related climate factors in *Abies fabri* forest region in 1998

月份	土壤呼吸	近地表气温	地表温度	5cm地温	10cm地温	气温	有效光辐射	进气口大	出气口大	进气口CO ₂ 浓度	出气口CO ₂ 浓度
Month	Soil respiration	Near surface	Surface	5cm soil	10cm soil	Air	PAR	气湿度	气湿度	Inlet CO ₂ concentration	Outlet CO ₂ concentration
土壤类型	CO ₂	Temperature	temperature	temperature	temperature	temperature	($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)	(%)	(%)	($\mu\text{L}/\text{L}$)	($\mu\text{L}/\text{L}$)
采伐迹	7.50	13.82	14.36	13.51	13.12	13.05	231.70	84.17	84.65	623.44	789.47
地土壤	12.24	13.46	14.14	13.48	12.62	12.76	219.12	90.62	91.63	414.36	557.51
	10.75	14.28	14.62	15.78	15.47	13.97	197.91	90.57	90.56	427.65	616.16
	13.42	15.30	15.24	16.72	16.26	12.94	156.77	87.37	85.25	419.78	1041.34
	14.84	15.90	16.23	15.33	15.33	13.42	355.57	86.62	82.31	428.40	979.38
	8.37	11.03	11.40	11.85	11.92	9.72	462.14	88.51	82.46	415.23	810.56
	0.60	7.44	7.98	7.80	8.14	5.18	167.88	89.18	82.60	407.26	421.46
演替林	6.89	15.60	13.41	10.34	9.93	13.86	35.27	80.07	81.86	693.10	867.68
土壤	4.34	12.52	11.65	9.26	9.64	11.77	18.60	88.91	90.13	430.52	498.09
	5.33	13.44	12.57	12.53	12.53	12.68	14.98	90.95	92.35	433.91	526.15
	5.24	13.58	12.83	12.58	12.58	12.42	12.27	89.59	88.91	438.16	575.21
	3.82	13.07	12.69	10.48	10.50	13.13	34.29	88.05	89.21	443.21	603.99
	3.05	9.56	9.74	9.04	9.30	9.33	51.34	89.18	90.33	439.26	518.42
	1.74	4.58	4.04	6.13	6.21	3.18	70.48	92.03	91.04	437.68	492.28
峨眉冷杉林	5.27	11.96	10.40	7.43	7.11	10.37	27.44	86.32	87.78	511.50	579.07
	6.04	12.29	11.06	8.19	7.96	10.95	24.49	89.14	89.29	437.39	510.98
	8.01	14.40	13.33	11.89	11.60	12.48	19.05	86.51	87.44	433.12	602.96
	8.66	14.21	13.11	11.74	11.79	11.97	18.01	88.49	88.79	461.05	721.45
	6.77	13.67	11.17	8.50	8.57	10.61	16.23	83.77	86.31	434.83	696.51
	5.24	9.14	7.33	6.57	6.60	9.46	17.12	83.26	86.58	422.59	618.37
	4.83	4.12	4.00	4.10	4.44	2.96	17.78	83.10	85.72	407.86	554.92

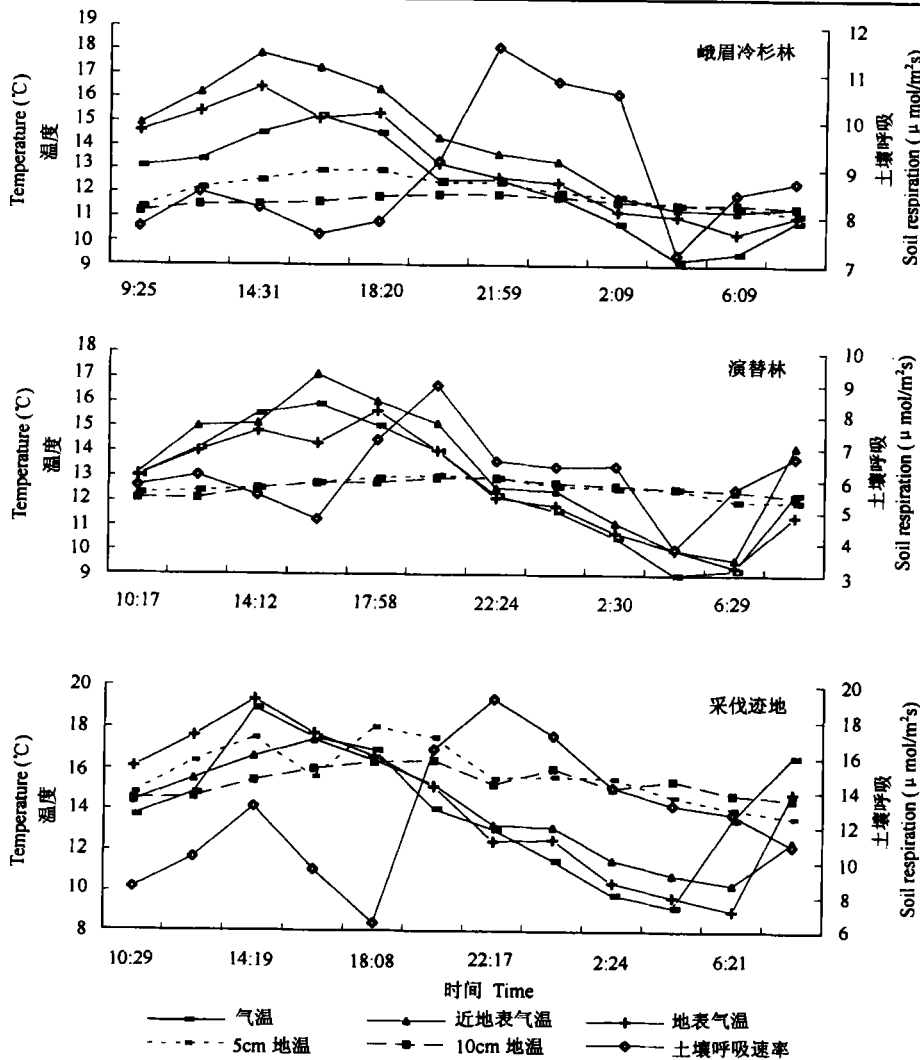


图1 土壤呼吸日变化曲线

Fig.1 The daily change curve of soil respiration

时,土壤呼吸强度还有所降低。湿度在一定范围内下降。反而使土壤呼吸强度升高,图1土壤呼吸的日变化过程和5月峨眉冷杉演替林土壤呼吸强度最高的情况就显示这一点。我们增加采集器内CO₂浓度,土壤呼吸强度也没有明显改变。Carlyle和Bunce等人对湿度、CO₂浓度升高将分别促进和抑制土壤呼吸的认识^[5,6],在本研究区观测结果中并没有得到证实。

我们将三种土壤类型呼吸强度与1998年5月至11月测定的相关气象因子1512组分别进行统计分析,它们之间不存在显著相关的关系,将测定值在各月的平均值进行多元回归后,发现各项温度指标与土壤呼吸强度有明显的相关性,说明温度的日变化对土壤呼吸过程的影响有一定的时滞性。现在有种观点认为夏季土壤CO₂释放强度是冬季的5倍^[7],这个结论与我们对峨眉冷杉演替林的测定结果比较接近,不适合其他两种类型土壤。

温度不仅影响植物地上部分生理活动,还对有机物分解、根系呼吸、土壤微生物等活动产生影响,因而对土壤排放 CO_2 影响最大。若以采伐迹地、演替林、峨眉冷杉林土壤呼吸强度分别为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 , 近地表气温、地表温度、5cm 深地温、10cm 深地温分别为 t_1 、 t_2 、 t_5 、 t_{10} , 分别取 7 个月的平均值做线性回归, 显著度达到极显著相关 ($P < 0.001$), 共有下列 6 式:

$$Y_1 = 1.51804t_1 - 10.1124 \quad (r = 0.9252), \quad Y_1 = 1.55999t_2 - 11.26970 \quad (r = 0.9197)$$

$$Y_2 = 0.52689t_1 - 0.72990 \quad (r = 0.9225), \quad Y_2 = 0.53774t_2 - 0.38833 \quad (r = 0.8486)$$

$$Y_3 = 2.8692 + 0.63247t_{10} \quad (r = 0.9685), \quad Y_3 = 3.14485 + 0.59485t_5 \quad (r = 0.9474)$$

采伐迹地和演替林土壤呼吸受近地表气温和地表温度的影响较大, 峨眉冷杉林土壤呼吸受 10cm 深和 5cm 深地温影响较大。根据以上公式计算表明, 大气温度升高将对采伐迹地土壤呼吸影响最大, 对演替林土壤呼吸影响次之, 对峨眉冷杉林土壤呼吸影响较小。以上结果反映了三种不同生态系统类型的结构和功能特征。

土壤呼吸作为生态系统碳循环的一个重要环节, 同时也是土壤生物活性、土壤肥力以及土壤透气性的指标^[8-10]。研究区内生态系统类型和土壤性质不同, 不同类型的土壤对土壤有机质的分解速率和植物根系的生理代谢有着重要影响。表 2 比较了研究区三种不同生态系统碳循环的特征。峨眉冷杉林每年固定碳 $5.57\text{t} / \text{hm}^2$, 其中有 $1.79\text{t} / \text{hm}^2$ 以凋落物形式输入土壤, 峨眉冷杉全年进行光合作用, 生理代谢比较旺盛, 根系呼吸作用释放的 CO_2 在土壤排放 CO_2 的量中占有很高的比例, 这也是峨眉冷杉林各月呼吸强度变化最小的重要原因。演替林每年固定碳 $4.19\text{t} / \text{hm}^2$, 其中有 $1.50\text{t} / \text{hm}^2$ 以凋落物形式输入土壤, 林中落叶成分占较高比例, 植物生理活动受季节变化影响很大, 演替林各月土壤呼吸强度有一定的变化。

采伐迹地上植被以草本为主, 还有少量先锋树种的幼树, 植物每年固定碳 $1.08\text{t} / \text{hm}^2$ 其中大部分输入土壤。森林被采伐以后, 植物-土壤下垫面生态环境发生了很大的变化, 土壤年平均温度升高, 有机质分解作用增加, 在森林采伐后最初几年土壤有机质和营养元素损失很大^[11]。采伐迹地植被每年固定碳和凋落物输入土壤和碳较少。土壤有机质分解释放的 CO_2 在土壤 CO_2 排放量中占有一定的比例。由于采伐迹地环境的变化, 较高的土壤表层温度促使土壤有机质分解和植物根系呼吸作用增加, 同时, 土壤呼吸强度受温度影响较大, 各月之间变化最大。

对同一气候区域不同下垫面, 其辐射平衡的差异主要取决于下垫面的性状^[12]。若植被盖度下降, 土壤热通量的日变幅和全天净热通量增加, 不同的下垫面性状可改变地表的辐射平衡, 从而使土壤温度及其振幅发生变化。采伐迹地植被盖度最低, 植被生长季土壤温度最高, 土壤表层温度的日振幅和季节变化最大(图 1、表 1)。演替林和峨眉冷杉林植被盖度较高, 植物生长季土壤温度较低, 土壤表层温度的日振幅和季节变化较小。

目前, 土壤有机质含碳量是大气中的 2 倍^[13], 受环境条件影响的植物群落净初级生产力和土壤有机质分解在土壤碳平衡过程中有着重用作用。滥伐森林不但消除了森林固碳作用, 而且增加了地面的辐射吸收, 使地面和土壤的温度升高, 促使土壤中碳的分解释放, 进而加剧温室效应, 引起全球气候变化^[14]。升高的大气 CO_2 浓度还进一步促使凋落物和土壤中的碳分解以及矿质营养元素流失^[15]。

2.4 土壤排放 CO_2 通量

根据海螺沟海拔 3000m 气象站资料和样地全年调查资料, 推测 12 月至 4 月土壤呼吸

表2 生态系统各组分的碳分配

Table 2 Distribution of carbon in different components of ecosystem

生态系统类型 Ecosystem types	植物碳储量 Carbon storage of plant (t/hm ²)	土壤碳储量 Carbon storage of soil (t/hm ²)	净初级生产力 Net primary production (t/hm ² a)	凋落物 Litter fall (t/hm ² a)
针叶林(峨眉冷杉林)	143.15	172.4	5.57	1.79
演替林	30.70	57.97	4.19	1.50
采伐迹地	1.46	18.33	1.08	0.84

月平均值一般不会超过 11 月份的土壤呼吸强度,所以在此以 11 月份的呼吸值作为 12 月至 4 月的平均值。将表 1 实测的土壤呼吸月平均值进行计算,结果见表 2。由于研究区冬季漫长,季节性冻土时间较长,12 月至 4 月土壤排放 CO₂ 的通量估计值可能偏高。

表3 峨眉冷杉林区土壤排放CO₂的通量Table 3 The estimated CO₂ flux from soils of *Abies fabri* forests region (kg/hm²d)

土壤类型 Soil type	月份 Month							平均 Mean
	5	6	7	8	9	10	11	
采伐迹地土壤	285.04	465.32	408.52	510.14	564.16	318.04	22.62	233.91
演替林土壤	261.74	164.91	202.65	199.20	145.07	115.76	66.17	123.76
峨眉冷杉林土壤	200.42	229.62	304.36	329.14	257.33	199.28	183.58	218.48

采伐迹地土壤排放 CO₂ 通量的值最高,约为 223.91kg / hm²d,峨眉冷杉林土壤排放 CO₂ 通量的值略低,约为 218.48kg / hm²d。演替林土壤排放 CO₂ 通量的值最低,约为 123.76kg / hm²d。将以上结果参照相应土壤排放 CH₄ 通量、生态系统生物量和净初级生产力的研究结果(另文待发表),可以获得以下初步认识。采伐迹地生态系统对 CO₂ 的排放大于吸收,峨眉冷杉演替林生态系统对 CO₂ 的吸收大于排放,峨眉冷杉成熟林生态系统对 CO₂ 的吸收和排放达到相对平衡。

3 结 论

1. 采伐迹地、演替林和峨眉冷杉林土壤呼吸强度平均值 CO₂ 分别为 5.89、5.76、3.26 μmol / hm²s。三种土壤呼吸的日变化和季节变化存在一定差异。

2. 温度是影响土壤呼吸的主要因素,采伐迹地、演替林土壤呼吸与近地表气温和地表气温之间存在着极显著相关,峨眉冷杉林土壤呼吸与 10cm、5cm 深地温之间存在着极显著相关。未来气温升高将对采伐迹地土壤呼吸影响最大,演替林的冷之,峨眉冷杉林的最小。

3. 生态系统类型和土壤性状对土壤呼吸有重要作用,植物-土壤下垫面性状可以改变辐射平衡,导致温度对土壤呼吸影响程度不同。

4. 采伐迹地、演替林和峨眉冷杉林土壤排放 CO₂ 的通量分别为 223.91、123.76、218.48kg / hm²d。

参 考 文 献

1. Hongton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. ed. IPCC Climate Change, The IPCC Scientific Assessment. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990. 365
2. Hongton J T, Meira Filho L G, Bruce J *et al.* ed. IPCC Climate Change Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994. 339
3. 罗辑. 贡嘎山东坡植被原生演替的群落排序. 见: 陈富斌, 罗辑主编. 贡嘎山高山生态环境研究(第2卷). 北京: 气象出版社, 1998. 23~27
4. 王良健, 李显明, 林致远. 也谈我国西南高山地区暗针叶林下发育的土壤. 地理学报, 1995, 50(6): 542~551
5. Carlyle J C, Than U B A. A biotic controls of soil respiration between an eighteen-year-old *Pinus rediata* stand in south-eastern Australia. The Journal of Ecology, 1988, 76: 654~662
6. 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
7. 杜宝华. 作物冠层内二氧化碳源、流研究现状与展望. 中国农业气象, 1994, 15: 44~48
8. Neilson J W, Pepper I L. Soil respiration as an index of soil aeration. Soil Sci. Soc. AM J, 1990, 54: 428~432
9. Reiners W A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. Ecology, 1968, 49: 47~483
10. Macfadyen A. Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration. Soil Bio. Biochem, 1970, 2: 9~18
11. Bormann F H, Likens G E 著. 李景文等译. 森林生态系统的格局与过程. 北京: 科学出版社, 1985. 86~108
12. Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Sranzenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298: 156~159
13. Kuusk A. Absorption profiles of shortwave radiation in a vegetation canopy. Agri. For. Meteor. 1992, 62(1): 191~204
14. 李文华. 长江洪水与生态建设. 自然资源学报, 1999, 14(1): 1~8
15. Christian K, John A A. Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. Science, 1992, 257(1): 1672~1675

CO₂ EMISSIONS FROM SOILS IN *ABIES FABRI* FOREST REGION ON THE EAST SLOPE OF GONGGA MOUNTAIN

Luo Ji Yang Zhong Yang Qing-wei

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy
of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041)

Summary

Abies fabri forest is one of representative type of subalpine dark coniferous forest in Southwest China. The difference was obvious among CO₂ emissions from soils in *Abies fabri* forest region on the east slope of Gongga Mountain. The soil respiration of clearcut site approached 5.89 μmol / hm²s CO₂. The series of soil respiration was arranged: September > August > June > July > May > October > November. The soil respiration of *Abies fabri* forest approached 5.76 μmol / hm²s CO₂. The series of soil respiration was arranged: August > July > September > June > May > October > November. The soil respiration of succession forest approached 3.26 μmol / hm²s CO₂. The series of soil respiration was arranged: May > July > August > June > September > October > November. There existed a good linear correlation between soil respiration of clearcut site-succession forests and near surface-surface temperature. There existed a good linear correlation between soil respiration of *Abies fabri* forest and 5cm~10cm soil temperature. The soil CO₂ flux of clearcut site was 223.91 kg / hm²d. The soil CO₂ flux of succession forest was 123.76kg / hm²d. The soil CO₂ flux of *Abies fabri* forest was 218.48kg / hm²d.

Key words *Abies fabri* forest, Soil respiration, CO₂ emission