

喀斯特峡谷不同植被类型土壤的呼吸及其温度敏感性

唐夫凯^{1,2}, 崔明¹, 卢琦¹, 周金星², 郭红艳², 王昭艳³

(1. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所 北京 100091; 2. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 北京 100083; 3. 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100048)

摘要: [目的] 了解喀斯特地区植被恢复对土壤碳释放的影响, 为精确估计区域土壤碳收支变化提供参考。[方法] 以喀斯特峡谷地区典型植被类型(草地、稀灌草丛、灌丛和乔木林地)为研究对象, 采用 Li-8100 便携式土壤呼吸仪对其土壤呼吸、土壤温度和土壤水分进行定位连续观测, 系统研究土壤温度(T)和土壤湿度(W)对土壤呼吸速率(R_s)的影响。[结果] (1) 草地、稀灌草丛、灌丛和乔木林 4 种植被类型土壤呼吸均呈单峰型季节动态, 土壤呼吸速率的最大值均出现在夏季, 最小值出现在冬季, 其土壤呼吸速率变化范围分别为 $0.73 \sim 1.21, 1.20 \sim 1.48, 1.54 \sim 2.41, 1.86 \sim 2.95 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 观测期内, 土壤呼吸速率均值分别为 $1.65, 2.76, 2.45, 3.43 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。(2) 土壤温度是影响土壤呼吸速率的主导因素, 单因素指数模型显示土壤温度对土壤呼吸速率变化的解释能力为 72.37% ; 三次项模型表明土壤水分的贡献率为 43.9% 。双因素关系模型较好地反映了土壤温度、湿度对土壤呼吸的影响, 二者可共同解释土壤呼吸变化的 $81.5\% \sim 91.2\%$ 。(3) 土壤呼吸的温度敏感性指数 Q_{10} 值与土壤温度和湿度均呈显著负相关 ($p < 0.05$)。[结论] 4 种植被类型土壤呼吸及其温度敏感性同时受土壤温度和水分影响, 当土壤含水量过低或过高时, 土壤温度的主导作用相对减弱, 土壤湿度的影响作用加强。

关键词: 土壤呼吸; 速率; 温度; 湿度; 温度敏感性; 喀斯特峡谷

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0061-08

中图分类号: S154.4

文献参数: 唐夫凯, 崔明, 卢琦, 等. 喀斯特峡谷不同植被类型土壤的呼吸及其温度敏感性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 61-68. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.012

Soil Respiration and Its Sensitivity to Temperature Under Different Vegetation Types in Typical Karst Gorge Area

TANG Fukai^{1,2}, CUI Ming¹, LU Qi¹, ZHOU Jinxing², GUO Hongyan², WANG Zhaoyan³

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Department of Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to explore soil respiration features and its response to soil temperature and soil moisture under different vegetation in order to provide references for the accurate estimation of changes and balance of soil organic carbon. [Methods] Soil respiration rate (R_s) of four typical succession communities including grassland, thin shrub-grassland, shrub land and forest land were observed by using LI-8100 soil carbon flux measurement system to investigate the influences of soil temperature (T) and soil moisture (W) on soil respiration in typical karst regions of Guizhou Province. [Results] (1) The seasonal variations of soil respiration rate of four vegetation types showed a similar unimodal distribution, with the peak occurred in summer and depression occurred in winter. The range of soil respiration rate in four vegetation types was $0.73 \sim 1.21, 1.20 \sim 1.48, 1.54 \sim 2.41$ and $1.86 \sim 2.95 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,

收稿日期: 2015-04-01

修回日期: 2015-05-19

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金“中国西南喀斯特区碳储量及碳汇潜力研究”(CAFYBB2014ZD006); 中国水利水电科学研究院科研专项基金(泥基本科研 1415)

第一作者: 唐夫凯(1988—), 男(汉族), 山东省济宁市人, 博士研究生, 研究方向为水土保持和生态系统服务功能。E-mail: tangfk_hi@126.com。

通讯作者: 崔明(1979—), 女(汉族), 辽宁省营口市人, 博士, 副研究员, 主要从事生态恢复和自然地理等研究。E-mail: cuiming2009@foxmail.com。

respectively. The average soil respiration rate was 1.65, 2.76, 2.45 and 3.43 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ in the observation period. (2) Univariate model indicated that soil temperature and moisture could explain soil respiration variation by 72.37% and 43.9%, respectively. Double factor model suggested that soil temperature and moisture together could explain 81.5%~91.2% of the seasonal variations in R_s . (3) The temperature dependence of soil respiration (Q_{10}) has been widely used in estimating soil respiration rate. Soil temperature and moisture were both negatively correlated to Q_{10} of four vegetation types. [Conclusion] Soil temperature and moisture together influenced soil respiration rate and Q_{10} values, and when the soil moisture was too high or too low, the effect of temperature was weakened, and the effect of the soil moisture reinforce.

Keywords: soil; respiration rate; temperature; moisture; temperature dependence of soil respiration; karst gorge

土壤呼吸是土壤碳库向大气碳库输入碳的主要途径^[1]。土壤碳库微小的变动都可能导致大气中 CO_2 浓度的巨大变化^[2]。研究表明,土壤碳库 0.1% 的变化将会使大气圈 CO_2 浓度产生 1 mg/L 的变化,从而加剧或减缓全球气候变暖^[3]。土壤呼吸速率及其变化特征对于全球碳平衡预算、估测及其变化研究是最为基础的数据^[4-5],它受生物和非生物因素作用共同影响,具有一定的空间和时间变异性^[6]。土壤呼吸作用强度主要由气候因素决定,但同一气候区土壤呼吸作用常因植被状况不同而存在较大差异^[7-8]。不同植被类型土壤呼吸速率及其时空变化特征,土壤 CO_2 -C 排放量及其变化机制,是当前生态学研究的重点内容之一。温度和湿度是影响土壤呼吸的两个重要因素,全球气候变化势必通过影响温度、湿度等因素而对土壤生物地球化学过程产生重要影响^[2,7]。土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值常用来表述土壤呼吸与温度之间的敏感关系,它表示温度每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸的变化比率。在各种生态系统中, Q_{10} 在时间和空间上的变化非常大,其值一般在 1.3~3.3 之间变化^[9-10]。在一定范围内,土壤湿度的变化也会影响土壤呼吸强度,进而引起 Q_{10} 值的变化。

以云贵高原为中心的喀斯特地区,位于世界 3 大岩溶集中分布区之一的东亚片区的核心地带,喀斯特典型发育。喀斯特生态系统生物群落结构简单,生态脆弱性较明显,其生态环境一旦遭到破坏就很难恢复^[11]。喀斯特生态系统中碳的转移过程主要受土壤中碳的支配和控制,喀斯特岩溶作用及其强度与土壤碳循环密切相关,研究喀斯特植被群落不同恢复阶段的土壤呼吸作用对于岩溶区碳汇潜力与评价研究具有重要意义^[12]。高艳平等^[13]和邹军等^[14]对典型的喀斯特植被类型单一季节的土壤呼吸特征进行了研究,吴鹏等^[15]对喀斯特原生林和次生林的呼吸特定及其与土壤温度的关系进行了研究。由于对土壤呼吸季节变异及其影响因素的研究不足,使得区域土壤碳排

放量不能得到有效估计。此外,喀斯特地区生境异质性强,土壤温度和湿度空间变异大,势必会导致不同喀斯特区域土壤呼吸产生较大差异,不同喀斯特类型区土壤呼吸 Q_{10} 值对温度、湿度的响应关系也是需要解决的问题。

本文选择贵州省西南喀斯特岩溶峡谷区 4 种典型喀斯特植被群落类型为研究对象,采用定位连续观测的方法研究了土壤呼吸的季节变化特征及其与主要影响因子的关系,旨在了解喀斯特地区植被恢复对土壤碳释放的影响,为精确估计区域土壤碳收支变化提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省关岭县,东经 $105^{\circ}37'$ — $105^{\circ}39'$,北纬 $25^{\circ}40'$ — $25^{\circ}42'$ 之间,属于亚热带季风湿润气候。区内海拔 400~1 100 m,相对高差悬殊,属典型的喀斯特高原峡谷区。年均气温 18.4 $^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量 1 205 mm,土壤干湿季节变化明显,全年降雨量集中分布在 5—10 月,占全年降水量的 75.4%。研究区土壤由石灰岩和大理岩发育而成,土层瘠薄,且干旱、黏度大。该区地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,受岩性、干旱环境、土壤和人类活动等因素的影响,植被退化严重,导致生态系统脆弱和环境承载能力低。区内的优势乔木有朴树 (*Celtis sinensis*)、青檀 (*Pteroceltis tatarinowii*)、香椿 (*Toona sinensis*)、南酸枣 (*Choerospondias axillaris*)、乌桕 (*Triadica sebifera*) 等;优势灌木主要有:火棘 (*Pyracantha fortuneana*)、车桑子 (*Dodonaea viscosa*)、云南鼠刺 (*Itea yunnanensis*)、圆叶乌桕 (*Sapium rotundifolium*)、悬钩子蔷薇 (*Rosa rubus*) 等。草本植物主要有茅草 (*Imperata cylindrica*)、菘草 (*Arthraxon hispidus*)、蒲公英 (*Taraxacum mongoli-*

cum)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等。

1.2 样地设置与土壤呼吸测定

本研究选取了具有代表性的草地、稀灌草丛、灌丛和乔木林地 4 种植被类型研究对象,对其土壤呼吸特征进行了研究。各样地基本情况见表 1。采用美国 Li-COR 公司生产的 Li-8100 CO₂ 通量测定系统,运用样方法布设试验,对样地土壤呼吸速率进行测量和数据的采集。4 种典型植被类型分别设置 1 个 20 m×20 m 的标准样方,在样方内布设多个 PVC 土壤呼吸环(外径 20 cm,内径 19.5 cm,高 12 cm)并进行

本底调查。将 PVC 呼吸环垂直打入土壤中,露出地面 3—5 cm,整个观测期间,土壤呼吸环的位置保持固定不变。

分别在 2012 年 7、10 月及 2013 年的 1、4 月,选择晴天对土壤呼吸进行全天监测(9:00—17:00,每 1 h 测 1 次,21:00 至次日 06:00,每 3 h 测 1 次),测定土壤呼吸的季节变化。每次测量时提前一天将 PVC 隔离圈内的植物齐地面剪下所有地上部分。测定时,采用呼吸通量测定系统自带的土壤温度和湿度传感器分别测定土壤 5 和 0—10 cm 处的土壤温度和湿度。

表 1 样地基本情况

| 植被类型 | 海拔/ m | 坡度/ (°) | 坡向 | 土壤容重/ (g·cm ⁻³) | pH 值 | 有机质/ (g·kg ⁻¹) | 林地 起源 | 郁闭 度/% | 优势种 |
|------|----------|------------|----|--------------------------------|------|-------------------------------|----------|-----------|----------------------|
| 草地 | 710 | 22.1 | 西南 | 1.22 | 7.42 | 32.68 | 天然 | 65 | 茅草、白绒草、蓬草、苣荬草等 |
| 稀灌草丛 | 722 | 20.2 | 西南 | 1.17 | 7.95 | 39.54 | 天然 | 70 | 火棘、盐肤木、云南鼠刺、苣荬草、蒲公英等 |
| 灌丛 | 736 | 25.4 | 南 | 1.24 | 7.48 | 49.01 | 天然 | 90 | 车桑子、圆叶乌柏、芒萁、悬钩子蔷薇等 |
| 乔木林 | 704 | 18.5 | 西南 | 1.19 | 7.97 | 65.52 | 天然 | 80 | 青檀、朴树、乌柏、灰毛浆果楝等 |

注:主要物种拉丁名,茅草(*Imperata cylindrica*)、白绒草(*Leucas mollissima*)、蓬草(*Conyza canadensis*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)。下同。

1.3 数据处理

采用 SPSS 18.0 和 SigmaPlot 10.0 进行数据统计分析和绘图,样地某一时刻的土壤呼吸速率、温度和湿度以该时段不同样点的均值表示。采用 ANOVA 进行方差分析和多重比较,分析不同植被类型土壤呼吸速率、温度、湿度的显著性。

土壤呼吸温度敏感性采用 Van't Hoff 模型计算^[16]:

$$R_s = a \cdot e^{bT}, Q_{10} = e^{10b} \quad (1)$$

土壤呼吸与湿度之间的关系分别采用线性、幂函数和三次项模型计算:

$$R_s = a + bW, R_s = a \cdot W^b, R_s = a + bW + cW^2 + dW^3 \quad (2)$$

采用双因素关系模型拟合分析土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的影响,其计算方法为^[17]:

$$R_s = a \cdot e^{bT} \cdot W^c \quad (3)$$

式中: R_s ——土壤呼吸速率[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; T ——土壤温度(°C); W ——土壤湿度(%); a, b, c, d ——待定参数。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸动态变化

2.1.1 土壤呼吸日变化特征 土壤呼吸是敏感的生

物学指标,由于土壤在一天中受到外界环境的影响不同,土壤温度、水分及土壤微生物都会产生相应变化,从而影响到土壤呼吸过程。4 种植被类型土壤呼吸速率日动态变化均呈单峰曲线(图 1),总体表现为上午时段土壤呼吸速率随着气温的升高而升高,中午前后(12:00—15:00)达到最大值,随后土壤呼吸速率开始降低,凌晨 0:00 到 6:00 期间土壤呼吸速率最小。不同土地利用方式不同月份土壤呼吸峰值出现时间略有差异,春季、夏季和冬季土壤呼吸速率最大值出现在 14:00 前后,秋季土壤呼吸速率最大值出现在 12:00—13:00,这可能与太阳高度以及日照时间长短,以及监测时的环境要素等有关。

在春季和冬季,乔木林地不同时刻土壤呼吸速率均高于灌丛地,而在秋季时,灌丛地土壤呼吸速率要高于乔木林地;在春季,草地和稀灌草丛土壤呼吸速率在全天内的变化曲线比较接近。在夏季,4 种植被类型土壤呼吸速率差异最为明显,同一时刻土壤呼吸速率的差值最大;冬季时土壤呼吸速率日变化曲线则相对平缓。

2.1.2 土壤呼吸季节变化特征 4 种植被类型土壤呼吸速率、土壤温度和湿度均呈显著的季节性变化(图 2)。不同植被类型土壤呼吸速率最大值均出现在夏季,最小值均出现在冬季(图 2a)。草地、稀灌草丛、灌丛和乔木林地土壤呼吸速率变化范围分别为 0.73~1.21,

1.20~1.48, 1.54~2.41, 1.86~2.95 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 年平均土壤呼吸速率分别为 1.65, 2.76, 2.45, 3.43 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最大呼吸速率分别是最小呼吸速率的 3.40, 4.18, 2.32, 3.28 倍。土壤呼吸速率的变化幅度以草地最大, 稀灌草丛次之, 乔木林和灌丛最小。土壤温度的季节变化与呼吸速率的变化趋势一致, 在

一天内土壤呼吸速率的峰值一般比土壤温度的最高点延迟 1~2 h(图 2b); 草丛、稀灌草丛、灌丛和乔木林地土壤温度年均值分别为 21.12, 22.01, 24.78 和 24.12 $^{\circ}\text{C}$ 。土壤含水量呈多峰曲线, 反映了明显的干湿交替变化, 4 种植被类型土壤含水量年均值分别为 20.96%, 19.05%, 24.10% 和 25.32%(图 2c)。

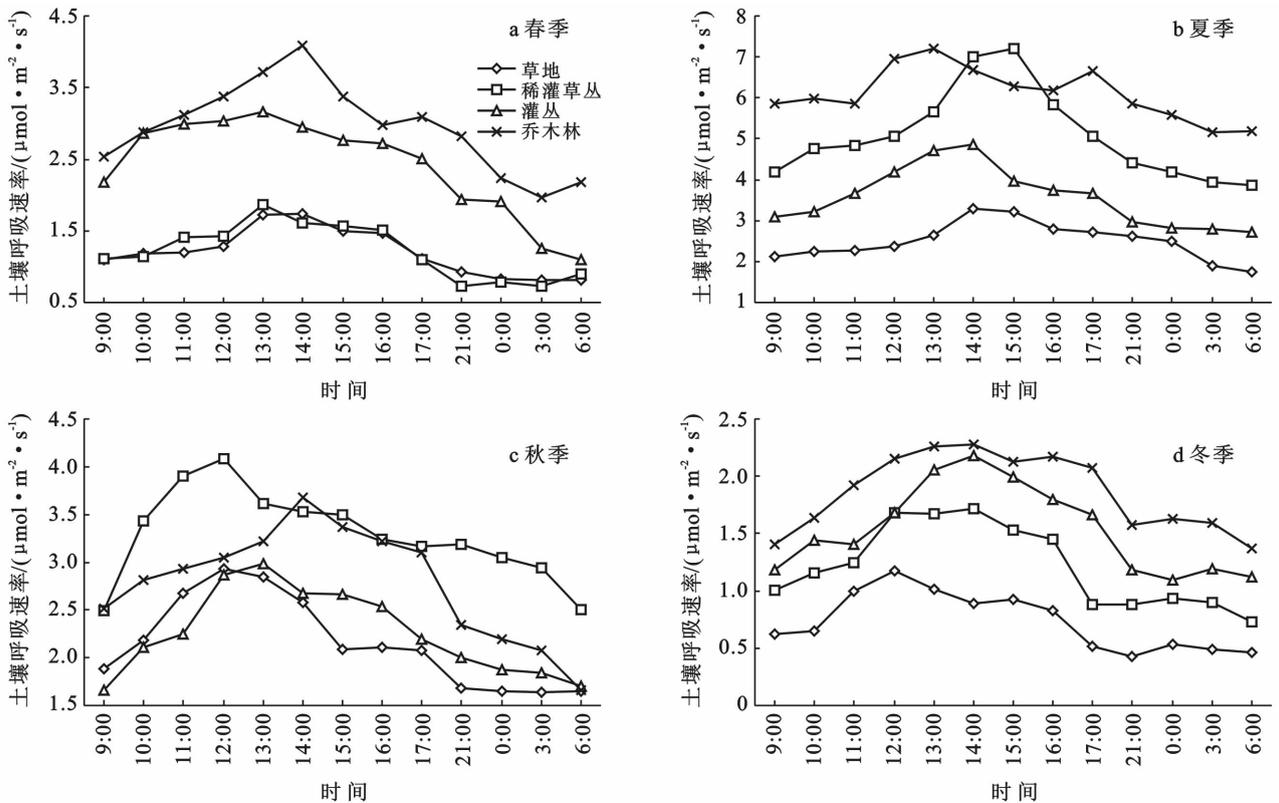


图 1 不同植被类型土壤呼吸速率日变化

2.2 环境因子对土壤呼吸的影响

2.2.1 土壤温度对土壤呼吸的影响

不同植被类型土壤呼吸与土壤温度均呈极显著正相关关系(图 3, $p < 0.01$)。采用 Van't Hoff 指数模型解释土壤呼吸速率在全年中 75.1%~90.3% 的变化。其中, 研究区内所有植被类型土壤温度和土壤呼吸的指数模型为: $R_s = 0.222 e^{0.098 T}$ ($R^2 = 0.7237$, $p < 0.01$)。模型模拟结果表明研究区在全年的土壤呼吸 Q_{10} 值为 2.66, 不同植被类型 Q_{10} 值差异显著 ($p < 0.05$), 草地、稀灌草丛、灌丛和乔木林 Q_{10} 值分别为 3.67, 3.10, 1.92, 2.31, 即土壤温度每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸速率增大 1.92~3.67 倍。

在不同土壤温度和含水量条件下, Q_{10} 值不同。根据研究区的土壤温度在全年的变化将土壤温度划分为 3 段, 分别计算 Q_{10} 值(表 2)。当 10 cm 处土壤温度在 10~20 和 20~30 $^{\circ}\text{C}$ 范围内时 Q_{10} 分别为 3.67, 3.21, 即土壤温度每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸速率增

大 3.67 和 3.21 倍。当 10 cm 处温度在 30~40 $^{\circ}\text{C}$ 内时, Q_{10} 为 1.70, 即在此范围内土壤温度增加 10 $^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸增大 1.70 倍。

表 2 不同土壤温度条件下土壤呼吸和温度的关系

| 土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$ | $R_s = a \cdot e^{bT}$ | | | | Q_{10} |
|--------------------------|------------------------|---------|---------|----------|----------|
| | a | b | R^2 | p | |
| 10—20 | 0.132 7 | 0.130 0 | 0.472 6 | 0.002 ** | 3.67 |
| 20—30 | 0.145 4 | 0.116 5 | 0.310 6 | 0.001 ** | 3.21 |
| 30—40 | 0.868 8 | 0.053 3 | 0.023 6 | 0.015 * | 1.70 |

注: ** 表示 1% 显著性水平 ($p < 0.01$); * 表示 5% 显著性水平 ($p < 0.05$)。下同。

2.2.2 土壤湿度对土壤呼吸的影响

分别采用线性模型、三项模型和幂函数模型模拟不同植被类型下土壤呼吸与土壤湿度之间的关系, 拟合度 R^2 在 0.280~0.724 之间(表 3)。相对于土壤温度而言, 土壤呼吸与土壤湿度相关性较小。其中, 线性模型模型得出稀灌草丛和灌丛土壤呼吸与湿度相关关系不显著, 草

地和乔木林地的相关性达到显著水平;幂函数模型拟合度 R^2 在 0.280~0.575 之间,其中稀灌草丛和乔木林达到显著水平,草地和灌丛相关关系不显著。三次

项模型模拟得到 4 种植被类型土壤呼吸和土壤湿度相关性均达到显著性水平($p < 0.05$),即采用三次项模型模拟土壤呼吸与土壤湿度的关系效果最好。

表 3 基于土壤含水量(W)的土壤呼吸模型参数

| 植被类型 | $R_s = a + bW$ | | | | $R_s = a + bW + cW^2 + dW^3$ | | | | | | $R_s = a \cdot W^b$ | | | |
|------|----------------|-------|-------|--------|------------------------------|--------|-------|----------|-------|---------|---------------------|-------|-------|--------|
| | a | b | R^2 | p | a | b | c | d | R^2 | p | a | b | R^2 | p |
| 草地 | 0.097 | 0.074 | 0.577 | 0.045* | 5.21 | -0.773 | 0.043 | -0.000 7 | 0.705 | 0.013* | 0.063 | 1.056 | 0.467 | 0.081 |
| 稀灌草丛 | 0.129 | 0.135 | 0.548 | 0.199 | 6.37 | -0.934 | 0.055 | -0.000 8 | 0.643 | 0.022* | 0.107 | 1.059 | 0.575 | 0.026* |
| 灌丛 | 0.907 | 0.064 | 0.318 | 0.224 | 7.21 | -0.712 | 0.030 | -0.000 4 | 0.545 | 0.043* | 0.325 | 0.062 | 0.280 | 0.439 |
| 乔木林 | -1.383 | 0.189 | 0.615 | 0.012* | 37.25 | -4.278 | 0.165 | -0.001 9 | 0.724 | 0.008** | 0.059 | 1.232 | 0.489 | 0.042* |

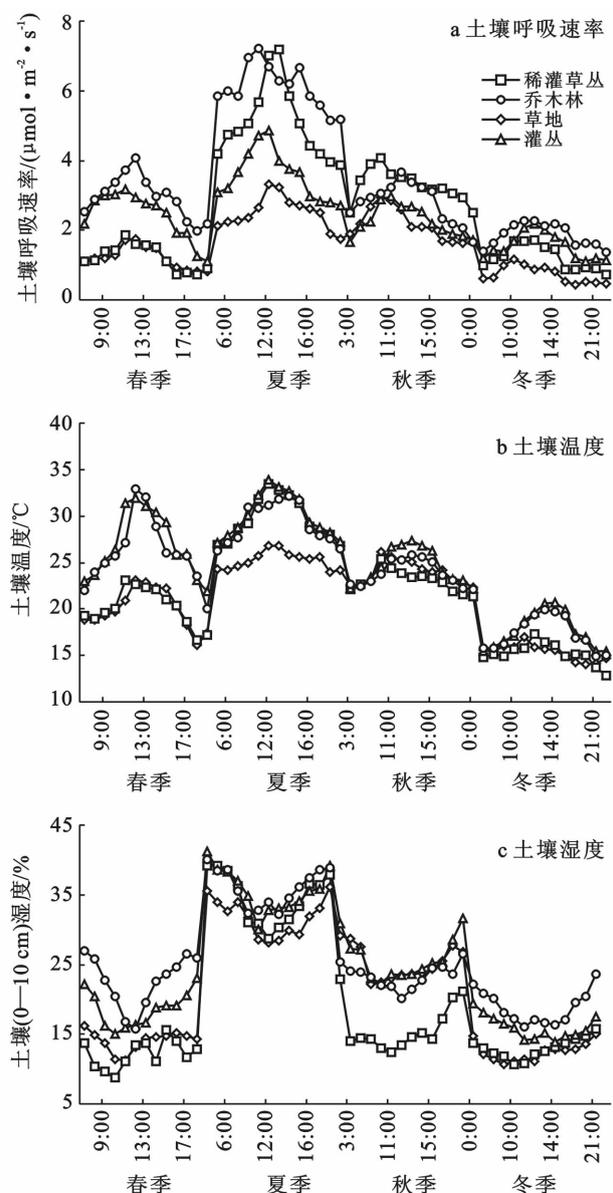


图 2 4 种植被类型下土壤呼吸速率、土壤(5 cm)温度和土壤(0—10 cm)湿度季节变化

采用三次项模型得到全年范围内土壤呼吸与土壤含水量的关系为: $R_s = -0.000 3 x^3 + 0.216 x^2 - 0.391 4 x + 3.63 (R^2 = 0.439, p < 0.05)$ 。对该三次

项模型求解得到当土壤含水量为 35.88%时土壤呼吸速率达到峰值。以 35.88%的含水量为分界线,当土壤含水量小于 35.88%时土壤呼吸随土壤湿度的增加而升高,当土壤体积含水量超过 35.88%后,土壤呼吸速率随着含水量的增加而降低。

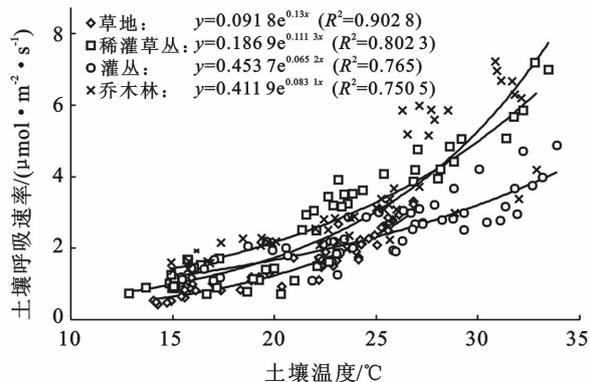


图 3 土壤呼吸速率与土壤温度

为了解不同水分条件下 Q_{10} 的变化特征,将研究区土壤体积含水量在一年中的变化划分为 4 段,分别计算 Q_{10} 值(表 4)。当土壤水分小于 15%时, Q_{10} 最大;在 >35%时, Q_{10} 最小,对土壤呼吸产生抑制。当土壤水分在 15%~35%范围内时, Q_{10} 值差异不大,介于 1.92~2.23。

表 4 不同土壤水分条件下土壤呼吸和温度的关系

| 土壤湿度/% | $R_s = a \cdot e^{bT}$ | | | | Q_{10} |
|--------|------------------------|--------|-------|---------|----------|
| | a | b | R^2 | p | |
| <15 | 0.120 | 0.128 | 0.622 | 0.004** | 3.58 |
| 15~25 | 0.477 | 0.066 | 0.534 | 0.012* | 1.92 |
| 25~35 | 0.275 | 0.080 | 0.246 | 0.044* | 2.23 |
| >35 | 35.680 | -0.007 | 0.037 | 0.432 | 0.93 |

2.2.3 土壤温度、湿度共同对土壤呼吸的影响 土壤呼吸速率受土壤温度和土壤水分的共同影响,表 5 为采用双因素模型得到的土壤呼吸与土壤温度(T)和湿度(W)关系模型的参数,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 81.5%~91.2%。整体上双因素模型的显著性和相关系数 (R^2) 均明显高于单因素模型,其中乔木林效果最好,灌丛次之,草地和稀灌草丛最差。

表 5 土壤呼吸 (R_s) 与土壤温度 (T) 和土壤湿度 (W) 关系模型 $R_s = a \cdot e^{bT} \cdot W^c$ 参数

| 植被类型 | 参数 | | | 相关系数 (R^2) | p 值 |
|------|-------|-------|--------|----------------|---------|
| | a | b | c | | |
| 草地 | 6.783 | 0.117 | -0.014 | 0.893 | 0.001** |
| 稀灌草丛 | 4.028 | 0.105 | -0.021 | 0.912 | 0.003** |
| 灌丛 | 6.232 | 0.055 | -0.028 | 0.824 | 0.000** |
| 乔木林 | 5.252 | 0.078 | -0.023 | 0.815 | 0.000** |

双因素模型中,参数 a 为温度 0 °C 时的土壤呼吸速率,参数 b 和 c 分别为温度敏感性因子和湿度敏感性因子,参数 b, c 由大到小顺序为草地、稀灌草丛、乔木林、灌丛。表明草地土壤呼吸速率对温度和湿度的变化更为敏感,这也是导致草地土壤呼吸速率年变化幅度最大的原因之一,同时预示了未来区域降雨量减少或气温升高将对喀斯特草地土壤呼吸产生更大影响。

2.3 Q_{10} 值与土壤温度和湿度关系

表 6 为采用指数模型拟合得到的土壤呼吸 Q_{10} 值

表 6 不同植被类型土壤呼吸 Q_{10} 值、土壤 (5 cm) 平均温度 (T)、土壤 (0—10 cm) 平均湿度 (W)

| 季节 | 草地 | | | 稀灌草丛 | | | 灌丛 | | | 乔木林 | | |
|----|----------|--------------------|--------|----------|--------------------|--------|----------|--------------------|--------|----------|--------------------|--------|
| | Q_{10} | $T/^\circ\text{C}$ | $W/\%$ |
| 春季 | 3.02 | 19.79 | 13.39 | 2.71 | 19.98 | 12.77 | 1.68 | 26.84 | 18.03 | 1.56 | 26.05 | 17.58 |
| 夏季 | 2.40 | 25.22 | 18.67 | 1.93 | 29.71 | 34.96 | 1.67 | 30.17 | 36.14 | 1.43 | 29.24 | 31.93 |
| 秋季 | 1.75 | 24.22 | 20.26 | 1.16 | 22.73 | 14.34 | 2.21 | 24.53 | 19.40 | 2.23 | 23.96 | 16.14 |
| 冬季 | 3.36 | 16.08 | 8.67 | 3.41 | 15.41 | 10.14 | 2.92 | 17.67 | 15.00 | 3.22 | 17.34 | 16.46 |

在本研究测定的土壤温湿度范围内,草地、稀灌草丛、灌丛和乔木林土壤 (5 cm 处) 温度每升高 1 °C, Q_{10} 值将分别减少 0.154, 0.112, 0.108, 0.159, Q_{10} 值对土壤温度的变化十分敏感;而土壤 (0—10 cm 处) 湿度每增加 1%, Q_{10} 值减少很小,分别为 0.128, 0.033, 0.039, 0.064, 表明 Q_{10} 值对土壤湿度的变化敏感性相对较低。

3 结论与讨论

喀斯特峡谷区 4 种植被类型土壤呼吸速率日变化均呈单峰型曲线,白天呼吸速率较高,夜间较低。在年尺度上,土壤呼吸速率存在明显的季节变化,以夏季最高,冬季最低。随着植被由草地向稀灌草丛、灌丛和乔木林的恢复,土壤呼吸增强。温度和湿度是影响土壤呼吸的关键因子,单因素指数模型表明土壤

与土壤 (5 cm) 平均温度、土壤 (0—10 cm) 平均湿度统计结果。当平均土壤温度高于 20 °C 时,林地土壤呼吸 Q_{10} 值在 1.16~2.23 之间变化;当温度低于 20 °C 时, Q_{10} 值在 2.0 以上;在温度最低的 12 月, Q_{10} 值高达 3.41。在土壤湿度较大的月份 Q_{10} 值较低,而在土壤湿度较低的月份 Q_{10} 值较高。

4 种植被类型 Q_{10} 值与土壤 (5 cm) 平均温度 (T)、土壤 (0—10 cm) 平均湿度 (W) 的回归分析表明, Q_{10} 值与土壤温度和湿度均呈显著负相关。其关系式分别为:

(1) 草地:

$$Q_{10} = -0.154 T + 5.78 \quad (R^2 = 0.77, p < 0.05)$$

$$Q_{10} = -0.128 W + 4.59 \quad (R^2 = 0.91, p < 0.05)$$

(2) 稀灌草丛:

$$Q_{10} = -0.112 T + 4.72 \quad (R^2 = 0.46, p < 0.05)$$

$$Q_{10} = -0.033 W + 2.90 \quad (R^2 = 0.45, p < 0.05)$$

(3) 灌丛:

$$Q_{10} = -0.108 T + 4.79 \quad (R^2 = 0.93, p < 0.05)$$

$$Q_{10} = -0.039 W + 2.97 \quad (R^2 = 0.38, p < 0.05)$$

(4) 乔木林:

$$Q_{10} = -0.159 T + 5.95 \quad (R^2 = 0.94, p < 0.05)$$

$$Q_{10} = -0.064 W + 3.42 \quad (R^2 = 0.36, p < 0.05)$$

(5 cm) 温度对呼吸的贡献率为 72.37%, 三次项模型表明土壤 (0—10 cm) 水分对呼吸的贡献率为 43.9%。双因素关系模型 ($R_s = a \cdot e^{bT} \cdot W^c$) 较好地反映了土壤温度、湿度对土壤呼吸的影响,二者可共同解释土壤呼吸变化的 81.5%~91.2%。4 种植被土壤呼吸对温度的敏感系数 (Q_{10} 值) 存在差异, Q_{10} 值随季节的变化而变化。土壤温度是影响土壤呼吸速率的主导因素, 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。当土壤含水量过低或过高时,土壤温度的主导作用相对减弱,土壤湿度的影响作用加强。

3.1 不同植被类型对土壤呼吸的影响

植被是决定土壤呼吸速率的重要因素,不同植被类型群落组成结构的差异,导致土壤微生物类群组成的不同。这也使得土壤微生物总活性和土壤物质代

谢强度,以及表征土壤质量特征的生物学指标的不同^[13],即表现为土壤呼吸速率的差异。草地、灌草、灌丛和林地平均土壤呼吸速率分别为 1.65, 2.76, 2.45, 3.43 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,林地平均土壤呼吸速率分别比其他 3 种植被类型高 40.12%, 20.03% 和 108.18%,这可能与植被由草地向乔木恢复的过程中小气候条件、土壤地下过程(生物量、根系数量与微生物活性)的变化,以及土壤理化性质的改善有关^[18]。此外,不同植被类型凋落物的差异,包括凋落物生物量与土壤有机碳输入、对雨水响应能力以及对土壤呈温度作用的差异都会影响到土壤呼吸速率^[7]。

研究区 4 种典型植被类型土壤呼吸速率季节变化均呈单峰曲线,存在明显的季节变化差异。土壤呼吸速率以夏季最高,冬季最低。分析其原因主要为夏季气温高,降雨集中,根系、微生物生物活性和新陈代谢能力得到极大提高,土壤呼吸速率处于全年最高水平;秋季气温维持在较高水平,降雨减少,土壤含水量偏低,土壤微生物活性减弱,而此时植物新陈代谢和根系呼吸作用仍较强;冬季气温降低,土壤温度为全年最低,微生物活性较低,土壤呼吸速率处于全年最低水平;春季气温升高、降水增加,土壤根系和微生物活性增强,土壤呼吸速率随之慢慢增加,但不会出现全年的最低值或最大值。

3.2 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性波动^[19]。本研究土壤呼吸日变化呈明显的昼夜规律,日变化过程为单峰曲线,相同土壤在不同季节土壤呼吸速率的高低峰值出现的时间以及变化幅度不同,与其他研究的结果相似^[2-5, 13-15, 20]。

土壤呼吸速率与土壤温度之间具有显著的指数函数关系,本研究土壤温度对土壤呼吸速率变化的解释能力为 72.37%,Markus^[21]研究证实土壤温度对土壤呼吸速率的单独解释能力很难超过 80%。土壤呼吸速率不可能随着温度的升高或降低而出现无限制的增长或降低^[22]。由前述表 2 可知 Q_{10} 值是随着温度的升高而减小的,即随着土壤温度范围的升高,土壤呼吸对温度的敏感性逐渐降低。分析其原因主要土壤生物活动,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,在温度过高的时候,土壤微生物活动受温度限制,而且呼吸酶在不同的温度条件下活性也可能不同。

土壤呼吸速率与土壤湿度的关系比较复杂,本研究用三次方程表述二者的关系效果最佳($R^2 = 0.439$)。发现土壤体积含水量超过 35.88%后,水分

开始对呼吸产生抑制作用,其原因为当含水量增加,微生物新陈代谢所需要的激发能减少,土壤呼吸增加比较迅速,而水分过高时会导致土壤中 CO_2 和 O_2 传输困难。不同水分条件下的土壤呼吸和温度指数模型表明,当土壤含水量 $< 15\%$ 和 $> 35\%$ 时,指数模型分别可以解释 62.23% 和 3.67% 的土壤呼吸速率变化,即土壤温度的主导因素地位相对较低,可能是过低和过高的土壤水分含量在其中起到一定作用。

双变量模型对土壤呼吸与土壤温度、湿度的拟合结果显示土壤温度和土壤湿度共同解释了 4 种植被类型土壤呼吸变化的 81.5%~91.2%,双变量模型的解释能力明显优于单因素关系模型。该区为典型喀斯特高原峡谷区,具有干热河谷的气候特征,1 a 中气温变化大,降雨分配不均,若采用单因素模型单独拟合土壤呼吸与土壤温度或湿度,其结果的可靠性将难以得到保证。

3.3 不同植被类型土壤呼吸 Q_{10} 值与土壤温度、土壤湿度关系

土壤呼吸 Q_{10} 值在预测土壤呼吸对全球气候变化响应研究中十分重要。许多学者研究发现 Q_{10} 值具有一定的时间和空间变异性,它随季节的变化而变化^[10, 23]。在没有考虑土壤湿度的情况下,本研究 4 种植被类型下土壤呼吸与土壤(5 cm 处)温度在低温时的拟合效果要优于在温度较高的季节(表 2)。温度较低的秋冬季土壤呼吸与土壤温度的相关性的决定系数(R^2)高于温度较高的春季和夏季,温度最高的夏季土壤温度只能解释土壤呼吸速率变化的 34.6%,而在温度最低的 12 月土壤温度解释了土壤呼吸速率变化的 63%。即 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,这与 Kutsch^[24] 等对德国北部农地的土壤呼吸研究得到的冬季 Q_{10} 值明显高于较高温度的夏季相一致。此外, Kirschbaum^[25] 在室内进行控制试验也发现 Q_{10} 值在高温下较低,而在低温下较高,温度为 20 $^\circ\text{C}$ 时, Q_{10} 值为 2.5 左右,而温度在 0 $^\circ\text{C}$ 时, Q_{10} 值却能高达 8, Q_{10} 值和温度之间存在负相关关系。土壤湿度对 Q_{10} 值的影响表现为在湿度较大的月份 Q_{10} 值较低,而在湿度较低的月份 Q_{10} 值较高,表明当土壤湿度较低时,土壤呼吸对温度的变化更敏感。即当土壤含水量过低或过高时,土壤温度的主导作用相对减弱,土壤含水量的影响作用则相对增强。

土壤呼吸及 Q_{10} 值受土壤温度和湿度共同影响,环境条件的差异会带来土壤呼吸温度敏感性的差异,受复杂的地理环境和局部小气候综合作用的影响,喀斯特峡谷具有干热河谷气候特征,在该地区土壤呼吸

和碳收支变化研究中,为提高生态模型的精度,有必要增加小时间尺度上水热条件对土壤呼吸影响的研究以获取更多的资料与数据。

[参 考 文 献]

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation [J]. *Tellus*, 1992, 44(2): 81-99.
- [3] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 609-618.
- [4] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [5] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11): 1625-1635.
- [6] 梁福源, 宋林华, 王静. 土壤 CO₂ 浓度昼夜变化及其对土壤 CO₂ 排放量的影响[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(2): 170-176.
- [7] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [8] 李红生, 刘广全, 王鸿喆, 等. 黄土高原 4 种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子[J]. *生态学报*, 2008, 28(9): 4099-4106.
- [9] Curiel Y J, Janssens I A, Carrara A, et al. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 161-169.
- [10] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 1-6.
- [11] 袁道先, 刘再华, 林玉石, 等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [12] 潘根兴, 曹建华, 何师意, 等. 土壤作为湿润亚热带表层岩溶作用的动力机制: 系统碳库及碳转移特征[J]. *南京农业大学学报*, 1999, 22(3): 49-52.
- [13] 高艳平, 丁访军, 崔迎春, 等. 黔中喀斯特地区不同林型春季土壤呼吸研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 163-167.
- [14] 邹军, 崔迎春, 刘延惠, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中春季土壤呼吸特征研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 195-198.
- [15] 吴鹏, 崔迎春, 杨婷, 等. 茂兰喀斯特森林主要演替群落呼吸研究[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2012, 37(4): 57-62.
- [16] Sotta E D, Meir P, Malhi Y. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(5): 601-617.
- [17] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [18] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [19] 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[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 583-591.
- [20] 常宗强, 史作民, 冯起, 等. 黑河流域山区牧坡草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1630-1606.
- [21] Markus R, Jensarne S, Andrew C A, et al. Does the temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter depend upon water content, soil horizon, or incubation time? [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1754-1767.
- [22] Luo Yiqi, Zhou Xuhui. Soil Respiration and the Environment[M]. San Diego: Elsevier Inc, 2006: 72.
- [23] Xu Ming, Ye Qi. Soil surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [24] Kutesch W L, L Kappen. Aspects of carbon and nitrogen cycling in soils of Bomhaved Lake district (II): Modeling the influence of temperature increase on soil respiration and organic carbon content in arable soils under different management [J]. *Biogeochemistry*, 1997, 39(2): 207-224.
- [25] Kirschbaum M I F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and effect of global warming on soil organic C storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 753-760.