

鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究

周存宇^{1,2} 周国逸¹ 王迎红³ 张德强¹ 刘世忠¹ 王跃思³ 孙 扬³

(1 中国科学院华南植物园 2 长江大学园艺园林学院 3 中国科学院大气物理研究所)

摘要:利用静态箱-气相色谱法对鼎湖山针阔叶混交林的土壤呼吸速率的季节变化和昼夜变化,进行了为期1年的野外观测研究.自然状态下土壤呼吸速率的年平均值为 $(400 \pm 29) \text{ mg}(\text{CO}_2)/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其中由凋落物分解释放的 CO_2 占土壤总呼吸的年平均比例为42%;土壤呼吸速率与林内气温、地表温度、地下5、10、15和20 cm土壤温度都呈显著指数相关,用土壤呼吸速率与温度间的指数模型得出对应于以上各温度的 Q_{10} 值变动在1.92~2.81之间;土壤呼吸速率与土壤含水量的关系依观测点土壤水分状况不同而有一定差异;土壤呼吸速率的日变化模式在雨季和旱季有明显区别,相对于温带陆地生态系统而言,该林型土壤呼吸速率的日较差较小.

关键词:鼎湖山,土壤呼吸, Q_{10} 值,土壤温度

中图分类号:S714.2 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2005)04-0023-05

ZHOU Cun-yu^{1,2}; ZHOU Guo-yi¹; WANG Ying-hong³; ZHANG De-qiang¹; LIU Shi-zhong¹; WANG Yue-si³; SUN Yang³. **Soil respiration of a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan**

Mountain, Guangdong Province. *Journal of Beijing Forestry University* (2005) 27(4) 23-27 [Ch., 18 ref.]

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, P. R. China;

2 College of Horticulture and Garden, Yangtze University, Jingzhou, 434025, P. R. China;

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, P. R. China.

Field experiment was carried out to examine the soil respiration rate by using static chamber-gas chromatograph technique in a coniferous and broad-leaved forest in Dinghushan Mountain Biosphere Reserve for one year. The results show that mean annual soil respiration rate is $(400 \pm 29) \text{ mg}(\text{CO}_2)/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, while CO_2 from the litter decomposition accounts for 42% of the total CO_2 emission from the soil surface. Significant relationships are found between soil respiration rate and ambient air temperature, soil temperatures at different depths (the surface, 5 cm depth, 10 cm depth, 15 cm depth and 20 cm depth), which could be best described by exponential equations. The Q_{10} values based on air temperature and soil temperature at surface, 5, 10, 15 and 20 cm depth vary from 1.92 to 2.81. The relationships between soil respiration rate and soil water content in the two observation sites vary with the soil water regime. The diurnal pattern of soil respiration rate in the rainy season is distinctly different from that in the dry season. Compared with temperate terrestrial ecosystems, this subtropical forest has a smaller diurnal variation of soil respiration rate.

Key words Dinghushan Mountain Biosphere Reserve, soil respiration, Q_{10} value, soil temperature

在森林生态系统的碳循环中土壤呼吸是一个重要环节,是森林地下部分碳支出的主要途径,因而对整个森林生态系统碳平衡的估算具有重要意义.在全球变化的背景下,由于土壤呼吸对温度变化的敏感性,所以受到越来越多的关注.从全球范围来看,对土壤呼吸的研究虽然已涉及到农田、草原、森林、

湿地、冻原等各种生态系统,但就研究的地域而言,大部分的研究集中在中纬度的温带草地和森林,亚热带森林生态系统土壤呼吸的研究相对比较匮乏,这与其在全球陆地生态系统中所占的比重是很不相称的.我国在土壤呼吸方面的研究最初也是从温带的农田、草地和森林开始的^[1-3],只是近年来才有少

收稿日期:2004-06-15

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01)、重要方向性项目(KSCX2-SW-120)和国家自然科学基金项目(30470306).

第一作者:周存宇,博士生.主要研究方向:森林生态系统与大气间温室气体交换.电话:020-37252754 Email:zhoucy@scib.ac.cn 地址:510650 广州中国科学院华南植物园.

责任作者:周国逸,研究员.主要研究方向:森林生态系统.电话:020-37252708 Email:gyzhou@scib.ac.cn 地址:同上.

数这方面的工作在我国亚热带地区开展^[4,5],所用方法或为静态箱-碱石灰吸收法或为动态箱-红外线气体分析法,而本研究采用静态箱-气相色谱法来测定亚热带森林土壤呼吸在我国尚属首次.本研究以鼎湖山马尾松针阔叶混交林为对象,试图揭示土壤呼吸的季节变化和日变化规律以及影响其变化的关键因子,为准确估算该地区的碳收支状况和预测土壤呼吸对全球变暖的响应提供依据.

1 研究地概况

本研究在鼎湖山自然保护区针阔叶混交林3号样地内进行.保护区位于广东省中西部,东经112°30'39"~112°33'41",北纬23°09'21"~23°11'30",面积1155 hm²,最高峰鸡笼山海拔1000.3 m.属南亚热带季风湿润气候,年平均降水量1956 mm,主要集中在4—9月份,占全年的76%;年平均温度为20.9℃,最冷月(1月)和最热月(7月)温度分别为12.0℃和28.0℃;年平均相对湿度为80.8%^[6].本文的研究地点位于保护区内五棵松,处于地带性植被季风常绿阔叶林的边缘,是阔叶树种侵入人工或自然的马尾松(*Pinus massoniana*)林后形成的,为演替系列中间阶段的典型代表类型.群落垂直结构可分为4层:乔木2层,灌木1层,草本1层,此外还有多种藤本和附生的层间植物.组成种类以常绿树种占绝对优势,大部分属热带亚热带成分.研究样地的母岩为砂页岩,土壤为砂质壤土,pH值3.86,土壤有机质含量3.5%.地面枯枝落叶层盖度80%~90%,厚度3 cm左右.

2 研究方法

土壤呼吸速率利用静态箱-气相色谱法测定.采样箱为组合式,即由底座、顶箱两部分组成,均为不锈钢板制成.底座:长(L)×宽(W)×高(H)×钢板厚度(T)=500 mm×500 mm×100 mm×2.5 mm;水封槽:W×H×T=20 mm×30 mm×2.5 mm;顶箱:L×W×H×T=500 mm×500 mm×500 mm×1.5 mm.顶箱封顶,内装2个轴流混气扇、采样管、测温口.实验观测前将底座打入采样位点,因坡度较大,无法采用水密封,水封槽内粘贴弹性胶带进行密封.观测区内设置2种处理:观测前去除地表凋落物(S);保留地表凋落物(L+S).在每个采样点罩箱后0、10、20、30 min分别用100 mL医用注射器采集箱内气体90 mL,采样后及时带回实验室分析.用HP4890D(美国Agilent公司生产)气相色谱仪测定CO₂气体浓度,CO₂经镍触媒转化器转化后,用氢焰离子化检测器(FID)进行检测,检测器、转化

器、分离柱温度分别为200、375、55℃,载气为高纯氮气,流速30 mL/min^[7].

土壤呼吸速率用地表CO₂气体通量表示,气体的通量是指单位时间单位面积观测箱内该气体质量的变化,一般正值表示气体从土壤排放到大气,负值表示土壤吸收大气中的该气体,用公式表示为:

$$F = \frac{m}{t} \cdot D \frac{V}{A} = hD \frac{m}{t}$$

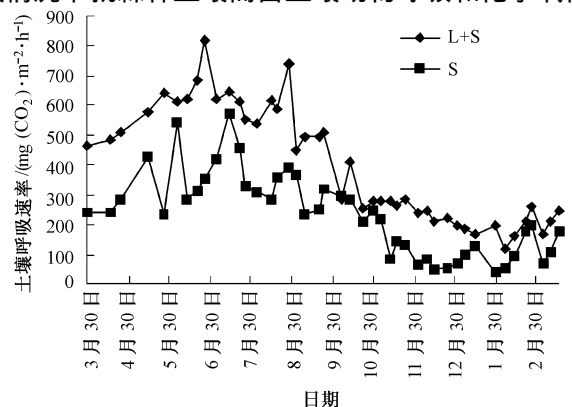
式中,F为气体通量(mg/(m²·h)),V为观测箱的容积,A为观测时包围的土壤面积,D为箱内气体密度,m/t是气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率,h为观测箱高度.

此外,在CO₂气体通量测定的同时用便携式数字温度计(JM624,天津立文电子有限公司生产)观测气温、地表温度和地下5 cm土壤温度.土壤含水量用中国生态系统网络统一配置的TDR土壤测墒仪(MPKt,江苏瑞迪生科技有限公司生产)测定,在每一采样点周围选取5个点测量土壤含水量,取其平均值代表采样点内的土壤含水量.从2003年4月至2004年3月,每周进行1次野外土壤呼吸速率及相关环境因子的观测.

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸的季节变化

从2003年4月到2004年3月的观测期间,无论是保留凋落物的处理还是去除凋落物的处理,土壤呼吸速率都是雨季(4—9月)明显高于旱季(10—3月)(图1).由静态箱法测定的土壤呼吸可称为土壤总呼吸,它实际上包括土壤微生物和土壤动物的异养呼吸、植物根系的自养呼吸和化学氧化过程,但一般情况下就森林土壤而言土壤动物呼吸和化学氧化



L+S为保留凋落物的处理;S为去除凋落物的处理(下同)

图1 两种处理土壤呼吸速率季节变化曲线
(2003年4月—2004年3月)

FIGURE 1 Seasonal patterns of soil respiration rate under two treatments

过程释放的 CO₂ 占地表 CO₂ 总排放的比例很小,所以通常不予考虑,这样构成森林土壤总呼吸主要是土壤微生物(包括分解凋落物的微生物)的异养呼吸和根系的自养呼吸. 鼎湖山地区受季风影响,雨季降雨频繁,温度较高,良好的水热条件有利于植物的生长发育,植物地下部分的根系呼吸旺盛,且生长过程中产生相当量的分泌物可作为微生物代谢活动的养料;另一方面在高温高湿条件下凋落物分解加快,向土壤输送的养分增多,促进了土壤微生物的呼吸,而在旱季情况刚好相反,低温和干旱限制了植物根系和土壤微生物的代谢活动,使得土壤总呼吸速率降低.

经 *t* 检验,保留和去除地表凋落物两种处理间土壤呼吸有显著差异 ($P < 0.01$). 计算结果表明,就全年平均来看凋落物分解产生 CO₂ 占土壤总呼吸的比例为 42%,说明在南亚热带森林生态系统凋落物分解是地表 CO₂ 排放的一个重要来源.

3.2 温度和土壤含水量对土壤呼吸的影响

在对土壤呼吸实验观测期间,位于观测点附近的通量观测塔的气象自动观测设备记录下每天(每隔 30 min 记录 1 次)的林内气温、地表温度、地下 5、10、15 和 20 cm 的土壤温度. 将我们每次进行土壤呼吸观测时用手持便携式数字温度计所测得的气

温、地表温度和地下 5 cm 土温与自动设备记录的相应温度做 *t* 检验可知,两套仪器所得结果无显著差异,说明完全可以利用通量观测塔所记录的有关温度的数据进行统计分析.

将土壤呼吸与气温和不同深度土壤温度进行回归分析表明,这些温度与土壤呼吸速率间都存在极显著的指数关系(表 1),其中与 5 和 10 cm 深处的土壤温度的相关性最好. 这是因为作为土壤总呼吸主要贡献者的土壤微生物主要分布在土壤的表层,因此相对于气温和地表温度而言,土壤呼吸速率对表层土壤温度的变化比较敏感.

Q_{10} 值是指温度每升高 10 °C 土壤呼吸增加的倍数,它是反映土壤呼吸速率对温度变化敏感性的有效指标,其计算公式为 $Q_{10} = e^{10b}$,式中 b 为土壤呼吸与温度间指数模型中的温度反应系数^[8,9]. 根据各种温度与土壤呼吸速率的指数回归方程可计算出土壤呼吸速率(包括凋落物分解过程微生物呼吸)相对于气温、地表温度、地下 5、10、15 和 20 cm 土壤温度的 Q_{10} 值,分别为 1.92、1.95、2.62、2.71、2.76 和 2.81. 从气温到地下 20 cm 土壤温度其全年变化幅度是递减的,相应的 Q_{10} 值随温度变幅的减小而增大,由此可见在比较不同生态系统土壤呼吸的 Q_{10} 值时一定要注意的是否基于同一种温度.

表 1 土壤呼吸速率 (Y) 与各温度 (x) 间的回归方程

TABLE 1 Regression equations between soil respiration (Y) and temperature (x)

温度	处理 1 (L+S)			处理 2 (S)		
	回归方程	R ²	P	回归方程	R ²	P
气温	$Y = 97.953 e^{0.0652x}$	0.703 7	<0.01	$Y = 27.587 e^{0.0926x}$	0.751 4	<0.01
地表温度	$Y = 92.482 e^{0.0666x}$	0.694 5	<0.01	$Y = 23.831 e^{0.0956x}$	0.735 1	<0.01
地下 5 cm 温度	$Y = 51.785 e^{0.0965x}$	0.805 6	<0.01	$Y = 12.377 e^{0.1358x}$	0.821 3	<0.01
地下 10 cm 温度	$Y = 47.790 e^{0.0996x}$	0.793 0	<0.01	$Y = 11.103 e^{0.1403x}$	0.806 1	<0.01
地下 15 cm 温度	$Y = 45.244 e^{0.1016x}$	0.779 5	<0.01	$Y = 10.305 e^{0.1431x}$	0.790 0	<0.01
地下 20 cm 温度	$Y = 43.170 e^{0.1034x}$	0.765 4	<0.01	$Y = 9.675 e^{0.1455x}$	0.772 7	<0.01

回归分析表明两种处理条件下,土壤呼吸都与土壤含水量存在显著相关关系,但它们的相关模型有一定差异,保留凋落物覆盖的处理其土壤呼吸速

率与土壤含水量呈线性相关,而去除凋落物处理土壤呼吸速率与土壤含水量为多项式相关,且前者的相关系数明显大于后者(图 2).

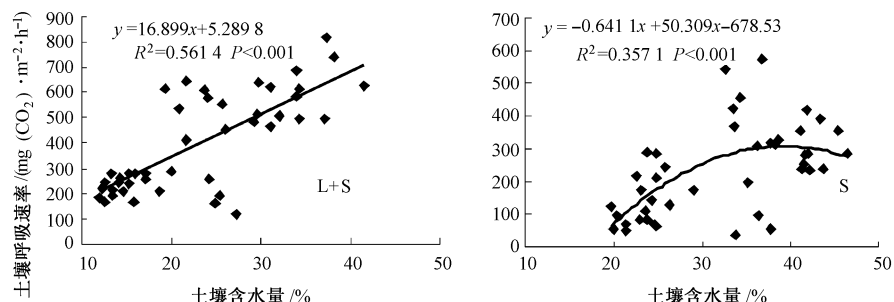


图 2 两种处理土壤呼吸速率与土壤含水量的相关性

FIGURE 2 Relationship between soil respiration rate and soil moisture under two treatments

3.3 土壤呼吸的昼夜变化

在1年的观测期间,于雨季的2003年6月底和7月底以及旱季的11月底和2004年1月底进行了土壤呼吸日变化的测定。从图3可以看出在两种处理条件下,雨季和旱季的土壤呼吸速率昼夜变化模式都是截然不同的。雨季的高温高湿环境有利于植物根系和土壤微生物的代谢活动,土壤总呼吸速率

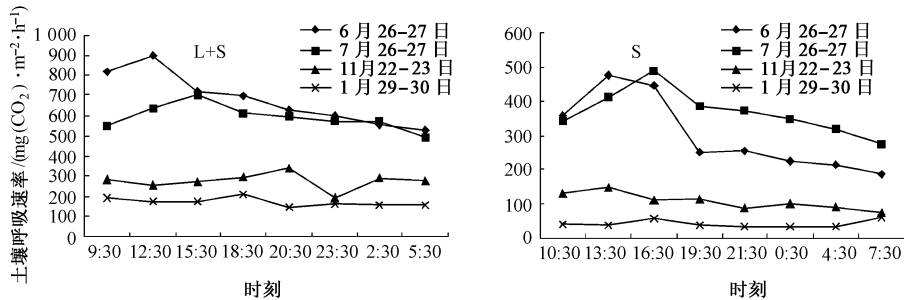


图3 两种处理下土壤呼吸速率昼夜变化动态

FIGURE 3 Diurnal patterns of soil respiration rates under two treatments

4 结论与讨论

鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸速率季节变化明显,表现为雨季大于旱季。该林型地表凋落物分解释放 CO_2 占土壤总呼吸的比例全年平均为42%。董云社^[10]在温带森林观测结果表明,去掉地表凋落物和腐殖质后土壤排放 CO_2 量减少23%,比本研究中去掉凋落物后土壤排放 CO_2 量减少的比例要低得多。这可能是因为在温度较高的亚热带凋落物分解较快,释放 CO_2 量较多;另外根据2002年的调查在鼎湖山几种主要林型中针阔叶混交林的凋落物现存量最大(497 g/m²),相应地由凋落物分解释放的 CO_2 也较多。

回归分析表明,该类型森林土壤呼吸与气温和各层土壤温度呈显著指数相关,且与地下5~10 cm土壤温度相关性最好。陈全胜等^[11]在内蒙古草原的研究结果表明,土壤呼吸速率与气温和不同深度土壤温度也存在显著的指数关系,而与气温的相关性最好,其次是地表温度。造成这种差异的主要原因可能是草原群落的土壤有机物质主要是以凋落物和粗腐殖质的形式集中于地表,土壤中的有机质含量很低^[12],这样土壤呼吸速率就与气温和地表温度的关系更为密切。

本研究得出的鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的 Q_{10} 值明显低于处于温带地区的硬木混交林($Q_{10} = 3.4 \sim 5.6$)和山毛榉林($Q_{10} = 4.2$)^[13,14],而与中亚热带的几种森林土壤呼吸速率的 Q_{10} 值(1.75~2.55)^[4]比较接近。说明就土壤呼吸对温度升高的响应敏感性而言,在年均温度较高的亚热带地区要低

较高,昼夜变化明显。而旱季的低温和干燥的环境抑制了土壤呼吸,使之维持在较低的水平,昼夜变幅很小,特别在1月底的观测日正是寒潮过后,不仅温度低,而且昼夜温差很小,地下5 cm土壤温度的昼夜差值只有1.2,所以土壤呼吸速率在整个观测日几乎没有变化。

于在年均温度较低的温带地区。

保留和去除凋落物两种处理下土壤呼吸与土壤含水量的相关模型明显不同,且相关系数前者大于后者(图2)。分析其中原因发现,这两个处理观测点的坡向、林冠覆盖、微地形等方面存在一定差异,造成两个观测点的土壤含水量间有较大的差别。将全年的数据经 t 检验发现,去除地表凋落物处理观测点与保留凋落物处理观测点的土壤含水量间有显著差异($P < 0.01$),前者大于后者9%左右。去除凋落物的观测点全年土壤含水量的变化范围是20%~47%,变异系数0.26,而保留凋落物观测点的土壤含水量变化范围是12%~42%,变异系数0.37。从图2可以看出,就去除凋落物的处理而言,土壤含水量小于38%时,土壤呼吸与土壤含水量为正相关,而大于38%时则为负相关,整个曲线呈向上微突的弧形。土壤水分含量的高低对土壤孔隙的通透性有很大影响, O_2 是植物根系和土壤微生物进行有氧呼吸的必要条件,过高的土壤含水量会限制土壤中的 O_2 的扩散^[15],此时土壤处于嫌气状态,植物根系和好氧微生物的活动受到抑制,土壤有机质的分解速率降低,土壤中产生的 CO_2 减少,所以会出现当超出某一值后,土壤含水量与土壤呼吸呈负相关。实际上对土壤呼吸而言,最佳的土壤水分状况往往是接近田间最大持水量,当土壤过干或过湿时土壤呼吸都会受到抑制^[16,17]。保留凋落物处理的观测点土壤含水量较低,即使在雨季也可能并未超出田间最大持水量,所以其与土壤呼吸基本上是正的线性相关。

在雨季,该林型土壤呼吸速率日变化明显,土壤呼吸速率的日最大值一般出现在12:00—16:00之间,而最低值则出现在6:30左右,与温度的日变化

趋势基本一致。另外,在日出之后植物进行光合作用使得林内空气 CO₂ 浓度不断降低,而土壤 CO₂ 浓度与空气 CO₂ 浓度的差值则升高,在 12:00—16:00 浓度差升至最大,这也是造成该时段土壤呼吸较强的原因之一。将本研究结果与位于温带的陆地生态系统相应季节的土壤呼吸速率的日变化观测结果^[1,2,18] 比较,发现无论是与温带的草原还是森林生态系统相比,位于亚热带的鼎湖山针阔叶混交林的土壤呼吸速率日变幅都较小,这是因为该地区温度,特别是土壤温度的日较差较小,使得与土壤温度密切相关的土壤呼吸速率的日较差也随之降低。在旱季,土壤呼吸速率日变化很小,当气温低于 10 时,土壤呼吸速率几乎没有昼夜的变化。

参 考 文 献

- [1] 刘绍辉,方精云,清田一信. 北京山地温带森林的土壤呼吸[J]. 植物生态学报,1998,22(2):119-126.
LIU S H, FANG J Y, MAKOTO K. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2):119-126.
- [2] 孙向阳,乔杰,谭笑. 温带森林土壤中的 CO₂ 排放通量[J]. 东北林业大学学报,2001,29(1):35-39.
SUN X Y, QIAO J, TAN X. Flux of carbon dioxide in temperate forest soils[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(1):35-39.
- [3] 杜睿,黄建辉,万小伟,等. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律[J]. 环境科学,2004,25(2):12-16.
DU R, HUANG J H, WAN X W, et al. The research on the law of greenhouse gases emission from warm temperate forest soils in Beijing region[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(2):12-16.
- [4] 黄承才,葛滢,常杰,等. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究[J]. 生态学报,1999,19(3):324-328.
HUANG C C, GE Y, CHANG J, et al. Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3):324-328.
- [5] 易志刚,蚁伟民,周国逸,等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放的研究[J]. 生态学报,2003,23(8):1673-1678.
YI Z G, YI W M, ZHOU G Y, et al. Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8):1673-1678.
- [6] 黄展帆,范征广. 鼎湖山的气候[G]//中国科学院鼎湖山森林生态系统定位站. 热带亚热带森林生态系统研究:第1集. 广州:广东科技出版社,1982:11-23.
HUANG Z F, FAN Z G. The climate of Dinghushan Biosphere Reserve[G]//Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, CAS. *Tropical and subtropical forest ecosystem: No. 1*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1982:11-23.
- [7] WANG Y S, WANG Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5):842-844.
- [8] LLOYD J, TAILOR J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, 8:315-323.
- [9] LUO Y, WAN S, HUI D, et al. Acclimation of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413:622-625.
- [10] 董云社,彭公炳,李俊. 温带森林土壤排放 CO₂、CH₄、N₂O 时空特征[J]. 地理学报,1996,51(增刊):120-128.
DONG Y S, PENG G B, LI J. Seasonal variations of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from temperate forest soil[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(Suppl.):120-128.
- [11] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报,2003,27(2):202-209.
CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin river basin of Inner Mongolia[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2):202-209.
- [12] 李明峰,董云社,齐玉春,等. 锡林河流域羊草群落春季 CO₂ 排放日变化特征分析[J]. 中国草地,2003,25(3):9-14.
LI M F, DONG Y S, QI Y C, et al. The analysis of diurnal variation of CO₂ flux in *Leymus chinensis* grassland of Xilin river basin[J]. *Grassland of China*, 2003, 25(3):9-14.
- [13] DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4:217-227.
- [14] IVAN A J, KIM P. Large seasonal changes in Q₁₀ of soil respiration in a beech forest[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9:911-918.
- [15] LINN D M, DORAN J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48:1267-1272.
- [16] KUCERA C L, KIRKHAM D R. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri[J]. *Ecology*, 1971, 52:912-915.
- [17] EDWARDS N T. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor[J]. *Soil Sci Am Pro*, 1975, 39:361-365.
- [18] 杜睿,王庚辰,刘广仁,等. 内蒙古羊草草原温室气体交换通量的日变化特征研究[J]. 草地学报,1998,6(4):258-264.
DU R, WANG G C, LIU G R, et al. The study on diurnal variation in greenhouse gas revenue and expenditure fluxes of *Leumus chinensis* grassland of Inner Mongolia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 1998, 6(4):258-264.

(责任编辑 董晓燕)