

# 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸 对气温变化的响应

陈全胜 李凌浩 韩兴国\* 阎志丹 王艳芬 张焱 袁志友 唐芳

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

**摘要** 在夏秋季节, 采用碱液吸收法对锡林郭勒草原 11 个群落的土壤呼吸进行了测定, 比较和分析了各群落土壤呼吸的季节动态、平均呼吸速率、土壤呼吸对气温变化的响应。结果表明: 1) 各群落土壤呼吸有明显的季节变化, 其动态与气温大体一致, 但不完全同步; 2) 生长季各群落平均呼吸速率介于  $565.07 \sim 1\,349.56 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  之间, 总体差异极显著, 各群落平均呼吸速率与平均气温无显著相关关系; 3) 指数模型能较好地表示土壤呼吸对温度变化的响应, 温度能在一定程度上解释土壤呼吸的季节变化, 但温度较低时模型的拟合好于温度较高时; 4) 各群落的  $Q_{10}$  值介于 1.47 ~ 1.84 之间, 与各群落的平均气温亦无显著相关关系, 小麦群落的  $Q_{10}$  高于所有草地群落, 说明土地利用方式对土壤呼吸的温度敏感性有影响。

**关键词**  $\text{CO}_2$  排放量  $Q_{10}$  值 温度敏感性 模拟 土地利用

## RESPONSES OF SOIL RESPIRATION TO TEMPERATURE IN ELEVEN COMMUNITIES IN XILINGOL GRASSLAND, INNER MONGOLIA

CHEN Quan-Sheng LI Ling-Hao HAN Xing-Guo\* YAN Zhi-Dan  
WANG Yan-Fen ZHANG Yan YUAN Zhi-You and TANG Fang

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract** Soil surface carbon dioxide flux, the sum of plant and microbial respiration, is an important component of the carbon cycle of terrestrial ecosystems. Temperature is a key factor that regulates many terrestrial biogeochemical processes, such as soil respiration. Numerous studies show that soil respiration increases with temperature, creating a positive feedback to global warming. Accurately quantifying the relationship between soil respiration and temperature is necessary, because it will help to develop mechanisms of the feedback, which will aid in predicting the tendency of global change.

In order to determine the law of soil respiration dynamics driven by temperature, and to detect the sensitivity of soil respiration in response to temperature in different communities of temperate grassland, in summer and autumn, we measured soil respiration in eleven communities using the alkali absorption method. We examined seasonal patterns of soil respiration, average respiration rate and responses of soil respiration to temperature. All the communities were located in Xilin River Basin, which has a typical temperate and semi-arid climate.

The seasonal variations of soil respiration were similar to those of temperature, but were not completely consistent with each other. The highest value of soil respiration was in summer (June to Aug.). Average soil respiration rates of all communities varied from  $565.07 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  to  $1\,349.56 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , and the difference was significant ( $p < 0.001$ ). Respiration was greatest in wet mixed grasses community and least in *Caragana stenophylla* community. There was no notable relationship between average soil respiration and air temperature in all eleven communities, though relation of soil respiration and temperature could be described well by exponential functions for each community ( $R^2 = 0.3305 - 0.7312$ ,  $p < 0.0001 - 0.0220$ ). The modeling was better at lower temperature than at higher.  $Q_{10}$  values of all communities were between 1.47 and 1.84, which were similar to or a little higher than the value in global scale. The  $Q_{10}$  value of wheat community was higher than that of other communities, which implied that land use could affect the sensitivity of soil respiration to temperature, and cultivation of the soil in grassland might be a  $\text{CO}_2$  source for atmosphere along with global warming.

**Key words**  $\text{CO}_2$  efflux,  $Q_{10}$  value, Temperature sensitivity, Modeling, Land use

土壤呼吸是碳循环的重要环节,在陆地生态系统中,通过土壤呼吸排放到大气中的  $\text{CO}_2$  高达  $68 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ,该值仅次于陆地植被总光合作用所固定的碳量(Raich & Schlesinger, 1992)。由于大气中的  $\text{CO}_2$  是引起全球温暖化最主要的温室气体(方精云等, 2000),而土壤呼吸对温度变化又相当敏感(Fang & Moncrieff, 2001),在全球变暖的情况下,土壤呼吸所释放的  $\text{CO}_2$  将随着地球表面温度的升高而增加,因此,温度升高和土壤  $\text{CO}_2$  排放量增加就成了全球变化的一个正反馈效应(Fang & Moncrieff, 2001; Cox *et al.*, 2000; Lenton, 2000; Woodwell *et al.*, 1998; Kirschbaum, 1995; Raich & Schlesinger, 1992)。将土壤呼吸与温度变化之间的关系精确量化,有利于人们对这种反馈机制的理解和对全球变化趋势作出准确的预报。

然而,土壤呼吸往往因植被状况的不同而相异(Raich & Tufekcioglu, 2000)。已有研究证明,土壤呼吸速率在不同的生物群区(Biome)之间有较大的差异(Schlesinger, 1977; Singh & Gupta, 1977; Raich & Schlesinger, 1992);也有结果表明,甚至在相邻不同植物群落之间的土壤呼吸速率也常常存在着相当大的变异(Ellis, 1974);而且植被状况的不同常常在一定程度上也反映了温度、水分等环境要素在空间上的分异,所以,研究土壤呼吸对温度变化的响应,有必要按照不同植被状况来进行。

温带草原是重要的植被类型,在全球变化背景下,为了揭示中国温带草原土壤呼吸受温度驱动的规律,估测草原上不同植物群落土壤呼吸对温度变化响应的敏感程度,在夏季和秋季,我们对锡林河流域 11 个具有一定代表性的植物群落的土壤呼吸进行了测定,分析了其季节变化与温度之间的关系。

## 1 研究区域自然状况描述

研究区域选在锡林河流域内,该流域属温带半干旱气候,气温年较差和日较差大,冬季寒冷漫长,夏季温和短促,具明显的大陆性气候特征。该流域多年平均气温从东南的  $-1.4^\circ\text{C}$  向西北递增至  $2.0^\circ\text{C}$ ,多年平均降水量从东南的 449 mm 向西北递减为 327 mm。流域内白音锡勒牧场和中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站的气象记录表明,近 30 年来的平均气温为  $0.15^\circ\text{C}$  左右,且一直呈上升趋势;多年平均降水量为 345 mm 左右,但年际之间存在较大差异。与水热状况的空间格局相对应,

该流域东南部为草甸草原,向西北逐渐过渡为典型草原和干草原(李博等, 1988),土壤也依次从黑钙土逐渐过渡为暗栗钙土和淡栗钙土(赵献英等, 1988)。各实验样地的地理位置与植被、土壤状况见表 1。

## 2 实验设计和数据分析

实验从 2001 年 6 月初开始到 2001 年 10 月中旬结束,分别在每月的 5 日、15 日和 25 日对所有群落土壤呼吸进行同步监测,测定方法为碱液吸收法。大尺度、长时间的监测过程中使用该方法具有简单、实用和效率高的特点。每个群落土壤呼吸量的测定为 5 个重复,另设两个对照测定大气  $\text{CO}_2$  浓度,用镀锌金属桶作气室。测定土壤呼吸前,先将植物齐地面剪掉,但不触动凋落物。以上每个处理中放置装有 20 ml、浓度为  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaOH 溶液的玻璃瓶一个,24 h 后取出用盐酸滴定,通过消耗的盐酸体积确定碱液吸收的  $\text{CO}_2$  量。具体操作详见文献(李凌浩等, 2000; Anderson, 1982)。

气象数据来源于实验区域内 8 个气象站,其中 7 个气象站分别在 7 个样地里或附近,另外一个气象站为中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站长期监测羊草样地的自动记录气象站。没有设立气象站的样地的气象数据结合海拔高度,采用 Kriging 空间插值法确定。所有的统计分析都在 SAS(Version 8.2)软件中进行,各群落之间生长季平均土壤呼吸量差异采用 ANOVA 程序进行多重比较(Duncan's Multiple-Range Test)分析。土壤呼吸与温度之间关系采用非线性回归程序(Proc Nline)分析,所使用的指数模型(Kucera & Kirkham, 1971; Norman *et al.*, 1992; Lloyd & Taylor, 1994; Raich & Potter, 1995; Davidson *et al.*, 1998; Luo *et al.*, 2001)如下:

$$R_s = ae^{bT}$$

式中  $R_s$  为土壤呼吸;  $T$  为气温;  $a$  是温度为  $0^\circ\text{C}$  时的土壤呼吸(Grace & Rayment, 2000; Luo *et al.*, 2001),也有研究者将其称为基础呼吸(Morén & Lindroth, 2000);  $b$  为温度反应系数。虽然土壤呼吸对温度响应的敏感程度可以用系数  $b$  来表示(Luo *et al.*, 2001),但在研究过程中,人们还是习惯用  $Q_{10}$  值。 $Q_{10}$  值通过下式确定:

$$Q_{10} = e^{10b}$$

式中  $b$  同上式。各群落平均土壤呼吸与温度之间的关系以及  $Q_{10}$  值与温度之间的关系采用线性相关程序(Proc Corr)分析。

表 1 各群落植被状况  
Table 1 The vegetation of the experiment sites

序号 Serial number	群落类型 Type of community	地理位置 Location	主要植物种类 Main floristics
1	线叶菊-杂类草 <i>Filifolium sibiricum</i> and mixed herbaceous	43°30'38" N 116°49'29" E	线叶菊( <i>Filifolium sibiricum</i> )、蓬子菜( <i>Galium verum</i> )、地榆( <i>Sanguisorba officinalis</i> )、西伯利亚羽茅( <i>Achnatherum sibiricum</i> )、日阴菅( <i>Carex pediformis</i> )、达乌里羊茅( <i>Festuca dahurica</i> )、麻花头( <i>Serratula centauroides</i> )、南牡蒿( <i>Artemisia eriopoda</i> )、贝加尔针茅( <i>Stipa baicalensis</i> )、羊草( <i>Aneurolepidium chinense</i> )等
2	小麦 <i>Triticum aestivum</i>	43°30'53" N 116°49'04" E	人工种植的小麦( <i>Triticum aestivum</i> )为主,有少量的卷茎蓼( <i>Polygonum convolvulus</i> )和蒿属植物( <i>Artemisia</i> spp.)
3	湿生杂类草 Wet mixed grasses	43°37'37" N 116°41'14" E	泽芹( <i>Sium suave</i> )、薄荷( <i>Mentha haplocalyx</i> )、毛水苏( <i>Stachys baicalensis</i> )、黄戴戴( <i>Halerpestes cymbalaria</i> )、海韭菜( <i>Triglochin maritimum</i> )、沼生柳叶菜( <i>Epilobium palustre</i> )、沼繁缕( <i>Silene palustris</i> )、水麦冬( <i>T. palustre</i> )、毛茛( <i>Ranunculus japonicus</i> )、驴蹄草( <i>Caltha palustris</i> )等
4	冷蒿-星毛委陵菜 <i>Artemisia frigida</i> and <i>Potentilla acaulis</i>	43°37'05" N 116°41'15" E	冷蒿( <i>A. frigida</i> )、星毛委陵菜( <i>Potentilla acaulis</i> )、菊叶委陵菜( <i>P. tanacetifolia</i> )、糙隐子草( <i>Cleistogenes squarrosa</i> )、木地肤( <i>Kochia prostrata</i> )、苔草( <i>Carex</i> spp.)、羊草、冰草( <i>Agropyron cristatum</i> )等
5	羊草 <i>Aneurolepidium chinense</i>	43°48'17" N 116°34'25" E	羊草、糙隐子草、苔草、冰草、大针茅( <i>Stipa grandis</i> )、落草( <i>Koeleria altaica</i> )、双齿葱( <i>Allium bidentatum</i> )等
6	芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	43°49'52" N 116°31'01" E	芨芨草( <i>Achnatherum splendens</i> )、黄蒿( <i>Artemisia scoparia</i> )、轴藜( <i>Axyris amaranthoides</i> )、蔓麦瓶草( <i>Silene repens</i> )、克氏针茅( <i>Stipa krylovii</i> )、羊草、西伯利亚羽茅等
7	冷蒿-糙隐子草 <i>Artemisia frigida</i> and <i>Cleistogenes squarrosa</i>	43°54'48" N 116°18'36" E	冷蒿、糙隐子草、苔草、冰草、大针茅、羊草、阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> )、木地肤、小叶锦鸡儿( <i>Caragana microphylla</i> )等
8	沙生小叶锦鸡儿 Dune <i>Caragana microphylla</i>	43°54'54" N 116°06'34" E	小叶锦鸡儿、糙隐子草、猪毛菜( <i>Salsola collina</i> )、尖头叶藜( <i>Chenopodium acuminatum</i> )、虫实( <i>Corispermum</i> spp.)、苔草、大针茅等
9	羊草 <i>Aneurolepidium chinense</i>	43°56'12" N 115°47'38" E	羊草、糙隐子草、黄囊苔草、大针茅等
10	狭叶锦鸡儿 <i>Caragana stenophylla</i>	43°56'04" N 115°29'16" E	狭叶锦鸡儿( <i>Caragana stenophylla</i> )、糙隐子草、猪毛菜、木地肤、冷蒿、双齿葱等都有分布
11	大针茅-糙隐子草 <i>Stipa grandis</i> and <i>Cleistogenes squarrosa</i>	43°57'28" N 115°11'27" E	木地肤、猪毛菜、糙隐子草、大针茅、尖头叶藜、双齿葱等

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤呼吸和温度的季节变化

从图 1 可以看出,各群落的温度变化范围虽不尽相同,但季节动态比较一致,且土壤呼吸的变化范围和季节动态皆因群落类型的不同而有所差异,即使在地理位置比较靠近的线叶菊-杂类草群落与小麦群落之间、湿生杂类草群落与冷蒿-星毛委陵菜群落之间也是如此。所有群落土壤呼吸的最大值都出现于 6 月下旬至 8 月中旬之间。各群落的土壤呼吸多呈不规则的多峰曲线,与气温的季节变化总趋势大体相近,生长季后期尤其如此,但在温度较高的 6~8 月,土壤呼吸与温度动态并不完全一致,如在夏季,虽然 7 月 25 日的温度为一相对低温,但这一天受大范围的阴雨天气的影响,所有实验点土壤湿度较高,所以相对应的土壤呼吸在所有群落中几乎都表现为峰值。

#### 3.2 各群落夏秋季土壤呼吸速率比较

方差分析表明,整个生长季各群落土壤平均日呼吸的总体差异极为显著( $p < 0.01$ ),湿生杂类草群落最高,为  $1\ 349.56\ \text{mg}\ \text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ,是相邻冷蒿-星毛委陵菜群落的 1.72 倍,是呼吸速率最低的狭叶锦鸡儿群落的 2.39 倍。多重比较的结果(表 2)说明,各群落之间的差异显著程度不一致,总体来说,水分供应状况比较好的湿生杂类草群落、芨芨草群落、线叶菊-杂类草群落以及没有退化的羊草群落土壤呼吸速率较大,而已经发生了不同程度退化和灌丛化的群落土壤呼吸量较少。相关分析表明,生长季各群落的平均土壤呼吸速率与同期平均温度之间没有显著关系( $R^2 = 0.088\ 6, p = 0.373\ 9$ )。

#### 3.3 土壤呼吸对温度变化的响应

非线性回归分析的结果(图 2)表明,指数模型能够较好地描述各群落土壤呼吸与温度之间的关系( $R^2 = 0.365\ 3 \sim 0.735\ 3, p < 0.000\ 1 \sim 0.022\ 0$ ),其中

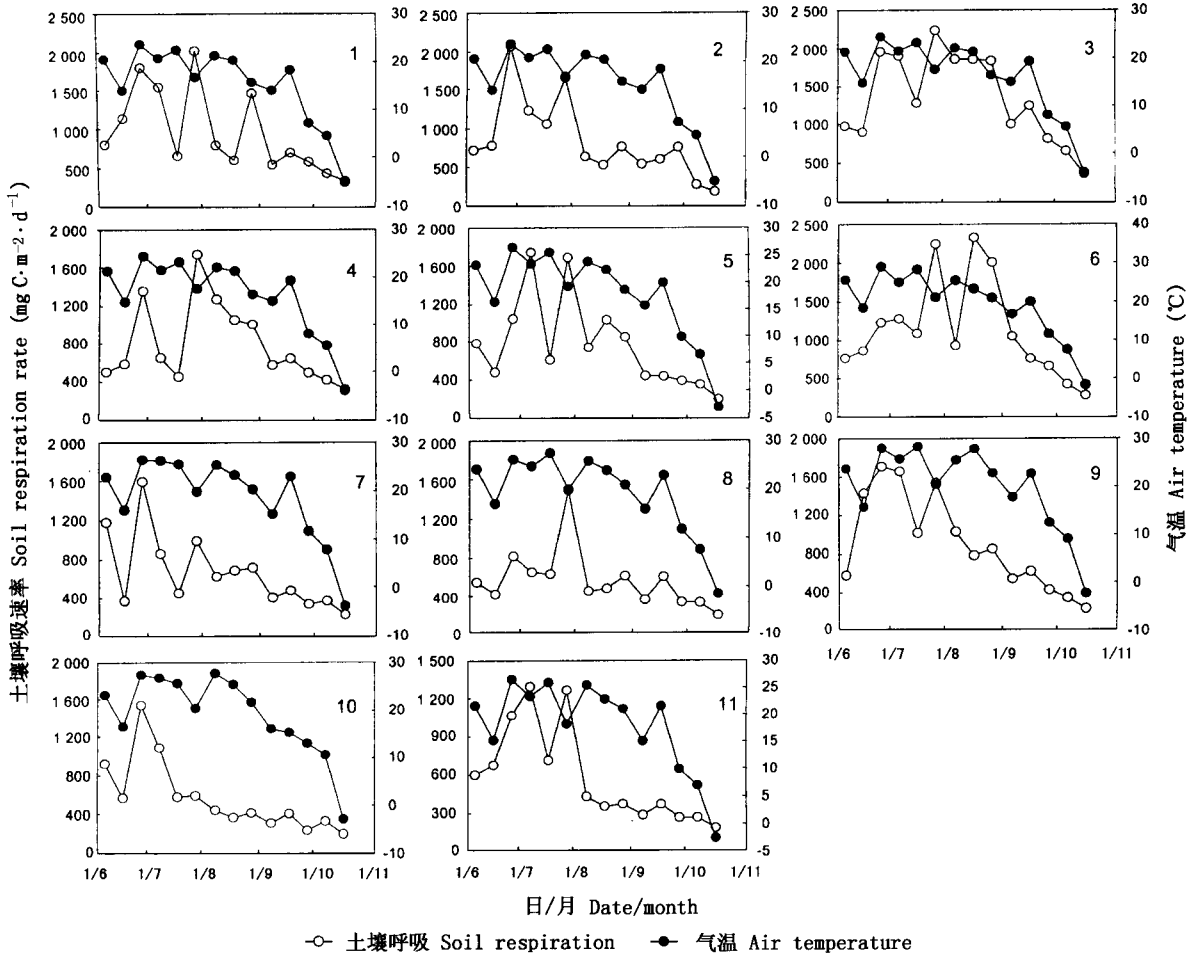


图 1 各群落土壤呼吸速率和气温季节动态  
 Fig. 1 Seasonal patterns of soil respiration and air temperature in 11 communities  
 图中序号同表 1 Serial numbers are same in Table 1

表 2 各群落土壤呼吸多重比较  
 Table 2 Results of Duncan's multiple-range test on soil respiration in 11 communities

群落类型 Type of community	序号 <sup>1)</sup> Serial number	生长季平均呼吸速率 Average respiration rate (mg C·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	组别 Group
湿润或没有退化 Humid or not-retrogressive	3	1 349.56 ± 156.39	A
	6	1 135.43 ± 170.53	A B
	1	952.43 ± 144.49	B C
	9	911.27 ± 133.44	B C
退化 Retrogressive	2	839.45 ± 137.46	B C
	4	785.87 ± 114.06	B C
	5	767.83 ± 127.01	B C
	7	661.35 ± 102.76	C
	10	582.41 ± 100.27	C
	11	581.69 ± 100.81	C
	8	565.07 ± 83.32	C

1) 序号同表 1 Serial numbers are same in Table 1

以湿生杂类草群落的相关性最好 ( $R^2 = 0.7353, p < 0.0001$ )。  $Q_{10}$  值是衡量土壤呼吸对温度变化响应的一个方便指数 (Ohashi *et al.*, 2000), 11 个群落的

$Q_{10}$  值依次排列如下:

小麦群落: 1.84; 羊草群落 (5): 1.78; 湿生杂类草群落: 1.75; 羊草群落 (9): 1.69; 芨芨草群落: 1.66; 冷蒿-糙隐子草群落: 1.63; 狭叶锦鸡儿群落: 1.62; 大针茅-糙隐子草群落: 1.62; 线叶菊-杂类草群落: 1.53; 沙生小叶锦鸡儿灌丛群落: 1.52; 冷蒿-星毛委陵菜群落: 1.47。从图 2 还可看出, 温度较低时, 所有群落土壤呼吸的散点聚集在拟合曲线附近, 随着温度的升高, 土壤呼吸的散点渐渐发散开来。将各群落的  $Q_{10}$  值同群落实验期内的平均温度进行相关分析, 结果表明, 这 11 个群落的  $Q_{10}$  值与各群落实验期平均温度之间的相关关系极不显著 ( $R^2 = 0.0082, p = 0.7907$ )。

### 4 讨论

不同研究地点所得到的温度与土壤呼吸之间的具体关系可能各不相同, 但是温度对土壤呼吸的影

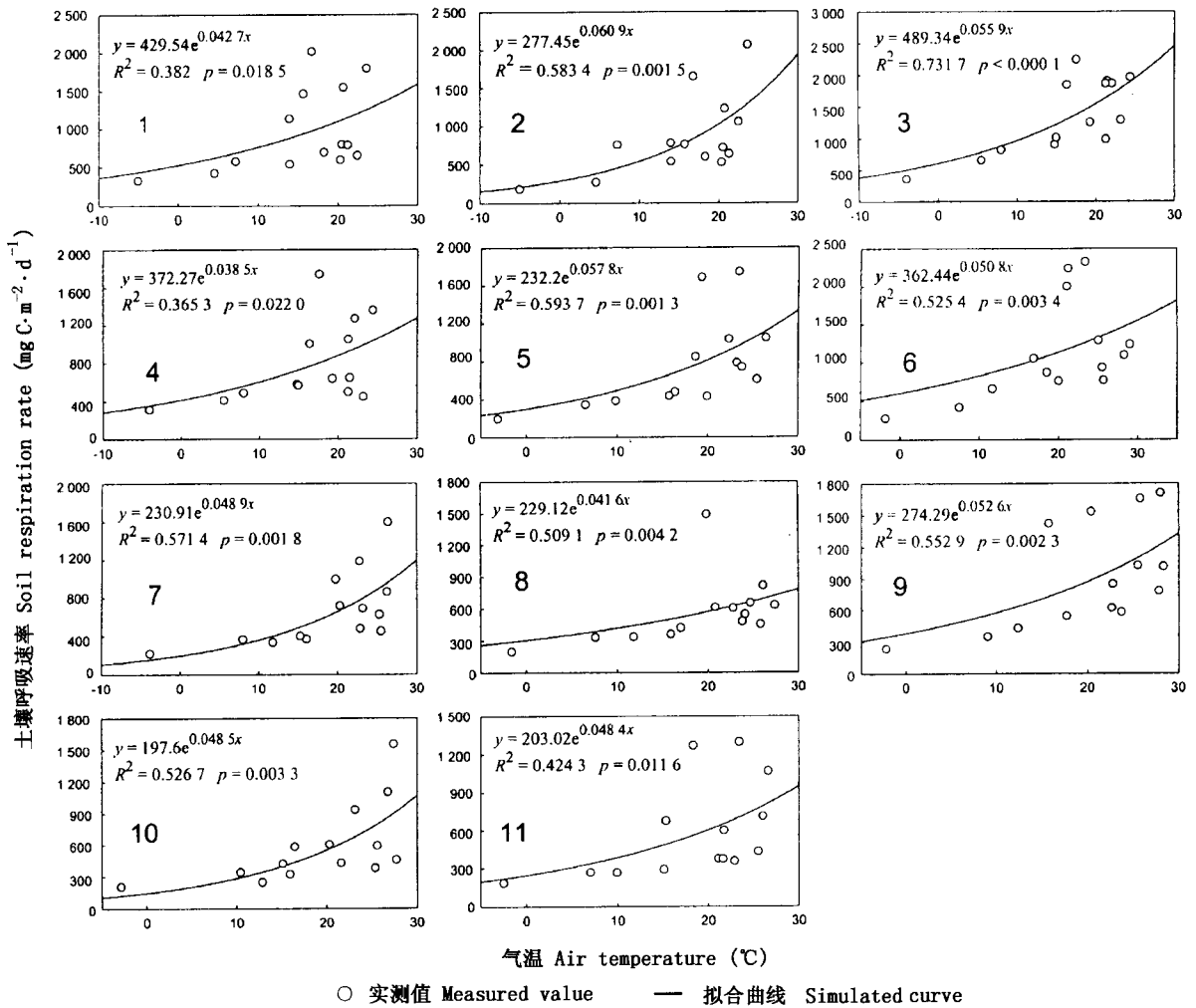


图 2 各群落土壤呼吸与气温关系  
 Fig.2 Relationship between soil respiration rate and air temperature in 11 communities  
 图中序号同表 1 Serial numbers are same in Table 1

响几乎总是可以用一个指数模型来表示(Lloyd & Taylor, 1994; Davidson *et al.*, 2000),例如,在杭州的中亚热带木本植物群落(黄承才等,1999)中,温度与土壤呼吸之间即存在着显著的指数关系。本研究中,指数模型也能较好地表示所有群落土壤呼吸对温度变化的响应,但其在低温时拟合效果较好,高温时拟合效果较差。与此相应,各群落土壤呼吸季节动态与温度变化不完全同步,在温度较高的生长旺季尤其如此。原生羊草群落(李凌浩等,2000)以及美国 Washington 东部半干旱草原区(Wildung *et al.*, 1975)也有类似的现象。

全球尺度上(不包括湿地)基于气温产生的  $Q_{10}$  值为 1.5 (Raich & Potter, 1995), 本研究中各群落的  $Q_{10}$  值介于 1.47 ~ 1.84 之间,接近或稍高于这一水平。11 个群落中,小麦群落的  $Q_{10}$  值最高,比相邻的线叶菊—杂类草群落高出 0.31; Wagai 等(1998)在

美国 Wisconsin 南部也发现,在耕作过的玉米地,其  $Q_{10}$  值比草地和免耕玉米地高,说明不同的土地利用方式会影响土壤呼吸对温度变化的敏感程度。由于正反馈机制的存在,草原上耕地的土壤呼吸对温度变化的敏感性高于草地,就意味着在全球变暖的背景下,开垦草原造成碳的净释放极有可能是大气碳库一个重要的碳源。

李凌浩等(2000; 2002)、Gupta 和 Singh (1981)的研究结果表明,根系与微生物呼吸的比例会因季节的变化而变化,且温度对土壤呼吸影响的程度也会出现相应的改变(李凌浩等,2000)。Luo 等(2001)、Rustad 和 Fernandez (1998)、Cheng 等(1996)认为,基质的数量与质量可以调控土壤呼吸对温度的响应,因为在温暖环境下,如果为微生物生命活动提供能量的基质有限,那么,微生物群落组成就会出现变化,或者,与土壤呼吸有关的生理和生态功能进行相

应的调整(Atkin *et al.*, 2000),从而减少土壤中的呼吸量;Kirschbaum(2000)、Keith等(1997)则认为,温度较高时,水分条件的限制会降低本应随温度上升的土壤呼吸量,因此在干旱条件下, $Q_{10}$ 值是依赖于土壤湿度的(Carlyle & Than, 1988);此外,超过一定的温度后,植物根系和土壤微生物中一部分与有氧呼吸有关的酶可能失活或被杀死(Fang & Moncrieff, 2001),从而引起土壤呼吸量增加幅度的减小,等等。上述原因可以解释研究者们经常观察到的高温环境低 $Q_{10}$ 值和低温环境高 $Q_{10}$ 值情况(Keith *et al.*, 1997; Raich & Schlesinger, 1992),即所谓温度适应现象(Luo *et al.*, 2001; Oechel *et al.*, 2000)。本研究中,不仅位于东部草甸草原的小麦群落和线叶菊-杂类草群落之间土壤呼吸的温度敏感性有明显差别,其余群落之间也存在着程度不等的差异,其中退化程度较高群落的 $Q_{10}$ 值略低于未发生明显退化的群落。从单个群落看,各群落土壤呼吸季节动态与温度变化也存在着高温时不完全同步的现象,表现出了一定的温度适应性,但从总体来看,这11个群落土壤呼吸对温度变化敏感程度与各群落实验期间平均温度关系并不密切。各群落之间 $Q_{10}$ 值的异同也可能与温度以外的水分、土壤养分、植物与微生物生物量等因素的空间分异有关,因为土壤呼吸是个复杂的生物地球化学过程,上述这些因素不仅可以直接或间接地对土壤中 $\text{CO}_2$ 生产和排放过程产生影响,而且随着温度的变化,这些因素的地位和作用也会发生相应的改变,在一定条件下,甚至会对温度的效应产生修饰、校正甚至掩盖作用。

### 参 考 文 献

- Anderson, J. P. E. 1982. Soil respiration. In: Page, A. L. ed. *Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties. Part 2.* Madison: American Society of Agronomy. 831 ~ 871.
- Atkin, O. K., E. J. Edwards & B. R. Loveys. 2000. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytologist*, **147**: 141 ~ 154.
- Carlyle, J. C. & U. B. Than. 1988. Abiotic controls of soil respiration beneath an eighteen-year-old *Pinus radiata* stand in south-eastern Australia. *Journal of Ecology*, **76**: 654 ~ 662.
- Cheng, W., Q. Zhang, D. C. Coleman, C. R. Carroll & C. A. Hoffman. 1996. Is available carbon limiting microbial respiration in the rhizosphere? *Soil Biology and Biochemistry*, **28**: 1283 ~ 1288.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall & I. J. Totterdell. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, **408**: 184 ~ 187.
- Davidson, E. A., E. Belk & R. D. Boone. 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, **4**: 217 ~ 227.
- Davidson, E. A., L. V. Verchot, J. H. Cattanio, I. L. Ackerman & J. E. M. Carvalho. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biochemistry*, **48**: 53 ~ 69.
- Ellis, R. C. 1974. The seasonal pattern of nitrogen carbon mineralization in forest and pasture soils in southern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, **54**: 15 ~ 28.
- Fang, C. & J. B. Moncrieff. 2001. The dependence of soil  $\text{CO}_2$  efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**: 155 ~ 165.
- Fang, J. Y. (方精云), Y. H. Tang (唐艳鸿) & J. Chang (常杰). 2000. Changing global climates. In: Fang, J. Y. (方精云), Y. H. Tang (唐艳鸿), J. D. Lin (林俊达) & G. M. Jiang (蒋高明) eds. *Global ecology: climate change and ecological responses.* Beijing: China Higher Education Press. 1 ~ 24. (in Chinese)
- Grace, J. & M. Rayment. 2000. Respiration in the balance. *Nature*, **404**: 819 ~ 820.
- Gupta, R. & J. S. Singh. 1981. Soil respiration in a tropical grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, **13**: 261 ~ 268.
- Huang, C. C. (黄承才), Y. Ge (郭滢), J. Chang (常杰), R. Lu (卢蓉) & Q. S. Xu (徐青山). 1999. Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, **19**: 324 ~ 328. (in Chinese with English abstract)
- Keith, H., K. L. Jacobsen & R. J. Raison. 1997. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant and Soil*, **190**: 127 ~ 141.
- Kirschbaum, M. U. F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, **27**: 753 ~ 760.
- Kirschbaum, M. U. F. 2000. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biochemistry*, **48**: 21 ~ 51.
- Kucera, C. & D. Kirkham. 1971. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecology*, **52**: 912 ~ 915.
- Lenton, T. M. 2000. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple earth system model. *Tellus (B)*, **52**: 1159 ~ 1188.
- Li, B. (李博), S. P. Yong (雍世鹏) & Z. H. Li (李忠厚). 1988. The vegetation of Xilin River basin and its utilization. Research on Grassland Ecosystem (草原生态系统研究), **3**: 84 ~ 183. (in Chinese)
- Li, L. H. (李凌浩), Q. B. Wang (王其兵), Y. F. Bai (白永飞), G. S. Zhou (周广胜) & X. R. Xing (邢雪荣). 2000. Soil respiration of *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin River basin as affected by over-grazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **24**: 680 ~ 686. (in Chinese with English abstract)
- Li, L. H. (李凌浩), X. G. Han (韩兴国), Q. B. Wang (王其兵), Q. S. Chen (陈全胜), Y. Zhang (张焱), J. Yang (杨晶), W. M. Bai (白文明), S. H. Song (宋世环), X. R. Xing (邢雪荣) & S. M. Zhang (张淑敏). 2002. Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration in a grazed grassland in the Xilin River basin. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **26**: 29 ~ 32. (in Chinese with English abstract)
- Lloyd, J. & J. A. Tailor. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, **8**: 315 ~ 323.
- Luo, Y., S. Wan, D. Hui & L. L. Wallace. 2001. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, **413**: 622 ~ 625.
- Morén, A. S. & A. Lindroth. 2000.  $\text{CO}_2$  exchange at the floor of

- boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **101**: 1 ~ 14.
- Norman, J. M., R. Garcia & S. B. Verma. 1992. Soil surface CO<sub>2</sub> fluxes and the carbon budget of a grassland. *Journal of Geophysical Research*, **97**: 18845 ~ 18853.
- Oechel, W. C., G. L. Vourlitis, S. J. Hastings, R. C. Zulueta, L. Hinzman & D. Kane. 2000. Acclimation of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature*, **406**: 978 ~ 981.
- Ohashi, M., K. Gyokusen & A. Saito. 2000. Contribution of root respiration to total soil respiration in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) artificial forest. *Ecological Research*, **15**: 323 ~ 333.
- Raich, J. W. & A. Tufekcioglu. 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, **48**: 71 ~ 90.
- Raich, J. W. & C. S. Potter. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, **9**: 23 ~ 36.
- Raich, J. W. & W. H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus (B)*, **44**: 81 ~ 99.
- Rustad, L. E. & I. J. Fernandez. 1998. Experimental soil warming effects on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> flux from a low elevation spruce-fir forest soil in Main, USA. *Global Change Biology*, **4**: 597 ~ 605.
- Schlesinger, W. H. 1977. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **8**: 51 ~ 81.
- Singh, J. S. & S. R. Gupta. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, **43**: 449 ~ 528.
- Wagai, R., K. R. Brye, S. T. Gower, J. M. Norman & L. G. Bundy. 1998. Land use and environmental factors influencing soil surface CO<sub>2</sub> flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. *Soil Biology and Biochemistry*, **30**: 1501 ~ 1509.
- Wildung, R. E., T. R. Garland & R. L. Buschbom. 1975. The interdependent effect of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **7**: 373 ~ 378.
- Woodwell, G. M., F. T. Mackenzie, R. A. Houghton, M. Apps, E. Gorham & E. Davidson. 1998. Biotic feedbacks in the warming of the earth. *Climatic Change*, **40**: 495 ~ 518.
- Zhao, X. Y. (赵献英), Y. C. Yao (姚彦臣) & R. R. Yang (杨汝荣). 1988. Ecological geographic characteristics and outlook of natural grasslands resources in Xilin River basin. *Research on Grassland Ecosystem (草原生态系统研究)*, **3**: 184 ~ 226. (in Chinese)

责任编辑: 常杰 责任编辑: 周玉荣