

doi:10.13866/j.azr.2014.06.22

荒漠生态系统土壤表层微生物量碳空间分布及其影响因子^①

管海英^{1,2}, 赵 鑫¹, 斯 佳^{1,2}, 张思楠^{1,2}, 徐 璐^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤微生物作为荒漠生态系统中的重要分解者, 对干旱区碳循环有着重要作用。以干旱区荒漠生态系统柽柳保护样地为对象, 利用统计学与地统计学中的空间自相关方法, 分析在自然状况下土壤微生物量碳及其影响因子之间的空间变异和响应特征, 探讨柽柳荒漠生态系统的土壤微生物量空间分布特征及其控制机理。结果表明: 土壤微生物量碳为 $14.1 \sim 1178.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 远小于其他生态系统; 空间分布表现出植被覆盖越密集, 土壤微生物量碳越大, 且全局空间分布为正相关趋势, 局部空间自相关指数 Moran's I 为 $-0.2 \sim 0.5$; 土壤微生物量碳与土壤环境因子中的土壤水分(W)、土壤温度(T)均呈显著正相关($P < 0.05$), 且空间相关系数分别为 0.56 和 0.64。这些结果说明荒漠生态系统中土壤微生物量碳表现出强烈的空间异质性, 且空间分布在 10 m 格网尺度(像元尺度)与植被覆盖度、温湿度显著相关, 这些将有助于加强对干旱区土壤碳库空间格局的理解, 从而制定更精细的土壤微生物量碳空间自相关的像元尺度。

关键词: 荒漠生态系统; 土壤微生物量碳; 空间分布; 柽柳; 地统计学

荒漠生态系统中 90% 的碳总量贮存在土壤中^[1], 土壤碳与大气层碳进行交换的主要途径为土壤呼吸^[2]; 而荒漠生态系统中因表层土壤水分缺乏, 荒漠植被根系扎入地下数米, 根系呼吸作用微弱^[3], 土壤微生物呼吸^[4]对干旱区碳循环起到关键作用。土壤微生物活动是在时空范围进行的, 有必要从时间动态变化以及空间分布着手了解土壤微生物活动特征。目前, 对土壤微生物量碳动态变化中的季节分布报道较多^[5-12], 而对其空间分布方面的报道则较少^[13-14]; 研究荒漠生态系统土壤微生物量碳的空间分布及其对土壤呼吸的影响, 对了解荒漠生态系统土壤呼吸的空间变化规律, 准确评估干旱区^[15]的碳收支和制定应对全球变化策略具有重要的意义。

在空间分布中, 空间依赖性是指研究对象属性值的相似性与其位置的相似性存在一致性^[16], 现阶段常用的空间统计分析方法有常规统计分析、空间自相关分析、回归分析、趋势分析等; 而空间自相关是空间依赖性的重要形式之一, 是指研究对象和其空间位置之间存在某种相关性, 且是检验某一要素

属性值是否与其相邻空间点上同一要素属性值相关联的重要指标^[17]。生态学研究中空间要素是其重要组成部分, 只有不忽视空间要素才能得到较好的结果和结论^[18-19]。随着地统计学在生态学中的广泛应用, 使得土壤微生物量碳的空间动态研究成为可能^[20-21]。土壤微生物几乎参与土壤中一切生物和生物化学反应, 是维持土壤品质的重要组成部分, 对土壤中的动植物残体和土壤有机质及其有害物质的分解、生物化学循环和土壤结构的形成过程起着重要的调节作用^[22]。所以, 土壤微生物量碳空间数据往往具有一定的空间相关性。且有研究表明, 土壤微生物量碳在多尺度上(从点到全球尺度)均表现出极高的空间变异性^[14,23]。农田生态系统中, 不同的土壤性质决定微生物种群的空间异质性^[23], 微生物群落动态表现出明显的空间分布^[24]; 在森林生态系统中, 不同海拔高度具有温带代表性的落叶阔叶林中, 土壤微生物量碳在不同空间尺度上存在极为明显的空间变异性^[14], 有研究表明, 不同林型通过改变凋落物的数量和组成影响土壤理化性质等, 进而影响土壤微生物的空间分布^[25]; 草原生态系统

① 收稿日期: 2014-05-07; 修订日期: 2014-07-08

基金项目: 国家基金委青年基金项目(41101249); 国家重大科学计划(2012CB956204)

作者简介: 管海英(1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱区土壤微生物生态学研究. E-mail: guanhaiying12@mails.gucas.ac.cn

通讯作者: 赵鑫. E-mail: zhao_xin_99@yahoo.com

中,土壤生物量碳呈明显的垂直空间格局,且随深度向下递减^[26~27]。

然而,干旱区荒漠生态系统微生物量碳研究较少,且多集中在时间序列中的季节动态上,空间分布特征研究较少。本文选取干旱区准噶尔盆地南缘荒漠生态系统,旨在探讨干旱区土壤微生物量碳的空间分布特征及其与影响因子之间的关系,并为了解干旱区荒漠生态系统的碳循环及其对气候变化的响应提供基础资料。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

研究区域为古尔班通古特沙漠南缘^[28~29],实验样地位于中国科学院新疆生态与地理研究所阜康荒漠生态观测站内柽柳保护样地(44°17'N, 87°56'E),平均海拔475 m,该地属于温带荒漠大陆性气候,夏季炎热,冬季寒冷,年平均降水量普遍不超过200 mm,年平均蒸发量在2 000 mm以上,年平均气温6~10 °C,年日照时数总量2 532.5 h^[30],地表植被以柽柳为代表性植物^[31],土壤类型为盐化灰漠土,土壤有机碳含量为1.20~10.90 mg·g⁻¹。

1.2 采样方法与样品分析

2013年11月,在阜康荒漠观测站内选取以柽柳为主的样地,设置一个平整样方(图1),将其划分成36个10 m×10 m网格,采样时在每个网格内随机采取4个样本,混合后代表该样方土样,共计36个样,每个样本取0~10 cm的表层土壤,同时,用TDR便携式土壤水分计(Delta-T Devices Ltd, Moisture Meter HH2)记录测得的土壤瞬时温度、湿度、土壤电容率、土壤电导率等土壤环境因子,记录植被信



6	7	18	19	30	31
5	8	17	20	29	32
4	9	16	21	28	33
3	10	15	22	27	34
2	11	14	23	26	35
1	12	13	24	25	36

图1 采样网格

Fig. 1 Sampling grid

息,并用手持GPS(Garmin China Shanghai RHQ Co., Ltd)定位,采集的土样迅速带回实验室,去除土壤中可见的杂质,过2 mm筛,混匀,置于4 °C的冰箱中,用于土壤微生物量碳的测定,测定前将土样预培养10 d,以消除土壤水分限制对微生物的影响。

土壤水分测定:把土样放在105~110 °C的烘箱中烘至恒重,则失去的质量为水分质量。

微生物量碳的测定采用熏蒸提取^[32]紫外比色法测定:将新鲜土壤含水量调整到饱和含水量的55%,25 °C恒温避光培养10 d并保持相对湿度为100%,放入一小杯1 mol·L⁻¹ NaOH溶液以吸收释放的CO₂;采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法:熏蒸完成后,取熏蒸和未熏蒸的土样转入塑料瓶中,按土水比例1:4加0.5 mol·L⁻¹的K₂SO₄溶液,振荡30 min后过滤,立即在280 nm紫外光下测定吸光度,否则将形成白色絮状物影响实验结果,熏蒸和未熏蒸作相同处理。用Nunan等^[33]中的方法计算微生物量碳:

$$SMBC = 21\,747 \cdot (\Delta/\delta) \quad (1)$$

式中:SMBC为土壤微生物量碳,其单位为μg·g⁻¹, Δ/δ 是单位土吸光度增量。

$$\Delta/\delta = (abs_{\text{熏}}/G_{\text{熏}}) - (abs_{\text{未}}/G_{\text{未}}) \quad (2)$$

式中: Δ 代表吸光度值; abs 代表280 nm紫外光下的吸光度; G 代表与所称土重相当的烘干土重。

1.3 数据处理

运用地统计学相关方法^[34~35]对数据进行处理:

1.3.1 样条函数插值(spline)并绘制等值线 使用样条函数对空间点进行插值,需符合两个基本条件:①表面必须完全通过样本点;②表面的二阶曲率是最小的。

1.3.2 空间自相关分析 空间自相关分析是生态学上常用的空间分析方法,主要用于度量某一变量是否存在空间依赖关系以及变量自身在较近的空间中是否有较强的关联^[36]。常用的空间自相关指标指数有Moran's *I*和Geary's *C*,本文选用Moran's *I*进行分析。Moran's *I*指数包括Global Moran's *I*和Local Moran's *I*,分别用来进行全局空间自相关与局部空间自相关分析^[34]。全局空间自相关分析Global Moran's *I*的模型计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (3)$$

式中: z_i 与 z_j 分别是要素 i 、 j 的属性与其平均值 $(x_i - \bar{X})$ 和 $(x_j - \bar{X})$ 的偏差; $w_{i,j}$ 是要素 i 和 j 之间的空间权重; n 等于要素总数; S_0 是所有空间权重的聚合, S_0 公式为:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (4)$$

空间自相关分析可以研究出地理因素随位置变化的梯度效应,可以发现地理分布规律为同质场还是异质场;可以发现观测路径异常。全局空间自相关中, I 的值介于 $(-1, 1)$ 之间;当 $I > 0$ 时,表示空间正相关,表明相邻空间单元具有相似的属性值;当 $I < 0$ 时,表示空间负相关,表明相邻空间单元的属性值呈此长彼消状态;Local Moran's I 可以看作是 Global Moran's I 的各区域分量,它反映了各区域的空间自相关对区域整体空间自相关的影响程度。

1.3.3 影响因子的空间相关分析 相关分析是研究两组变量之间相关关系的一种多元统计方法。它能够揭示出两组变量之间的内在联系,目的是识别并量化两组变量之间的联系,将两组变量相关关系的分析,转化为一组变量的线性组合与另一组变量线性组合之间的相关关系分析^[37]。空间相关分析是基于地理学第一定律,即空间上分布的不同事物是相互联系的,彼此间相互影响。用空间分析中的波段集统计对土壤微生物量碳与 5 种土壤因子进行相关分析,分析其相关系数及显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物量碳的空间分布

从图 2 可见,研究区域土壤微生物量碳为 $14.1 \sim 1178.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $278.9 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,标准差为 $281.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,经插值后土壤微生物量碳为 $-13.15 \sim 1694.06 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,图 2 每木调查中的一个完整图形为一棵柽柳树,闭合树形大小表示树的覆盖区域。结合土壤微生物量碳与树木的分布图可清楚看出,柽柳集聚区域的东北方向土壤微生物量碳较高,而柽柳分布稀疏的西南方向则土壤微生物量碳较低,土壤微生物量碳明显表现出强烈的空间异质性。

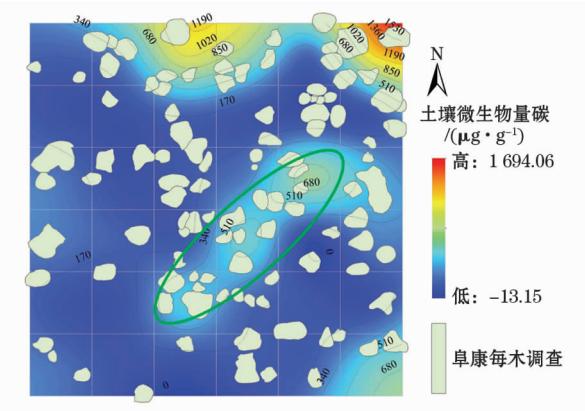
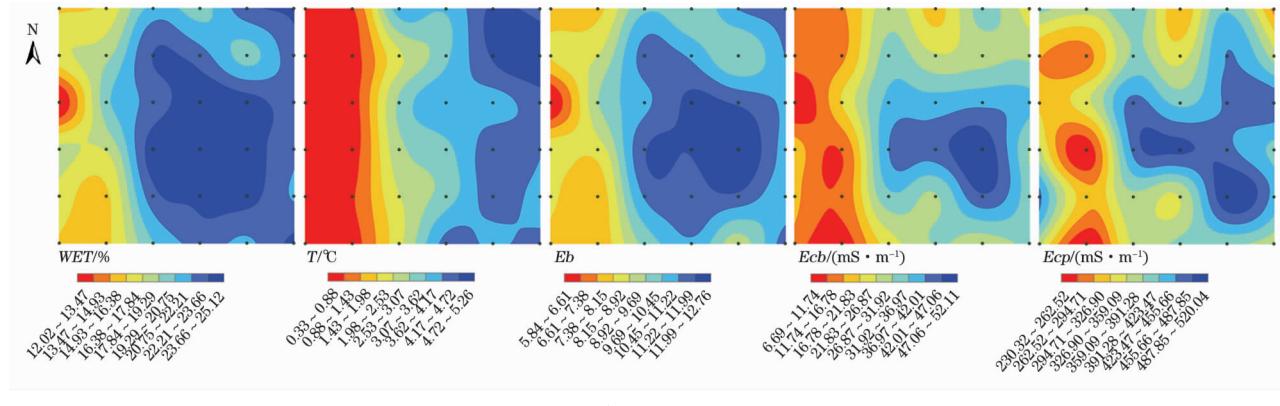


图 2 柽柳样地土壤微生物量碳及每木调查空间分布

Fig. 2 Spatial patterns of soil microbial biomass C and tree distribution of the *Tamarix chinensis* plot



字母所代表的含义见表 1。

图 3 柽柳样地土壤影响因子的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of influencing factors in the *Tamarix chinensis* plot

2.2 土壤影响因子的空间分布特征

由图 3 可见,数值由红色到蓝色递增。土壤水分为 $12.02\% \sim 25.02\%$,空间分布特征为中间区域湿度最大,而西边整个区域为低值区;土壤温度为

$0.33 \sim 5.26^\circ\text{C}$,空间分布大致表现出由西到东递增的趋势;土壤电容率为 $5.84 \sim 12.76$,表现出靠近东南方向值相对较高;土壤溶液导电率为 $6.69 \sim 52.11 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$;土壤毛细水导电率为 $230.32 \sim$

$520.04 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$, 土壤溶液导电率、土壤毛细水导电率均表现出向东方向逐渐增大的特征。比较这 5 种不同的土壤环境因子空间分布特征, 可看出基本遵循从西至东依次由低到高的变化规律, 对比图 2 的植被覆盖区域, 这 5 种在不同程度上显示出植被覆盖区明显呈现高值的特征。

2.3 土壤微生物量碳及其影响因子空间自相关分析

表 1 显示, 土壤微生物量碳及 5 种不同类别的影响因子在全局空间自相关上均为正相关, 为集聚分布, 表明相邻空间单元具有相似的属性值; 尽管土壤微生物量碳空间自相关指数为正值, 但其值较低 (0.14), 表明其未表现出显著正相关, 在选定的尺度下, 土壤微生物量碳不存在显著空间自相关性; 而 5 种土壤影响因子则均表现出强烈的空间自相关。

表 1 土壤微生物量碳及其与影响因子全局空间自相关

Tab. 1 Moran's *I* values of soil microbial biomass C and environmental factors

类别	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
土壤微生物量碳(SMBC)	0.14	<1.96	>0.05
土壤水分(<i>W</i>)	0.62	>1.96	<0.05
土壤温度(<i>T</i>)	0.80	>1.96	<0.05
土壤电容率(<i>Eb</i>)	0.60	>1.96	<0.05
土壤溶液导电率(<i>Ecb</i>)	0.66	>1.96	<0.05
土壤毛细水导电率(<i>Ecp</i>)	0.33	>1.96	<0.05

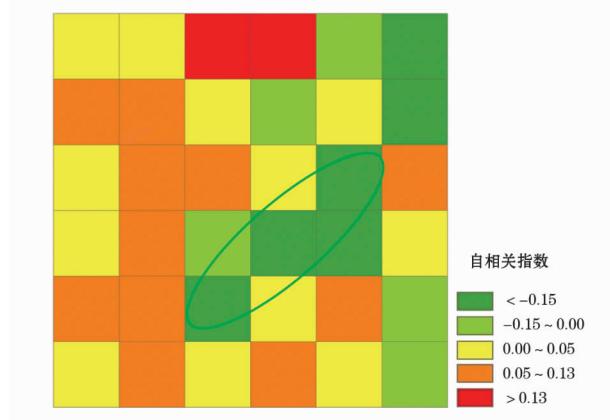


图 4 土壤微生物量碳局部空间自相关分析结果

Fig. 4 Local spatial autocorrelation results of soil microbial biomass

因每个区域的地表覆盖类型、土壤盐碱度和有机质含量等相对稳定的自然因素的不同, 造成每个区域之间 *I* 的差异。结合图 2 可清晰辨别出, 植被覆盖密集处 *I* 为负, 在空间上呈负相关, 与土壤微生物量碳中间出现较大值, 周围出现低值一致。而样地植被覆盖较稀疏的西侧 *I* 基本为正, 表现出空间

正相关。

2.4 土壤微生物量碳与影响因子的关系

土壤微生物量碳与影响因子的空间相关分析表明, 土壤微生物量碳与土壤水分(*W*)的相关系数为 0.56, 与土壤温度(*T*)间的相关系数为 0.64, 且与这两种影响因子显著相关($P < 0.05$); 而与土壤电容率(*Eb*)的相关系数为 0.46, 与土壤溶液导电率(*Ecb*)的相关系数为 0.42, 与土壤毛细水导电率(*Ecp*)的相关系数为 0.41, 这 3 种因子未表示出显著相关($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 空间分布特征

由土壤微生物量碳空间分布分析可知, 桤柳集聚区域土壤微生物量碳较高, 表现出植被稀疏区域土壤微生物量碳减少趋势, 与植被的空间结构关系很大^[38]; 且土壤微生物量碳未插值前为 $14.1 \sim 1178.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 远小于其他生态系统^[13,39]。因土壤微生物是土壤有机质和养分转化、循环的驱动力, 参与有机质的分解、腐殖质的形成等各个生化过程, 与土壤肥力密切相关^[22]; 在荒漠生态系统, 未被植被覆盖区域含盐量高于有植被覆盖区域, 而土壤盐分增加不利于土壤微生物量的积累^[40]; 植被越集中的地方土壤肥力越好, 即土壤微生物量碳与有机质含量显著相关^[33], 高含量有机质能够在微生物进行自身合成与代谢过程中提供足够的碳物质及能量来源。

土壤微生物在不同环境下变化剧烈, 在多尺度上(从点到全球尺度)表现出极高的空间变异性^[14,23]。本研究区域中土壤微生物量碳表现出强烈的空间变异, 虽在样方尺度的全局空间自相关中表现出土壤微生物集聚分布, 但并未在样方尺度表现出显著的全局空间自相关; 而土壤微生物量碳在样方尺度局部空间自相关中表现强烈。表明本实验中 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的样方尺寸下, 该样地的土壤微生物空间分布不存在显著的空间自相关性。

3.2 土壤微生物量碳空间分布的主要控制因子

土壤微生物量碳作为土壤有机碳中最活跃和最易变化的部分, 直接参与养分循环转化等生物化学过程, 同时, 又与土壤中 C、N、P、S 等元素的生物化学循环密切相关, 是反映土壤微生物活性强度及有机质分解过程的重要指标^[41], 能很好地反映出土壤状况。分析表明, 在空间上土壤微生物量碳与土壤

水分显示出显著($P < 0.05$)的相关性,与吴永胜等^[42]的土壤微生物与土壤水分密切相关一致。荒漠生态系统中,土壤含水量较低,而微生物进行一切生物化学反应都需要水的参与;同一地区,由于地形、地貌、地表覆盖不同土壤的水分含量也不同(图3),土壤水分表现出强烈的空间异质性。荒漠生态系统中,地表除植被覆盖外,同时还有生物结皮与裸地等不同覆盖类型;对比发现植被及生物结皮覆盖地表相对含水量较高,这为土壤微生物生长和繁殖创造了良好的条件,且其中的有些组分能通过光合作用合成碳水化合物,反过来能增加土壤中的有机质含量^[43],从而增强原本的地表覆盖类型,提高了涵养水分的能力。同样,温度作为微生物生命活动中不可缺少的一部分,在本试验中表现出与土壤微生物量碳在空间上相关系数为0.64的正相关关系($P < 0.05$),这与东北羊草草原土壤微生物量碳与土壤温度呈显著的线性正相关^[44]一致。

4 结论

干旱区荒漠生态系统土壤微生物量碳表现出较强的空间异质性,总体上表现出集聚分布:在植被覆盖密集区域土壤微生物量碳值较高,在植被稀疏区域较低。空间自相关分析结果表明,土壤微生物量碳在空间分布与邻近区域上具有一定相似性,但并未在选定的样方尺度呈现显著空间自相关。干旱区荒漠生态系统土壤微生物量碳不仅与土壤环境因子(土壤湿度和土壤温度)有显著相关性,更与地表覆盖植被分布密切相关。这是因为干旱区荒漠生态系统中,植被覆盖区域能很好地贮存有机质、涵养水分并给微生物提供适宜的生存环境,从而具有较高的土壤微生物量碳含量。本文研究结果将为了解土壤微生物量对土壤呼吸的空间影响及准确评估干旱区的碳收支空间格局提供基础资料。

参考文献(References):

- [1] 赵有益,龙瑞军,林慧龙,等.草地生态系统安全及其评价研究[J].草业学报,2008,17(2):143-150.[Zhao Youyi, Long Ruijun, Lin Huilong, et al. Study on pastoral ecosystem security and its assessment[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17 (2) : 143 - 150.]
- [2] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. Global Change Biology,1995,1(1):77-91.
- [3] Daniel L K,James A B,Gerry S E. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry,1998,30(7):961-968.
- [4] Hanson P J,Edwards N T,Garten C T,et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration:A review of methods and observations[J]. Biogeochemistry,2000,48(1):115-146.
- [5] 何容,王国兵,汪家社,等.武夷山不同海拔植被土壤微生物量的季节动态及主要影响因子[J].生态学杂志,2009,28(3):394-399.[He Rong,Wang Guobing,Wang Jiashe, et al. Seasonal variation and its main affecting factors of soil microbial biomass under different vegetations along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China[J]. Chinese Journal of Ecology,2009,28(3) : 394 - 399.]
- [6] 刘洋,张健,闫帮国,等.青藏高原东缘高山森林-苔原交错带土壤微生物生物量碳、氮和可培养微生物数量的季节动态[J].植物生态学报,2012,36(5):382-392.[Liu Yang,Zhang Jian,Yan Bangguo, et al. Seasonal dynamics in soil microbial biomass carbon and nitrogen and microbial quantity in a forest-alpine tundra ecotone,Eastern Qinghai-Tibetan Plateau,China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2012,36(5):382 - 392.]
- [7] 吴艺雪,杨效东,余广彬.两种热带雨林土壤微生物生物量碳季节动态及其影响因素[J].生态环境学报,2009,18(2):658-663.[Wu Yixue,Yang Xiaodong,Yu Guangbin. Seasonal fluctuation of soil microbial biomass carbon and its influence factors in two types of tropical rainforests [J]. Ecology and Environmental Sciences,2009,18(2):658 - 663.]
- [8] 张崇邦,施时迪.碱茅土壤微生物生物量季节动态模型的研究[J].中国草地,2001,23(4):48-58.[Zhang Chongbang,Shi Shidi. Study on the seasonal dynamic model of *Puccinellia tenuiflora* soil microbial biomass in northeastern China[J]. Grassland of China,2001,23(4):48 - 58.]
- [9] 曹成有,陈家模,邵建飞,等.科尔沁沙地四种固沙植物群落土壤微生物生物量及酶活性的季节动态[J].生态学杂志,2011,30(2):227-233.[Cao Chengyou, Chen Jiamo, Shao Jianfei, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities in four sand-fixation plantations on Horqin sandy land [J]. Chinese Journal of Ecology,2011,30(2):227 - 233.]
- [10] 王国兵,阮宏华,唐燕飞,等.北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态[J].应用生态学报,2008,19(1):37-42.[Wang Guobing,Ruan Honghua,Tang Yanfei, et al. Seasonal fluctuation of soil microbial biomass carbon in secondary oak forest and *Pinus taeda* plantation in north subtropical area of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(1):37 - 42.]
- [11] Grisi B,Grace C,Brookes P C,et al. Temperature effects on organic matter and microbial biomass dynamics in temperate and tropical soils[J]. Soil Biology and Biochemistry,1998,30(1):309-315.
- [12] 牛世全,杨婷婷,李君锋,等.盐碱土微生物功能群季节动态与土壤理化因子的关系[J].干旱区研究,2011,28(2):328-334.[Niu Shiquan, Yang Tingting, Li Junfeng, et al. Seasonal trends of microbial functional groups in saline-alkali soil and their relationship with soil physicochemical factors in the East Hexi Corridor[J]. Arid Zone Research,2011,28(2):328 - 334.]
- [13] 刘璐,宋同清,彭晚霞,等.木论喀斯特自然保护区土壤微生物

- 生物量的空间格局[J]. 生态学报,2012,32(1):207–214.
[Liu Lu,Song Tongqing,Peng Wanxia,et al. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,32(1):207–214.]
- [14] Zhao X,Wang Q,Yoshitaka K. Stand-scale spatial patterns of soil microbial biomass in natural cold-temperate beech forests along an elevation gradient [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 (7):1 466 – 1 474.
- [15] 韩芳,刘朋涛,牛建明,等.50 a 来内蒙古荒漠草原气候干燥度的空间分布及其演变特征[J]. 干旱区研究,2013,30(3):449–456. [Han Fang,Liu Pengtao,Niu Jianming,et al. Spatial distribution and evolution of climatic aridity in desert steppe in Inner Mongolia in recent 50 years[J]. *Arid Zone Research*,2013,30(3):449–456.]
- [16] Anselin L. A Companion to Theoretical Econometrics[M]. Texas: Blackwell Publishing Ltd,2001:310–330.
- [17] 吕韬,曹有辉.“时空接近”空间自相关模型构建及其应用:以长三角区域经济差异分析为例[J]. 地理研究,2010,29(2):351–360. [Lv Tao,Cao Youhui. Construction of spatial autocorrelation method of spatial-temporal proximity and its application: Taking regional economic disparity in the Yangtze River Delta as a case study[J]. *Geographical Research*,2010,29(2):351–360.]
- [18] Kuhn I. Incorporating spatial autocorrelation may invert observed patterns[J]. *Diversity and Distributions*,2007,13(1):66–69.
- [19] Legendre P,Fortin M. Spatial pattern and ecological analysis[J]. *Vegetatio*,1989,80(2):107–138.
- [20] Christien H E,Wardle D A. Spatial soil ecology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*,2002,17(4):177–183.
- [21] Smith J L,Halvorson J J,Harvey B J. Spatial relationships of soil microbial biomass and C and N mineralization in a semi-arid shrub-steppe ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26 (9):1 151 – 1 159.
- [22] 张利青,彭晚霞,宋同清,等. 云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量C、N、P空间分布[J]. 生态学报,2012,32(7):2 056 – 2 065. [Zhang Liqing,Peng Wanxia,Song Tongqing,et al. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon,nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,32(7):2 056 – 2 065.]
- [23] Franklin R B,Mills A L. Multi-scale variation in spatial heterogeneity for microbial community structure in an eastern Virginia agricultural field[J]. *FEMS Microbiology Ecology*,2003,44(3):335 – 346.
- [24] Brockman F J,Murray C J. Subsurface microbiological heterogeneity: Current knowledge, descriptive approaches and applications [J]. *FEMS Microbiology Reviews*,1997,20(3/4):231 – 247.
- [25] 刘爽,王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. 生态学报,2010,30(12):3 135 – 3 143. [Liu Shuang,Wang Chuankuan. Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2010,30(12):3 135 – 3 143.]
- [26] 杨婷婷. 荒漠草原生物量动态及碳储量空间分布研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013. [Yang Tingting. Study on Biomass Dynamics and Carbon Storage Distribution in Desert Steppe [D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2013.]
- [27] 马晓慧,胡东. 羊草草原土壤微生物量磷的空间异质性分析[J]. 首都师范大学学报:自然科学版,2008,29(1):61 – 66. [Ma Xiaohui,Hu Dong. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass phosphorus in *Leymus chinensis* community [J]. *Journal of Capital Normal University:Natural Science Edition*,2008,29(1):61 – 66.]
- [28] 蒋超,钱亦兵,杨海峰,等. 古尔班通古特沙漠南缘浅层风沙土含水量空间变异[J]. 干旱区研究,2009,26(4):519 – 525. [Jiang Chao,Qian Yibing,Yang Haifeng,et al. Spatial variation of moisture content in shallow aeolian sandy soil in the southern Marginal Zone of the Gurbantonggut Desert[J]. *Arid Zone Research*,2009,26(4):519 – 525.]
- [29] 谢继萍,钟文昭,黄刚,等. 准噶尔盆地南缘梭梭群落春季融雪期的土壤呼吸动态[J]. 干旱区研究,2013,30(3):430 – 437. [Xie Jiping,Zhong Wenzhao,Huang Gang,et al. Dynamic change of soil respiration in *Haloxylon ammodendron* community in southern edge of Junggar Basin in snowmelt season[J]. *Arid Zone Research*,2013,30(3):430 – 437.]
- [30] 郑新军,王勤学,刘冉,等. 准噶尔盆地东南缘盐生荒漠生态系统的凝结水输入[J]. 自然科学进展,2009,19(11):1 175 – 1 186. [Zheng Xinjun,Wang QinXue,Liu Ran,et al. The condensation of water input in southeastern salt desert ecosystem of Junggar Basin[J]. *Progress in Natural Science*,2009,19(11):1 175 – 1 186.]
- [31] 杨尧军,袁宏波,刘淑娟,等. 库姆塔格沙漠沙生柽柳种群与环境因子分析[J]. 干旱区研究,2013,30(5):827 – 831. [Yang Yaojun,Yuan Hongbo,Liu Shujuan,et al. *Tamarix taklamakanensis* populations and their environmental factors in the Kumtag Desert[J]. *Arid Zone Research*,2013,30(5):827 – 831.]
- [32] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社,2006:57 – 62. [Wu Jinshui,Lin Qimei,Huang Qiaoyun,et al. Measurements and Application of Soil Microbial Biomass[M]. Beijing: Meteorological Press,2006:57 – 62.]
- [33] Nunan N,Morgan M A,Herlihy M. Ultraviolet absorbance (280 nm) of compounds released from soil during chloroform fumigation as an estimate of the microbial biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,1998,30(12):1 599 – 1 603.
- [34] Arthur G,Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. *Geographical Analysis*,1992,24 (3):189 – 206.
- [35] Jose A F D,Luis M B,Hawkins B A. Spatial autocorrelation and red herrings in geographical ecology[J]. *Global Ecology and Biogeography*,2003,12(1):53 – 64.
- [36] 王强,戴九兰,付合才,等. 空间分析方法在微生物生态学研究中的应用[J]. 生态学报,2010,30 (2):439 – 446. [Wang Qiang,Dai Juilan,Fu Hecai,et al. The application of spatial analysis methods to microbial ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2010,30(2):439 – 446.]
- [37] 马超. 基于典型相关分析的遥感变化检测方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2013. [Ma Chao. Based on Canonical Correla-

- tion Analysis of Remote Sensing Change Detection Methods [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.]
- [38] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等.喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性[J].应用生态学报,2009,20(1):98-104. [Song Tongqing, Peng Wanxia, Zeng Fuping, et al. Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in Mulun National Natural Reserve in Karst area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1): 98 - 104.]
- [39] 杨凯,朱教君,张金鑫,等.不同林龄落叶松人工林土壤微生物量碳氮的季节变化[J].生态学报,2009,29(10):5 500 - 5 507. [Yang Kai, Zhu Jiaojun, Zhang Jinxin, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (10) : 5 500 - 5 507.]
- [40] 靳正忠,雷加强,徐新文,等.塔里木沙漠公路防护林土壤微生物生物量与土壤环境因子的关系[J].应用生态学报,2009,20(1):51-57. [Jin Zhengzhong, Lei Jiaqiang, Xu Xinwen, et al. Relationships of soil microbial biomass with soil environmental factors in Tarim Desert highway shelter-forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1): 51 - 57.]
- [41] 黄雪菊,王琴,孙辉,等.不同地表覆盖下低温季节对西南亚高山土壤微生物量碳动态的影响[J].山地学报,2012,30(5):543-549. [Huang Xueju, Wang Qin, Sun Hui, et al. Soil biomass carbon dynamics of subalpine forest in western Sichuan Province during the cold season [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30 (5) ; 543 - 549.]
- [42] 吴永胜,哈斯,李双权,等.毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮中微生物分布特征[J].生态学杂志,2010,29(8):1 624 - 1 628. [Wu Yongsheng, Ha Si, Li Shuangquan, et al. Distribution patterns of micro organisms in biological crusts on sand dunes of southern Mu Us sandy land [J]. Chinese Journal of Ecology 2010, 29 (8) : 1 624 - 1 628.]
- [43] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(2):128 - 135.
- [44] 吕秀华.东北羊草草原不同生境土壤微生物与土壤理化性质关系研究[D].长春:东北师范大学,2003. [Lv Xiuhua. Different Soil Habitats in Relation to Soil Physicochemical Properties in the *Leymus chinensis* Grassland in Northeast China [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2003.]

Spatial Patterns of Soil Microbial Biomass Carbon and Factors Influencing the Distribution in a Typical Desert Ecosystem

GUAN Hai-ying^{1,2}, ZHAO Xin¹, JIN Jia^{1,2}, ZHANG Si-nan^{1,2}, XU Lu^{1,2}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil microbes, as main decomposers in desert ecosystems, play an important role in the carbon (C) cycle in arid lands. Using the geostatistical spatial autocorrelation method, this study explored the spatial distribution patterns of the surface soil microbial biomass carbon in a selected *Tamarix chinensis* desert ecosystem, a typical desert ecosystem and further analyzed the environmental factors affected the distribution. The results showed that the microbial biomass C varied from 14.1 - 1 178.6 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ in the selected ecosystem, which was far more less than in the other ecosystem. The distribution presented as the higher the vegetation density, the larger the soil microbial biomass C. The soil microbial biomass exhibited a positive global spatial autocorrelation with its environmental factors and the local spatial autocorrelation Moran's I indexes varied from -0.2 to 0.5. The soil microbial biomass had a positive and significant relationship ($P < 0.05$) with soil moisture and soil temperature, with spatial correlation coefficients of 0.56 and 0.64, respectively. The results suggested that soil microbes in the desert ecosystem scale shows strong spatial heterogeneity and its distribution at 10 m level was heavily affected by vegetation density, soil moisture and soil temperature. This study would be in help to improve the understanding of the spatial distribution of soil carbon in arid lands and to define a finer spatial autocorrelation pixel scale accordingly.

Key words: desert ecosystem; soil microbial biomass C (SMBC); spatial variation; *Tamarix chinensis*; geostatistics