

DOI: 10.5846/stxb201406131228

严俊霞,李洪建,李君剑.庞泉沟自然保护区针阔混交林土壤呼吸的空间异质性.生态学报,2015,35(24): - .

Yan J X, Li H J, Li J J. Studies on spatial heterogeneity of soil respiration in a conifer-broadleaf mixed forest in the Pangquangou Nature Reserve Area. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

庞泉沟自然保护区针阔混交林土壤呼吸的空间异质性

严俊霞,李洪建*,李君剑

山西大学黄土高原研究所,太原 30006

摘要:为研究土壤呼吸空间变异的影响因素,测定了山西省庞泉沟自然保护区针阔混交林地的土壤呼吸(R_s)及其影响因子,运用传统和地统计学的方法分析了 4 m、2 m 和 1 m 间隔取样尺度下 R_s 的空间变异性及其与影响因子之间的关系。传统统计分析表明:除土壤温度(T_{10})和碳/氮(C/N)比变异程度较小外,其他测定因子的变异系数在 15%—59%之间,均为中等变异; R_s 与凋落物量(L_w)、凋落物含水量(L_m)、土壤全碳(C)和全氮(N)呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤水分(W_s)呈显著正相关($P < 0.05$),与土壤温度(T_{10})呈极显著负相关($P < 0.01$),与 C/N 比和土壤全硫(S)相关性不显著($P > 0.05$)。多元逐步回归分析表明: L_w 、 T_{10} 、 N 和 C/N 比四个因子能解释土壤呼吸空间变化的 26%。地统计学分析表明, T_{10} 、 W_s 、 L_m 、 C 、 N 和 C/N 比具有较强的空间自相关性,结构因素对其空间分布起着主导作用; R_s 和 L_w 具有中等程度的空间自相关性,随机因素和结构因素对它们的空间分布起的作用相当; S 具有较弱的空间自相关性,随机因素对其空间变异起着主导作用。 R_s 及其影响因子在相同的尺度上起作用,基本上都在 17 m 左右。分维数是事物复杂程度的一种量度,各指标的分维数大小依次为: $L_w(1.87) > S(1.84) > L_m(1.82) > N(1.77) > R_s(1.74) > C(1.73) > W_s(1.69) > T_{10}(1.56) > C/N(1.46)$ 。 R_s 的空间分布模式与 W_s 、 L_m 、 L_w 、 C 、 N 和 S 的空间分布模式较为一致,而与 T_{10} 的空间分布模式不同。4 m、2 m 和 1 m 取样尺度 95% 置信水平误差在 5% 和 10% 内必要采样数量分别为 74、44、39 个和 19、11、10 个。

关键词:土壤呼吸;空间特征;半方差函数;针阔叶混交林;庞泉沟自然保护区

Studies on spatial heterogeneity of soil respiration in a conifer-broadleaf mixed forest in the Pangquangou Nature Reserve Area

YAN Junxia, LI Hongjian*, LI Junjian

Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: In order to understand the spatial variability of soil respiration and its influencing factors, soil respiration (R_s) and related factors including soil temperature at 10 cm depth (T_{10}), soil water content from 0 to 10 cm depth (W_s), litter fall mass (L_w), litter fall moisture (L_m), soil total carbon (C), soil total nitrogen (N), and soil sulfur (S) were determined at 4, 2, and 1 m sampling scales, in a conifer-broadleaf mixed forest in Pangquangou nature reserve area of Shanxi province. The goals of this investigation were to monitor R_s heterogeneities at the stand scale and determine the correlations between R_s and affecting factors. The results from traditional statistics indicated that coefficients of variation (CV) for most of the measured factors ranged between 15%—59%; T_{10} and C/N ratio were approximately 10%. The spatial variations of both T_{10} and C/N ratio had low variability ($CV \leq 10\%$), and the others had medium variability ($10\% \leq CV \leq 100\%$). The simple linear correlations observed between R_s and L_w , L_m , C , N , and T_{10} were all highly significant ($P < 0.01$); the correlation between R_s and W_s was significant ($P < 0.05$). However, no significant relationship between R_s and C/N ratio and S ($P > 0.05$) was observed. Stepwise multivariate regression demonstrated that the four factors of L_w , T_{10} , N ,

基金项目:国家自然科学基金项目(41201374);山西省基础研究项目(2014011032-1)

收稿日期:2014-06-13; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongli@sxu.edu.cn

and C/N ratio together accounted for 26% of R_s heterogeneity, with the equation $R_s = 11.972 + 0.033L_w - 0.267T_{10} + 8.058N - 0.390C/N$ ($R^2 = 0.26$, $P = 0.000$). Principal component analysis showed that the soil substrates of C and N , the environmental factors of T_{10} and L_m , and the biotic factor of L_w could account for more than 70% of the spatial variation in R_s . The results from the geo-statistical analysis showed that the environmental factors of T_{10} , W_s , L_m , C , N , and C/N ratio had a significant spatial autocorrelation, and that structural factors played a leading role in their heterogeneity. S had a weak spatial autocorrelation, showing a random factor acted on its heterogeneity. The range of the semi-variogram function was about 17 m for R_s and the influencing factors. Fractal dimension was used to measure the complexity of natural phenomena, and the rank for the selected factors was in the following order: L_w (1.87) > S (1.84) > L_m (1.82) > N (1.77) > R_s (1.74) > C (1.73) > W_s (1.69) > T_{10} (1.56) > C/N ratio (1.46). The spatial distribution model of R_s showed a similar pattern to that of W_s , L_m , L_w , C , N , and S , but not similar to that of T_{10} . The required sampling numbers of the R_s for 4, 2, and 1 m scales within $\pm 5\%$ and $\pm 10\%$ of its actual mean at the 95% confidence level were 74, 44, and 39, and 19, 11, and 10, respectively. This showed a decrease in the required sampling number coinciding with a decrease in the sampling scale; there was a similar trend in the estimation of accuracy. Our research results may have important applications in the study of CO_2 efflux in similar semiarid regions.

Key Words: soil respiration; spatial heterogeneity; semi-variance analysis; mixed forest; Pangquangou nature reserve area

陆地生态系统土壤呼吸是将土壤碳传输到大气的重要途径^[1],由于土壤中碳储量大约是大气碳储量的2倍^[2],土壤呼吸的微小变化都能引起大气 CO_2 浓度的显著变化^[3]。为此,土壤呼吸的精确测定是研究生态系统碳循环和地球温暖化的关键问题之一。研究表明,土壤呼吸具有较大的时空变异性^[3-5]。通常认为土壤温度和土壤水分是控制土壤呼吸季节变化的关键因子^[6-8]。然而,土壤温度和土壤水分并不能完全解释土壤呼吸的空间变化^[9]。Hanson 等^[10]认为地形是影响土壤呼吸空间变异的关键因子;Rayment 等^[8]对加拿大北方森林的研究也支持了这一观点,并且他们认为土壤呼吸的底物供应也是影响土壤呼吸空间变异的关键因子之一;一些研究也强调了冠层结构如根系生物量、凋落物量等对土壤呼吸空间变异的影响^[11-13];土壤微生物和蚁群也是影响土壤呼吸空间变异的影响因子之一^[14, 15]。从植株尺度到景观尺度土壤呼吸都存在明显的空间异质性^[16, 17],其驱动因子因实验设计和不同研究的目标不同而不同^[18]。因此准确估计一个生态系统土壤碳通量,尤其是自然条件异质性较大的生态系统,需要对土壤呼吸的异质性进行深入研究^[19]。忽视生态系统土壤呼吸的异质性可能低估或高估土壤 CO_2 释放量。

目前大多都是用传统的研究方法如变异系数、相关分析和回归分析研究土壤呼吸的空间变化。传统分析方法描述土壤特征的属性是通过曲线拟合的方式来实现的。由于受到独立性假设前提的限制,忽略了空间自相关的作用。随着地统计学在生态学研究中的广泛应用,使得研究土壤呼吸的空间异质性成为可能^[11, 20, 21]。研究表明,地统计学是研究土壤特征空间变异特征的较好方法^[22],能更好的适用于区域化变量空间分布特征的描述。地统计学方法不仅能够揭示属性变量在空间上的变异、分布和相关特征,而且可以将空间格局和生态过程相联系,解释空间格局对生态过程与功能的影响^[23-24]。山西庞泉沟自然保护区华北落叶松、云杉森林生态系统是黄土高原地区具有代表性的森林植物类群,此外,还有白榆、白桦、白杨等树种。本研究采用传统统计分析和地统计分析的方法,对庞泉沟自然保护区针阔混交林土壤呼吸的空间变异程度、空间变异结构参数及合理取样数量进行了分析,并对环境因子、土壤特性和生物因子与土壤呼吸空间变异的关系做了探讨,目的是更好地为复杂地形山区土壤呼吸的研究提供基础数据,为区域碳循环研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区及试验地概况

1.1.1 试验区概况

试验区位于山西省庞泉沟自然保护区内,地理位置 $37^{\circ}47'45''$ — $37^{\circ}55'50''N$, $111^{\circ}22'33''$ — $111^{\circ}32'22''$

E。保护区面积 10443 hm^2 , 森林覆盖率 74% 以上。区内气候属寒温性气候, 夏季凉爽多雨, 冬季寒冷干燥, 年均温 3—4 $^{\circ}\text{C}$, 7 月均温 16.1 $^{\circ}\text{C}$, 1 月均温 -10.6 $^{\circ}\text{C}$, 年降水量 600—800 mm, 雨量集中在 6—9 月, 相对湿度 56%, 无霜期 92 d, 日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 2100 $^{\circ}\text{C}$ 。区内自然条件地带变化明显, 从低海拔到高海拔土壤类型依次为褐土、山地褐土、山地淋溶褐土, 山地棕壤、亚高山草甸土; 植被从山麓到山顶依次为落叶阔叶林带 (1200—1750 m)、针阔叶混交林带 (1750—2200 m)、寒温性针叶林带 (2200—2600 m)、亚高山灌丛草甸带 (2600—2720 m)^[25]。

1.1.2 试验样地

试验样地位于汾河主要支流文峪河上游、庞泉沟自然保护区内。地理位置 37°53′08.4″N, 111°25′56.6″E。试验用林为天然次生的针阔叶混交林, 位于庞泉沟八道沟沟口, 林种以云杉 (*Picea asperata* Mast.) + 华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) + 桦树 (*Betula*) 为主, 海拔 1790—1795 m。平均胸径 (16.1 \pm 10.2) cm, 树高约 15 m, 林木密度 725 株/ hm^2 。土壤为山地棕壤。土层厚度 10—30 cm。试验区坡度 8—10 $^{\circ}$ 左右, 林下枯枝落叶层明显, 厚 2—4 cm, 腐殖质层厚 1—3 cm, 平均 (0.8 \pm 0.6) cm。林下植物有披针苔草 (*Carex lanceolata*)、中亚苔草 (*Carex stenophylloides*) 等植物。

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法

根据森林植被的分布特征, 在具有代表性的针阔叶混交林中, 选取地面相对平缓的区域作为研究区域。在该区域内选择面积为 20 m \times 16 m 的样地, 用分级网格嵌套布测定点。首先, 将 20 m \times 16 m 样地等距离间隔划分为 20 个 4 m \times 4 m 的网格, 以每个网格的顶点作为测量点和取样点, 共 30 个点。然后依次在上一级样方的基础上划分 2 m \times 2 m 和 1 m \times 1 m 的网格 (图 1)^[21]。样地内共布设不同尺度的取样点 102 个。对每个样点进行编号并记录每个样点的空间相对坐标值。

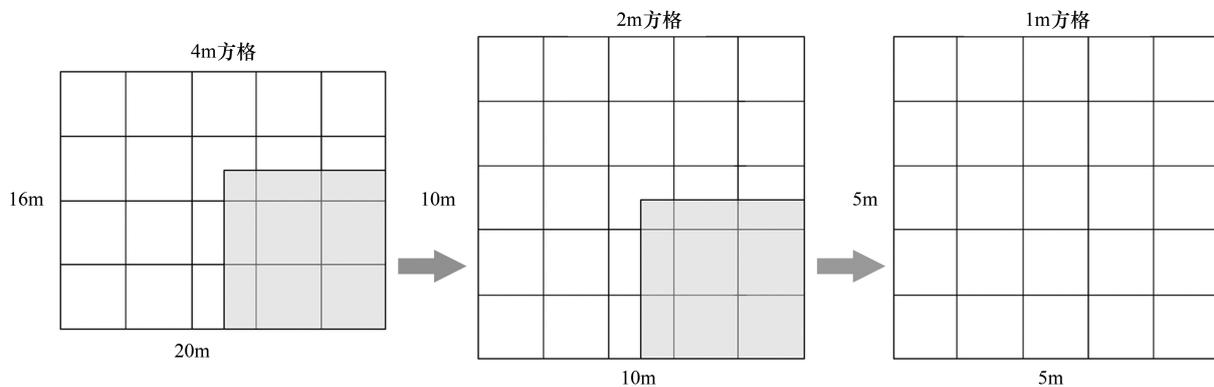


图 1 样点分布示意图

Fig. 1 Distributions of soil sampling points

1.2.2 土壤呼吸

用 LI-6400 便携式气体分析系统 (Li-cor, Lincoln, NE, USA) 和 LI-6400-09 土壤呼吸叶室测定土壤呼吸速率 (R_s)。在每个取样点提前一天各放置 1 个 PVC 环, 插入深度 3 cm 左右, 同时剪除 PVC 环内地表植被。测定于 2010 年 6 月 10 日早上 09:00 开始, 下午 15:00 结束。测定顺序依次为 4 m、2 m、1 m 网格的各样点。测定时, 将气室紧密扣合到 PVC 环上, 形成密闭气室。每个环测定 3 个循环, 取均值作为该测量点的土壤呼吸值。

1.2.3 环境因子测定

用 LI-6400 自带的土壤温度探针测定 10 cm 深度的土壤温度 (T_{10} , $^{\circ}\text{C}$); 0—10 cm 深度的土壤含水量 (W_s , %) 用土钻法测定。土壤呼吸测定完成后, 取 PVC 环内凋落物并称重, 65 $^{\circ}\text{C}$ 烘干后计算单位面积上的凋

落物量(L_w , t/hm²)和含水率(L_m , %)。用土钻取 PVC 环中 0—10 cm 深度的土样,自然风干,用 vario MACRO cube 元素分析仪(德国)测定土壤全氮(N , %)、全碳(C , %)和全硫(S , %)。碳氮比(C/N) = 全碳/全氮。

1.3 数据处理与统计

1.3.1 经典统计

采用单样本柯尔莫哥洛夫-斯米洛夫(One-sample Kolomogorov-Semirnov, K-S)检验数据是否呈正态分布,如果实验数据不符合正态分布就需要对数据进行对数转换。检验时取显著性水平 $\alpha = 0.05$,若 $P_{K-S} > 0.05$,则认为数据服从正态分布。如果 $P_{K-S} < 0.05$ 则需要将数据经过对数转换后进一步进行地统计学分析。采用相关分析方法分析环境因子、土壤特性和生物因子与土壤呼吸速率的相关关系;采用逐步回归分析法构建土壤呼吸与其影响因子的复合模型;采用主成分分析提取影响土壤呼吸的主成分。上述分析均利用 SPSS 17.0 软件进行。

1.3.2 地统计学分析

用 GS + 7.0(Gamma Design Software, Inc.) 地统计学软件进行半方差函数模型拟合和参数计算;利用 Surfer 8.0(Golden Software, Inc.) 进行克里金(Kriging)插值,绘制土壤呼吸及其相关因子空间分布的等值线图。

2 结果与分析

2.1 传统统计分析

2.1.1 常规统计分析

除 T_{10} 和 C/N 在 3 个取样尺度(4 m、2 m、1 m,下同)上的空间变异属于弱变异性外($CV \leq 10\%$), R_s 及其它相关因子的空间变异均属于中等变异($10\% \leq CV \leq 100\%$)(表 1)。 L_m 和 S 的变异系数随着取样尺度的增大而减小,分别从 34%—29%和 49%—17%。 R_s 、 W_s 、 L_w 、 C 、 N 和 C/N 的变异程度均随着取样尺度的增大而增大,分别从 16%—22%、15%—29%、43%—58%、29%—59%、26%—47%和 5%—9%。 T_{10} 在 3 个取样尺度的空间变异系数相同为 10%。表明 R_s 、 W_s 、 L_w 、 C 、 N 和 C/N 在较大的取样尺度上空间变异较大,而 L_m 和 S 在较小的取样尺度上空间变异较大, T_{10} 的空间变异则不受尺度的影响。对数据进行正态分布检验结果表明, R_s 及其影响因子均符合正态分布($P_{K-S} > 0.05$),数据满足平稳假设,不需要进行对数转换就可以进行地统计学分析。

表 1 土壤呼吸及其影响因子的描述统计分析

Table 1 Descriptive statistics results of soil respiration and its influencing factors

指标 Index	尺度 Scale	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布型 Distribution
R_s / ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	4 m	6.39	1.41	22	-0.41	-0.23	正态
	2 m	6.75	1.13	17	-0.16	-0.17	正态
	1 m	6.73	1.05	16	0.63	-0.34	正态
$T_{10}/^\circ\text{C}$	4 m	10.91	1.05	10	1.48	3.67	正态
	2 m	11.33	1.12	10	0.58	-0.49	正态
	1 m	11.36	1.19	10	1.27	1.49	正态
$W_s/\%$	4 m	24.76	7.06	29	1.59	4.11	正态
	2 m	23.10	3.88	17	0.16	-1.37	正态
	1 m	21.39	3.18	15	0.43	0.41	正态
$L_w/(t/hm^2)$	4 m	26.22	15.08	58	0.28	-0.22	正态
	2 m	24.31	13.28	55	0.68	0.15	正态
	1 m	22.31	9.56	43	1.09	2.08	正态
$L_m/\%$	4 m	63.84	18.42	29	-0.44	-0.02	正态
	2 m	57.99	17.42	30	-0.54	0.36	正态
	1 m	38.73	13.16	34	-0.07	-1.02	正态

续表

指标 Index	尺度 Scale	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布型 Distribution
$C/\%$	4 m	2.80	1.64	59	3.18	13.62	正态
	2 m	2.28	0.92	40	1.25	2.06	正态
	1 m	1.95	0.56	29	0.62	-0.31	正态
$N/\%$	4 m	0.20	0.09	47	2.97	12.56	正态
	2 m	0.18	0.06	32	0.58	0.65	正态
	1 m	0.16	0.04	26	0.44	-0.48	正态
C/N	4 m	13.55	1.23	9	0.33	-0.28	正态
	2 m	12.55	1.18	9	0.79	0.30	正态
	1 m	12.47	0.68	5	-0.36	-0.88	正态
$S/\%$	4 m	0.034	0.006	17	-0.20	-1.04	正态
	2 m	0.034	0.014	39	1.68	2.47	正态
	1 m	0.034	0.016	49	2.54	8.35	正态

表中 R_s 、 T_{10} 、 W_s 、 L_w 、 L_m 、 C 、 N 、 C/N 比和 S 分别代表土壤呼吸 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、10 cm 深度的土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$)、土壤水分 (%)、凋落物量 (t/hm^2)、凋落物含水量 (%)、土壤全碳 (%)、全氮 (%)、全碳/全氮比和全硫 (%)。

2.1.2 简单相关分析

R_s 与 L_w 、 L_m 、 C 和 N 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 W_s 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 T_{10} 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 C/N 和 S 相关不显著 ($P > 0.05$), 表明在空间尺度上, 环境因子、生物因子和土壤底物供应共同影响着 R_s (表 2)。采用多元逐步回归方法对 R_s 和其相关因子进行拟合, 方程为: $R_s = 11.972 + 0.033L_w - 0.267T_{10} + 8.058N - 0.390C/N$ ($R^2 = 0.26$, $P = 0.000$), L_w 、 T_{10} 、 N 和 C/N 4 个因子能解释 R_s 空间变化的 26%。主成分分析结果表明, 代表土壤底物供应的主成分 1 (N 和 C) 能解释 R_s 空间变异的 40.56%, 代表环境因子的主成分 2 (T_{10} 和 L_m) 能解释 18.20%, 代表生物因子的主成分 3 (L_w) 能解释 11.38%, 3 个主成分累计能解释 R_s 变异的 70.14% (表 3)。

表 2 土壤呼吸及其影响因子之间的相关性矩阵¹⁾

Table 2 Correlation matrix of soil respiration and its influencing factors

因子 Factor	R_s	T_{10}	W_s	L_w	L_m	C	N	C/N	S
R_s	1								
T_{10}	-0.31**	1							
W_s	0.25*	-0.12	1						
L_w	0.34**	-0.19	0.21*	1					
L_m	0.26**	-0.45**	0.04	0.19	1				
C	0.27**	-0.22**	0.59**	0.22*	0.21*	1			
N	0.29**	-0.20*	0.57**	0.20*	0.19	0.99**	1		
C/N	0.12	-0.33**	0.38**	0.30**	0.37**	0.74**	0.65**	1	
S	0.08	0.18	0.30**	0.20*	-0.06	0.28**	0.31**	0.04	1

¹⁾ * 显著性水平 0.05; ** 显著性水平 0.01

2.2 空间变异特征分析

2.2.1 半方差函数分析

除 L_m 的理论模型为球状模型外, R_s 和其它影响因子的理论模型均为线性模型 (表 4)。块金值和基台值之比 ($C_0/(C_0+C)$) 反映了系统变量的空间自相关程度。

T_{10} 、 W_s 、 L_m 、 C 、 N 、 C/N 的 $C_0/(C_0+C)$ 值都低于 25%, 表明他们具有较强的空间自相关性, 随机因素引起的异质性较小, 空间异质性的变化主要由结构因素如气候、地形和土壤成土母质等自然因素引起的; R_s 和 L_w 的 $C_0/(C_0+C)$ 值都大于 25% 而小于 75%, 表明 R_s 和 L_w 具有中等程度的空间自相关性, 随机部分引起 R_s 和 L_w 的

空间异质性分别占 31% 和 38%, 结构因素占 69% 和 62%, 气候、地形、土壤等结构因素起着主导作用; S 的 $C_0/(C_0+C)$ 值为 75%, 表明 S 具有较弱的空间自相关性, 随机因素引起的 S 的空间变异较大。

变程是描述空间异质性尺度的有效参数, 它与观测尺度以及在取样尺度上影响土壤呼吸的各种生态过程相互作用有关^[26]。在变程之内, 变量具有空间自相关特性, 反之则空间自相关消失。因此, 变程提供了研究某种属性相似范围的一种测度。在本研究中, 除 L_m 外, R_s 和其相关因子的变程都在 17 m 左右, 差异不大(表 4), 表明影响 R_s 和其影响因子的生态过程尺度相同。根据半方差函数理论, 采样点的最大距离要小于空间自相关距离才适用于空间异质性分析。在本实验中, 最大取样间距为 4 m, 小于空间自相关距离, 因此本实验取样间距是合理的。

表 3 主成分分析结果

成分 Component	主成分 1 PCA1	主成分 2 PCA2	主成分 3 PCA3
特征值 Eigenvalues	3.65	1.64	1.02
差异百分率/% Percent	40.56	18.20	11.38
累计贡献率/% Cumulative percent	40.56	58.76	70.14
特征向量 Evigenvectors			
R_s	0.50	-0.45	0.45
T_{10}	-0.45	0.69	0.13
W_s	0.70	0.27	0.08
L_m	0.41	-0.60	-0.20
L_w	0.41	-0.24	0.68
C	0.91	0.27	-0.20
N	0.89	0.29	-0.18
C/N	0.80	-0.02	-0.27
S	0.34	0.57	0.40

表 4 土壤呼吸及其影响因子的变异函数模型及其参数

Table 4 The parameters of theoretical models for soil respiration and its influencing factors

指标 Parameter	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill	变程/m Range	决定系数/ (R^2)	离差平方和 Sum of Squares of Deviations
R_s	线性	0.77	2.45	0.31	16.84	0.99	2.84E-04
T_{10}	线性	0.001	1.63	0.001	16.84	0.96	0.04
W_s	线性	2.53	50.85	0.05	17.35	0.92	172.7
L_w	线性	88.70	233.08	0.38	17.35	0.75	5531
L_m	球形	55.00	446.40	0.12	8.92	0.88	39497
C	线性	0.27	1.27	0.21	17.35	0.95	0.04
N	线性	0.001	0.004	0.25	17.35	0.96	3.67E-07
C/N	线性	0.23	2.53	0.09	17.35	0.98	0.09
S	线性	0.0003	0.0004	0.75	17.35	0.80	1.66E-07

2.2.2 分维数分析

在半方差函数和空间自相关距离分析的基础上, 对 R_s 和其影响因子在各向同性和各向异性下的分维数进行了计算(表 5)。在各向同性下, 各指标的分维数大小依次为: $L_w(1.87) > S(1.84) > L_m(1.82) > N(1.77) > R_s(1.74) > C(1.73) > W_s(1.69) > T_{10}(1.56) > C/N(1.46)$ 。随着分维数的递减, 空间分布格局对尺度的依赖性下降, 也就是说, L_w 依赖于尺度的变异最小, 空间分布结构最复杂, 而 T_{10} 和 C/N 的空间分布格局最简单。

在各向异性下, R_s 在 0° 方向上的分维数最大为 1.99, 45° 方向次之为 1.82, 90° 和 135° 方向较小分别为 1.56 和 1.71, 可见 R_s 在 0° 和 45° 方向空间分布较为复杂。与 R_s 相反, T_{10} 在 0° 和 45° 方向上的分维数较小, 在 90° 和 135° 方向较大, 可见 T_{10} 的空间分布与 R_s 的空间分布并不一致。 W_s 在 0° 、 45° 和 135° 方向分维数较大, 与 R_s 的各向异性相一致。 L_w 在 0° 、 45° 、 90° 和 135° 方向上的分维数均较大, 说明在所有方向上 L_w 依赖尺度的变异最小, 空间分布格局最为复杂, 和同向性下一致。 C 和 N 在 0° 、 45° 、 90° 和 135° 方向上的分维数差异不是很大, 说明在所有方向上依赖尺度的变异较为一致。 L_m 和 C/N 在 90° 方向上的分维数小于 0° 、 45° 和 135° 方向上的分维数, 这表明 90° 方向上 L_m 和 C/N 分布较简单, 变异对尺度的依赖性较大, 与 R_s 的分布较为一致。

表 5 土壤呼吸及其影响因子的分维值

Table 5 Fractal dimension of soil respiration and its influencing factors

指标 Parameters	各向同性 Isotropic	各向异性 Anisotropy			
		0°	45°	90°	135°
R_s	1.74(0.99) ^{a)}	1.99(0.00)	1.82(0.97)	1.56(0.96)	1.71(0.92)
T_{10}	1.56(0.93)	1.18(0.99)	1.48(0.93)	1.78(0.69)	1.71(0.74)
W_s	1.69(0.82)	1.81(0.68)	1.75(0.72)	1.60(0.70)	1.77(0.70)
L_w	1.87(0.57)	1.90(0.20)	1.93(0.23)	1.94(0.29)	1.80(0.65)
L_m	1.82(0.62)	1.83(0.60)	1.86(0.30)	1.80(0.67)	1.86(0.43)
C	1.73(0.95)	1.68(0.95)	1.77(0.84)	1.81(0.75)	1.71(0.92)
N	1.77(0.96)	1.76(0.90)	1.79(0.91)	1.79(0.91)	1.80(0.91)
C/N	1.46(0.89)	1.71(0.58)	1.53(0.67)	1.33(0.73)	1.47(0.95)
S	1.84(0.70)	1.89(0.27)	1.56(0.67)	1.84(0.20)	1.80(0.55)

a): 括号中的数据代表决定系数(R^2)

2.2.3 空间分布格局

图 2 为用 Kriging 最优内插法对 R_s 和其影响因子进行插值, 将点状数据转换为面状数据, 绘制的测定区的等值线图, Kriging 各参数的设置参照表 4 的半方差函数模型参数。从等值线图可以看出, 测定区域东部的 R_s 速率较低, 而测定区域的西部和北部较高; T_{10} 的分布规律与 R_s 不同, 高值区在测定区域的南部, 而北部较低; W_s 的空间分布较为复杂, 具有明显的斑块分布特点, 但总体来看, 西部和北部较高, 东南较低; L_w 、 C 、 N 、 S 和 C/N 的空间分布模式较为接近, 西北角较高, 东南角较低。以上分析表明, R_s 的空间分布模式与 W_s 、 L_m 、 L_w 、 C 、 N 、 S 的空间分布模式较为一致, 而与 T_{10} 的空间分布模式不同。

2.3 合理采样数目的确定

采用科学的抽样方法是准确估算研究区土壤呼吸总量常用的方法之一。国内外土壤学专家确定土壤样本容量多采用下面的公式:

$$N = (T * CV)^2 / k^2 \quad (1)$$

式中, N 代表合理的样本容量, T 表示与显著性水平相对应的 t 分布的双侧分位数; CV 是样本变异系数; k 代表实验允许的误差^[27]。

表 6 不同置信水平与估计精度下必要采样数量

Table 6 Sample capacity under different confidence levels and estimated precisions

尺度/m Scale	95%置信水平估计精度			90%置信水平估计精度		
	Estimation accuracy at the 95% confidence level			Estimation accuracy at the 90% confidence level		
	95%	90%	85%	95%	90%	85%
4	74	19	8	52	13	6
2	44	11	5	31	8	4
1	39	10	4	28	7	3

由表 6 可知, 当估计误差相同时, 各个尺度必要采样数量随着置信水平降低而减少, 95% 置信水平必要的样本数量高于 90% 置信水平的; 当置信水平相同时, 估计误差越大, 必要样本容量越少; 在同一置信水平和同一估计误差下, 随着取样尺度的减小, 必要采样数量减少; 在同一尺度、同一置信水平下, 必要采样数量随着相对误差的不断增大而不断减少。4 m、2 m 和 1 m 各取样尺度在 95%、90% 置信水平时误差在 5% 内所需的采样数量分别为 74、44、39 和 52、31、28 个; 误差在 10% 内分别为 19、11、10 和 13、8、7 个; 误差在 15% 内分别为 8、5、4 和 6、4、3 个。

3 讨论

变异系数常被用来量化土壤呼吸的空间变异程度。Hanson 等^[10] 认为橡树林土壤呼吸的空间变异系数

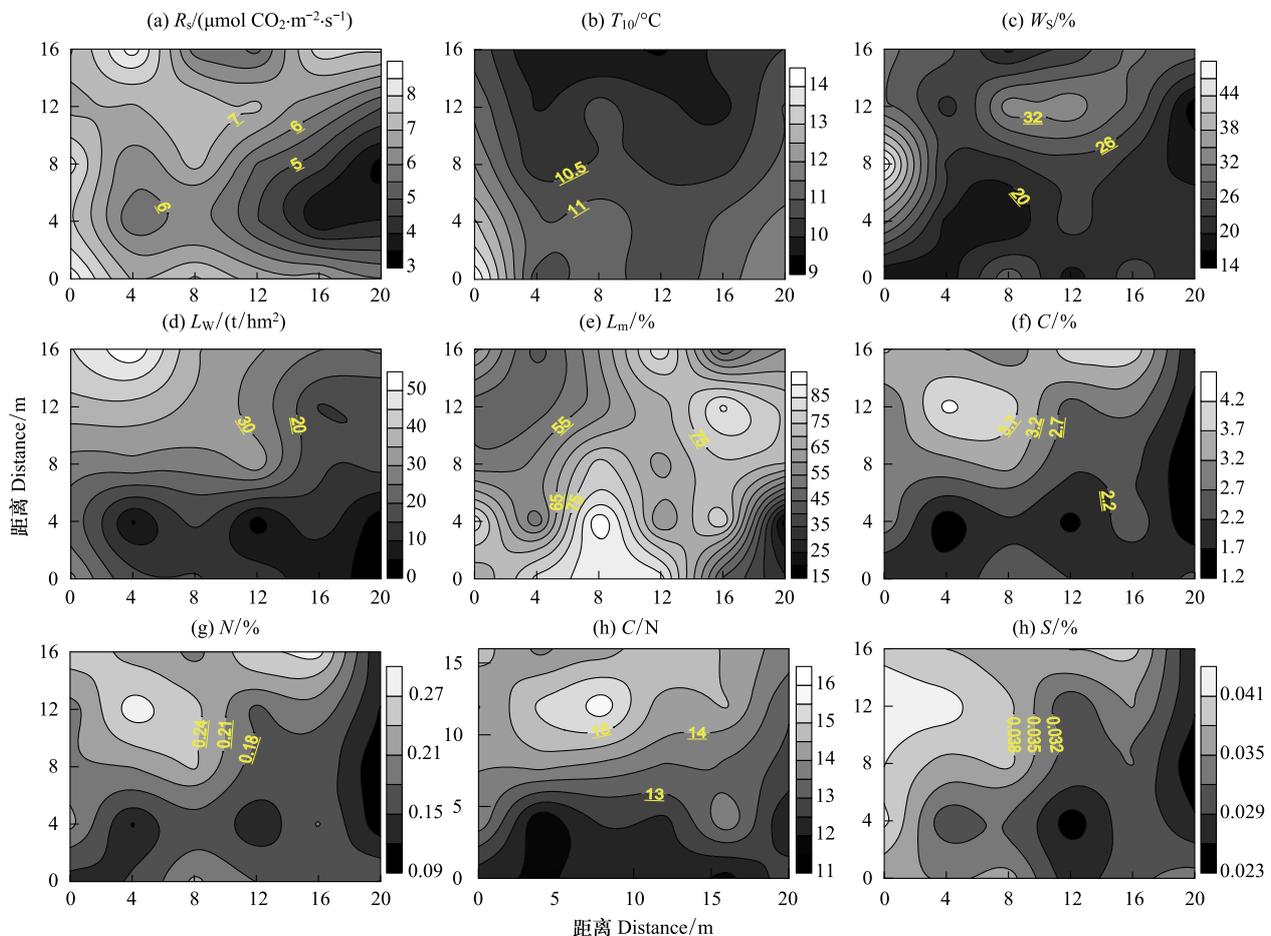


图2 土壤呼吸及其影响因子空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution maps of soil respiration rate and its influencing factors

在 28%—42% 之间; Xu 和 Qi^[15] 指出黄松人工林的变异系数在 30% 左右; Russell 和 Vorney^[28] 发现白桦林的变异系数在 16%—45% 之间; 闫美芳等^[29] 指出 2、7 和 12 年生杨树人工林的空间变异系数平均为 28.8%、22.4% 和 19.6%; Yim 等^[9] 发现日本一个落叶松人工林的变异系数为 28%, 认为空间变异系数与叶室覆盖的面积有关; Adachi 等^[30] 对马来西亚四种森林生态系统土壤呼吸研究后得出变异系数介于 40%—45%。总体而言, 森林生态系统土壤呼吸的空间变异系数在 20%—50%^[11]。另外, 也有研究报道土壤呼吸的空间变异程度随着取样间距的变化而变化, 如 Rayment 和 Jarvis 等^[8] 报道当取样尺度大于 1 m 时土壤呼吸的空间变异随着取样间距的增大而增大, 但增大的幅度并不大; Kosugi 等^[21] 采用分级网格嵌套布点对东南亚热带雨林 50 m×50 m 样地的研究表明, 土壤呼吸速率的空间变异随着采样尺度的增大而增大。本研究中土壤呼吸的变异系数随着取样尺度的增大而增大, 1 m、2 m 和 4 m 取样尺度上从 16%—22%, 位于报道的低值区, 可能与温带森林的样地结构比热带森林简单有关^[12]。

当尺度化上推或者模拟土壤呼吸的空间分布模式时了解影响土壤呼吸空间变异的影响因子和机理是重要的。大量的研究表明森林生态系统土壤呼吸的空间异质性与土壤碳氮含量密切相关^[6, 15, 31]。土壤中氮元素的不足会影响植物的光合作用, 其含量的变化会影响土壤微生物的活性, 进而影响土壤呼吸。氮的有效性也能影响细根生物量。当给温带木本植物添加大量的速效氮后细根生物量会急剧增加, 而添加无机氮后根冠比急剧降低^[32]。土壤有机质含量是微生物进行分解活动排放 CO₂ 的物质基础, 对土壤呼吸来说至关重要。微生物种群和土壤呼吸强度受到土壤中易分解有机质的影响, 当土壤中的有机质含量、根系生物量、微生物活性增加时, 其土壤呼吸速度就会显著增加^[33]。本研究中土壤呼吸与土壤全氮、全碳都呈极显著正相关 ($P <$

0.01)。温度、降水一方面直接影响土壤中根系和微生物的呼吸速率,另一方面通过影响植物、微生物生长以及土壤条件从而间接影响土壤呼吸。有报道指出土壤呼吸的空间变化与土壤水分呈正相关^[34]、与土壤温度呈负相关^[20, 35]。本研究中,土壤呼吸与凋落物含水量、土壤水分呈显著正相关($r = 0.26, P < 0.01; r = 0.25, P < 0.05$),与土壤温度呈极显著负相关($r = -0.31, P < 0.01$)。土壤温度和土壤呼吸呈负相关,可能是因为土壤水分通过对土壤温度的制冷效应从而间接影响土壤呼吸^[19, 20]。

土壤呼吸具有较高的空间变异性,通常需要较多的取样数量才能精确估计样地的土壤呼吸值。利用样本均值来代替样地土壤呼吸值可能会有很大的误差,只有选择合适的样本容量,才能比较准确地通过样本观察值来估计总体的相关参数。Yim 等^[9]认为在 95% 置信水平误差在 10% 和 20% 内估算日本落叶松人工林土壤呼吸的必要取样数量分别为 30 个和 8 个,并指出必要取样数量与叶室覆盖的面积和测定方法有关,较大的叶室需要较少的取样数量、较小的叶室需要较多的取样数量,利用碱液吸收法测定土壤呼吸时计算的必要取样数量低于实际需要的取样数量。Davidson 等^[36]报道了在同样的置信水平和误差下温带针阔混交林土壤呼吸的必要采样数量分别为 41 个和 10 个,认为必要采样数量与土壤呼吸的空间变异程度和叶室覆盖的面积有很大关系;Adachi 等^[30]对马来西亚四种森林生态系统研究后得出土壤呼吸的必要取样数目取决于土壤呼吸的空间变异程度,从 67—85 个和 17—21 个。本研究表明,3 个取样尺度 95%、90% 置信水平误差在 5%、10% 和 15% 内必要采样数量变化范围在 39—74 和 28—52、10—19 和 7—13、4—8 和 3—6 之间,低于上述研究所报道的必要采样数量,可能与样地的气候条件有关,本实验所观测的样地属寒温性气候,Adachi 等^[30]认为热带地区所需的采样数量高于温带地区的。

4 结论

通过对庞泉沟自然保护区针阔叶混交林地 3 个取样尺度下(间隔 1 m、2 m 和 4 m) 102 个采样点的 R_s 测定表明, R_s 的变异程度随着取样尺度的增大而增大,变异系数在 16% — 22% 之间; R_s 与 L_w 、 L_m 、 C 和 N 呈极显著正相关($P < 0.01$),与 W_s 呈显著正相关($P < 0.05$),与 T_{10} 呈极显著负相关($P < 0.01$),与 C/N 和 S 相关不显著($P > 0.05$)。 R_s 及其相关因子在相同的尺度上起作用,基本上都在 17 m 左右。该样地 R_s 在 4 m、2 m 和 1 m 取样尺度、95% 置信水平误差在 5% 和 10% 内所需的采样数量分别为 74、44、39 个和 19、11、10 个。

参考文献 (References):

- [1] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems-recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 141-153.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [3] Boriken W, Xu Y J, Davidson E A, Beese F. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8(12): 1205-1216.
- [4] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} . *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 154-164.
- [5] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, Clark K L. Soil CO_2 efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 1998, 205(2): 135-146.
- [6] Davidson E, Belk E, Boone R 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(2): 217-227.
- [7] Raich J, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [8] Rayment M, Jarvis P. Temporal and spatial variation of soil CO_2 efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(1): 35-45.
- [9] Yim M H, Joo S J, Shutou K, Nakane K. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175(1/3): 585-588.
- [10] Hanson P J, Wullschlegel S D, Bohlman S A, Todd D E. Seasonal and topographic patterns of forest floor CO_2 efflux from an upland oak forest. *Tree Physiology*, 1993, 13(1): 1-15.

- [11] Song Q H, Tan Z H, Zhang Y P, Cao M, Sha L Q, Tang Y, Liang N S, Schaefer D, Zhao J F, Zhao J B, Zhang X, Yu L, Deng X B. Spatial heterogeneity of soil respiration in a seasonal rainforest with complex terrain. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2013, 6(2): 65-72.
- [12] Luan J W, Liu S R, Zhu X L, Wang J X, Liu K. Roles of biotic and abiotic variables in determining spatial variation of soil respiration in secondary oak and planted pine forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44(1): 143-150.
- [13] Katayama A, Kume T, Komatsu H, Ohashi M, Nakagawa M, Yamashita M, Otsuki K, Suzuki M, Kumagai T. Effect of forest structure on the spatial variation in soil respiration in a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(10): 1666-1673.
- [14] Ohashi M, Kume T, Yamane S, Suzuki M. Hot spots of soil respiration in an Asian tropical rainforest. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(8): L08705, doi: 10.1029/2007GL029587.
- [15] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [16] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 杨扬, 刘景利, 史奎桥. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献. *生态学报*, 2007, 27(12): 5254-5261.
- [17] 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. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 530-543.
- [18] Adachi M, Ishida A, Bunyavejchewin S, Okuda T, Koizumi H. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. *Journal of Tropical Ecology*, 2009, 25(5): 531-539.
- [19] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(3): 199-209.
- [20] Fóti S, Balogh J, Nagy Z, Herbst M, Pintér K, Péli E, Koncz P, Bartha S. Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland. *Geoderma*, 2014, 213: 245-254.
- [21] Kosugi Y, Mitani T, Itoh M, Noguchi S, Tani M, Matsuo N, Takanashi S, Ohkubo S, Rahim Nik A. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(1-2): 35-47.
- [22] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(1/2): 20-37.
- [23] Hillel D. Research in soil physics: A re-view. *Soil Science*, 1991, 151(1): 30-34.
- [24] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 1999, 89(1-2): 1-45.
- [25] 马子清, 上官铁梁, 滕崇德. 山西植被. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 185-280.
- [26] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, 1985, 38(1): 45-94.
- [27] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(1): 106-112.
- [28] Russell C A, Voroney R P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest: I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 78(2): 301-310.
- [29] 闫美芳, 张新时, 周广胜. 不同树龄杨树(*Populus balsamifera*)人工林的土壤呼吸空间异质性. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1378-1384.
- [30] Adachi M, Bekku Y S, Konuma A, Kadir W R, Okuda T, Koizumi H. Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and of two types of plantation in Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 2005, 210(1): 455-459.
- [31] Sørensen A R, Buchmann N. Spatial and temporal variations in soil respiration in relation to stand structure and soil parameters in an unmanaged beech forest. *Tree Physiology*, 2005, 25(11): 1427-1436.
- [32] Rasse D P. Nitrogen deposition and atmospheric CO₂ interactions on fine root dynamics in temperate forests: a theoretical model analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(5): 486-503.
- [33] Bazzaz F A, Williams W E. Atmospheric CO₂ concentrations within a mixed forest: implications for seedling growth. *Ecology*, 1991, 72(1): 12-16.
- [34] Graf A, Herbst M, Weihermueller L, Huisman J A, Prolingheuer N, Bornemann L, Vereecken H. Analyzing spatiotemporal variability of heterotrophic soil respiration at the field scale using orthogonal functions. *Geoderma*, 2012, 181: 91-101.
- [35] Allaire S E, Lange S F, Lafond J A, Pelletier B, Cambouris A N, Dutilleul P. Multiscale spatial variability of CO₂ emissions and correlations with physico-chemical soil properties. *Geoderma*, 2012, 170: 251-260.
- [36] Davidson E, Savage K, Verchot L V, Navarro R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 21-37.