

三峡库区马尾松林土壤呼吸的空间变异特征

张涛^{1,2} 罗雷^{1,3} 雷杰² 宋秀丽² 王鹏程¹

1.华中农业大学园艺林学学院,武汉 430070; 2.恩施土家族苗族自治州林业调查规划设计院,恩施 445000;
3.湖北省林业调查规划设计院,武汉 430079

摘要 基于对三峡库区秭归县典型马尾松林样地土壤呼吸速率的测定,采用传统统计方法与地统计学方法,对样地尺度下土壤呼吸空间变异特征进行研究,并分析研究地土壤理化性质、微生物量、细根生物量等因子对土壤呼吸的空间异质性的影响。结果表明:三峡库区马尾松林土壤呼吸时间异质性明显,土壤温度是导致季节动态的主要因子。各季节土壤呼吸空间变异系数在32.6%~46.3%之间,属于中等变异。不同季节土壤呼吸均具有良好的空间自相关特征,并表现出明显的斑块分布格局,可由球状模型和指数模型拟合。在样地水平上,土壤速效氮含量、土壤孔隙度和细根生物量是导致土壤呼吸空间异质性的主导因子。

关键词 三峡库区; 马尾松林; 土壤呼吸; 空间变异; 地统计学方法

中图分类号 S 714; S 812.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)01-0028-07

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要生态过程,碳流通量每年高达 6.8×10^{10} t,其微小的变化就会导致大气CO₂浓度的急剧变化^[1]。土壤呼吸释放的CO₂主要来源于植物的根呼吸、土壤微生物和土壤动物呼吸以及土壤中非生物的化学氧化过程^[2],而且这些过程均与环境因子、土壤特性、植被覆盖等因素密切相关^[3-7],其中,土壤水热状况是土壤呼吸时间动态最主要的作用因子^[8]。由于土壤水热、植被生长和土壤微生物活性均存在显著的日变化和季节变化,因此,土壤呼吸通常表现出明显的时间变异特征^[2-4,9]。同时,影响土壤呼吸的因素,如土壤温湿度、植被分布、细根生物量、微生物种类和生物量等,在不同尺度的空间上均存在变异,导致土壤呼吸具有明显的空间变异特征^[10-14]。然而,研究表明,土壤呼吸的空间变异特征及其影响因子复杂,不同尺度下的研究结果间表现出明显差异^[15-16]。张义辉等^[17]研究表明,土壤水分的空间变化是产生土壤呼吸空间异质性的主导因子。Luan等^[18]发现栎林和松林的土壤呼吸的空间异质性来源于土壤有机碳、全N、容重、孔隙度、田间持水量、毛管孔隙度等土壤理化性质,与土壤温度无关;在生物素中,细根生物量、胸高断面积、测点4~5 m内的最大胸径和平均胸径对栎林的土壤呼吸有显著影响,但这些因

素与松林的土壤呼吸不相关。Shi等^[19]研究表明,森林土壤呼吸主要受土壤有机碳、碳氮比、林分平均径和测定周围的断面积有关。由此可见,目前对土壤呼吸空间变异特征研究还有限,土壤呼吸空间异质性的作用机制也没有形成较统一的认知。因此,有必要对不同尺度、不同生态系统类型的土壤呼吸空间异质性进行更多的研究,以期为准估算森林生态系统的碳汇潜力、揭示森林生态系统碳循环过程提供数据支持^[15,20]。相比于传统统计学分析方法,地统计学方法不仅能够反映土壤呼吸速率的空间变异特征以及与生态因子的作用规律,而且还可以通过联系生态过程和生态格局解释过程对格局和功能的影响。因此,地统计学方法被广泛应用于生态学研究^[19,21]。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方主要用材树种,也是我国南方地区生态建设的主要造林树种和先锋树种,分布范围广、面积大。三峡库区是我国生态建设重点区域,本研究选择三峡库区秭归县马尾松林开展不同季节的土壤呼吸速率、土壤理化及生物因子的监测,分析土壤呼吸空间变异特征及其影响因素和林分尺度上土壤呼吸空间变异特征,对揭示陆地生态系统碳循环机制具有重要的理论价值。

收稿日期: 2016-08-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD07B04); 国家自然科学基金项目(31570608)

张涛, 硕士. 研究方向: 森林生态学. E-mail: 283713339@qq.com

通信作者: 王鹏程, 博士, 副教授. 研究方向: 森林生态学. E-mail: pengchengwang@163.com

1 材料与方 法

1.1 研究样地概况

研究样地布设在三峡库区秭归县茅坪镇夔龙山 (E110° 58', N30° 49')。样地所在地年均气温 18.0℃, 年均日照时数 1 624.8 h, 无霜期 307 d, 年均大气相对湿度 77%, 年均降雨量 1 439 mm, 70% 以上的降水集中于 5—8 月。样地面积 2 000 m², 海拔为 305~330 m, 坡度 24°~28°, 植被为马尾松 (*Pinus massoniana*) 纯林, 林龄约 20 a。灌木层物种主要有红檵木 (*Loropetalum chinense*)、棕榈 (*Trachycarpus fortunei*)、商陆 (*Phytolacca acinosa*) 等; 草本层主要有兰草 (*Cymbidium faberi*)、苔草 (*Carex montana*)、求米草 (*Oplismenus undulatifolius*)、海金沙 (*Spora Lygodii*)、蕨类 (*Pteridophyta*)、鱼腥草 (*Houttuynia cordata*) 等。土壤种类为山地黄棕壤, 呈弱酸性。

1.2 试验方法

在密度一致的马尾松中龄林中按间距为 10 m 机械布设测定样点 30 个, 各样点安置 1 个直径为 20 cm 的 PVC 管。于 2011 年夏季 (7 月)、秋季 (10 月)、冬季 (12 月) 及 2012 年春季 (3 月) 相应的月初进行土壤呼吸测量。为避免温度日变化对土壤呼吸的干扰, 测量期间每天测量时间从 8:00 至 12:00。土壤呼吸速率由 LI-8100 土壤碳通量系统进行测量, 每个 PVC 管测量 3 次。同步利用仪器自带的土

壤温、湿度探头测量各点土壤温、湿度。用环刀取各测点土样测量其容重、孔隙度等, 用混合取样法取各点表层土壤样品, 带回实验室测量有机质含量、总氮、总磷、活性氮等化学性质及土壤微生物生物量; 用直径 10 cm 根钻取各样点 50 cm 深土样, 测量细根生物量。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 软件及 SPSS 17 软件进行数据正态检验与描述性统计分析、相关分析, 半变异函数分析及空间插值利用 GS+5.0 软件, 土壤呼吸等值线绘图选用 Surfer 10 软件。

2 结果与分析

2.1 各季节土壤呼吸描述性统计分析

表 1 为观测期各季节土壤呼吸描述性统计值。各季节中土壤呼吸速率最大达到 6.28 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最小为 0.25 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。土壤呼吸速率呈现明显的季节动态, 夏季显著高于其他季节, 其后依次为春季和秋季, 冬季显著低于其他季节。各季节土壤呼吸的空间变异系数 CV 处于 32.6%~46.3% 之间, 均属于中等变异。各季节间土壤湿度差异不显著, 而温度存在显著差异, 且温度与土壤呼吸速率呈显著正相关关系。单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验表明, 各季节样地土壤呼吸速率服从正态分布 ($P > 0.05$), 故测定数据进行地统计学分析前不需转换。

表 1 不同季节土壤呼吸描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistical analysis of soil respiration for different seasons

季节 Season	土壤呼吸速率/ $(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ Rate of soil respiration					温度/ $^{\circ}\text{C}$ ST	湿度/% SH
	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	变异系数 CV	分布型 Distribution pattern		
春季 Spring	3.27	0.93	1.890 \pm 0.616B	0.326	正态分布 Normal	18.2 \pm 0.57B	36.7 \pm 0.41
夏季 Summer	6.28	1.49	2.860 \pm 1.005A	0.351	正态分布 Normal	25.0 \pm 0.87A	35.3 \pm 2.70
秋季 Autumn	5.34	0.74	1.785 \pm 0.826B	0.463	正态分布 Normal	17.4 \pm 0.66A	37.6 \pm 4.84
冬季 Winter	2.07	0.25	0.815 \pm 0.326C	0.400	正态分布 Normal	9.4 \pm 0.35C	37.7 \pm 3.75

注: 同列不同大写字母表示在 0.01 水平差异显著。Note: Different capital letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.01$ level.

2.2 土壤呼吸半变异函数分析

选用指数模型、球状模型等多种半变异函数模型, 利用 GS+ for Windows 5.0 地统计学软件对各季节土壤呼吸速率进行拟合, 最终选择出决定系数大、残差小的模型用于土壤呼吸速率的模拟 (表 2)。

由表 2 可以看出, 土壤呼吸半变异函数模拟的决定系数 (R^2) 均较高, 除春季为 0.303 外, 其余季节均高于 0.680, 拟合残差 (RSS) 均很小, 介于 0.000 9~0.065 4 之间, 说明选用球状模型或指数模型可较好地拟合各季节土壤呼吸。

表 2 不同季节土壤呼吸半变异函数模型参数

Table 2 The parameters of theoretical models for soil respiration for different seasons

季节 Season	模型 Model	块金值 C_0 Nugget	基台值 C_0+C Sill	块金效应 $C_0/(C_0+C)$ Ratio of nugget to sill	变程 A/m Range	R^2	RSS
春季 Spring	指数模型 Exponential	0.328	0.657	0.499	101	0.303	0.006 4
夏季 Summer	球状模型 Spherical	0.425	1.420	0.299	101	0.750	0.065 4
秋季 Autumn	球状模型 Spherical	0.136	0.468	0.291	101	0.685	0.010 6
冬季 Winter	指数模型 Exponential	0.062	0.228	0.272	91	0.685	0.000 9

块金值(C_0)常用来描述由随机因素导致的空间变异,主要为测量误差和最小抽样尺度以下变量的变异性。基台值(C_0+C)表示研究对象变量总的空间变异程度。块金值和基台值之比 $C_0/(C_0+C)$,称为空间相关度,描述可度量空间自相关的变异所占的比例,即随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比[22]。由表 2 可知,除春季外,其余各季节土壤呼吸速率的块金效应都较小,说明在样地尺度上,马尾松林地土壤呼吸存在稳定的空间结构,随机因素产生的空间变异较小,结构因素如土壤理化性质、植被特征等稳定的环境因子对土壤呼吸空间异质性起着主导作用。春季土壤呼吸速率的块金效应较高,接近 50%,说明其他随机因素对土壤呼吸空间分布产生了较大影响。

2.3 空间自相关分析

自相关距离即变程(range)的生态学意义为在变程之内研究指标具有空间自相关特性,超过变程则空间自相关性消失[23]。表 2 结果显示,研究区域具有稳定的自相关距离,各季节土壤呼吸的变程值相近,冬季为 91 m,其余各季节为 101 m。

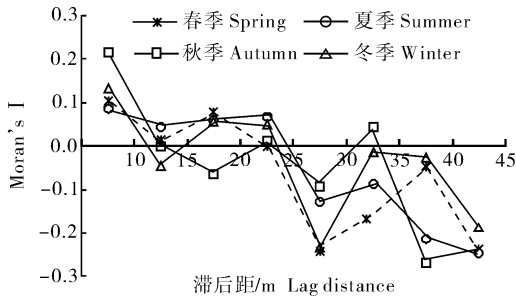


图 1 各季节土壤呼吸 Moran's I 系数

Fig.1 Moran's I of soil respiration for different seasons

Moran's I 系数也常用于描述研究变量的空间自相关关系。Moran's I 系数为正值时,表示研究变量存在空间正相关,为负值时即存在空间负相关,当 Moran's I 取值接近于 0 时,则研究变量为随机分布;同时,Moran's I 系数数值大小表示自相关性的强弱[24]。从图 1 可以看出,各季节土壤呼吸速率的 Moran's I 系数在 $-0.3 \sim 0.3$ 之间波动,且季

节间的空间自相关强弱变化不明显。Moran's I 系数随滞后距的增大而降低,数值由正值逐渐变为负值,表明在一定范围内土壤呼吸速率存在空间正相关,即较近距离的土壤呼吸速率变化较小;随距离增大则正相关关系逐渐减弱,超过一定距离后土壤呼吸则呈现随机分布;继续增加滞后距,土壤呼吸呈现空间负相关,并随滞后距增大逐渐加强。Moran's I 系数并非随滞后距增加单调递减,表明在样地水平上,土壤呼吸空间自相关尺度不明显,可能是存在的点状环境变异引起空间自相关性的局部变化。

2.4 各向异性分析

各向异性比描述研究变量各向异性的指标[25]。为降低坡度对研究结果的影响,各向异性比计算选择在样地 2 条对角线的方向(45° 和 135°)(图 2)。由图 2 可以看出,春季和夏季在所有尺度上 $K(h) > 1$,表明春季和夏季在 45° 方向上的土壤呼吸变异程度均大于 135° 方向上;而秋季和冬季在大多数尺度上 $K(h) < 1$,表明秋季和冬季在 135° 方向上的土壤呼吸变异程度大于 45° 方向上。同时, $K(h)$ 表现出明显的季节变化,从夏季到冬季逐渐降低,至次年春季回升,但低于夏季,表明马尾松林地土壤呼吸各向异性受一个或多个随季节变化明显的因子强烈影响。各季节土壤呼吸的各向异性比曲线波动明显,表明马尾松林地不仅存在土壤呼吸各向异性,且随尺度变化存在显著差异。

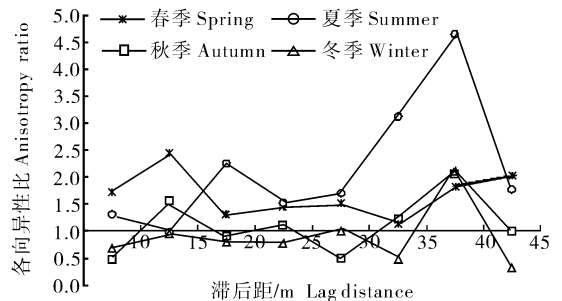


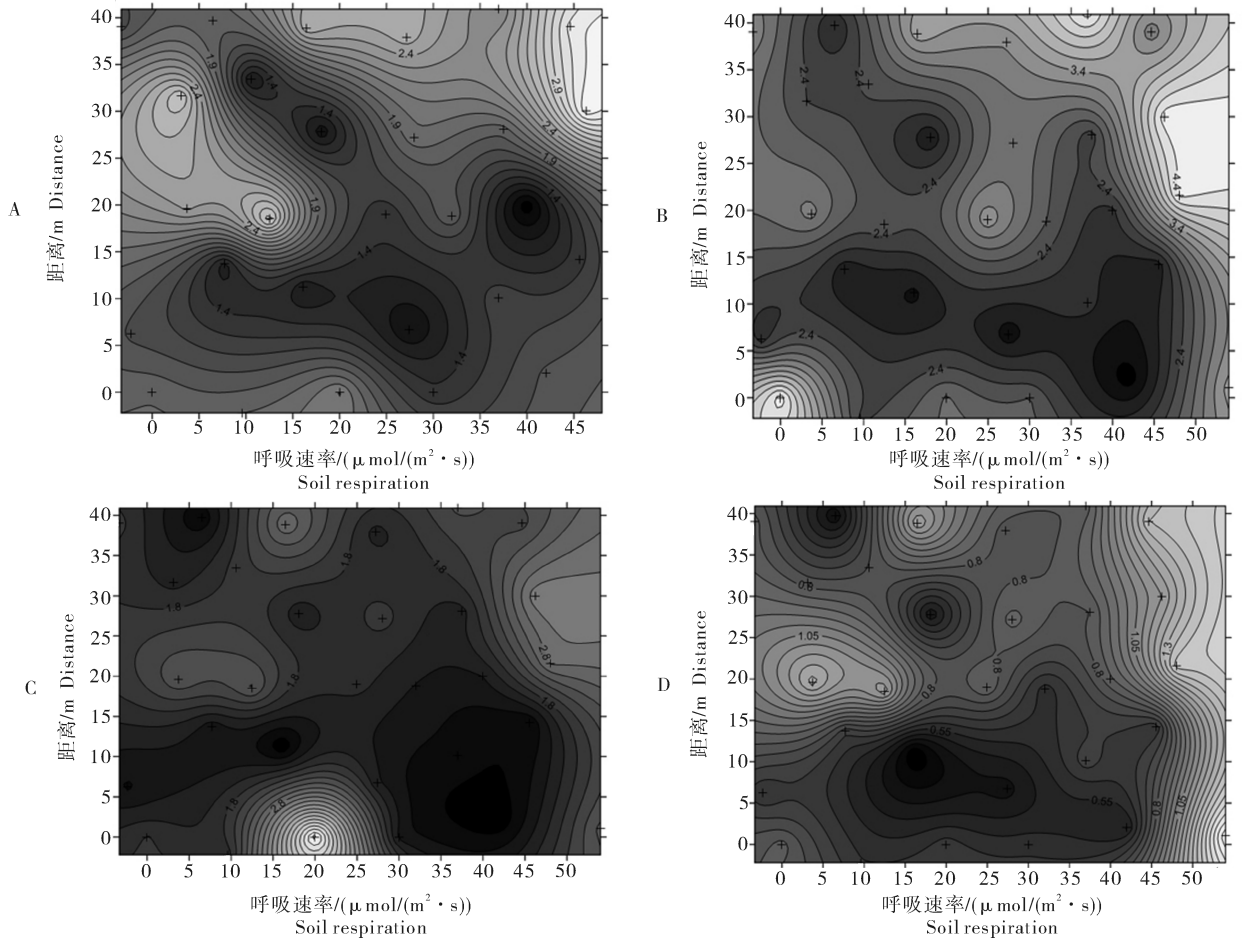
图 2 各季节土壤呼吸各向异性比

Fig.2 Ratio of anisotropic of soil respiration in different seasons

2.5 土壤呼吸空间格局分析

在半变异函数分析的基础上,选用 Kriging 最优内插法绘制出研究样地土壤呼吸的等值线图(图 3)。可以看出,各季节土壤呼吸速率均表现出明显的斑块分布格局,存在明显的高值区域和低值区

域。虽然不同季节间土壤呼吸速率的分布格局存在一定相似性,但局部还是存在明显差异,表明研究样地内控制土壤呼吸速率的主导因子在不同季节间保持相对稳定,同时,局部的环境因子变化也会导致土壤呼吸速率的波动。



A:春季 Spring; B.夏季 Summer; C.秋季 Autumn; D.冬季 Winter.

图 3 各季节土壤呼吸空间格局

Fig.3 Spatial distribution maps of soil respiration for different seasons

表 3 土壤总呼吸及其影响因子相关系数

Table 3 Correlation coefficient of soil respiration and environmental factors

类目 Items	土壤呼吸 SR	土壤温度 ST	土壤湿度 SH	微生物量 MB	细根生物量 FRB	速效氮 AN	土壤孔隙度 SP	总氮 TN	土壤有机碳 SOC
土壤呼吸 SR	1								
土壤温度 ST	-0.180	1							
土壤湿度 SH	-0.075	0.098	1						
微生物量 MB	0.143	-0.035	-0.180	1					
细根生物量 FRB	0.367 *	-0.122	-0.103	0.284	1				
速效氮 AN	0.525 **	-0.468 **	-0.082	0.090	0.000	1			
土壤孔隙度 SP	0.378 *	0.002	-0.150	0.507	0.183	0.250	1		
总氮 TN	0.255	0.015	-0.051	-0.168	0.046	-0.011	-0.227	1	
土壤有机碳 SOC	0.115	0.161	-0.490 *	-0.169	0.044	-0.175	0.057	0.665 **	1

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关。* and **, denote significant correlation at $P < 0.05$ or $P < 0.01$ level, respectively. SR: Soil respiration; ST: Soil temperature; SH: Soil humidity; MB: Microbial biomass; FRB: Fine roots biomass; AN: Available nitrogen; SP: Soil porosity; TN: Total nitrogen; SOC: Soil organic carbon.

2.6 土壤呼吸与环境因子的相关性

表 3 为各样点土壤理化性质与土壤呼吸速率的相关分析结果。结果表明,在林分尺度上,土壤呼吸在空间分布上与土壤温度、湿度之间不存在显著的相关关系,而与细根生物量与表层土壤总孔隙度之间存在显著的相关关系,与土壤速效 N 含量之间存在极显著的相关关系。

3 讨论

三峡库区马尾松林土壤呼吸存在明显的季节动态,夏季土壤呼吸速率最大,达到 $2.860 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,春季和秋季中等,分别为 1.890 、 $1.785 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冬季最小,仅为 $0.815 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,土壤温度是产生土壤呼吸的季节动态的主要原因。在林分尺度上,春、夏、秋、冬 4 个季节土壤呼吸存在中等空间变异,变异系数分别为 32.6%、35.1%、46.3%、40.0%。各季节土壤呼吸速率存在明显的空间自相关性,其斑块分布格局可由球状模型和指数模型模拟。样地局部细根生物量、土壤速效氮含量、土壤孔隙度等差异是产生土壤呼吸空间变异的主要因素。

在全球尺度上,气候、土壤和植被特征是影响土壤呼吸的主要因素,其中年均温、降雨量是影响土壤呼吸的主要因素,能解释绝大部分土壤呼吸变异^[6,9,15-16],主要因为在较大尺度上温度、降水存在较大的时空变异。在林分尺度上,温度随季节存在较大波动,从而导致土壤呼吸存在明显的时间异质性^[5-6,15,26]。本研究结果也证实降水和温度是产生土壤呼吸时间异质性的主要因子。土壤呼吸速率在不同季节存在显著差异,其中夏季土温最高、降水量大,土壤呼吸速率最大,冬季土温最低、土壤干燥,土壤呼吸速率最小。各季节小尺度内土壤温度相对均质,因此,对土壤呼吸空间变异性影响不大,这与很多在样地尺度上的研究结果一致^[5,10,19,26-28]。土壤含水量是通过影响土壤微生物量和酶活性而影响土壤呼吸速率,一般来说,土壤呼吸速率与土壤湿度呈现正相关关系^[6,15,19,29-30],但也出现相反的结论^[10,31],导致不同结论的原因主要为土壤湿度往往是通过影响土壤微生物的种类、生物量及其活性而作用于土壤呼吸,在干旱情况下,增加土壤湿度可以提升土壤的呼吸速率^[12],而过高的土壤含水量也可能使土壤呼吸受到抑制^[10,31]。本研究发现,土壤湿度与土壤呼吸间的相关性不显著,可能主要与研究

样地内土壤湿度存在季节性差异,但在相同季节内各测点间没有明显的空间异质性,这与一些样地尺度研究结果一致^[27,32]。

除温度、降水等气候因素外,生物因素如植被类型、叶面积指数、下木盖度、细根生物量、地上生物量等也是影响土壤呼吸的主要因素^[5-6,9,12,15,18-19]。本研究结果表明,马尾松林土壤呼吸与细根生物量显著相关,与前期多数研究结果一致^[9,12,18,28,33],但也有少量研究表明,林分尺度土壤呼吸空间异质性来源于土壤有机碳含量差异,与根系分布无关^[34]。

土壤理化性质也是产生土壤呼吸空间变异的主要因素^[12,15,18-19,26,29-30,32]。本研究发现马尾松林土壤呼吸速率与土壤总孔隙度显著相关,与 Luan 等^[18]和 Fiener 等^[32]的研究结果一致,表明土壤孔隙度高,利于土壤根系生长和促进微生物活动,提高土壤呼吸速率。本研究还表明土壤速效氮是影响土壤呼吸的另一个主导因子,土壤速效氮不仅能促进植物生长,同时还能加速凋落物的分解而提高呼吸速率,该结果与多数研究结果相同^[5,29,32]。

韩海燕等^[35]在附近样地的研究表明,土壤有机质分解贡献土壤呼吸 39%~65%,根系呼吸贡献 24%~37%。因此,林地局部根呼吸和土壤微生物呼吸空间变化产生土壤呼吸空间异质性的主要原因。本研究表明土壤细根生物量与土壤呼吸空间异质性呈显著相关关系,而土壤微生物量与土壤呼吸并不具有明显的相关关系,这说明土壤微生物量并没有成为土壤呼吸的限制因子,而细根生物量对土壤呼吸速率具有重要影响。

利用样地实测数据研究土壤呼吸预测模型是当前森林生态学研究的热点。目前用于模拟土壤呼吸的经验模型通常仅考虑温度、湿度等几个关键因素^[7,9,13],而忽略了生物因子对土壤呼吸的影响^[11,15,18-20]。因此,结合现代信息技术如遥感技术,构建多尺度、高精度土壤呼吸预测模型是当前森林生态学的重点发展方向之一。

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] BUCHMANN N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. *Soil biology and biochemistry*, 2000, 32(11): 1625-1635.
- [3] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associat-

- ed increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [4] SUBKE J A, VOKE N R, LERONNI V, et al. Dynamics and pathways of autotrophic and heterotrophic soil CO₂ efflux revealed by forest girdling[J]. *Journal of ecology*, 2011, 99(1): 186-193.
- [5] BORCHARD N, SCHIRRMANN M, VON-HEBEL C, et al. Spatio-temporal drivers of soil and ecosystem carbon fluxes at field scale in an upland grassland in Germany[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2015, 211: 84-93.
- [6] BOSSAA Y, DIEKKRÜGER B. Spatio-temporal variability of soil respiration in a spruce-dominated headwater catchment in western Germany [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11 (15): 4235-4249.
- [7] WRIGHT E L, BLACK C R, TURNER B L, et al. Environmental controls of temporal and spatial variability in CO₂ and CH₄ fluxes in a neotropical peatland [J]. *Global change biology*, 2013, 19(12): 3775-3789.
- [8] 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.
- [9] ARCHMILLER A A, SAMUELSON L J. Intra-annual variation of soil respiration across four heterogeneous longleaf pine forests in the southeastern United States [J]. *Forest ecology and management*, 2016, 359: 370-380.
- [10] ATKINS J W, EPSTEIN H E, WELSCH D L. Vegetation and elevation influence the timing and magnitude of soil CO₂ efflux in a humid, topographically complex watershed [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(10): 2975-2994.
- [11] FERRÉ C, CASTRIGNANÒ A, COMOLLI R. Assessment of multi-scale soil-plant interactions in a poplar plantation using geostatistical data fusion techniques; relationships to soil respiration [J]. *Plant and soil*, 2015, 390(1/2): 95-109.
- [12] ARCHMILLER A A, SAMUELSON L J, LI Y. Spatial variability of soil respiration in a 64-year-old longleaf pine forest [J]. *Plant and soil*, 2016, 403(1): 419-435.
- [13] WU W, TANG X P, GUO N J, et al. Spatiotemporal modeling of monthly soil temperature using artificial neural networks [J]. *Theoretical and applied climatology*, 2013, 113(3/4): 481-494.
- [14] FÓTI S, BALOGH J, HERBST M, et al. Meta-analysis of field scale spatial variability of grassland soil CO₂ efflux; interaction of biotic and abiotic drivers [J]. *Catena*, 2016, 143: 78-89.
- [15] CHEN S, ZOU J, HU Z, et al. Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: summary of available data [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2014, 198: 335-346.
- [16] BAHN M, REICHSTEIN M, DAVIDSON E A, et al. Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(7): 2147.
- [17] 张义辉, 李洪建, 荣燕美, 等. 太原盆地土壤呼吸的空间异质性 [J]. *生态学报*, 2010(23): 6606-6612.
- [18] LUAN J, LIU S, ZHU X, 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 and biochemistry*, 2012, 44(1): 143-150.
- [19] SHI B, JIN G. Variability of soil respiration at different spatial scales in temperate forests [J]. *Biology and fertility of soils*, 2016, 52(4): 561-571.
- [20] NGAO J, LONGDOZ B, GRANIER A, et al. Estimation of autotrophic and heterotrophic components of soil respiration by trenching is sensitive to corrections for root decomposition and changes in soil water content [J]. *Plant & soil*, 2007, 301(1/2): 99-110.
- [21] 章清, 张海涛, 郭龙, 等. 基于主成分分析的协同克里格插值模型对土壤铜含量的空间分布预测 [J]. *华中农业大学学报*, 2016, 35(1): 60-68.
- [22] 韩海燕, 张涛, 王鹏程, 等. 三峡库区兰陵溪小流域 3 种林分类型土壤呼吸特征 [J]. *林业科学*, 2014(11): 182-187.
- [23] LI H, REYNOLDS J F. On definition and quantification of heterogeneity [J]. *Oikos*, 1987, 73(2): 280-284.
- [24] TRANGMAR B B, YOST R S, UEHARA G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties [J]. *Advances in agronomy*, 1986, 38: 45-94.
- [25] 张海森, 宋向东, 邓建梅. 基于模型的 Moran's I 检验在信息软件业中的应用 [J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2008, 24(1): 66-68.
- [26] MERBOLD L, ZIEGLER W, MUKELABAI M M, et al. Spatial and temporal variation of CO₂ efflux along a disturbance gradient in a miombo woodland in Western Zambia [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(1): 147-164.
- [27] HERBST M, BORNEMANN L, GRAF A, et al. A geostatistical approach to the field-scale pattern of heterotrophic soil CO₂ emission using covariates [J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/2/3): 377-392.
- [28] SUCHEWABORIPONT V, ANDO M, IIMURA Y, et al. The effect of canopy structure on soil respiration in an old-growth beech-oak forest in central Japan [J]. *Ecological research*, 2015, 30(5): 867-877.
- [29] BUCZKO U, BACHMANN S, GROPP M, et al. Spatial variability at different scales and sampling requirements for in situ soil CO₂ efflux measurements on an arable soil [J]. *Catena*, 2015, 131: 46-55.
- [30] WANG Y, ZHU H, LI Y. Spatial heterogeneity of soil moisture, microbial biomass carbon and soil respiration at stand scale of an arid scrubland [J]. *Environmental earth sciences*, 2013, 70(7): 3217-3224.
- [31] CECCON C, PANZACCHI P, SCANDELLARI F, et al. Spatial and temporal effects of soil temperature and moisture and the relation to fine root density on root and soil respiration in a mature apple orchard [J]. *Plant and soil*, 2011, 342(1/2): 195-

- 206.
- [32] FIENER P, DLUGOß V, KORRES W, et al. Spatial variability of soil respiration in a small agricultural watershed—are patterns of soil redistribution important? [J]. *Catena*, 2012, 94: 3-16.
- [33] JURASINSKI G, JORDAN A, GLATZEL S. Mapping soil CO₂ efflux in an old-growth forest using regression kriging with estimated fine root biomass as ancillary data[J]. *Forest ecology and management*, 2012, 263: 101-113.
- [34] FERRÉA C, ZENONE T, COMOLLI R, et al. Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration in a semi-natural forest of Lombardy, Italy[J]. *Pedobiologia*, 2012, 55(6): 285-294.
- [35] 韩海燕, 曾立雄, 雷静品, 等. 三峡库区兰陵溪小流域 3 种林型土壤呼吸组分的量化[J]. *东北林业大学学报*, 2014(3): 73-76.

Spatial variability characteristics of soil respiration of *Pinus massoniana* forest in Three Gorges Reservoir Area

ZHANG Tao^{1,2} LUO Lei^{1,3} LEI Jie² SONG Xiuli² WANG Pengcheng¹

1. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Forest Inventory and Planning Institute of Enshi Autonomous Prefecture, Enshi 445000, China;
3. Forest Inventory and Planning Institute of Hubei Province, Wuhan 430079, China

Abstract Based on the continuous measurement of the soil respiration of typical *Pinus massoniana* forest in Zigui County of Three Gorges Reservoir Area, the spatial variation characteristics of soil respiration in sample scale was studied. The effects of factors including physical and chemical properties of soil, microbial biomass and fine root biomass on spatial heterogeneity of soil respiration were analyzed using geostatistics combining with the classic statistics. The results showed that soil respiration had an obvious seasonal dynamics due to the changes of soil temperature among different seasons. Soil respiration had a moderate variation in each season with a coefficient of variation between 32.6% and 46.3%. Soil respiration had a spatial autocorrelation characteristic and a clear patchy distribution, and could be described well by spherical model or exponential model. Spatial variation of soil respiration in the forest stand was controlled by the biomass of fine root, the porosity of the surface layer soil and the soil available nitrogen.

Keywords Three Gorges Reservoir Area; *Pinus massoniana* forest; soil respiration; spatial heterogeneity; geostatistics

(责任编辑: 陆文昌)