

森林土壤呼吸空间格局的研究现状

毛国平^{1,2}, 胡军国^{1*}, 严邦祥³, 陈慧玲³, 陈茂钦⁴ (1. 浙江农林大学信息工程学院, 浙江杭州 311300; 2. 浙江省景宁县农业局, 浙江景宁 323500; 3. 浙江省景宁县林业局林技推广中心, 浙江景宁 323500; 4. 浙江省景宁县望东垟管理局, 浙江景宁 323500)

摘要 介绍了国内外关于土壤呼吸空间格局的研究现状, 多数研究结果发现森林土壤呼吸空间格局的日间变化基本保持一致, 另外土壤呼吸空间格局的日变化和生长季节的月变化同样保持稳定。但是, 由于生长季与非生长季的各种环境因子差异较大, 导致生长季和非生长季的土壤呼吸空间格局有较大差异。另外, 土壤呼吸空间格局经过环境扰动影响(如火烧及土壤干旱)后会发生显著的变化。最后对今后森林土壤呼吸空间格局研究方向进行了展望。

关键词 森林土壤呼吸; 空间格局; 日变化; 月变化; 季节变化; 扰动

中图分类号 S714 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)06-0016-05

Research Progress on the Spatial Pattern of Soil Respiration in Forest Ecosystem

MAO Guo-ping^{1,2}, HU Jun-guo¹, YAN Bang-xiang³ et al (1. College of Information Engineering, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Hangzhou, Zhejiang 311300; 2. Agricultural Bureau of Jingning County of Zhejiang Province, Jingning, Zhejiang 323500; 3. Forest Technology Extension Center, Forestry Bureau of Jingning County of Zhejiang Province, Jingning, Zhejiang 323500)

Abstract The research status of soil respiration spatial pattern at home and abroad was introduced. Most of the research results showed that the diurnal variation of forest soil respiration pattern and the monthly variation in the growing season were stable. However, due to the differences between the environmental factors in the growing season and the non-growing season, the soil respiration spatial pattern of the growing season and the non-growing season was quite different. In addition, environmental disturbances such as fire and soil drought after the impact of soil respiration spatial pattern will change significantly. Finally, the direction of future research on the spatial pattern of forest soil respiration was anticipated.

Key words Forest soil respiration; Spatial pattern; Diurnal variation; Monthly variation; Seasonal variation; Disturbance

森林生态系统作为陆地生态系统的主体, 是大气 CO₂ 浓度的主要调控者^[1]。森林生态系统碳存储了整个陆地生态系统超过 50% 的碳, 其中 60% ~ 70% 的碳存储于森林土壤中^[2-3], 因此森林土壤是一个巨大的碳库, 土壤呼吸是将土壤碳传输到大气的重要途径^[4-5]。作为森林生态系统的第二大碳排出生态过程, 森林土壤呼吸在全球碳循环中起着重要作用^[6-7]。由于森林土壤呼吸的变化会直接影响森林存储碳的能力, 因此需要对森林土壤呼吸进行精确量化, 是衡量森林生态系统土壤碳平衡的重要环节, 森林生态系统的土壤呼吸在全球碳循环和碳平衡中起着关键作用, 精确量化森林生态系统的土壤碳通量成为研究生态系统碳循环和全球气候变化的热点之一。

由于森林生态系统生物种类繁多, 且各种环境因子在空间上复杂多变^[8], 土壤呼吸本身作为一个复杂的生态过程, 且易受到诸多环境因素的影响, 表现出强烈的空间异质性^[9-10], 土壤呼吸在空间上的变化受到多种因素的影响, 如土壤温湿度^[11]、凋落物数量^[12]、根系生物量^[13]、植被的物种组成^[14]、土壤微生物量^[15]等。土壤呼吸空间异质性对精确估算区域土壤呼吸带来相当大的困难, 忽视土壤呼吸空间异质性可能会错估土壤碳通量^[16]。因此, 了解土壤呼吸在空间上的变化机制是准确量化区域土壤呼吸的前提^[17-18]。由于地统计学考虑了土壤呼吸的空间自相关作用, 能够得到空间上连续的数据来更加全面地描述区域内数据的变化情

况^[19-20], 从而获得直观的土壤呼吸空间格局, 这不仅可以揭示土壤呼吸的空间分布规律, 还能结合其他土壤属性在空间上的变化规律来解释各种生态过程之间的联系, 因此能更好地研究土壤特性的空间异质性, 且地统计学已经广泛应用于土壤呼吸异质性研究中^[21-22]。

随着研究土壤呼吸空间格局方法的不断完善, 关于土壤呼吸空间格局的研究也在不断深入。在关于区域土壤呼吸的研究中, 了解土壤碳通量在整个区域的空间变化情况对于有效量化土壤呼吸以及研究土壤呼吸空间上的变化机制至关重要, 对土壤呼吸空间格局时间上变化的研究也越来越受到重视, 研究土壤呼吸空间格局的时空变化, 对准确量化区域土壤呼吸总量以及研究区域碳平衡具有重要意义。虽然很多学者已经研究各种生态尺度上的土壤呼吸空间格局及其空间变化上的驱动因子^[23-24], 然而土壤呼吸空间格局在时间上的变化容易受到忽视, 如果忽视土壤呼吸空间格局在时间上的变化, 会对量化特定时间段内的土壤呼吸带来不确定性, 因此研究土壤呼吸空间格局在时间上的变化同样重要。笔者着重阐述现有的研究关于土壤呼吸空间格局的日间变化、日变化、月变化、季节变化以及土壤呼吸空间格局经过环境干扰之后的变化。

1 地统计学方法介绍

克里金空间插值方法是地统计学在生态环境资源领域中应用最广泛、也是最为成熟的一种方法。克里金方法是研究对象属性在空间上变化的方法, 通过待估点周围一定范围的实测点的属性值进行线性组合得到一个最优的无偏估计值, 这种空间变异性通常用试验性变异函数来表达。变异函数一般包括自变异函数和交叉变异函数, 用来决定变量属性的空间自相关性。采用半方差分析法计算土壤呼吸及其影响

基金项目 国家基金面上项目(31570629); 浙江省公益技术研究工业项目(2015C31004)。

作者简介 毛国平(1993—), 男, 浙江景宁人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤呼吸。* 通讯作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事林业物联网技术与应用研究。

收稿日期 2017-11-22

因子的空间异质性程度,半方差函数又称半变异函数,以区域化变量理论为基础。半方差函数的计算公式为

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

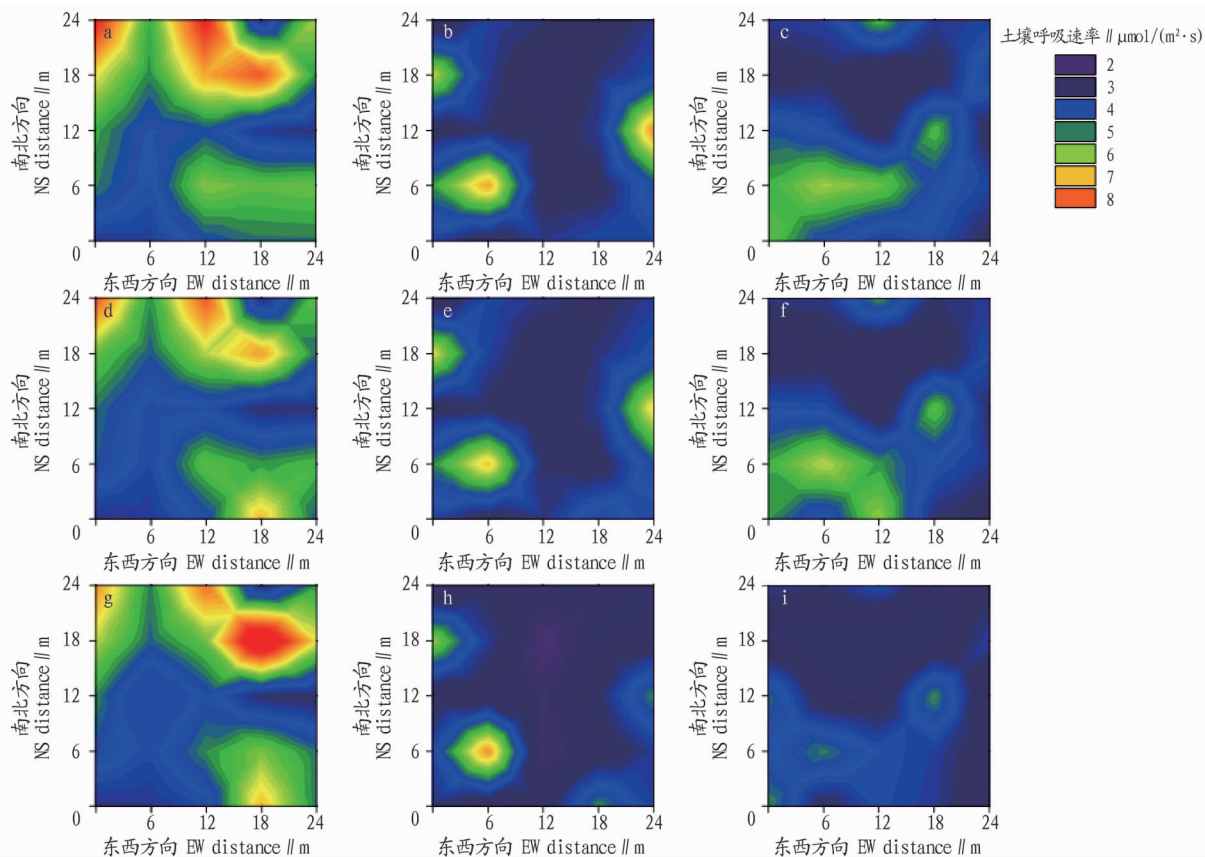
式中, $\hat{\gamma}(h)$ 为随着距离 h 的变化而变化的经验半方差; $z(x_i)$ 是对应第 i 个点的属性值; $N(h)$ 是距离为 h 点的数目。

2 土壤呼吸空间格局的国内外研究现状

2.1 土壤呼吸空间格局的日间变化及日变化

Archmiller 等^[25]在美国阿拉巴马州东部一个长叶松林中研究土壤呼吸空间格局的日变化,在研究区域内布置了3个24 m × 24 m的样地,采集样地上午、中午、下午的数据,利用3个时间段

的土壤呼吸数据进行空间插值分析,得到样地3个时间段的土壤呼吸空间格局分布情况(图1)。由图1可知,每个样地3个时间段的土壤呼吸空间格局并未发生明显的变化,土壤呼吸空间格局从上午到下午的日间变化基本保持一致,认为土壤呼吸空间格局的日变化相当稳定,林分结构以及土壤属性是土壤呼吸空间格局的关键影响因子。另外La等^[26]采集了3 d同一时间段不同土壤温度和不同土壤湿度条件下的土壤呼吸数据,3 d的数据都用半方差空间模型拟合,结果发现,3 d的土壤呼吸数据拟合结果基本相似,间接表明土壤呼吸日变化保持稳定。



注:a,b,c分别为样地1、2、3上午的土壤呼吸空间格局;d,e,f分别为样地1、2、3中午的土壤呼吸空间格局;g,h,i分别为样地1、2、3下午的土壤呼吸空间格局

Note: a, b, c represents the spatial patterns of soil respiration in the morning of plot 1, 2, 3, respectively; d, e, f represents the spatial patterns of soil respiration in the noon of plot 1, 2, 3, respectively; g, h, i represents the spatial patterns of soil respiration in the afternoon of plot 1, 2, 3, respectively

图1 3个研究样地上午、中午、下午的土壤呼吸空间格局

Fig. 1 The spatial patterns of soil respiration in 3 samples in the morning, noon and afternoon

2.2 土壤呼吸空间格局的月变化

Shi等^[27]研究了我国东北原始阔叶红松林土壤呼吸空间格局的月变化,在研究区域布置了300 m × 300 m的样地,分别在2014年5、7、9月采集土壤呼吸数据,分别代表春季、夏季、秋季,同样用地统计学方法得到5、7、9月样地3个月份的土壤呼吸空间格局分布情况(图2)。由图2可知,根据5、7、9月的土壤呼吸空间格局可以发现,土壤呼吸空间格局在生长季表现相当稳定,土壤呼吸高值区在试验周期内一直是高值区,土壤呼吸低值区在试验周期内同样也一直是低值区,并且发现林分结构和土

壤湿度是土壤呼吸空间变化的关键影响因子。Luan等^[28]在我国河南宝天曼自然保护区研究土壤呼吸空间格局的月变化,结果同样发现土壤呼吸空间格局的月变化在试验周期保持一致。

2.3 土壤呼吸空间格局的季节变化

Xu等^[29]研究美国内达华山脉的黄松林内土壤呼吸空间格局的季节变化,在研究区域布置20 m × 20 m的样地,采集了生长季和非生长季的土壤呼吸数据以及其他土壤变量数据,发现生长季到非生长季的土壤呼吸空间格局会发生显著变化,因为从生长季到非

生长季影响土壤呼吸空间变化的关键影响因子发生了改变。张涛等^[30]研究三峡库区马尾松林土壤呼吸的空间变异性,在研究区域布置了40 m×50 m的样地,对比了春、夏、秋、冬季节的土壤呼吸空间格局,结果见图3。从图3可以看出,春季和夏季的土壤呼吸分布格局存在一定的相似性,但

局部存在明显差异,另外非生长季(秋季到冬季)和生长季(春季和夏季)的土壤呼吸空间格局存在明显差异,表明研究区域内控制土壤呼吸的主导因子在生长季节保持相对稳定,非生长季局部的环境因子发生变化导致土壤呼吸速率的波动变化。

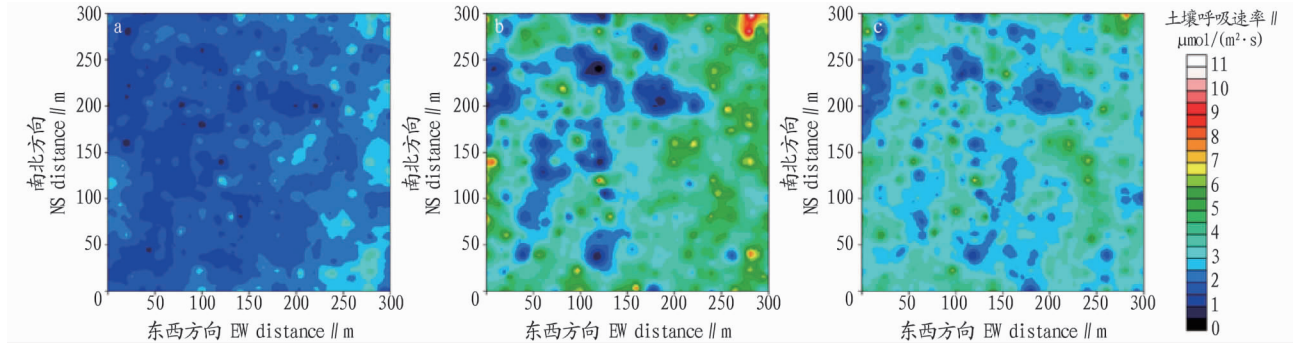


图2 研究区域5(a)、7(b)、9月(c)的土壤呼吸空间格局

Fig. 2 The spatial pattern of soil respiration in May, July and September in the study area

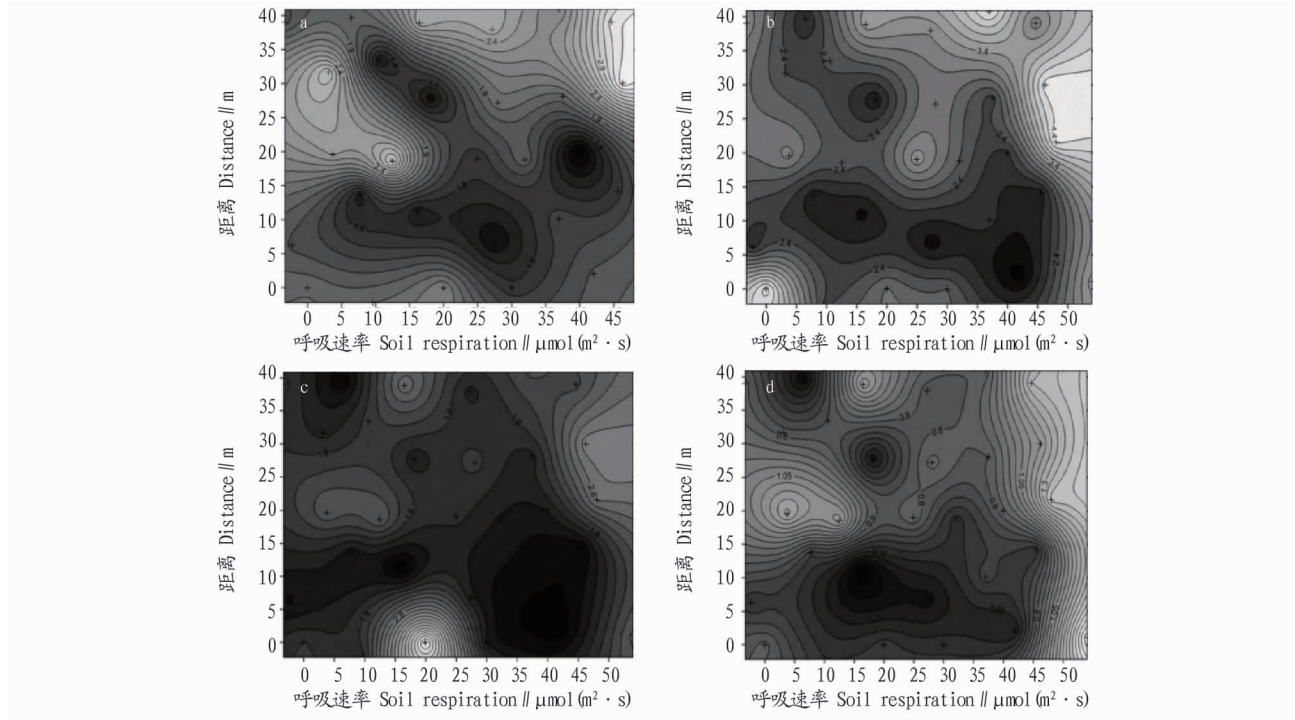


图3 研究区域春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)的土壤呼吸空间格局

Fig. 3 The spatial pattern of soil respiration in spring, summer, autumn and winter in the study area

2.4 土壤呼吸空间格局在火烧后的变化 Hu等^[31]研究大兴安岭土壤呼吸空间格局在计划火烧影响后的变化,在研究区域布置20 m×30 m的样地,采集样地遭遇火烧前后的土壤呼吸数据,结果见图4。根据图4中火烧前后土壤呼吸空间格局可知,火烧能显著改变先前的土壤呼吸空间格局,认为样地经过火烧影响后,减少了原有的立木覆盖,导致土壤微生物活动以及土壤湿度均发生明显变化,这些改变使土壤有机质及土壤微生物碳的分布发生变化,从而改变原有的土壤呼吸空间格局^[32]。Kobziar等^[33]研究表明,对照地、火烧地及火烧后翻耕地的土壤呼吸变异系数(CV)分别为42%、49%和66%,其研究结果同样表明火烧会显著改变原有的土

壤呼吸空间格局。

2.5 土壤呼吸空间格局受干旱条件影响后的变化 Martin等^[34]研究美国威斯康辛州背部的森林土壤呼吸空间格局受干旱条件影响后的变化,分别采集了样地在春季、夏季、秋季及干旱季节的土壤呼吸数据,对比4个季节的土壤呼吸空间格局,结果见图5。从图5可见,春季到秋季的土壤呼吸空间格局表现相当稳定,高值区和低值区的分布几乎没有改变,结果与前人研究一致,但是干旱季节的土壤呼吸空间格局与非旱季的土壤呼吸空间格局有明显的差异, Martin等^[34]发现,由于旱季土壤缺少水分,从而抑制了土壤微生物摄取土壤有机物,导致土壤微生物呼吸受到限制,最终降低了土壤

呼吸强度, 干旱条件会改变土壤呼吸空间格局。

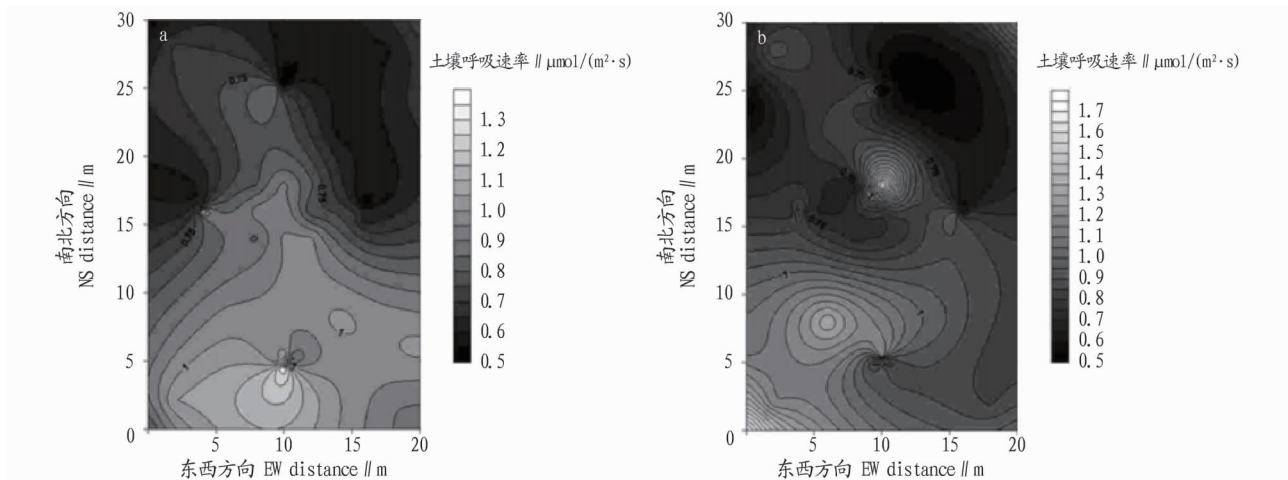


图4 火烧前(a)、后(b)土壤呼吸空间格局

Fig.4 The spatial pattern of soil respiration before and after fire

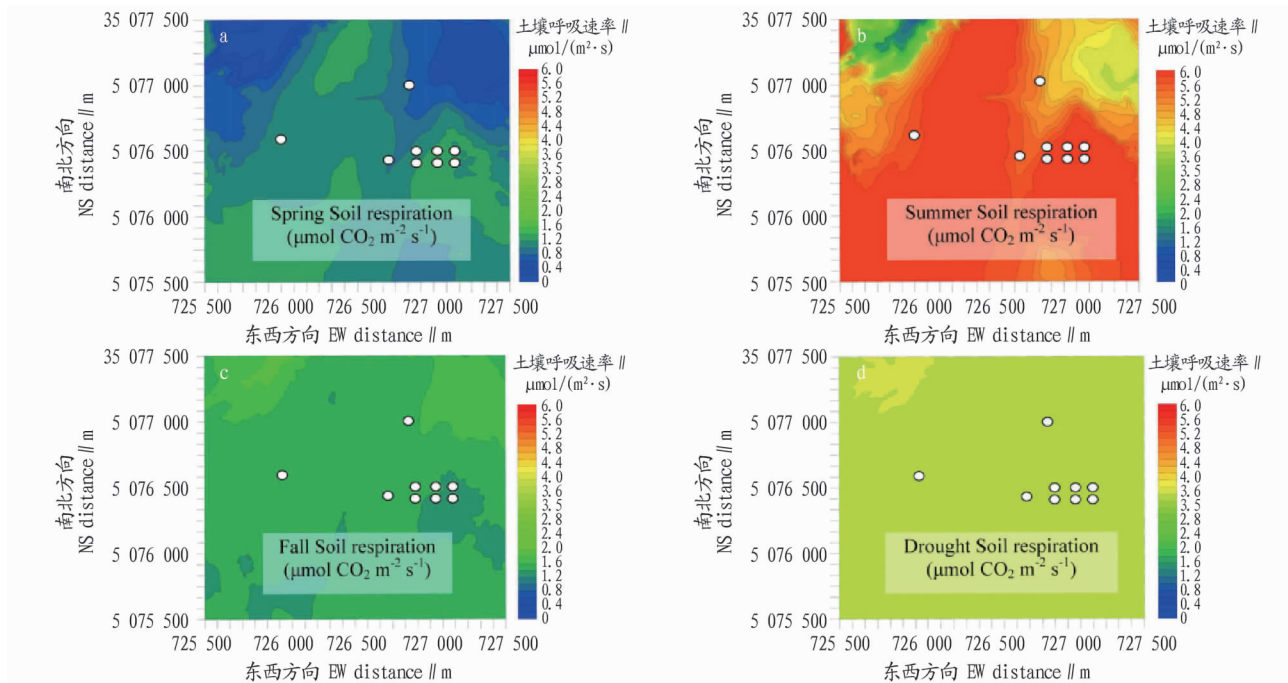


图5 研究区域春季(a)、夏季(b)、秋季(c)以及旱季(d)的土壤呼吸空间格局

Fig.5 The spatial pattern of soil respiration in spring, summer, autumn and dry season in the study area

3 展望

根据上述关于土壤呼吸空间格局的研究现状可发现, 在没有环境因子扰动(如经过火烧及干旱影响)的情况下, 森林土壤呼吸空间格局的日变化、生长季的月变化在避免环境干扰的情况下基本能保持稳定, 这种土壤呼吸空间格局的稳定性能够给量化特定时间内的区域土壤呼吸带来便利, 但是由于生长季和非生长季的各种环境因子之间发生明显的变化, 导致2个季节土壤呼吸空间变化上的关键影响因子有差异, 从而生长季和非生长季的土壤呼吸空间格局有明显变化。另外, 土壤呼吸空间格局经过环境因子的扰动(如经过火烧及干旱影响)后, 由于环境扰动会改变原有的土壤属性分布情况, 从而导致环境扰动会改变原有的土壤呼吸空间格局, 这给准确量化区域土壤呼吸带来了挑战。

目前有关降雨对土壤呼吸空间格局影响的研究不够全面, 降雨在生态系统中已经被揭露为一个能调控生物多样性和生态系统功能的重要因素^[35-36]。降雨不仅直接影响生态过程, 还能通过其他环境因子间复杂的相互作用间接影响^[37]。如降雨通过影响土壤温湿度等特性^[38], 凋落物的分解^[39]及地上生物量等^[40]能直接或通过相互作用来影响土壤呼吸。由于降雨对地上地下生态系统都有复杂的影响, 这给降雨直接对土壤呼吸空间格局的影响带来很多不确定性。特别对降雨事件频发且降雨强度大的热带和亚热带区域来说, 有关降雨对该地区休眠期土壤呼吸空间格局影响的研究仍不够全面, 由于休眠期大气温度较低, 降雨后蒸发量较小, 降雨对该时期土壤影响具有较长的时间持续性^[41], 并且休眠期土壤呼吸的二氧化碳排放量占全年总量的10%~

50%^[42],目前有关降雨对休眠期土壤呼吸空间格局影响的研究比较缺乏,研究降雨对区域土壤呼吸空间格局的影响是准确量化区域土壤呼吸的重要过程,能够提高土壤呼吸监测和评价的可靠性,对森林生态系统碳循环有重要意义。

参考文献

- [1] LI W B, YUAN F H. Research progress on spatial heterogeneity of soil respiration in forest ecosystem[J]. World forestry research, 2014, 27(2): 11-16.
- [2] WATSON R T, NOBLE I R, BOLIN B, et al. Land use, land-use change, and forestry: A special report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [3] LORENZ K, LAL R. Carbon sequestration in forest ecosystems[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [4] HURSH A, BALLANTYNE A, COOPER L, et al. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale[J]. Global change biology, 2017, 23(5): 2090-2103.
- [5] GOMEZ-CASANOVA N, ANDERSON-TELXEIRA K, ZERI M, et al. Gap filling strategies and error in estimating annual soil respiration[J]. Global change biology, 2013, 19(6): 1941-1952.
- [6] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.
- [7] FANG C, YE J S, GONG Y H, et al. Seasonal responses of soil respiration to warming and nitrogen addition in a semi-arid alfalfa-pasture of the Loess Plateau, China[J]. Sci Total Environ, 2016, 569/570: 1466-1477.
- [8] LI Y, CHEN G K, LIN D M, et al. Carbon storage and its distribution of forest ecosystems in Zhejiang Province, China[J]. Chinese journal of plant ecology, 2016, 40(4): 354-363.
- [9] CHEN C, HONG T, LIN Y M, et al. Spatial variation of soil respiration in a coastal protection forest in southeastern China[J]. J Soils Sediments, 2017, 17: 2284-2295.
- [10] LI W B, BAI Z, JIN C J, et al. The influence of tree species on small scale spatial heterogeneity of soil respiration in a temperate mixed forest[J]. Sci Total Environ, 2017, 590/591: 242-248.
- [11] ZHANG Y H, LI H J, RONG Y M, et al. Study on spatial heterogeneity of soil respiration in Taiyuan Basin[J]. Acta Ecol Sin, 2010, 30(23): 6606-6612.
- [12] BRÉCHET L, DANTEC V L, PONTON S, et al. Short-and long-term influence of litter quality and quantity on simulated heterotrophic soil respiration in a lowland tropical forest[J]. Ecosystems, 2017, 20(6): 1190-1204.
- [13] PACALDO R S, VOLK T A, BRIGGS R D, et al. Soil CO₂ effluxes, temporal and spatial variations, and root respiration in shrub willow biomass crops fields along a 19-year chronosequence as affected by regrowth and removal treatments[J]. GCB Bioenergy, 2014, 6(5): 488-498.
- [14] HUANG W J, LIU J X, HAN T F, et al. Different plant covers change soil respiration and its sources in subtropics[J]. Biology and fertility of soils, 2017, 53(4): 469-478.
- [15] SCOTT-DENTON L E, SPARKS K L, MONSON R K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest[J]. Soil biology & biochemistry, 2003, 35(4): 525-534.
- [16] YAN J X, LI H J, LI J J. Spatial heterogeneity of soil respiration in a conifer-broadleaf mixed forest in the Panguangou Nature Reserve Area[J]. Acta ecologica sinica, 2015, 35(24): 8184-8193.
- [17] HU J G, ZHOU J, ZHOU G M, et al. Improving estimations of spatial distribution of soil respiration using the bayesian maximum entropy algorithm and soil temperature as auxiliary data[J]. PloS one, 2015, 11(1): 1-19.
- [18] HU H Q, HU T X, SUN L. Spatial heterogeneity of soil respiration in a *Larix gmelinii* forest and the response to prescribed fire in the Greater Xing'an Mountains, China[J]. J For Res, 2016, 27(5): 1153-1162.
- [19] DORMANN C F, MCPHERSON J M, ARAUJO B M, et al. Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: A review[J]. Ecography, 2007, 30(5): 609-628.
- [20] LAVOIE M, MACK M C. Spatial heterogeneity of understory vegetation and soil in an Alaskan upland boreal forest fire chronosequence[J]. Biogeochemistry, 2012, 107(1/2/3): 227-239.
- [21] KOSUGI Y, MITANI T, ITOH M, et al. Spatial and temporal variation in soil respiration in a southeast Asian tropical rainforest[J]. Agricultural and forest meteorology, 2007, 147(1/2): 35-47.
- [22] FÓTI S, BALOGH J, NAGY Z, et al. Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland[J]. Geoderma, 2014, 213(1): 245-254.
- [23] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.
- [24] RAICH J W, POTTER C S, BHAGAWATI D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94[J]. Global change biology, 2002, 8(8): 800-812.
- [25] ARCHMILLER A A, SAMUELSON L J, LI Y R. Spatial variability of soil respiration in a 64-year-old longleaf pine forest[J]. Plant soil, 2016, 403(1): 419-435.
- [26] LA SCALA JR N, MARQUES JR J, PEREIRA G T, et al. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil[J]. Soil Biology & biochemistry, 2000, 32(10): 1459-1462.
- [27] SHI B K, GAO W F, CAI H Y, et al. Spatial variation of soil respiration is linked to the forest structure and soil parameters in an old-growth mixed broadleaved-Korean pine forest in northeastern China[J]. Plant soil, 2016, 400(1/2): 263-274.
- [28] LUAN J W, LIU S R, ZHU X L, et al. Roles of biotic and abiotic variables in determining spatial variation of soil respiration in secondary oak and planted pine forests[J]. Soil biology & biochemistry, 2012, 44(1): 143-150.
- [29] XU M, QI Y. 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.
- [30] 张涛, 罗雷, 雷杰, 等. 三峡库区马尾松林土壤呼吸的空间变异特征[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(1): 28-34.
- [31] HU H Q, HU T X, SUN L. Spatial heterogeneity of soil respiration in a *Larix gmelinii* forest and the response to prescribed fire in the Greater Xing'an Mountains, China[J]. J For Res, 2016, 27(5): 1153-1162.
- [32] NILSSON K S, HYVÖNEN R, AGREN G I. Using the continuous-quality theory to predict microbial biomass and soil organic carbon following organic amendments[J]. Eur J Soil Sci, 2005, 56(3): 397-406.
- [33] KOBZIAR L N, STEPHENS S L. The effects of fuels treatments on soil carbon respiration in a Sierra Nevada pine plantation[J]. Agricultural and forest meteorology, 2006, 141(2/3/4): 161-178.
- [34] MARTIN J G, BOLSTAD P V. Variation of soil respiration at three spatial scales: Components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape[J]. Soil biology & biochemistry, 2009, 41: 530-543.
- [35] ZHOU X H, TALLEY M, LUO Y Q. Biomass, litter, and soil respiration along a precipitation gradient in Southern Great Plains, USA[J]. Ecosystems, 2009, 12(8): 1369-1380.
- [36] EPSTEIN H E, LAUENROTH W K, BURKE I C, et al. Ecological responses of dominant grasses along two climatic gradients in the Great Plains of the United States[J]. J Veg Sci, 1996, 7(6): 777-788.
- [37] ZHANG B W, TAN X R, WANG S S, et al. Asymmetric sensitivity of ecosystem carbon and water processes in response to precipitation change in a semi-arid steppe[J]. Functional ecology, 2017, 31(6): 1301-1311.
- [38] DENG Q, ARAS S, YU C L, et al. Effects of precipitation changes on aboveground net primary production and soil respiration in a switchgrass field[J]. Agriculture, ecosystems and environment, 2017, 248: 29-37.
- [39] MCCULLEY R L, BURKE I C, NELSON J A, et al. Regional patterns in carbon cycling across the Great Plains of North America[J]. Ecosystems, 2005, 8: 106-121.
- [40] DERNER J D, HICKMAN K R, POLLEY H W. Decreasing precipitation variability does not elicit major aboveground biomass or plant diversity responses in a mesic rangeland[J]. Rangeland ecology and management, 2011, 64(4): 352-357.
- [41] LIANG L Y, PENG S L, SUN J M, et al. Estimation of annual potential evapotranspiration at regional scale based on the effect of moisture on soil respiration[J]. Ecological modelling, 2010, 221(22): 2668-2674.
- [42] SCHINDLBACHER A, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN A, GLATZEL G, et al. Winter soil respiration from an Austrian mountain forest[J]. Agricultural and forest meteorology, 2007, 146(3/4): 205-215.