



北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸时间变化特征

摘要

利用 LI-8100 开路式土壤碳通量系统测定龙王山森林土壤呼吸速率,研究北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸速率的日变化和季节性变化规律.结果表明:北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸速率在 12—14 时达到最大,与土壤温度变化基本一致;森林土壤呼吸速率随土壤温度的季节性变化而变化,在夏季土壤呼吸速率较高,在冬季土壤呼吸速率较低;土壤呼吸速率与土壤温度间存在着明显的指数关系,土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 为 2.81.

关键词

北亚热带落叶阔叶林;土壤呼吸;日变化;季节性变化; Q_{10}

中图分类号 X171

文献标志码 A

收稿日期 2014-10-21

资助项目 国家自然科学基金(41175136);江苏省“青蓝工程”项目(2014)

作者简介

何都良,男,硕士,副教授,研究方向为气候变化与生态响应.hdl@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044

2 南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室,南京,210044

0 引言

土壤呼吸是土壤与大气间进行碳交换的主要途径^[1],全球每年通过土壤呼吸所释放的碳为 75 Pg^[2].土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,是植被光合作用之外陆地生态系统碳收支中最大的通量^[3],土壤呼吸微小的变化都会使大气 CO₂ 浓度和土壤碳贮存发生巨大的改变,在全球碳收支中扮演着极为重要的角色.森林土壤是全球陆地生态系统最大的碳库,约 1 394 Pg,占总量的 6% 左右^[2],是森林植被碳库的 2 倍多^[4].森林土壤呼吸占森林生态系统呼吸总量的 40%~80%^[5].因此,森林生态系统土壤呼吸的研究一直受到广泛关注.

近年来,我国学者对不同森林土壤呼吸开展了大量的研究工作,包括温带阔叶红松混交林、北亚热带-南暖温带过渡区典型森林、亚热带人工林、南亚热带季风常绿阔叶林和针阔叶混交林等^[6-11].而有关北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的研究较少^[12].

本研究以北亚热带落叶阔叶林为研究对象,应用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统测定土壤呼吸速率,研究北亚热带森林土壤呼吸的日变化和季节性变异规律,为深入开展该区域森林土壤碳循环特征研究及其碳汇评估提供基础资料.

1 材料和方法

1.1 试验地概况

研究样地位于江苏省南京市北郊的龙王山(118°42' E, 32°11' N),属北亚热带季风气候区.年平均气温 15.5 °C,1 月平均气温 2.2 °C,极端低温-13.3 °C,7 月平均气温 28.2 °C,极端高温 40.7 °C,无霜期 225 d,年相对湿度为 76%,多年平均降水量 1 019.5 mm.样地地带性植被为亚热带落叶阔叶林,群落郁闭度为 0.9,林冠层主要树种有白栎(*Quercus fabri*)、化香(*Platycarya strobilacea*)、构树(*Broussonetia papyrifera*).林下层主要有白檀(*Symplocos paniculata*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、狭叶山胡椒(*L. angustifolia*)、朴树(*Celtis sinensis*)、茶条槭(*Acer ginnala*)等树种.草本层有苔草(*Carex spp.*)、天门冬(*Asparagus cochinchinensis*)、繁缕(*Stellaria media*)等植物.

1.2 土壤呼吸的测定

采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统对土壤呼吸速率进行

观测.设置4个样地,测量前一星期在样地内安装1个PVC测量圈,测量圈安装后不再移动,直至整个试验周期结束.大约每2周观测土壤呼吸一次,观测时间为8:00—10:00,同时测定10 cm深的土壤温度,并用称重法测定土壤湿度.整个观测时间为2008年5月至2009年5月,其间于2008年5月21日、2008年6月19日、2008年7月9日和2009年5月7日进行土壤呼吸的日变化观测.日变化观测时间为8:00—18:00,每2小时观测一次.

为与LI-8100土壤碳通量测量系统测定的结果进行对比,试验期间采用静态箱-气相色谱法观测土壤呼吸.在每个样地安装1个采样底座(直径20 cm),底座为圆形无底盆钵,盆钵上口有1.5 cm深的凹槽,用以在采样时注水与采样箱密封.采样箱为1 m高的PVC圆柱,箱体直径与底座凹槽直径一致,箱体外侧先包裹一层海绵和铝箔,以减小采样时箱内温度变化.用带有三通阀的针筒采集气样,分别于关箱后0、10、20 min采集,抽样前抽推针筒数次以混合箱内气体,每次抽样50 mL,并记录采样箱内温度、土壤温度和土壤水分.采样工作在8:00—10:00完成.通过对每组3个样品的CO₂混合比与相应的采样间隔时间进行直线回归,可求得CO₂的排放速率.再根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱有效高度、CO₂分子量,求得单位面积的排放量^[13].

1.3 数据统计

根据土壤呼吸与土壤温度关系的指数方程,来计算土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})值(温度每增加10℃呼吸速率变为初始值的倍数).试验数据用Excel 2003进行计算与分析,用统计软件SPSS 17.0 (SPSS Inc.)进行显著性检验和相关性分析.

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸日变化特征

图1为不同日期进行的森林土壤呼吸日变化观测.从图1中可见,落叶阔叶林土壤的呼吸速率呈现单峰曲线变化趋势,呼吸速率峰值普遍出现在中午12时至下午14时.这种变化与土壤温度变化趋势比较一致,说明土壤温度对土壤呼吸速率有较大的影响.

2.2 土壤呼吸季节性变化规律

森林土壤呼吸季节性变化规律如图2所示.由图2可知,龙王山土壤呼吸速率与土壤温度的变化具有一致性,并且具有明显的季节变化.1年的观测结果表明,土壤呼吸排放量呈单峰、单谷的季节变化趋势,随土壤温度的变化而变化,其峰值出现在2008年7月16日($5.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),低谷出现在2008年12月10日($0.60 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).土壤呼吸排放量总趋势为处于夏天2008年5月—2008年

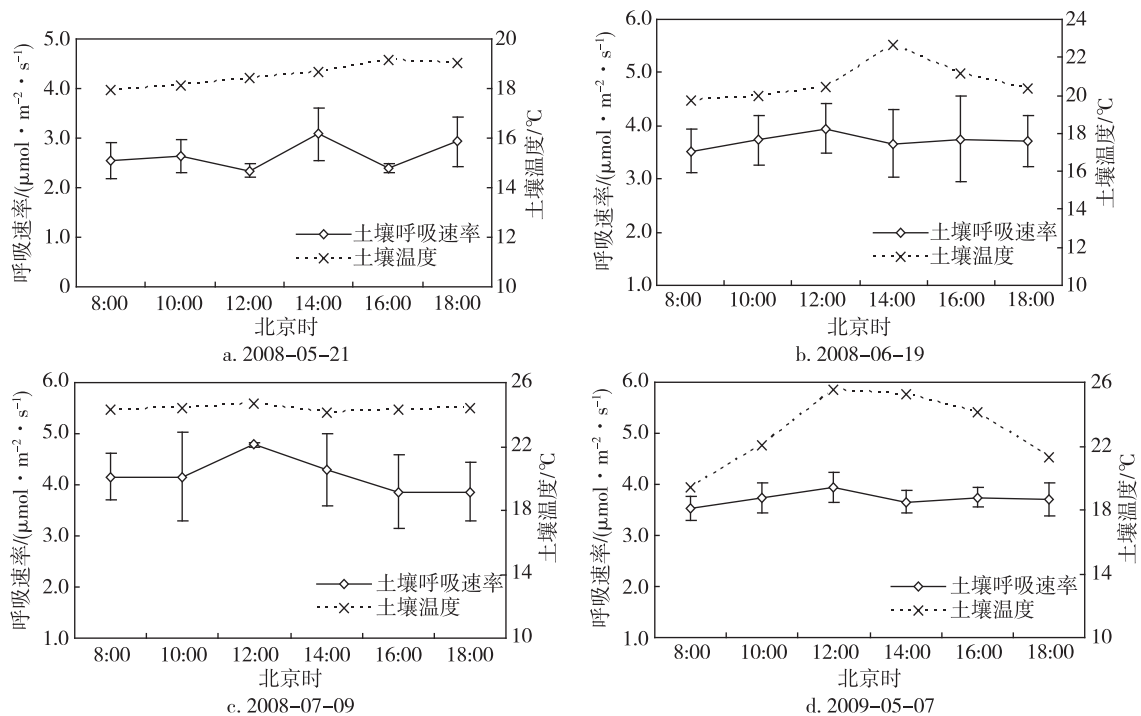


图1 土壤呼吸速率的日变化

Fig. 1 Diurnal variation characteristics of soil respiration rate

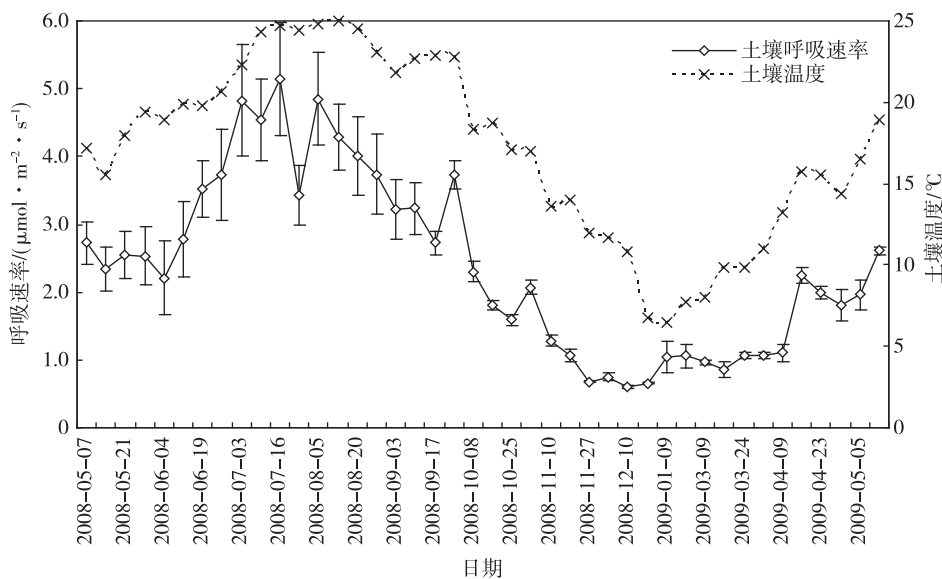


图2 土壤呼吸速率季节性变化

Fig. 2 Seasonal variation characteristics of soil respiration rate

7月逐渐上升,进入秋季的8月到2009年1月逐渐下降,下降趋势在8月到11月最强,12月到次年1月的下降趋势缓慢,2009年1月到2009年4月趋于平稳,进入夏季的5月后土壤呼吸排放量逐渐上升。

另外,春夏秋冬四季的土壤平均呼吸速率分别为 (1.53 ± 0.63) 、 (3.92 ± 0.87) 、 (2.15 ± 0.98) 和 $(0.82 \pm 0.21) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中春秋两季的 CO_2 平均排放量大致相当,而在夏季和冬季分别出现最高值和最低值。这主要是由于春秋两季气温差别不大,夏季土壤温度较高,微生物代谢速率等均较其他3个季节要高,因此 CO_2 排放量也较高,冬季则相反。

2.3 龙王山森林土壤呼吸的温度敏感性

将观测日土壤呼吸速率与龙王山土壤温度进行回归分析(图3),结果可见龙王山土壤温度与土壤呼吸速率间存在极其显著的指数关系,其回归方程为 $y = 0.3403e^{0.1032x}$ ($R^2 = 0.795$),表明在相对比较正常的水分条件下,土壤温度的增加会明显促进土壤呼吸。土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})值为2.81。

3 讨论

3.1 土壤呼吸日变化规律及季节性变化规律

许多研究者的研究表明,在土壤水分含量充足、不成为限制因素的条件下土壤呼吸速率与土壤温度呈正相关。温度是影响土壤呼吸的关键因素,两者的相关性较好。理论上随着温度的升高,土壤中的微生物活性会增加,土壤 CO_2 释放量也随之增大,温度过

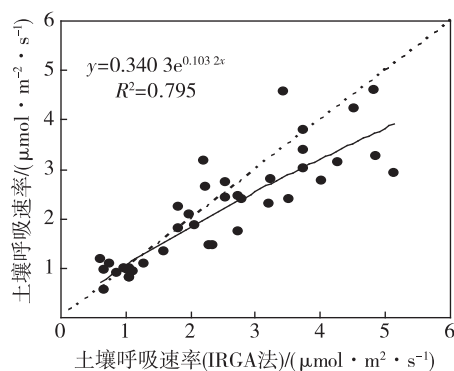


图3 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Fig. 3 Relationship between soil respiration rate and soil temperature

高后呼吸又下降。当温度在 $10 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化时,土壤呼吸速率随温度的升高而增加($Q_{10} = 2 \sim 2.5$),当温度超过 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, CO_2 的释放速率反而下降^[14]。

从试验数据分析可知,夏季最高土壤呼吸速率(7月)是冬季最低土壤呼吸速率(12月)的8.5倍。在7、8月的夏季,土壤呼吸速率较大,排放到大气中的 CO_2 最多。土壤呼吸速率的日变化和季节性变化规律主要受到土壤温度的影响,但也有研究显示不同季节中土壤呼吸速率和土壤温度往往不是同步发生的,特别是在植物生长的高峰期(春季与夏季)^[15]。

3.2 土壤温度敏感性(Q_{10})

Q_{10} 为温度系数,用来描述土壤呼吸与温度之间的关系,分别是温度为 T 和 $T+10$ 时的生物化学反应

速度,表示温度每升高 10 °C 土壤呼吸的变化比率.然而许多研究表明 Q_{10} 并非一个常数,它往往受到许多因素的影响.一般情况下,短期的升温往往会强烈促进土壤呼吸,但随着温度的升高或增温时间的延长,土壤呼吸速率的增长幅度往往下降甚至停止,其对温度变化的敏感程度降低,表现出所谓的温度适应性^[16].有研究表明,温度的改变对土壤呼吸的温度敏感性的影响一方面是影响其底物的有效性、呼吸酶与底物的亲和力和最大反应速度等,另一方面是在影响植物的光合作用、根系的生长和地下碳分配的动态^[15].

中国森林土壤呼吸 Q_{10} 值介于 1.33 ~ 5.53 之间,平均值为 2.65^[16].龙王山森林土壤 Q_{10} 值为 2.81,高出中国森林土壤呼吸 Q_{10} 平均值.有研究^[17]表明,中国森林土壤呼吸 Q_{10} 与气温呈负相关,这与许多研究发现 Q_{10} 值在温度高时较大,而在温度低时较小相一致^[18-19].在我国,森林随着纬度的升高,森林土壤呼吸的 Q_{10} 值就越大,这就说明高纬地区的森林土壤呼吸对温度具有更强的响应能力.

3.3 红外气体分析法与静态箱-气相色谱法的对比分析

用静态箱-气相色谱法(SCGC)测定的土壤 CO₂ 排放速率在 0.57~4.59 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,普遍低于红外气体分析法(IRGA)的测定结果.2 种方法的时间变异性较大,SCGC 法和 IRGA 法的变异系数分别为 2.11% ~ 59.97% 和 1.76% ~ 42.36%,平均值为 18.80% 和 24.07%.SCGC 法测定结果是 IRGA 法的 57.80%~194.48%,而 SCGC 法测定的年平均土壤呼吸速率是 IRGA 法的 89.98%.对 2 种方法测定的土壤呼吸速率进行相关分析,发现 SCGC 法和 IRGA 法具有极其显著的幂函数关系($y = 1.056 9x^{0.8014}$, $R^2 = 0.8219$, $p < 0.01$, 图 4),相关性高于线性关系($R^2 = 0.7557$).当土壤呼吸速率大于 1.46 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,SCGC 法测定结果小于 IRGA 法;当土壤呼吸速率小于 1.46 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,SCGC 法测定结果大于 IRGA 法.

4 结论

龙王山落叶阔叶林土壤呼吸速率的日变化呈现单峰曲线变化趋势,最高峰值普遍出现在 12:14,与土壤温度的变化趋势一致.

龙王山落叶阔叶林土壤呼吸速率呈单峰、单谷的季节变化趋势,随土壤温度的变化而变化.

龙王山落叶阔叶林土壤呼吸速率与土壤温度的

何都良,等.北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸时间变化特征.

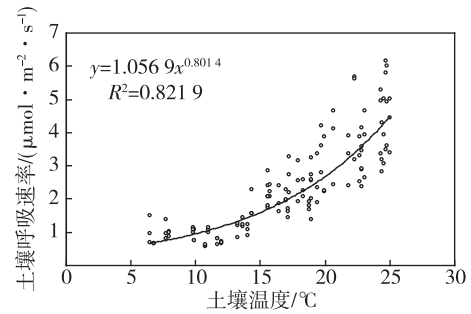


图 4 红外气体分析法与静态箱-气相色谱分析法测定的土壤呼吸间的相关性分析

Fig. 4 Correlation between soil respiration rates measured by infrared gas analysis method and static chamber-gas chromatogram method

回归方程为 $y = 0.340 3e^{0.103 2x}$ ($R^2 = 0.795$),龙王山落叶阔叶林土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})为 2.81.

参考文献

References

- [1] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1977, 8: 51-81
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 7-20
- [3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux on soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 1992, 44(2): 81-89
- [4] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263(5144): 185-190
- [5] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a Ponderosa pine ecosystem [J]. Global Change Biology, 1999, 5(2): 169-182
- [6] 张德强,孙晓敏,周国逸,等.南亚热带森林土壤 CO₂ 排放的季节动态及其对环境变化的响应 [J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2006, 36(增刊 1): 130-138
ZHANG Deqiang, SUN Xiaomin, ZHOU Guoyi, et al. Seasonal dynamics of soil CO₂ emissions and its response to environmental change in a southern subtropical forest [J]. Science China: Earth Science, 2006, 36 (sup1): 130-138
- [7] 常建国,刘世荣,史作民,等.北亚热带-南温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1791-1802
CHANG Jianguo, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al. Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5): 1791-1802
- [8] 郭丽娟,国庆喜.集水区尺度下东东北部森林土壤呼吸的模拟 [J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4090-4100
GUO Lijuan, GUO Qingxi. Simulation of soil respiration in

- forests at the catchment scale in the eastern part of north-east China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (13): 4090-4100
- [9] 龚斌,王风玉,张继平,等.中亚热带森林土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的关系[J].*生态环境学报*, 2013, 22(8): 1275-1281
GONG Bin, WANG Fengyu, ZHANG Jiping, et al. Diurnal changes of soil respiration of mid-subtropical forest and its relationship with soil temperature and humidity [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (8): 1275-1281
- [10] 周文嘉,石兆勇,王妮.中国东部亚热带森林土壤呼吸的时空格局[J].*植物生态学报*, 2011, 35(7): 731-740
ZHOU Wenjia, SHI Zhaoyong, WANG Wei. Temporal and spatial patterns of soil respiration in subtropical forests of eastern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(7): 731-740
- [11] 赵冰清,王云琦,王彬,等.环境因子对重庆缙云山林地土壤呼吸动态特征的作用[J].*北京林业大学学报*, 2014, 36(3): 83-89
ZHAO Bingqing, WANG Yunqi, WANG Bin, et al. Role of environmental factors on forest soil respiration characteristics in Jinyun Mountain of Chongqing, southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36 (3): 83-89
- [12] 王国兵,唐燕飞,阮宏华,等.次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸的季节变异及其主要影响因子[J].*生态学报*, 2009, 29(2): 966-975
WANG Guobing, TANG Yanfei, RUAN Honghua, et al. Seasonal variation of soil respiration and its main regulating factors in a secondary oak forest and a pine plantation in north-subtropical area in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 966-975
- [13] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-time ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 842-844
- [14] 张慧东.寒温带兴安落叶松林土壤二氧化碳释放特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学生态环境学院, 2007
ZHANG Huidong. Study on the pattern of soil CO₂ respiration in Dahurian larch forest of frigid-temperate zone [D]. Hohhot: School of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia Agricultural University, 2007
- [15] 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(2): 217-227
- [16] Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, et al. Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming [J]. *Nature*, 2000, 406(6799): 978-981
- [17] Kutsch W L, Kappen L. Aspects of carbon and nitrogen cycling in soils of the Bornhoved lake district. II. Modeling the influence of temperature increase on soil respiration and organic carbon content in arable soils under different managements [J]. *Biogeochemistry*, 1997, 39 (2): 207-224
- [18] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus B*, 1992, 44 (2): 81-99
- [19] Moyano F E, Kutsch W L, Schulze E-D. Response of mycorrhizal, rhizosphere and soil basal respiration to temperature and photosynthesis in a barley field [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(4): 843-853

Temporal variation characteristics of soil respiration in North subtropical deciduous broad-leaved forest

HE Duliang¹ LI Hanmao¹ WANG Yaping¹

1 Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract To investigate the diurnal variation and seasonal variation characteristics of soil respiration rate in north subtropical deciduous broad-leaved forest, the soil respiration rates in Longwang Mountain forest of Nanjing, Jiangsu province were measured using LI-8100 automated soil CO₂ flux system, and the soil temperature and moisture were recorded at the same time. The result showed that soil respiration rate increased and reached its peak during 12:00 to 14:00, which is generally in accordance with the diurnal change of soil temperature. As for the seasonal variation, the forest soil respiration rate changed with the seasonal variation of soil temperature. The soil respiration rate was relatively high when the soil temperature was high in summer, and vice versa. Significant relationship was found between soil respiration rate and soil temperature, and the Q_{10} of deciduous broad-leaved forest soil in Longwang Mountain was calculated to be 2.81.

Key words north subtropical deciduous broad-leaved forest; soil respiration; diurnal variation; seasonal variation; Q_{10}