

喀斯特原生林土壤呼吸动态变化及其影响因素

吕文强^{1,2}, 王世杰^{1,*}, 刘秀明¹

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 普定喀斯特生态系统
观测研究站 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:森林土壤呼吸是陆地生态系统土壤呼吸的重要组成部分,其动态变化对全球碳平衡有着重要的影响,然而目前对喀斯特地区原生林土壤呼吸的研究还比较薄弱。本研究通过对茂兰喀斯特原生林土壤呼吸的日、月动态变化监测,得出以下初步结论:1)茂兰喀斯特原生林土壤呼吸有着明显的日变化规律:白天土壤呼吸速率明显高于晚上(最高值出现在13:00~15:00),且雨季土壤呼吸日变化规律与旱季存在明显差异;2)喀斯特原生林土壤呼吸速率变化范围为140.3~920.6 mg·m⁻²·h⁻¹,且有着明显的月变化特征,即雨季的各月明显高于旱季时各个月份的土壤呼吸,年通量与南亚热带阔叶林无明显差异;3)茂兰喀斯特原生林仅在旱季土壤呼吸的日变化与气温有着显著的指数相关关系($R^2=0.83, P<0.001$),土壤呼吸的月变化或日变化(雨季)与土壤温度、湿度均无相关性。

关键词:土壤呼吸;温度;湿度;喀斯特森林

中图分类号:S15 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9250(2011)03-0313-05

森林土壤呼吸是陆地生态系统土壤呼吸的重要组成部分,其动态变化对全球碳平衡有着重要的影响。不同的森林生态系统,土壤呼吸具有不同的动态变化特征^[1,2]。在我国西南地区,保存着同纬度地带最完整的喀斯特原生林,地上植被为常绿落叶阔叶混交林,但地表基岩裸露、土层薄且不连续,小生境类型多,生态系统的组成和结构复杂,被认为是一种特殊的、脆弱的森林生态系统^[3,4]。目前,对喀斯特原生林生态系统土壤呼吸的动态变化研究比较薄弱,仅少数研究者采用碱液吸收法对该生态类型土壤呼吸动态变化进行了初步的研究^[5,6],亟待加强。从另一角度来看,随着国家和地方石漠化生态治理的实施,作为区域顶级生态系统的喀斯特原生林将是重要的参照体系,即分布广泛的石漠化山地的生态重建理想目标是达到或接近区域原生林。因而,开展喀斯特原生林土壤呼吸变化规律的研究,不仅具有剖析喀斯特顶级生态系统土壤碳库动态变化的理论意义,而且可为逐步实施的生态治理工程的

碳汇效益评价和评估奠定基础。

森林土壤呼吸受诸多因素的影响,其中温度和湿度是两个重要因素^[7,8]。在全球气候变化背景下,土壤温度和湿度将有着不同程度的改变,因此评价气候变化对生态系统的影响需要深刻认识和量化温度和湿度对土壤呼吸的影响^[9]。从已有的研究情况来看,土壤湿度和土壤呼吸之间的关系较为复杂,有正相关、负相关甚至不相关等多种情况出现^[10];温度和土壤呼吸之间的关系相对较为固定,一般表现为正相关,但土壤呼吸对温度的敏感性有着不同的体现,不同的生态类型、不同时空条件下 Q_{10} 值的变化性很大^[11]。可见,土壤呼吸与温度、湿度的相关性差别很大。因此,特殊的喀斯特原生林生态系统的土壤呼吸与温度、湿度的相关性可能与其它生态系统不同,需要深入研究。

本文拟选择贵州省荔波茂兰喀斯特原生林,重点对土壤呼吸进行日变化动态监测、月变化监测,分析土壤呼吸的日动态及季节变化规律,剖析土壤温

收稿日期:2011-01-23; 改回日期:2011-05-03

基金项目:中国科学院知识创新工程方向性项目(kzcx2-yw-306)、国家自然科学基金创新群体项目(40721002)和贵州省科技基金资助项目(黔科合J字[2008]2014)。

第一作者简介:吕文强(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为环境地球化学。E-mail:lvwenqiang1982@126.com

*通讯作者:E-mail:wangshijie@vip.skleg.cn.

度、湿度对土壤呼吸的影响机理,旨在为解析喀斯特原生林生态系统土壤碳库动态变化及收支平衡奠定基础,最终为喀斯特石漠化地区生态重建工程的碳汇效益评价和评估提供科技支撑。

1 区域概况和方法

1.1 研究区概况

本次研究的茂兰喀斯特原生林位于贵州高原南部向广西丘陵平原过度的斜坡地带,地理位置为东经 $107^{\circ}37' \sim 108^{\circ}18'$,北纬 $25^{\circ}07' \sim 25^{\circ}39'$,所设样地在中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站茂兰观测场内。样地林区岩石类型为石灰岩及白云岩,基岩裸露率在 $70\% \sim 80\%$ 。林区年平均温度 15.3°C ,年降水量 1750 mm ,属于中亚热带季风湿润气候地区;4~9月的降水量多达 1420 mm ,占全年降水量的 81% ,其中6~8月的雨量高达 $96\% \sim 97\%$ 。该区是目前世界上同纬度地区残存下来的仅有的、原生性强、相对稳定的喀斯特森林生态系统,也是喀斯特地区原生性森林分布面积最大的地区。植被类型以乔木林为主,高 $10 \sim 20\text{ m}$,覆盖率达 80% 以上,优势种为圆果化香、短萼海桐、小果润楠、青檀、光叶海桐、丝栗栲等,枯落物层浅薄。土壤呼吸的监测点布设在占小生境土壤面积最大的土面上(约 60% 以上),土壤层发育相对较厚,约 $30 \sim 40\text{ cm}$,表层 10 cm 深度的有机质含量为 7.35% 。

1.2 CO_2 的采集和测定

本次研究土壤呼吸月动态监测的时间为2008年8月到2009年7月,具体为2008年的8、9、11月和2009年的3、4、5、6、7月;在每月中旬的早、中、晚分别进行监测,以3次的平均值代表当月的土壤呼吸速率。土壤呼吸日动态监测分别与2008年11月13日、2009年3月21日、2009年4月29日和7月15日进行了昼夜采样,前12h每隔2h采一次,后12h每隔4h采样一次。

采用较为常用的密闭静态箱法进行土壤呼吸的监测,具体操作是在罩箱后的0、10、20、30 min分别抽取箱内气体,并同时测定箱内气温和压力;在实验室用气相色谱仪(HP-6890)测定 CO_2 浓度,并用如下公式计算每个时间段土壤呼吸 CO_2 通量:

$$F = [(MPH)/(RT)] \times (dc/dt), \quad (1)$$

式中 F 为释放通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,以 CO_2 计算), M 为分子量($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), P 为箱内压力(mmHg), R 为理想气体常数($0.062364\text{ m}^3 \cdot \text{mmHg} \cdot$

$\text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$), T 为采样温度(K), dc/dt 为罩箱时间内的 CO_2 浓度变化($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。

此外,在监测土壤呼吸的同时,测定 5 cm 地温、气温及 $0 \sim 10\text{ cm}$ 土壤质量含水量。在土壤呼吸日动态监测过程中,考虑到土壤湿度变化性较小,因而未进行土壤湿度变化的监测。

2 结果与讨论

2.1 土壤呼吸的月变化特征

从2008年8月到2009年7月的监测期间,茂兰喀斯特原生林土壤呼吸变化范围为 $140.3 \sim 920.6\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,呈现单峰变化规律,即有明显的月变化(图1):在雨季(4~9月,下同)土壤呼吸速率的平均值为 $549.2\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,明显大于旱季(10~3月,下同)的平均值($217.8\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),雨季土壤呼吸占全年的 70% ;6月的土壤呼吸速率最大,为 $920.6\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。茂兰喀斯特原生林土壤呼吸的月变化规律及最大值出现在6月的特征与大多其它生态系统基本相一致。

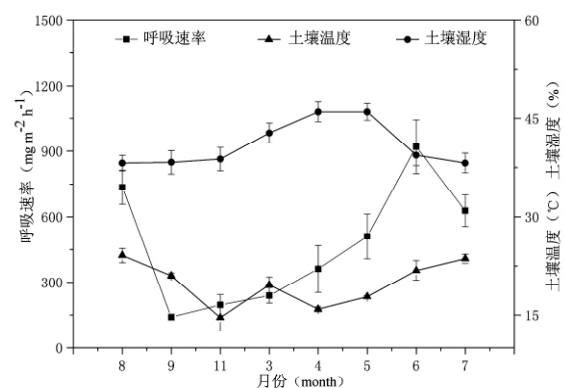


图1 土壤呼吸速率、土壤温度和土壤湿度的月变化(平均值±标准偏差)

Fig.1 Monthly variations of soil respiration, temperature, and water contents (mean±SE)

粗略地计算茂兰喀斯特原生林土壤呼吸年平均值为 $4082.2\text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,远大于喀斯特次生林($621.1\text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,折算后)^[12]和灌木林($150.9\text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,折算后)^[13],体现出植被覆盖度或生物量对土壤呼吸的主要控制作用。茂兰喀斯特原生林的土壤呼吸速与南亚热带鼎湖山阔叶林基本相当($4143.3\text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,折算后)^[14]。表面上看,生物量相对较低($144.6\text{ t}/\text{hm}^2$)^[15]的茂兰原生林土壤呼吸与生物量相对较高($290.4\text{ t}/\text{hm}^2$)的其它顶级生态系统相当^[16]。实际上,喀斯特地区由于岩石出

露面积大(70%~80%)^[17],因而从总量上看喀斯特地区单位土壤呼吸的速率、通量均小于同气候带同级的其它生态系统。因此,我们在估算喀斯特地区土壤呼吸通量研究过程中应充分考虑土壤面积。

2.2 土壤呼吸的日动态变化

从图 2 可以看出,土壤呼吸速率日动态变化基本上表现为单峰曲线,最大值一般出现在 13:00 到 15:00 之间,仅 09 年 3 月 21 日的监测土壤呼吸速率最大值出现在 19:00;总体上呈现出白天的土壤呼吸速率大于晚上的态势,且全天土壤呼吸均为大气的源。具体来看,2008 年 11 月 13 日土壤呼吸速率变化范围为 149.4~293.6 mg · m⁻² · h⁻¹,平均值为 195.9 mg · m⁻² · h⁻¹,变异幅度为 74%(最大值最小值之差/平均值);2009 年 3 月 21 日的变化范围为 189.5~282.7 mg · m⁻² · h⁻¹,平均值为 239.7 mg · m⁻² · h⁻¹,变异幅度为 38%;2009 年 4 月 29 日的变化范围为 147.1~446.5 mg · m⁻² · h⁻¹,平均值为 361.55 mg · m⁻² · h⁻¹,变异幅度为 100%;2009 年 7 月 15 日的变化范围为 556.9~736.4 mg · m⁻² · h⁻¹,平均值为 627.6 mg · m⁻² ·

h⁻¹,变异幅度为 32%。由以上数据可知,雨季的土壤呼吸日动态变化与旱季存在着明显的差异性,主要体现在:雨季的土壤呼吸速率日平均值明显大于旱季。

2.3 温度、土壤湿度对土壤呼吸速率的影响

由图 1 可见,土壤温度受季节控制非常明显,雨季(雨热同季)的土壤温度明显高于旱季。但是,土壤湿度的变化情况恰好相反,表现为旱季的土壤湿度高于雨季。这可能是一种较为特殊的现象,土壤湿度的季节变化可能受采样前的气候条件所致,如旱季时采样前发生降雨,而雨季时采样发生在连续无雨天气,将会导致本研究中旱季的土壤湿度高于雨季的土壤湿度。

众所周知,土壤呼吸主要来源于土壤微生物活动和根系呼吸,土壤微生物活动受土壤温度、湿度的影响更为直接,而根系呼吸不仅依赖于温度的变化,而且还依赖于植物生理活动的变化^[18]。因此,土壤呼吸明显的月变化规律就是植物生长期与雨季同期的体现。但从监测期间的土壤呼吸的月变化与温度、土壤湿度的相关关系来看,土壤呼吸与土壤温

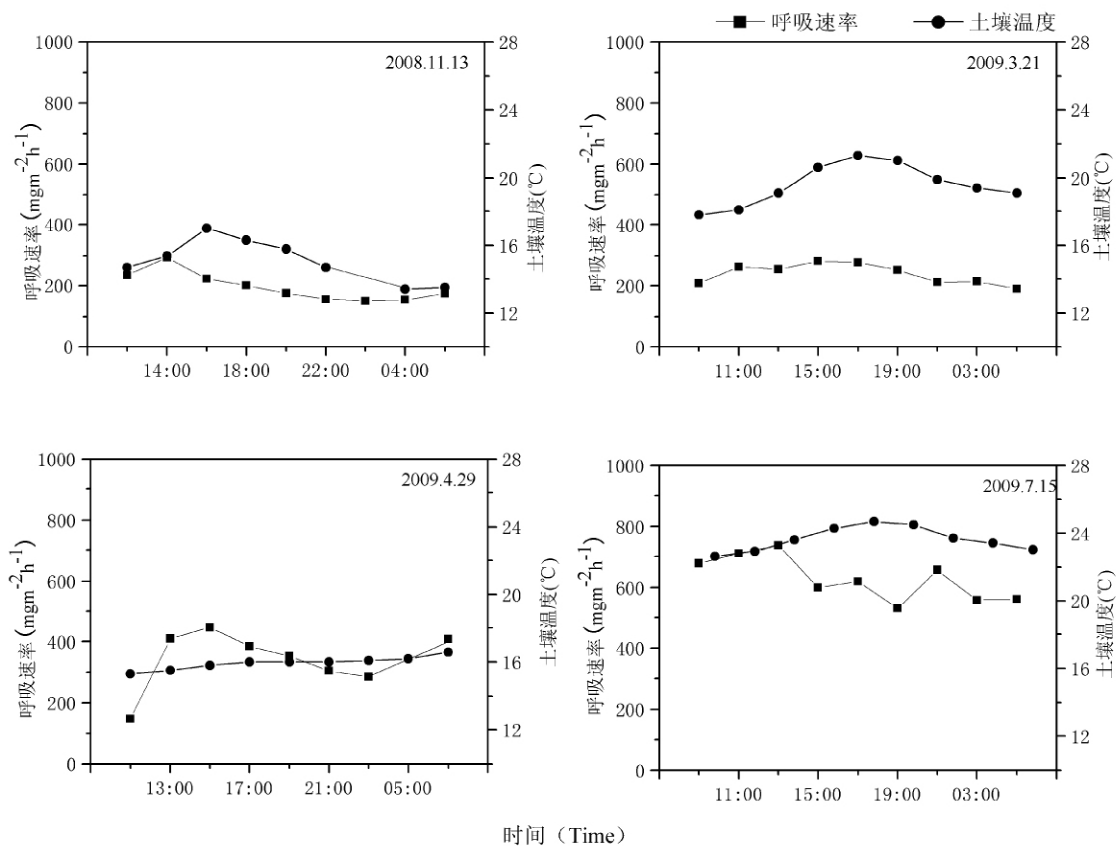


图 2 土壤呼吸和土壤温度的日变化

Fig. 2 Diurnal variations of soil respiration and soil temperature

度、湿度均无明显的相关关系($P > 0.05$),显示出喀斯特地区土壤呼吸与土壤温度、湿度的关系非常复杂。如前文所述,2009年4月的监测日气温明显低于2009年3月的监测日,然而前者的土壤呼吸明显高于后者,说明植物生长期的根系呼吸明显占据主导地位,受温度控制作用不明显。

从茂兰喀斯特原生林土壤呼吸日动态变化与土壤温度关系来看,两者并不存在明显的指数相关的现象,这说明土壤呼吸的日动态变化与土壤温度有着较为复杂的相关关系,或土壤温度的变化不能完全解释土壤呼吸的日动态变化规律。同样,在雨季土壤呼吸日动态变化与气温也无明显的相关关系。但是,土壤呼吸日动态变化与气温在旱季(2008年11月、2009年3月)有着显著的指数相关,相关系数 R 均达0.91($P < 0.001$)。这说明,在旱季由于植物生理活动处于半休眠期,植物的生理活动对气温的变化更为敏感,同时气温变化也影响着土壤温度继而制约着微生物呼吸;在雨季,植物生理活动处于高峰期,对气温的敏感相对较弱,或土壤微生物呼吸在雨季高温状况下也处于一个高峰期,因此气温变化或土壤温度变化对微生物呼吸的影响也有限。本研究中土壤呼吸的变化和土壤湿度并无明显的相关关系,可能的原因是与该地区独特的生态类型有关,出现这种现象的主要原因在于喀斯特地区的土层较薄,土壤保水能力差,一旦有降雨发生,大量的雨水随地下径流流失掉,在本研究中,除了雨季开始前后,含水量较高,其余月份土壤水量逐月变化很小,很难达到土壤微生物永久性萎蔫点或超过田间持水量,不足以影响微生物与植物根系活动^[10]。另外土壤湿度对土壤呼吸的影响相当复杂,既可以直接影响根和微生物呼吸,也可以通过影响土壤物理特性等其他环境因子间接影响土壤呼吸速率^[19],很难用

单一的数学方程来表达。土壤呼吸的月变化和土壤温度的相关关系不明显则可能是因为土壤温度对土壤呼吸的影响有滞后效应^[6],同时增加影响土壤呼吸的因子很多,且这些因子相互作用,相互制约,共同影响着土壤呼吸,从而导致土壤呼吸和温度的关系变的复杂。

另外,与其它生态系统相比,茂兰喀斯特原生林旱季的土壤呼吸的 Q_{10} 值为1.54~1.61,小于同气候带针阔叶林^[14],反映出旱季茂兰喀斯特原生林的土壤呼吸的温度敏感性相对较低。

3 结论

1) 茂兰喀斯特原生林土壤呼吸有着明显的日动态变化规律,白天土壤呼吸速率明显高于晚上,高峰值出现在13:00~15:00间;雨季的土壤呼吸日动态变化与旱季存在着明显的差异性,雨季的土壤呼吸速率日平均值明显大于旱季。

2) 茂兰喀斯特原生林土壤呼吸有着明显的月变化特征,呼吸速率变化范围为140.3~920.6 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,雨季各月的平均土壤呼吸速率为549.2 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,明显高于旱季(217.8 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$);茂兰喀斯特原生林的年通量为4082.2 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与南亚热带阔叶林基本相当,大于中、北亚热带及同气候区的其它喀斯特生态系统(如次生林、灌木林等)。

3) 茂兰喀斯特原生林仅在旱季土壤呼吸的日动态变化与气温有着显著的指数相关($R^2 = 0.83$, $P < 0.001$);无论土壤呼吸的季节变化和雨季的日动态变化与土壤温度、湿度均无明显的相关性($P > 0.05$)。这体现了茂兰喀斯特原生林土壤呼吸与温度、湿度间的关系非常复杂。

参 考 文 献

- [1] 栾军伟,向成华,骆宗诗,等. 森林土壤呼吸研究进展[J]. 应用生态学报,2006,17(12):2451-2456.
- [2] 冯文婷,邹晓明,沙丽清,等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较[J]. 植物生态学报,2008,32(1):31-39.
- [3] 周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察集[M]. 贵阳:贵州科学技术出版社,1987:1-23.
- [4] 周游游,黎树式,黄天放. 我国喀斯特森林生态系统的特征及其保护利用—以西南地区茂兰、木论、弄岗典型喀斯特森林去为例[J]. 广西师范学院学报(自然科学版),2003,16(3):67-72.
- [5] 冉景丞,何师意,曹建华,等. 亚热带喀斯特森林土壤 CO_2 排放量动态研究[J]. 贵州科学,2002,20(2):42-47.
- [6] 周运超,周习会,熊志斌,等. 岩溶系统不同植被下土壤碳排放的温度效应[J]. 贵州科学,2004,22(4):21-27.
- [7] 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.
- [8] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *Botany Review*, 1977, 43: 449–528.
- [9] Randerson J T, Thompson M V, Malmstrom C M, *et al.* Substrate limitations for heterotrophs: implications for models that estimate the seasonal cycle of atmospheric CO₂[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10: 585–602.
- [10] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 5: 972–978.
- [11] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44: 81–99.
- [12] 程建中, 李心清, 周志红, 等. 西南喀斯特地区几种主要土地覆被下土壤 CO₂-C 通量研究[J]. *地球化学*, 2010, 39(3): 258–265.
- [13] 刘芳, 刘从强, 王仕禄, 等. 黔中土壤 CO₂ 的释放特征及其影响因素[J]. *生态环境*, 2008, 17(3): 1120–1124.
- [14] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(4): 23–27.
- [15] 夏焕柏. 茂兰喀斯特植被不同演替阶段的生物量和净初级生产力估算[J]. *贵州林业科技*, 2010, 38(2): 1–7.
- [16] 刘申, 罗艳, 黄钰辉, 等. 鼎湖山五种植被类型群落生物量及其径级分配特征[J]. *生态科学*, 2007, 26(5): 387–393.
- [17] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 475–483.
- [18] Marshall J D, Perry D A. Basal and maintenance respiration of mycorrhizal root systems of conifers[J]. *Can J Forest Res*, 1987, 17: 872–877.
- [19] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. *林业科学研究* 2009, 22(5): 722–727.

Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Controlling Factors in Natural Karst Forests

LÜ Wen-Qiang^{1,2}, WANG Shi-Jie¹, LIU Xiu-Ming¹

(1. Puding Monitoring and Research Station for Karst Ecosystem, State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550001, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Forest soil respiration in a terrestrial ecosystem is a very important part involved in the global carbon cycle. Understanding soil respiration is crucial both for the carbon balance of terrestrial ecosystems and the global carbon balance. However, few studies are focused on karst forest ecosystems. In order to investigate the soil respiration rate, the Maolan Biosphere Reserve as a natural karst forest was chosen for this study. Our results showed that distinctly monthly and diurnal variations of soil respiration rates (ranging from 140.3 mg · m⁻² · h⁻¹ to 920.6 mg · m⁻² · h⁻¹) were observed; soil respiration in each month during the wet seasons was higher than that during the dry seasons; there was no difference between the total released CO₂ flux in this study and in subtropical broad-leaved forests; during the daytime the soil respiration (the maximum was found at 13:00~15:00) was significantly higher than that during the night time; obvious differences were observed in the diurnal variation of soil respiration between the wet seasons and the dry seasons. The soil respiration was correlated with air temperature during the dry seasons ($R^2=0.83, P<0.001$). There was no relationship between the variations of soil respiration and soil temperature as well as soil water contents during the wet seasons.

Key words: soil respiration; temperature; soil water content; karst forest