

不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性

王小国^{1,3}, 朱 波^{1,*}, 王艳强¹, 郑循华²

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
3. 中国科学院研究生院, 北京, 100039)

摘要 采用静态箱-气相色谱法对四川盆地中部紫色土丘陵区 3 种土地利用方式 (林地、草地和轮作旱地) 土壤呼吸进行测定, 结果表明, 林地、草地和旱地土壤呼吸速率变化范围分别为 78.63 ~ 577.97、39.28 ~ 584.18 和 34.48 ~ 484.65 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹, 年平均土壤呼吸速率分别为 264.68、242.91、182.21 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹。3 种土地利用方式的土壤呼吸速率季节变化趋势均呈单峰曲线, 林地和草地土壤呼吸速率最大值均出现在夏末 (7 月底与 8 月初之间), 旱地土壤呼吸速率最大值出现的时间比林地和草地要早, 在 6 月底与 7 月初之间, 最小值均出现在 12 月底与翌年 1 月初之间。土壤温度和土壤湿度是影响本地区土壤呼吸的主要因子, 双因素关系模型 ($R = ae^{bt}w^c$) 较好地拟合了土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的影响, 二者共同解释了土壤呼吸变化的 64% ~ 90%。土壤呼吸的温度敏感性指数 Q_{10} 值受土壤 (5cm 处) 温度和土壤 (0 ~ 10cm) 湿度的影响。分析表明 3 种土地利用土壤的 Q_{10} 值与土壤温度呈显著负相关关系, 而与土壤湿度呈显著正相关关系。

关键词 土地利用; 土壤呼吸; 温度敏感性; 静态箱-气相色谱

文章编号: 1000-0933 (2007) 05-1960-09 中图分类号: S154, S181 文献标识码: A

Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions

WANG Xiao-Guo^{1,3}, ZHU Bo^{1,*}, WANG Yan-Qiang¹, ZHENG Xun-Hua²

1 Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (5): 1960 ~ 1968.

Abstract: Soil respiration, as an important source of atmospheric carbon oxide (CO₂), has received considerable attention in the recent years. Changes in land use or soil management practices affect the status of soil organic carbon (SOC), and hence alter CO₂ emissions from terrestrial ecosystems into the atmosphere. Soil respiration rates as well as soil temperature and moisture were measured with closed chamber-chromatographic technique at three plots with different land-use (i. e., forest, grassland and rotated upland cropland) in an experimental station of CERN (Chinese Ecosystem Research Net) located in the Central Sichuan Basin. Over the studied period, soil respiration rates varied from 78.63 to 577.97 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ at the forest plantation, from 39.28 to 584.18 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ at the grassland plot, and from 34.48 to 484.65 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ at the cropland plot. The seasonal variations of the soil respiration rates measured across the three plots

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2005CB121108); 国家自然科学基金重点资助项目 (40331014)

收稿日期: 2006-01-07; 修订日期: 2007-02-20

作者简介: 王小国 (1977 ~) 男, 湖北红安人, 博士生, 主要从事土壤环境研究. E-mail: xiaoguowang@sina.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bzhu@imde.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Basic-research Program of China (No. 2005CB121108); Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 40331014)

Received date 2006-01-07; **Accepted date** 2007-02-20

Biography: WANG Xiao-Guo, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil environment. E-mail: xiaoguowang@sina.com

showed a similar pattern with a single peak occurred in the summer and a depression in the winter. The relationship of soil respiration rate (R) with soil temperature (T) and soil moisture (W) fit well to the equation $R = ae^{bT}w^c$ (a, b, c were constants). The results indicated that soil temperature and soil moisture together could explain 64%—90% of the seasonal variations in soil respiration rate. The temperature dependence of soil respiration (Q_{10}) has been widely used in estimating soil respiration rate. This parameter has commonly been treated as a constant near to 2.0 in many ecosystem models although it has been documented that Q_{10} value varies with temperature and moisture. Owing to the nonlinear relationship between Q_{10} and respiration rate, a small change in Q_{10} could cause a significant variation in the modeled soil respiration flux. Therefore, accurately quantifying Q_{10} and its variability is crucial for estimating ecosystem carbon budget. Our research showed that the Q_{10} values were positively related to the moisture in the top soil (0—10 cm) and negatively related to the soil temperature at 5 cm depth. Based on the equation shown above, 1°C increase in soil temperature at 5 cm depth will reduce the Q_{10} value by 0.08, 0.06 and 0.07 for the forest, grassland and cropland plots, respectively; and 1% decrease in soil moisture will reduce the Q_{10} value by 0.14, 0.10 and 0.11 for the forest, grassland and cropland plots, respectively. The modifications with the Q_{10} value will make the calculated soil respiration rates more reliable.

Key Words: land use; soil respiration; ecosystem model; temperature sensitivity; closed chamber chromatographic

土地利用变化引起的陆地生态系统类型转变对于全球碳循环有重要作用^[1]。人类活动作为气候变化的重要驱动力,不仅通过影响气候系统造成全球性气候变化,还影响陆地生态系统的地理分布格局及其生产力,改变陆地生态系统的碳贮量和碳排放速率^[2,3]。Lal 等估计至 1998 年全球已有约 $750 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的森林被用作农田,占土地利用变化的 45% 约 $660 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的草地被开垦成农田,占土地利用变化的近 40%^[3]。长期土地利用方式的改变导致碳从陆地生态系统释放是大气 CO_2 浓度不断升高的主要原因之一,准确估计土地利用变化对陆地生态系统碳平衡的影响是当前全球变化和全球碳循环研究的重点内容^[4]。

温度和湿度是调节和控制许多生物地球化学过程的关键因子,全球气候变化势必对这些生物地球化学过程产生深刻的影响^[5]。土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的重要环节之一,气温和降雨的变化不仅会影响陆地碳循环的源汇功能,而且,由于土壤呼吸的最终产物是主要的温室气体,反过来它将对全球变化的趋势和格局产生深远的影响^[6]。

长期以来就有研究者使用 Q_{10} 来描述土壤呼吸与温度之间的关系。 Q_{10} 表示温度每升高 10°C 土壤呼吸的变化比率。近期的研究认为,在各种生态系统中, Q_{10} 在时间和空间上的变化可能非常大^[7-9]。Raich 和 Schlesinger 综合大量文献发现 Q_{10} 值一般在 1.3 ~ 3.3 之间变化^[9]。同时,在一定范围内,湿度也强烈地影响土壤呼吸强度从而也会引起 Q_{10} 值的变化^[5]。

但在研究不同尺度土壤呼吸对气候变化响应的众多模型中,由于研究资料与数据的缺乏, Q_{10} 值常被看作一个接近于 2.0 的常数^[10-14],由此可能造成在利用模型估算土壤呼吸时产生偏差。因此, Q_{10} 值的精确量化对在大尺度上利用模型进行碳循环研究至关重要^[4]。

四川盆地中部紫色土丘陵区经过 20 世纪 70 年代大规模的植树造林及随后的山水田林路综合整治,土地利用与覆盖变化显著,20 世纪 80 年代中期已初步建造了坡顶桉柏混交林,坡腰旱耕地,田坎地埂林草维护,基本形成林地与农地的镶嵌复合格局^[15]。本文通过对川中丘陵区 3 种不同土地利用方式(森林、草地、旱地轮作)下土壤呼吸的研究,描述了不同土地利用方式的土壤呼吸动态,并计算了一个利用温度和湿度修正的 Q_{10} 关系式,试图为在利用模型估算本地区土壤碳循环时提供基础数据。

1 试验区基本概况

本研究在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站集水区-盐亭县林山乡截流村进行。位于 $105^{\circ}27'E$, $31^{\circ}16'N$, 地处嘉陵江一级支流涪江的支流——猕江、湍江的分水岭上,面积 0.38 km^2 。气候具有四川盆地典型亚

热带湿润季风气候特征,年均温度 17.3℃,极端最高气温 40℃,极端最低气温 -5.1℃;多年平均降雨量 825mm,分布不均,春季占 5.9%,夏季 65.5%,秋季 19.7%,冬季 8.9%,无霜期 294d(表 1)。土壤主要为石灰性紫色土,土层厚度一般 20~60cm,质地为中壤,粘粒含量 <20%,粉粒为 33.1%~43.8%,土壤容重为 1.3~1.60g·cm⁻³,总孔度为 38%~51.7%,田间持水量为 28.8%、凋萎湿度为 5.4%~7.7%。林地、草地和旱地土壤有机质含量分别为 19.26、13.71g·kg⁻¹和 11.98 g·kg⁻¹。

试验区土地利用以旱地轮作和林地为主。林地为桉木 (*Alder cremastogyne*)和柏木 (*Cupresses fineries*)混交林,1972 年种植。混交林生态系统经过长时间演替,大部分桉木已死亡,现已逐渐演化为纯柏林。林分(胸径 >3cm)平均胸径为 10.8cm,平均树高为 11.9m,保留密度为 1595 株/hm²。林下灌木主要有黄荆 (*Vitex negundo*)、马桑 (*Coriaria sinica*)、刺梨 (*Rosa roxburghii*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*)等,草本多为禾本科 (*Gramineae*)、莎草科 (*Cyperaceae*)、菊科 (*Compositae*)、唇形科 (*Labiatae*)和豆科 (*Leguminosae*)等植物。草地为当地种植面积最大的多年生黑麦草 (*L. multiflorum*) 秋季干物质生物量为 242.0 g/m²。

旱地主要是坡耕地,坡度多在 5~15°。旱地为玉米-小麦轮作,玉米在当年 5 月份种植,9 月份收割,生长期约 4 个月左右;玉米收割后种植小麦,生长期约 7 个月左右。试验用地采用常规耕作。

表 1 试验区多年平均降雨量、气温和太阳辐射

Table 1 Annual mean precipitation, air temperature and solar radiation at experiment area

降雨 Precipitation (mm)	气温 Air temperature (°C)	降雨分配 Distribution of precipitation (mm)				太阳辐射 Solar radiation (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)				不同气温平均日数 Days of different air temperature (d)	
		11~3月 Nov.-Mar.	4月 Apr.	5~9月 May-Sept.	10月 Oct.	11~3月 Nov.-Mar.	4月 Apr.	5~9月 May-Sept.	10月 Oct.	>0°C	>10°C
1~12月 Jan.-Dec.	1~12月 Jan.-Dec.	11~3月 Nov.-Mar.	4月 Apr.	5~9月 May-Sept.	10月 Oct.	11~3月 Nov.-Mar.	4月 Apr.	5~9月 May-Sept.	10月 Oct.	>0°C	>10°C
825	17.3	173.3	52.3	576.9	78.5	1.03	0.46	3.21	0.23	359	294

2. 研究方法

2.1 试验设计与土壤呼吸测定

在试验站桉柏混交林永久标准样地 (25m×25m)内按随机布置原则选择有代表性地点,进行林地土壤呼吸的定位测定,并定期贴地去掉地表绿色植被。

草地试验在试验站人工种植黑麦草地中空地上进行,定期去除试验区域上新生杂草。

旱地轮作土壤呼吸的测定是在旱地中间空地中进行。

土壤呼吸测定采用静态箱-气相色谱法,具体测定方法与试验设计可参见韩广轩等^[6]。测定时间为 2004 年 5 月~2005 年 4 月,测定频率为每周测定两次。在土壤呼吸测定的同时进行土壤 (0~10cm)重量含水量、气温和土壤 (5cm 处)温度等环境要素的同期观测。

2.2 数据处理

为分析土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的共同影响,选择双因素关系模型进行拟合^[7]:

$$R = a \cdot e^{bT} \cdot w^c$$

式中 R 为土壤呼吸速率, T 为土壤 (5cm)处温度, w 为土壤 (0~10cm)含水量, a 、 b 、 c 为待定参数。

Q_{10} 值采用指数关系模型进行计算:

$$R = a \cdot e^{bT} \quad Q_{10} = e^{10b}$$

式中 a 、 b 为待定参数。

以每月测定的土壤呼吸速率平均值代表该月平均土壤呼吸速率,通过累加计算求得当年土壤呼吸年通量^[7]。

数据处理均在 SPSS11.0 软件包上进行。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用方式的土壤呼吸季节变化

3 种不同土地利用方式的土壤呼吸速率的季节变化与温度的季节变化基本一致,均呈单峰曲线(图 1)。林地和草地土壤呼吸速率最大值均出现在夏末(7 月底与 8 月初之间),玉米-小麦轮作地土壤呼吸速率的最大值比林地和草地的最大值出现时间要早,在 6 月底与 7 月初之间,表明轮作地土壤呼吸对气温的回升比林地和草地敏感,最小值均出现在 12 月底与翌年 1 月初间。林地、草地和轮作地土壤呼吸速率变化范围分别为 78.63 ~ 577.97、39.28 ~ 584.18 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹ 和 34.48 ~ 484.65 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹,年平均土壤呼吸速率(测定期间平均值)分别为 264.68、242.91、182.21 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹。土壤呼吸速率的变化幅度(最大值与最小值之差除以平均值)以轮作地(247%)最大,草地(224%)次之,林地(189%)最小,方差分析表明,林地、草地和轮作地的土壤呼吸速率间差异显著($p < 0.01$),说明在林地转换为农田或者草地后,会引起土壤呼吸速率显著变化。林地、草地和轮作地土壤呼吸通量分别为 5.221、4.724 tC·hm⁻²·a⁻¹ 和 3.477 tC·hm⁻²·a⁻¹,前者分别约是后二者的 1.1 倍和 1.5 倍。

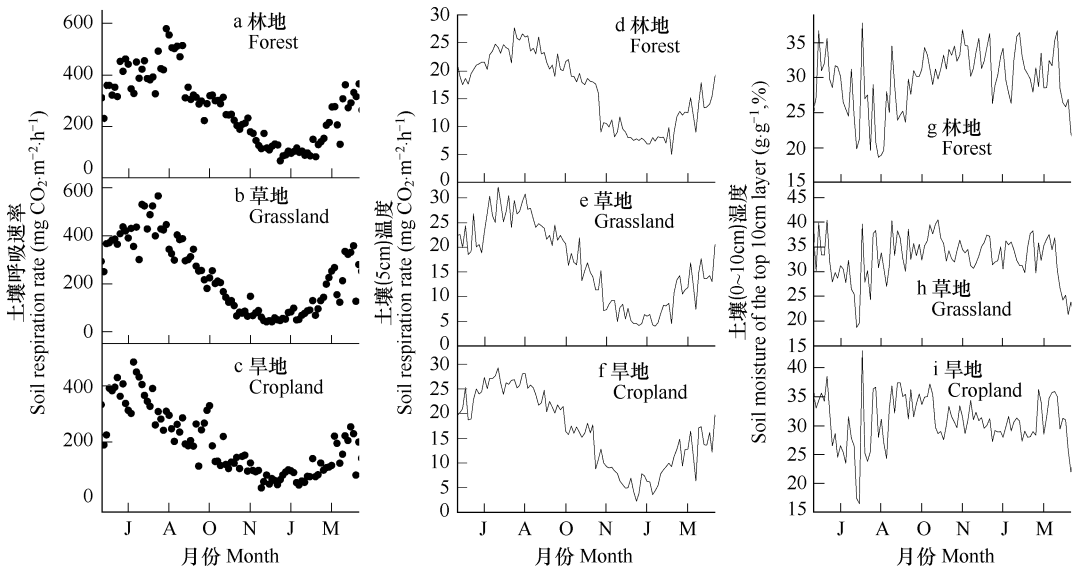


图 1 3 种土地利用方式下土壤呼吸速率(a~c)、土壤(5cm)温度(d~f)和土壤(0~10cm)湿度(g~i)季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of soil respiration (a~c), soil temperature at 5cm depth (d~f) and soil water content at top 10cm layer (g~i) of three types of land-use

3.2 土壤温度与土壤湿度对土壤呼吸的共同影响

目前,国内研究土壤温度和湿度对土壤呼吸的影响时多采用单因素模型来单独分析温度和湿度对土壤呼吸的影响,采用双因素模型分析二者对土壤呼吸的共同影响较少^[17]。采用双因素模型 $R = a \cdot e^{bT} \cdot w^c$ 对土壤温度和土壤湿度与土壤呼吸的共同影响进行回归分析。结果表明土壤温度和湿度共同解释了土壤呼吸速率季节变化的 64% ~ 90% (表 2),说明本地区不同土地利用方式的土壤呼吸速率主要受到土壤温度和湿

表 2 土壤呼吸(R)与土壤温度(T)和湿度(W)关系模型 $R = a \cdot e^{bT} \cdot w^c$ 参数

Table 2 Parameters of the relation model of soil respiration with soil temperature and moisture

土地利用类型 Type of land use	参数 a Parameter a	参数 b Parameter b	参数 c Parameter c	相关系数 R ² Correlation coefficient R ²	测定次数 n Number of measurement n	p 值 p value
林地 Forest	14.45	0.068	0.59	0.90	89	<0.01
草地 Grassland	9.36	0.069	0.70	0.84	92	<0.01
旱地 Cropland	6.10	0.078	0.76	0.64	94	<0.01

度的共同影响。

模型 $R = a \cdot e^{bT} \cdot w^c$ 中, 参数 b 称为温度敏感性因子, 参数 c 称为湿度敏感性因子, 其大小顺序均为轮作地 > 草地 > 林地 (表 2), 表明人为扰动强烈的旱地轮作地土壤呼吸对温度和湿度的变化更为敏感, 这也是导致轮作地土壤呼吸速率变化幅度最大的原因之一, 同时亦预示着未来气温升高或降雨量减少将对旱地耕作土壤呼吸产生更大的影响。

3.3 Q_{10} 值与土壤温度和湿度关系

为探讨土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸温度敏感性大小 (Q_{10}) 的影响, 采用指数关系式 $R = a \cdot e^{bT}$ 拟合土壤呼吸速率 (R) 与土壤平均温度 (T) 关系, 计算 Q_{10} 值大小^[7]。结果如表 3。

在没有考虑土壤湿度的情况下, 3 种土地利用方式下土壤呼吸与土壤 (5cm 处) 温度在低温时的拟合效果要优于温度较高的月份。在林地中, 温度较低的月份 (1~4 月和 9~12 月份) 土壤呼吸与土壤温度的相关性的决定系数 (R^2) 高于温度较高的 5~8 月份, 温度最高的 7 月份 (24.6°C) 土壤温度只能解释土壤呼吸速率变化的 39%, 而在温度最低的 1 月份 (5.7°C) 土壤温度解释了土壤呼吸速率变化的 83%。在平均土壤温度高于 20°C 时, 林地土壤呼吸 Q_{10} 值在 1.28~1.81 之间变化, 温度低于 20°C 时, Q_{10} 值在 2.0 以上, 在温度最低的 1 月份 Q_{10} 值高达 3.23。 Q_{10} 值存在高温时较低而低温时较高的趋势, 表明在低温时土壤呼吸对温度的变化更敏感。同样, 土壤湿度也影响着 Q_{10} 值的变化, 在湿度较大的月份 Q_{10} 值较高, 而在湿度较低的月份 Q_{10} 值较低, 表明当土壤湿度较高时, 土壤呼吸对湿度的变化更敏感。

表 3 2004 年 5 月~2005 年 4 月 3 种土地利用方式下的土壤呼吸 Q_{10} 值、土壤 (5cm) 平均温度、土壤 (0~10cm) 平均湿度

Table 3 Q_{10} values, soil temperature at 5cm depth and soil moisture at top 10cm layer under different land-use from May, 2004 to April, 2005

月份 Month	林地 Forest			草地 Grassland			旱地 Cropland		
	Q_{10} 值 Q_{10} values	温度 T (°C)	湿度 W (%)	Q_{10} 值 Q_{10} values	温度 T (°C)	湿度 W (%)	Q_{10} 值 Q_{10} values	温度 T (°C)	湿度 W (%)
5	2.03	19.5	29.6	2.09	23.4	31.2	2.48	24.3	28.9
6	1.28	21.9	28.2	2.04	24.7	27.4	2.29	26.1	24.1
7	1.25	23.7	24.6	1.43	26.8	23.6	1.54	24.2	21.9
8	1.27	24.1	21.9	1.60	29.2	20.1	1.79	27.2	19.6
9	1.81	21.3	28.7	2.47	22.3	27.6	2.61	24.3	25.7
10	2.73	18.5	31.4	2.19	15.2	29.5	2.56	18.6	28.9
11	2.23	12.6	33.3	2.38	9.4	34.2	3.02	10.2	31.3
12	2.52	8.7	34.5	2.79	7.6	35.4	3.18	7.3	37.2
1	3.23	5.7	32.5	3.10	5.3	33.2	3.54	4.9	31.3
2	2.41	7.9	33.7	3.48	7.5	34.3	3.68	6.3	32.3
3	2.45	11.3	29.8	2.45	11.7	29.5	3.06	10.9	32.6
4	2.74	16.7	33.1	2.92	13.5	34.1	3.15	15.9	31.6

T : mean soil temperature, W : mean soil moisture

分别将 3 种土地利用方式下土壤呼吸的 Q_{10} 值与土壤 (5cm) 平均温度 (T) 和土壤 (0~10cm) 平均湿度 (W) 进行回归分析, 结果表明 Q_{10} 值与土壤温度呈显著负相关关系, 而与土壤湿度呈显著正相关关系。关系式分别为:

$$\begin{aligned} \text{林地} \quad Q_{10} &= -0.08T + 3.44 & (R^2 = 0.64, n = 12, p < 0.05) \\ Q_{10} &= 0.14W - 2.00 & (R^2 = 0.65, n = 12, p < 0.05) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{草地} \quad Q_{10} &= -0.06T + 3.40 & (R^2 = 0.72, n = 12, p < 0.05) \\ Q_{10} &= 0.10W - 0.72 & (R^2 = 0.68, n = 12, p < 0.05) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{旱地} \quad Q_{10} = -0.07T + 3.90 \quad (R^2 = 0.78, n = 12, p < 0.05)$$

$$Q_{10} = 0.11W - 0.48 \quad (R^2 = 0.75, n = 12, p < 0.05) \quad (3)$$

从方程(1~3)中可以看出,在本研究测定温度和湿度范围内,林地、草地和轮作地土壤(5cm处)温度每升高1℃, Q_{10} 值将分别减少0.08、0.06和0.07;土壤(0~10cm)湿度每升高1%, Q_{10} 值将分别增加0.14、0.10和0.11。表明本地区土壤呼吸温度敏感性指数(Q_{10})对土壤温度和湿度的变化也十分敏感。 Q_{10} 值随着温度的升高而减少则表明了土壤呼吸对温度升高的适应性。

4 讨论

4.1 不同土地利用方式下的土壤呼吸

林地、草地和轮作地平均土壤呼吸速率分别为264.68、242.91、182.21 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹,林地平均土壤呼吸速率分别比草地和轮作旱地的高8.23%和31.16%,这可能与森林转变成草地或农田后系统小气候、土壤地下过程(地上、地下部分生物量比例和微生物区系等)的变化、残留物被移走、土壤有机质含量降低和土壤碳的输入减少有关^[3,9,18,19],而且草地和农田由于放牧和耕作等剧烈人为活动引起的土壤物理性质(孔隙度、团聚体结构等)的变化还会影响土壤呼吸速率^[3,18]。而农田或草地转变成林地后,林地凋落物使得土壤有机碳输入增加,土壤的人为扰动也不及草地和农田^[18,19]。森林砍伐变成农田或草地后造成土壤呼吸速率下降,或者农田或草地造林后土壤呼吸速率增加的这种趋势与国外的许多研究结果一致。如Larionova等在莫斯科西部地区的白杨-白桦混交林地和农牧交错地带(草地和农田)发现林地土壤呼吸速率高于草地和农田,且差异显著,并且他认为造成林地土壤呼吸速率显著高于草地和农田的主要原因是林地土壤与草地和农田土壤碳密度之间的差异^[19]。本研究中林地、草地和轮作地土壤平均有机质含量分别为19.26、13.71g·kg⁻¹和11.98g·kg⁻¹,林地土壤有机质含量明显高于草地和旱地土壤。Motavalli发现森林砍伐变成农田的5a中,土壤表层有机碳最先也最易被流失而使农田表层土壤呼吸显著低于林地表层土壤^[20]。国内吴建国等在六盘山地区的研究结果显示草地和农田土壤CO₂释放速率分别比天然次生林土壤低23%和65%^[21]。尽管林地土壤呼吸通量高于草地和旱地(分别为草地的1.1倍和旱地的1.5倍),由于生态系统对C吸存的贡献大小取决于生态系统C源和C汇平衡的结果,因而其是否不利于大气CO₂的吸存,还有待于对林地生态系统的碳平衡分析。

4.2 不同土地利用方式下土壤呼吸对土壤温度和湿度的响应

土壤温度和湿度是影响土壤呼吸的主要因素,由于土壤温度和湿度的不同配置引起土壤呼吸的季节波动^[22]。目前有关土壤呼吸与土壤温度或土壤湿度的单因素关系模型报道较多,而揭示土壤温度和土壤湿度与土壤呼吸关系的双变量模型较少^[17,23,24]。本研究采用 $R = a \cdot e^{bT} \cdot w^c$ 对土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度的关系进行拟合,结果显示土壤温度和湿度共同解释了3种土地利用方式土壤呼吸变化的64%~90%(表2),这与同样采用双因素模型发现土壤温度和土壤湿度共同解释不同森林土壤呼吸季节变化的80%~96%的研究结果相似^[17]。本区具有四川盆地典型亚热带湿润季风气候特征,1年中气温变化较大且降雨分配不均(表1),若采用单因素模型单独拟合土壤呼吸与土壤温度或者土壤湿度,结果的可靠性将难以得到保证。

本研究中轮作旱地土壤呼吸对土壤温度和土壤湿度的响应要比林地和草地敏感,这也导致旱地土壤呼吸速率最大值出现的时间要比林地和草地的提前1个月左右。由于不同土地利用方式土壤呼吸对气候变化反应的敏感性大小之间存在差异,而土壤呼吸作为土壤碳循环的重要组成部分,由此造成的结果可能是在未来大的气候变化背景下土地利用方式的转变将会引起土壤中的有机碳贮量的变化^[1,3]。特别是对耕作土壤而言,由于耕地土壤呼吸对土壤温度和湿度的强敏感性以及对土壤的耕作活动,使得耕地土壤碳库更容易损失,本研究中的轮作旱地土壤有机碳含量已成下降趋势,特别是耕地表层土壤(未刊资料)。据估计,全球从耕作土壤中流失的碳在20世纪80年代已高达0.8Pg·a⁻¹^[25]。我国耕地土壤碳库的损失已引起国内外的广泛关注,如何在保证耕地生产力的基础上提高我国耕地土壤的固碳潜力已成为一个亟待解决的问题。森林砍伐转变成农田或草地后将会减少农田或草地土壤有机碳库,而从耕地或草地转化为森林的过程则是一个土壤有机碳的累积过程,其累积速度依气候带而异^[26]。Lugo等研究表明农田弃耕转变为林地以后在50a当中,热带次

生林土壤有机碳能够恢复到原先的 75% ,而温带和寒带将达到原来的 90% [27]。因此,目前我国开展的天然林保护和退耕还林工程将对减缓全球气候变化的进程起到积极的作用 [28]。

4.3 不同土地利用方式土壤呼吸 Q_{10} 值与土壤温度和土壤湿度关系

许多研究者均发现 Q_{10} 值存在一定的时间和空间变异,它随着季节的变化而变化 [5, 7-9, 12, 29-34]。如 Kutsch 和 Kappen 对德国北部的一个玉米单作地和一个轮作地的土壤呼吸的研究结果表明,在温度较低的冬季 Q_{10} 值明显高于较高温度夏季的 [30]。为消除其他因子如土壤湿度和植被枯落物质量对土壤呼吸的影响, Kirschbaum 综合了许多室内控制培养试验后发现 Q_{10} 值在低温下较高,而在高温下较低。温度为 20℃ 时, Q_{10} 值为 2.5 左右,而温度在 0℃ 时 Q_{10} 值却能高达 8,温度和 Q_{10} 值之间存在负相关关系 [29]。研究者还发现除了温度影响 Q_{10} 值外,土壤湿度也会对 Q_{10} 值产生影响,如 Gullledge 和 Schimel 对北美泰加林的研究结果表明,在降雨量较大年份的 Q_{10} 值总是明显高于干旱年份的 [31]。Davidson 等对北美硬木林的研究结果也表明,有良好排水条件的试验点 Q_{10} 值较低,而在土壤湿度经常较高的试验点 Q_{10} 值也较高 [33]。

尽管众多结果均表明 Q_{10} 值随着土壤温度和土壤湿度的变化而变化,环境条件的不同,土壤呼吸的温度敏感性会有一些的差别,但由于过去研究资料与数据的缺乏,在利用生态模型模拟大尺度碳循环研究中, Q_{10} 值常被看作是一个接近于 2.0 的常数,如 Century 模型、TEM 模型和 PnET 模型等 [10-12, 35, 36]。在 TEM 模型中,当温度为 0~5℃ 时 Q_{10} 值在 2.5~2.0 之间取值;在 5~20℃ 时, Q_{10} 值为 2.0;在 20~40℃ 时 Q_{10} 值为 2.0~1.5 [36]。利用固定的 Q_{10} 值或者其经验值代入模型模拟的结果还有待验证,其结果可能会出现高温时高估而在低温时却低估土壤呼吸的大小 [13, 34, 37]。本研究结果表明 Q_{10} 值与土壤温度呈显著的负相关关系而与土壤湿度呈显著的正相关关系(方程 1~3),此结果与国外相关研究结果相似。如 Qi 等对加利福尼亚州南部森林的研究发现 Q_{10} 值与土壤温度和土壤湿度存在显著的正负相关关系 ($Q_{10} = -0.08T + 2.89$, $Q_{10} = 0.08W + 0.4$, T 为土壤温度, W 为土壤湿度) [33]。Mark 等综合不同纬度(北极、寒温带、温带和热带)不同物种(56 种)土壤呼吸和土壤温度的关系后也发现 Q_{10} 值随着土壤温度的增加而降低,并且两者之间存在显著的负相关关系 ($Q_{10} = 3.22 - 0.046T$, $R^2 = 0.45$, $n = 45$, $p < 0.0001$, T 为土壤温度) [34]。国内研究者如王森等对长白山不同森林类型 [37]、张波等对三江平原不同土地利用方式 [38] 土壤呼吸温度敏感性的研究结果也表明温度和湿度在一定范围内影响土壤呼吸温度敏感性的大小。

目前 Q_{10} 模型被广泛应用于不同尺度土壤呼吸对温度变化的反应上,而且大尺度上对全球碳平衡估测主要是通过模型推算,而许多模型对土壤的呼吸所采用固定的 Q_{10} 参数并没有反映土壤呼吸对温度和湿度变化的适应性,在利用 Q_{10} 模拟计算时可能引起较大的误差 [10-13, 30, 39]。因此, Q_{10} 参数值的精确量化对生态系统碳平衡的可靠估计显得尤为重要,将 Q_{10} 值作为一个固定的常数代入生态模型预测或推算的结果并不符合真实情况,而通过一个利用温度或湿度修正的 Q_{10} 值将会提高生态模型的模拟精度 [13, 30, 34]。

References :

- [1] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317-327.
- [2] Vitousek P M, H A Mooney, J Lubchenco. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277: 494-199.
- [3] Lal R, J Kimble & R Follett. Land use and soil C pool in terrestrial ecosystems. In: Lal R, J Kimble, R. Follett & B A, Stewarts. Management of carbon sequestration in soil. Boca Raton: CRC Press. 1998, 1-10.
- [4] Sampson R N, Apps M, Brown S, et al. Terrestrial biosphere carbon fluxes quantification of sinks and sources of CO₂. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 70: 3-15.
- [5] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 1-6.
- [6] Mc Guire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates. *J. Biogeog.*, 1995, 22: 78-796.
- [7] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 2004, 10: 161-169.

- [8] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15: 687–696.
- [9] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81–99.
- [10] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, 5 (supplement) 1–15.
- [11] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363: 234–240.
- [12] Schimel D, Melillo J, Tian H, *et al.* Contribution of increasing CO_2 and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 2000, 287: 2004–2006.
- [13] Qi Y, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: non-linearity begets surprises. *Ecological Modelling*, 2002, 153: 131–142.
- [14] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (4): 831–836.
- [15] Zhu Bo, Gao M R, Liu G C, *et al.* Evolution of Agro-ecosystem in the hilly area of the central Sichuan Basin. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21 (1): 56–62.
- [16] Han G X, Zhu B, Zhang Z J, *et al.* CO_2 emission from soil-wheat system in a paddy dry-land rotation area in the central Sichuan basin and its influence factors. *Advance in Earth Science*, 2004, 19 (supplement): 496–501.
- [17] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, *et al.* Response of soil CO_2 efflux to forest conversion in subtropical zone of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (7): 1684–1690.
- [18] Trumbore S E, Davidson E A, Barbosa D E, *et al.* Below-ground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonian. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 515–528.
- [19] Larionova A A, Yermolayev A M, Blagodatsky S A, *et al.* Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use. *Biol Fertil Soil*, 1998, 27: 251–257.
- [20] Motavalli P, Discekici P H, Kuhn J. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fraction and CO_2 efflux in the Northern Guamaquifer. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2000, 79: 17–27.
- [21] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The mineralization of soil organic carbon under different land uses in the Liupan Mountain forest zone. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, 28 (4): 530–538.
- [22] Yang Y S, Dong B, Xie J S, *et al.* Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (3): 583–591.
- [23] Schlentner R E, Van Cleve K. Relationships between CO_2 evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, 1985, 15: 97–106.
- [24] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO_2 efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains. *Plant and Soil*, 2001, 237 (1): 15–23.
- [25] Schlesinger W H. Soil organic matter: a source of atmospheric CO_2 . Woodwell G M. *The role of Terrestrial vegetation on the Global Carbon Cycle*. New York: John Wiley, 1984. 111–127.
- [26] Lal R. Soil organic dynamics in crop land and range land. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 353–362.
- [27] Lugo A E, Sanchez A J, Brown S. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil*, 1986, 96: 185–196.
- [28] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (5): 733–740.
- [29] Kirschbaum M I F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*. 1995, 27: 753–760.
- [30] Kutesch W L, L Kappen. Aspects of carbon and nitrogen cycling in soils of Bornhöved Lake district II. Modelling the influence of temperature increase on soil respiration and organic carbon content in arable soils under different management. *Biogeochemistry*, 1997, 39: 207–224.
- [31] Gulledge J, P Schimel. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of Taiga Forest stands in Interior Alaska. *Ecosystems*, 2000, 3: 269–282.
- [32] Xu M, Qi Y. Soil surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variation in a young ponderosa pine plantation in California. *Global Change Biology*, 2001, 7: 667–677.
- [33] Davidson E A, Belk E, Boone D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217–227.

- [34] Mark G Tjoelker, Jacek Oleksyn, Peter B Reich. Modeling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent Q_{10} . *Global Change Biology*, 2001, 7: 223–230.
- [35] Aber J D, Federer C A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, 1992, 92: 463–474.
- [36] McGuire A D, Melillo J M, Joyce L A, *et al.* Interactions between carbon and nitrogen dynamics in estimating net primary productivity for potential vegetation in North America. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6: 101–124.
- [37] Wang M, Ji L Z, Li Q R, *et al.* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (8): 1234–1238.
- [38] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Temperature sensitivity of soil respiration and its effecting factors in the different land use. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25 (11): 1537–1542.
- [39] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (11): 2649–2655.

参考文献:

- [14] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. *生态学报*, 2004, 24 (4): 831–836.
- [15] 朱波, 高美容, 刘刚才, 等. 川中丘陵农业生态系统演替. *山地学报*, 2003, 21 (1): 56–62.
- [16] 韩广轩, 朱波, 张中杰, 等. 川中丘陵区水旱轮作土壤-小麦系统 CO_2 排放及其影响因素. *地球科学进展*, 2004, 19 (增): 496–501.
- [17] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. *生态学报*, 2005, 25 (7): 1684–1690.
- [21] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较. *植物生态学报*, 2004, 28 (4): 530–538.
- [22] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应. *生态学报*, 2004, 24 (3): 583–591.
- [28] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20 (5): 733–740.
- [37] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2003, 14 (8): 1234–1238.
- [38] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析. *环境科学学报*, 2005, 25 (11): 1537–1542.
- [39] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 土壤呼吸对温度升高的适应. *生态学报*, 2004, 24 (11): 2649–2655.