

DOI: 10.5846/stxb201212041747

吉雪花, 张元明, 周小兵, 吴林, 张静. 不同尺度苔藓结皮土壤性状的空间分布特征. 生态学报, 2014, 34(14): 4006-4016.

Ji X H, Zhang Y M, Zhou X B, Wu L, Zhang J. Spatial distribution of soil properties covered by moss crusts on different scales. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 4006-4016.

# 不同尺度苔藓结皮土壤性状的空间分布特征

吉雪花<sup>1</sup>, 张元明<sup>2,\*</sup>, 周小兵<sup>2</sup>, 吴林<sup>2</sup>, 张静<sup>2</sup>

(1. 新疆石河子大学, 石河子 832000; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830001)

**摘要:** 苔藓结皮是生物结皮的高级阶段, 它在防风固沙、改善土壤水分、养分等方面具有十分重要的生态作用, 但前期研究多是对结皮区和无结皮覆盖区土壤性状的比较, 对结皮斑块内土壤理化因子的空间分布情况尚不明确。运用经典统计学、地统计学以及克里格插值法探讨了土壤水分、有机质、全氮、全磷、总盐在样方和斑块两个尺度的空间变异特征, 旨在阐明不同尺度苔藓结皮土壤空间异质性的强度, 明确不同尺度土壤各性状合适的取样距离。研究结果表明苔藓结皮土壤性状在两种尺度均表现出中等程度的变异, 随着取样尺度减小, 自相关性在空间异质性中占的比重增加, 结构因素的影响增强, 随机因素的影响减弱。样方尺度的空间异质性大于斑块尺度异质性, 且土壤性状的变程较大, 采样时可适当增大取样间距; 两种尺度下 5 个土壤性状中, 全磷的变程最小, 实际取样时应适当缩小取样距离, 总盐变程大, 自相关程度低, 因而取样间距可适当放大。斑块尺度, 苔藓结皮土壤性状由边缘向中心递增(磷递减)的现象与斑块的边缘效应有关。

**关键词:** 苔藓结皮; 斑块; 尺度; 土壤性状; 空间分布

## Spatial distribution of soil properties covered by moss crusts on different scales

Ji Xuehua<sup>1</sup>, ZHANG Yuanming<sup>2,\*</sup>, ZHOU Xiaobing<sup>2</sup>, WU Lin<sup>2</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shezi University, Shihezi 832000, China

<sup>2</sup> Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830001, China

**Abstract:** Biological soil crusts are the organic complexes composed of bacteria, cyanobacteria, algae, lichen and moss with soil particles. They play critical roles in desert ecosystems, including enhancing soil stability and fertility, preventing soil erosion by water or wind, facilitating seed germination. Moss crust is the latest successional stage of biological soil crusts in arid and semiarid land, which perform important functions. Most of the studies focused on the difference of soil properties between moss crust and lack of moss crust. Generally, moss crust distributes in patches in interdune areas of sand dunes, it is a small scale. Little is known about its nutrients distribution at patch scale. The aims of this research are to (1) make sure the strength of soil heterogeneity for moss crust at both quadrature scale and patch scale; (2) support basic data for moss crust according to patch size. In this study, patch's area is calculated by Photoshop CS 5.0. Five soil physiochemical properties were analyzed with standard soil analytical methods. Classical statistics, geostatistic techniques, semivariogram model fitting and mapping methods were used to describe the spatial distribution of soil properties at both scales. The results indicated that there were medium variations for five soil properties of moss crusts at both scales. Coefficient variations of five properties at quadrature scale varied from 12% to 30%. With the exception of total phosphorus, most coefficient valuations of the other four properties at patch scale were less than 20%, which indicated the soil spatial heterogeneity of moss crust at quadrature scale is much stronger than that at patch scale. The spatial autocorrelation of five soil properties at quadrature scale ranged from 65% to 92%. For patch scale, except for total phosphorous, spatial autocorrelations of the other four parameters

**基金项目:** 国家自然科学基金(41361097); 国家重点基础研究发展计划(2014CB954202); 石河子大学高层次人(RCZX201315); 西部之光博士资助项目(XBBS201103)

**收稿日期:** 2012-12-04; **网络出版日期:** 2014-02-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangym@ms.xjb.ac.cn

were over 90%, which means, that the proportion of spatial autocorrelations of moss crust increase with the decreasing of sampling scale. Additionally, the effect of structure factors increased on patch scale with the decreasing proportion of the random factors, which was consistent with the result of spatial autocorrelation. In this study, values of soil water, organic matter and total nitrogen decreased from center of moss patch to edge, however, total phosphorus increased from center to edge at patch scale, which indicated that there was heterogeneity for moss crust patch at micro scale. There was irregular change for total soluble salt at patch scale, but at quadrature scale, total soluble salt content with mosses was much higher than that without mosses, which implied that with the decreasing of sampling scale, the heterogeneity of soil salt disappeared. The autocorrelation ranges of water, organic, total nitrogen and total phosphorus at patch scale were smaller than the diameter of the moss crusts patch, autocorrelation range of total soluble salt was out of patch size, on the whole, autocorrelation ranges increased with the sampling size. Thus, sampling distance can be increased at quadrature scale, but for patch scale, sampling distance should be reduced to avoid missing the tiny heterogeneity. At both scales, the lowest autocorrelation range of total phosphorus was observed. Therefore, the sampling distance must be short for variation of phosphorus, while for total salt, sampling distance can be increased properly due to its big variation range.

**Key Words:** moss crusts; patch; scale; soil properties; spatial distribution

空间异质性是植被格局形成的主要原因<sup>[1-2]</sup>,是一个依赖于尺度的生态学概念<sup>[3]</sup>,异质性的程度随着尺度的变化而改变<sup>[4]</sup>,同一变量,从某一尺度看可能是异质的,但缩小研究尺度到某一范围后,可能表现为均质<sup>[5-6]</sup>。一般情况下,随着取样点距离加大,随机因素在变异中的比重将会增加,小尺度下的异质性将被掩盖<sup>[7-8]</sup>,而多尺度的研究却可以弥补此缺陷,因此多尺度分析已经成为研究空间异质性的首要内容和手段。

土壤空间异质性是自然界中最常见一种空间异质性<sup>[9-10]</sup>,这种现象在有灌木的沙漠和草原生态系统中尤为典型<sup>[11]</sup>。与尺度相关的土壤空间异质性在灌木中得到了较高的重视,从根系<sup>[12]</sup>到个体<sup>[13-14]</sup>,从地貌<sup>[15-16]</sup>到区域<sup>[17-18]</sup>开展了全面而系统的研究。李从娟等<sup>[19]</sup>从根际、个体、种群、地貌和区域 5 个尺度对古尔班通古特沙漠土壤化学属性的空间异质性进行了研究,结果表明同一属性在不同研究尺度下表现出不同的空间变异程度,土壤 pH 值在各尺度异质性的顺序为:个体> 种群> 地貌> 区域> 根际,而土壤有机质、全氮则表现为个体尺度上最大,地貌尺度上次之,种群尺度上最小。吴乐知和蔡祖聪<sup>[20]</sup>在不同尺度对我国土壤有机质含量进行分析,结果表明随着取样空间尺度增大,土壤有机质的变异系数逐渐下降,即从县级的 50% 下降到省级的 40% 和大区级的 31%。沈海亮等<sup>[21]</sup>对宁夏野生甘草的分布进行研究,发现在较小的研究尺度上随机因

素对其分布格局起着重要作用,而在较大尺度上结构性因素则起到了控制作用。上述研究对空间异质性及尺度效应的探索和发展做出了很大的贡献,深化了对尺度与植被格局关系的认识。研究不同尺度土壤的空间异质性,有助于深入了解土壤性状在某一尺度空间异质性的强度和范围,明确不同生态学现象所对应的尺度以及某一生态现象的临界尺度,从而为实际操作中土样的采集提供理论依据。

大量研究证实苔藓结皮的存在能够改变土壤理化性质,增加表层土壤养分含量<sup>[22-23]</sup>。苔藓植物对水分高度敏感,在干旱半干旱区苔藓植物通常分布在阴湿、低洼地。在古尔班通古特沙漠苔藓结皮通常以大小不一的斑块分布在丘间低地,苔藓结皮的这种斑块状分布必然造成土壤性状的不均匀分布,导致空间异质性。目前有关结皮土壤性状空间异质性的研究多集中在结皮覆盖区与无结皮覆盖区养分含量的比较上,对结皮内部土壤性状空间异质性发生的强度、范围及其与尺度的关系尚缺乏研究。本研究以苔藓结皮斑块为例,在两种尺度上分析了苔藓结皮土壤性状的空间分布特征,旨在阐明苔藓结皮斑块土壤性状在空间上的变异强度和发生范围,为实际操作中苔藓结皮土壤取样提供理论依据和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠 (44° 15'— 46° 50' N, 84°

50'—91°20' E) 是中国面积最大的固定、半固定沙漠, 为典型的大陆性干旱气候, 年平均温度  $-5.7^{\circ}\text{C}$ , 极端最高气温  $40^{\circ}\text{C}$  以上, 极端最低气温低于  $-40^{\circ}\text{C}$ , 年降水量 80—160 mm, 年蒸发量 2000 mm, 干燥度 16 级以上, 空气相对湿度平均 50%—60%, 5—8 月份通常在 45% 以下。土壤肥力极为瘠薄, 沙丘表面植被覆盖度仅有 15%—50%, 主要植物种有白梭梭 (*Haloxylon persicum*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、蛇麻黄 (*Ephedra distachya*)、沙拐枣 (*Calligonum leucocladium*)、沙蒿 (*Artemisia arenaria*) 等耐旱植物。由于降水的季节分配较均匀, 使短命和类短命植物获得一定发育。除此之外, 沙漠地表还发育有良好的生物结皮, 苔藓结皮主要发生在丘间低地, 齿肋赤藓 (*Syntrichia caninervis*) 是其中的优势种<sup>[24]</sup>, 本研究中齿肋赤藓的纯度在 90% 以上, 其它苔藓种类见表 1<sup>[25]</sup>。研究区土壤为碱性沙壤土, pH 值 8.6, 容重  $1.36\text{ g/cm}^3$  (含 1.6%—1.7% 壤土, 13%—14% 细土和 85% 沙土, 沙土中细沙、中沙和极细沙分别占约 23%—29%, 粗沙含量约为 5%)。

表 1 古尔班通古特沙漠主要苔藓物种组成

Table 1 Common species composition of moss crust in the Gurbantunggurt Desert

平均厚度/cm Average thickness	常见种 Common species
2.2	齿肋赤藓 <i>Syntrichia caninervis</i> , 银叶真藓 <i>Bryum argenteum</i> , 绿色流苏藓 <i>Crassidium chloronotos</i> , 泛生墙藓 <i>Tortula muralis</i>

## 1.2 样品采集与分析

### 1.2.1 土样采集

本研究以表层土样 (0—10 cm) 为研究对象, 土样采集于 2010 年 5 月。为减少由于特殊立地条件引起的误差, 样方尺度和斑块尺度均设 3 个重复进行土壤采样, 文中数据均为 3 个重复的平均值。样方设在平坦低地, 大小为  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ , 样方内 50% 覆盖藓类结皮, 其它为裸地, 东西以 2.5 cm 为间隔, 南北以 5 cm 为间隔划分样方, 如图 1a 所示, 两线交错点为采样点, 共 171 个样点; 用铁铲切取土样, 每点土样重约 80 g。斑块尺度土样采集在  $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$  的样地内随机选取 3 个直径 4 cm 以上的藓类结皮斑块, 土样的采集以斑块中心为起点分别以半径 0.5 cm, 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm 和 6 cm 在东西南北四个方向取样, 取样深度 0—10 cm, 不规则斑块按照其在各方向上的长度取样 (图 1b), 本文中斑块 1、2、3 分别有 16、34、32 个取样点, 其它数据由克里格插值 (Kriging) 法获得。

### 1.2.2 土样理化特性分析

将采集好的土样在自然状态下风干后, 过 2 mm 筛。土壤 pH 值以土水比 1:5 的悬浊液采用酸度计 (pHS22C) 测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法 (LWY84B 型控温式铝体消煮炉); 全氮采用凯氏法, 高氯酸-硫酸消化法 (LWY84B 型控温式铝体消煮炉); 全磷采用酸溶-钼锑抗比色法 (LWY84B 型控温式铝体消煮炉)<sup>[26]</sup>; 水溶性总盐采用残渣烘干-重量法; 土壤水分含量-烘干称重法。

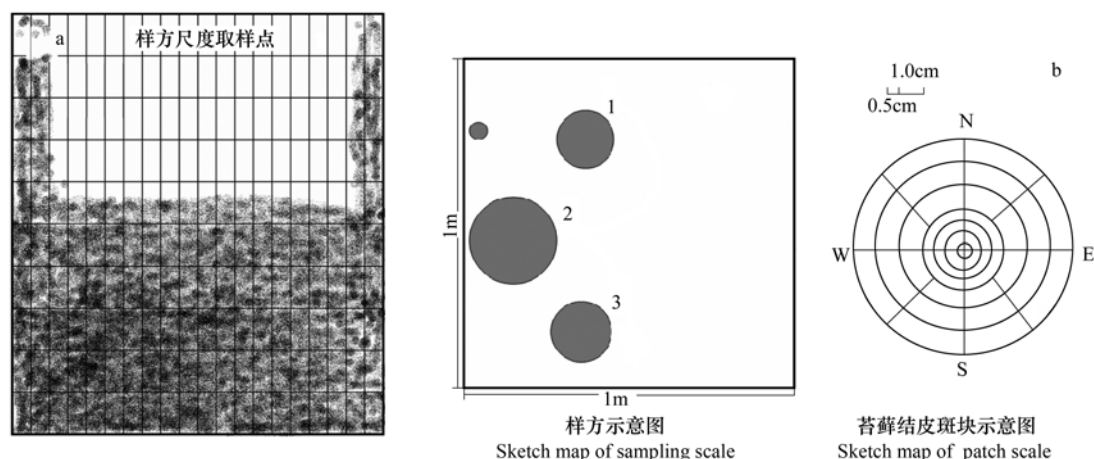


图 1 土壤采样

Fig.1 Soil sampling

(a) 图中黑色部分为结皮覆盖区, 空白部分为裸地; (b) 图中黑色圆代表苔藓结皮斑块, 空白区域代表裸地

### 1.3 数据处理

本文采用 SPSS 17.0 (IBM SPSS Statistics 17.0) 处理数据。采用 Excel 2003 制表,GS+ 5.0 绘图。

## 2 结果分析

### 2.1 苔藓结皮土壤性状空间异质性的统计特征

由统计分析可知,样方尺度 5 个土壤性状基本符合正态分布,满足地统计学分析的要求。标准差

反映了绝对变异的大小,而变异系数 (Coefficient Variation,CV) 则反映了相对变异的程度,其数值大小等于标准差 (SD) 与平均值 (mean) 的比值。由表 2 可知,在样方尺度,样方内土壤含水量 (WC),有机质 (OG),全氮 (TN),全磷 (TP),总盐 (TS) 的变异系数分别为 26.66%,22.55%,30.16%,12.65% 和 26.12%,其值都在 10%—100% 之间,按照赵锐锋等<sup>[27]</sup>的标准属于中等程度的变异。

表 2 样方尺度苔藓结皮土壤性状空间异质性的描述性统计特征

Table 2 Descriptive statistics of soil heterogeneity with moss crusts at the quadrat scale

土壤属性 Soil properties	平均值 Mean /(g/kg)	标准差 Standard Deviation(SD)	标准误 Standard Error(SE)	变异系数 Coefficient Variation (CV)/%	最小值 Minimum /(g/kg)	最大值 Maximum /(g/kg)
水分 WC	1.670	0.445	0.198	26.66	0.59	2.96
有机质 OG	2.543	0.573	0.329	22.55	1.37	4.73
全氮 TN	0.149	0.05	0.002	30.16	0.08	0.310
全磷 TP	0.290	0.037	0.001	12.65	0.20	0.38
总盐 TS	0.492	0.129	0.016	26.12	0.25	0.85

斑块尺度,3 个大小不同的苔藓结皮斑块土壤性状的变异系数范围分别为 WC (17.73%—23.06%)、OG (14.55%—20.15%)、TN (20.67%—26.732%)、TS (17.73%—20.32%)、TP (5.14%—8.82%) (表 3),由此可知除 TP 外,各斑块其它 4 个土壤性状的变异系数都在 10%—100% 之间,说明斑块尺度上述 4 个土

壤性状表现出中等程度的变异,这与样方尺度的分析结果一致;而 TP (5.14%—8.82%) 的变异系数小于 10%,比样方尺度的变异强度降低了 4%—7%,其它 4 个土壤性状在斑块尺度的变异小于或接近样方尺度的变异。两种尺度下苔藓结皮土壤各因子中,TN 的空间异质性最大,而 TP 空间异质性最小。

表 3 斑块尺度土壤性状空间异质性的描述性统计特征

Table 3 Descriptive statistics of soil heterogeneity with moss crusts at the patch scale

土壤属性 Soil properties	平均值 Mean /(g/kg)	标准差 Standard deviation(SD)	标准误 Standard error(SE)	变异系数 Coefficient variation(CV)/%	最小值 Minimum /(g/kg)	最大值 Maximum /(g/kg)
1-WCI 水分	3.871	0.752	0.596	19.42	2.61	4.92
2-WC 水分	6.400	1.135	0.236	17.73	4.68	8.82
3-WC 水分	6.812	1.571	0.406	23.06	5.02	10.14
1-OG 有机质	2.583	0.526	0.144	20.15	1.93	3.76
2-OG 有机质	3.214	0.648	0.133	19.94	2.33	5.00
3-OG 有机质	4.265	0.629	0.159	14.55	3.32	5.31
1-TN 全氮	0.187	0.050	0.015	26.73	0.11	0.31
2-TN 全氮	0.267	0.060	0.020	22.47	0.15	0.48
3-TN 全氮	0.333	0.068	0.017	20.67	0.23	0.44
1-TP 全磷	0.345	0.036	0.091	8.82	0.28	0.39
2-TP 全磷	0.397	0.033	0.011	7.69	0.33	0.61
3-TP 全磷	0.371	0.019	0.005	5.14	0.33	0.41
1-TS 总盐	0.224	0.039	0.001	17.73	0.20	0.30
2-TS 总盐	0.187	0.038	0.011	20.32	0.10	0.30
3-TS 总盐	0.169	0.031	0.013	18.99	0.10	0.30

## 2.2 苔藓结皮土壤性状半方差分析结果

用 GS+ 软件进行半方差模型的拟合, 结果见表 4, 表 5。由表 4 可知, 样方尺度, 苔藓结皮土壤 WC、OG、TN、TS 均符合球面模型, 决定系数  $r^2$  值都在 0.95 以上, 残差 RSS 均在  $10^{-4}$  以下, 这说明此模型能较好的反映以上 4 个土壤性状的空间结构特征, TP 是指指数模型, 决定系数  $r^2$  为 0.772, 与其它因子相比, 模型的精度稍差(表 4); 斑块尺度 3 个斑块 5 个土壤性状主要适用于指数和球面模型(1 号斑块 TS 除外), 除最小的 1 号斑块模型精度较低外, 其它 2 个斑块模型的决定系数都在 0.6 以上。1 号斑块的 TS 出现了线性模型, 说明 TS 在小斑块内不存在空间异质性, 其异质性应该存在于更大的尺度范围内(表 5)。块金值( $Co$ )表示随机部分的空间异质性, 拱高( $C$ )表示系统变异的空间异质性, 拱高与基台值( $Co+C$ )之比反映自相关部分的空间异质性占总空间异质性的程度。本研究中, 半方差分析结果表明, 不同尺度下苔藓结皮土壤各性状的  $Co$  ( $<0.01$ ) 都较小, 表明苔藓结皮土壤各性状存在较强的空间结构性。本研究中样方尺度, 土壤 OG (67.35%), TN (65.29%), WC (80.62%), TP (92.88%), TS (88.88%) 的  $C/Co+C$

值均在 65% 以上, 说明在样方尺度, 苔藓结皮上述土壤性状具有较强的空间依赖性, 在变程内各因子具有较强的自相关性, 结构性因素对苔藓结皮土壤 WC、TP、TS 的变异起着主导作用, 而 OG 和 TN 的空间变异则是由结构变异和随机变异共同作用形成。斑块尺度, 除 TP 外, 其它各因子由自相关引起的空间变异比重增加, 由结构因素引起的变异比重较样方水平也升高了, 随机变异在斑块尺度几乎不起作用; 土壤 TP 中由自相关引起的变异在斑块尺度下降, 结构性因素在总变异中的比重也降低了。采样尺度不同, 土壤各因子的变程( $Ao$ )也有显著变化, 由表 4 可知, 样方尺度 WC、OG、TN 的变程大于结皮覆盖范围, TP 的变程小于结皮覆盖范围, 而 TS 的变程则大于样方。除此之外, 变程也随结皮斑块大小的改变而变化, 由表 5 可知, 1 号斑块除 TS 外, 其余土壤性状的变程均小于斑块直径; 2 号斑块除 TN、TS 外, 其他土壤性状的变程均与斑块大小一致; 而 3 号斑块土壤各性状的变程均小于斑块。总体上, 各取样尺度下苔藓结皮土壤的 TP 变程均最小, TS 变程最大。

表 4 样方尺度苔藓结皮土壤性状的变异函数理论模型及相关参数

Table 4 The theory models and corresponding parameters of soil properties with moss crusts at the quadrat scale

土壤属性 Soil properties	理论模型 Model	块金值 Nugget $Co$	基台值 Sill $Co+C$	变程 Range $Ao$	自相关比例 $C/(Co+C)$ /%	决定系数 $r^2$	残差 RSS
水分含量 WC	Spherical	0.016	0.081	48.76	80.62	0.986	$7.38 \times 10^{-6}$
有机质 OG	Spherical	0.010	0.031	42.73	67.35	0.985	$2.68 \times 10^{-6}$
全氮 TN	Spherical	$6.36 \times 10^{-4}$	$1.83 \times 10^{-3}$	39.82	65.29	0.989	$6.36 \times 10^{-9}$
全磷 TP	Exponential	$6.20 \times 10^{-5}$	$8.71 \times 10^{-4}$	5.52	92.88	0.772	$1.95 \times 10^{-8}$
总盐 TS	Spherical	$1.68 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^{-2}$	81.21	88.88	0.958	$1.47 \times 10^{-6}$

表 5 斑块尺度苔藓结皮土壤性状的变异函数理论模型及相关参数

Table 5 The theory models and corresponding parameters of soil properties with moss crusts at the patch scale

土壤属性 Soil properties	理论模型 Model	块金值 Nugget $Co$	基台值 Sill $Co+C$	变程 Range $Ao$	自相关比例 $C/(C+Co)$ /%	决定系数 $r^2$	残差 RSS
1-WC 水分	Exponential	$1.00 \times 10^{-4}$	0.020	0.53	92.49	0.756	$4.28 \times 10^{-4}$
2-WC 水分	Spherical	$1.00 \times 10^{-3}$	0.025	4.56	99.60	0.841	$5.69 \times 10^{-5}$
3-WC 水分	Spherical	$1.00 \times 10^{-3}$	0.041	3.49	99.76	0.409	$1.00 \times 10^{-3}$
1-OG 有机质	Spherical	$1.00 \times 10^{-4}$	0.019	1.18	99.95	0.455	$1.24 \times 10^{-4}$
2-OG 有机质	Spherical	$1.00 \times 10^{-3}$	0.035	4.74	99.71	0.744	$3.13 \times 10^{-4}$
3-OG 有机质	Spherical	$1.00 \times 10^{-5}$	0.012	3.11	99.92	0.761	$1.04 \times 10^{-4}$
1-TN 全氮	Spherical	$1.42 \times 10^{-4}$	$9.90 \times 10^{-4}$	1.36	86.35	0.272	$1.93 \times 10^{-7}$
2-TN 全氮	Exponential	$6.61 \times 10^{-4}$	$5.77 \times 10^{-3}$	1.73	88.56	0.725	$6.14 \times 10^{-7}$

续表

土壤属性 Soil properties	理论模型 Model	块金值 Nugget $C_0$	基台值 Sill $C_0+C$	变程 Range $A_0$	自相关比例 $C/(C+C_0)/\%$	决定系数 $r^2$	残差 RSS
3-TN 全氮	Spherical	$4.26\times10^{-5}$	$1.86\times10^{-3}$	1.48	87.37	0.726	$2.18\times10^{-8}$
1-TP 全磷	Exponential	$2.37\times10^{-4}$	$5.45\times10^{-4}$	0.56	57.8	0.996	$2.15\times10^{-10}$
2-TP 全磷	Spherical	$5.47\times10^{-4}$	$1.46\times10^{-3}$	1.51	62.69	0.698	$1.08\times10^{-7}$
3-TP 全磷	Spherical	$6.62\times10^{-5}$	$1.94\times10^{-4}$	1.48	65.98	0.6026	$2.18\times10^{-8}$
1-TS 总盐	Line	$1.26\times10^{-3}$	$1.26\times10^{-3}$	4.73	0	0.383	$5.69\times10^{-5}$
2-TS 总盐	Spherical	$1.44\times10^{-6}$	$4.31\times10^{-5}$	4.41	96.79	0.242	$1.15\times10^{-10}$
3-TS 总盐	Spherical	$1.01\times10^{-6}$	$2.72\times10^{-3}$	4.93	99.96	0.855	$2.12\times10^{-7}$

2.3 苔藓结皮土壤性状空间插值分析

为了更直观地反映土壤性状的空间分布情况,利用 GS+ 5.3 对实际采样数据进行 Kriging 插值,绘

制了苔藓结皮土壤在两个研究尺度下 5 个性状含量的空间分布图(图 2,图 3)。图 2 是样方尺度土壤各

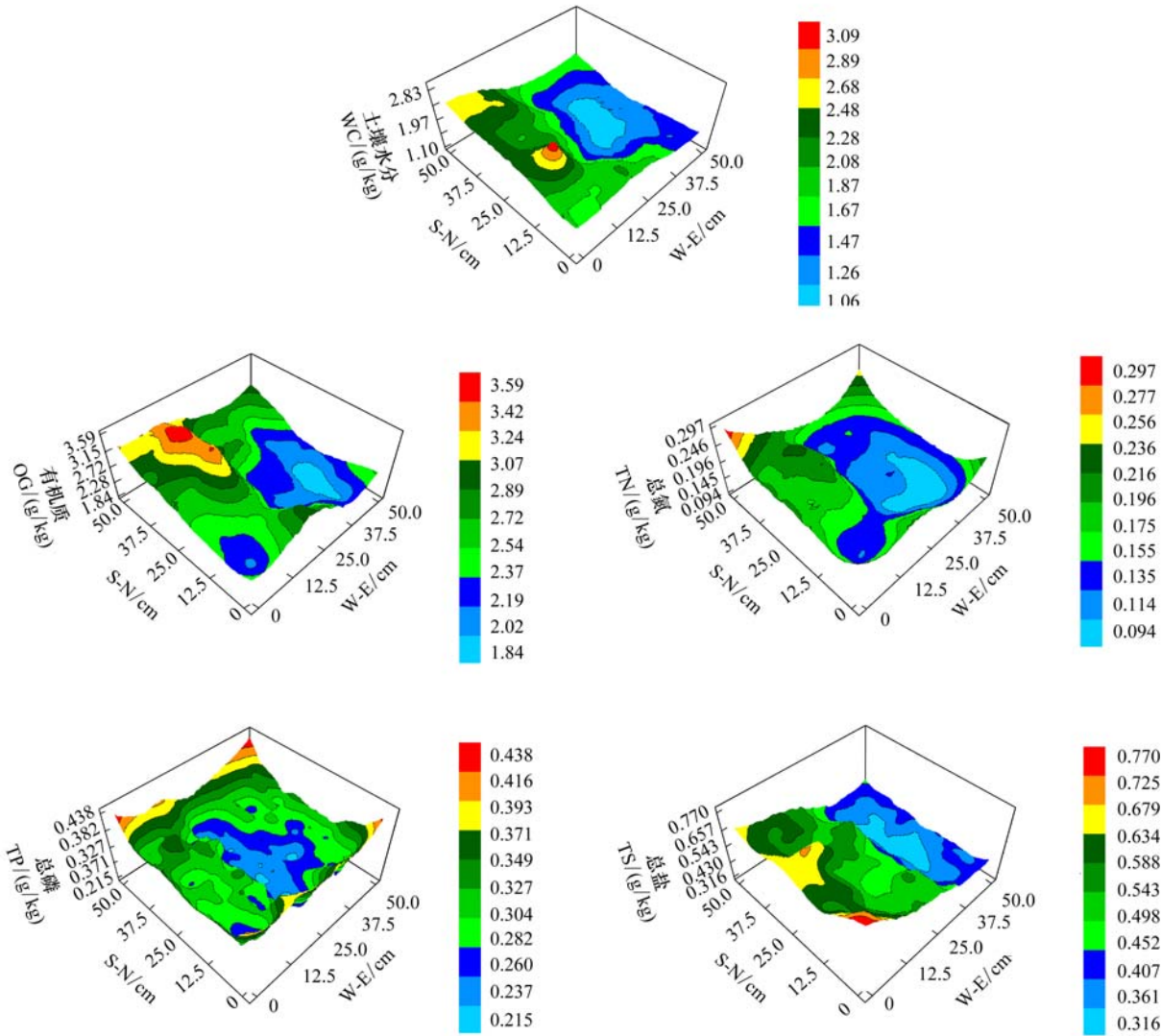
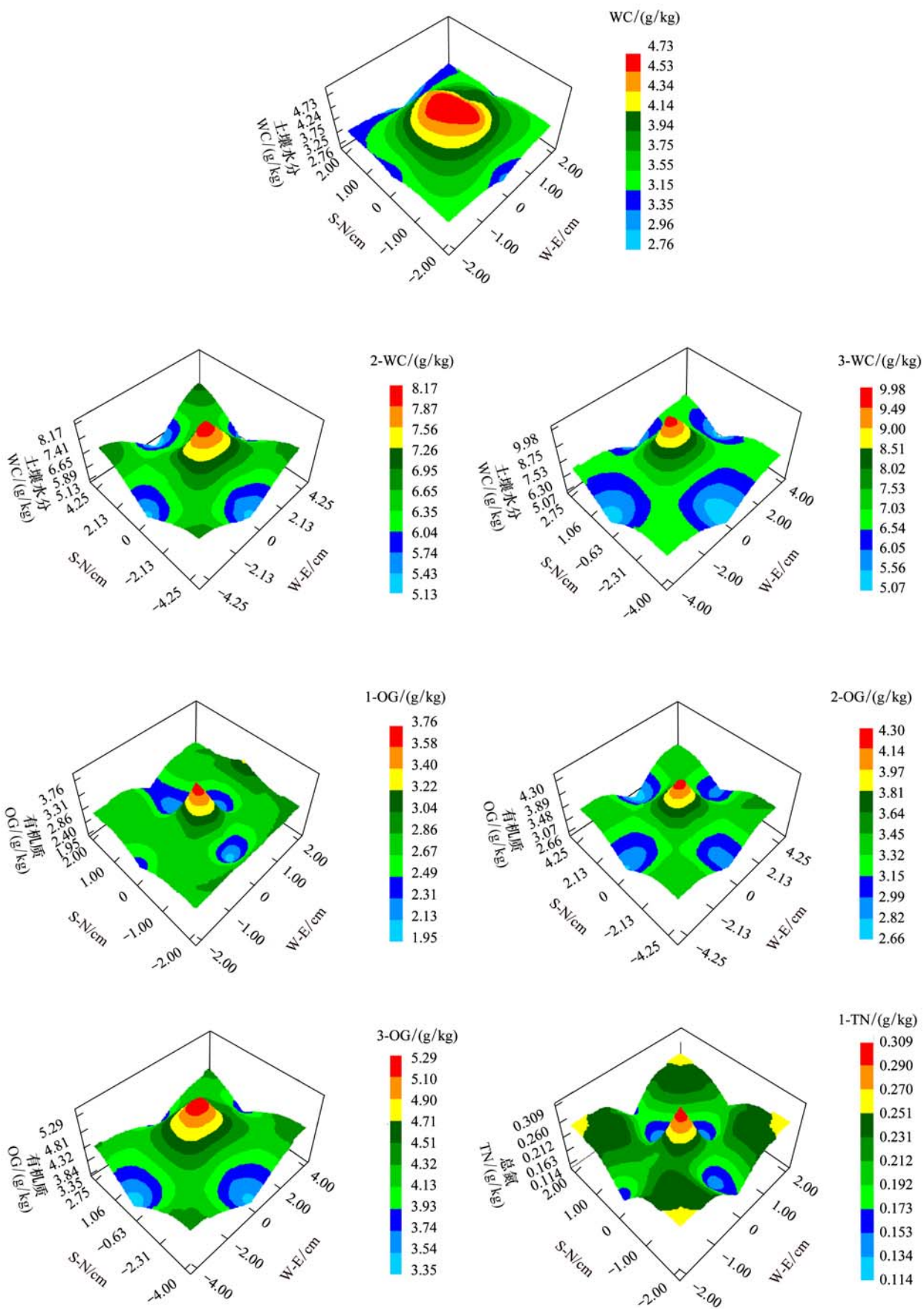


图 2 样方尺度苔藓结皮土壤水分(WC)、有机质(OG)、总氮(TN)、总磷(TP)、总盐(TS)的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil water (WC), organic matter (OG), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total salt (TS) with moss crusts at quadrat scale





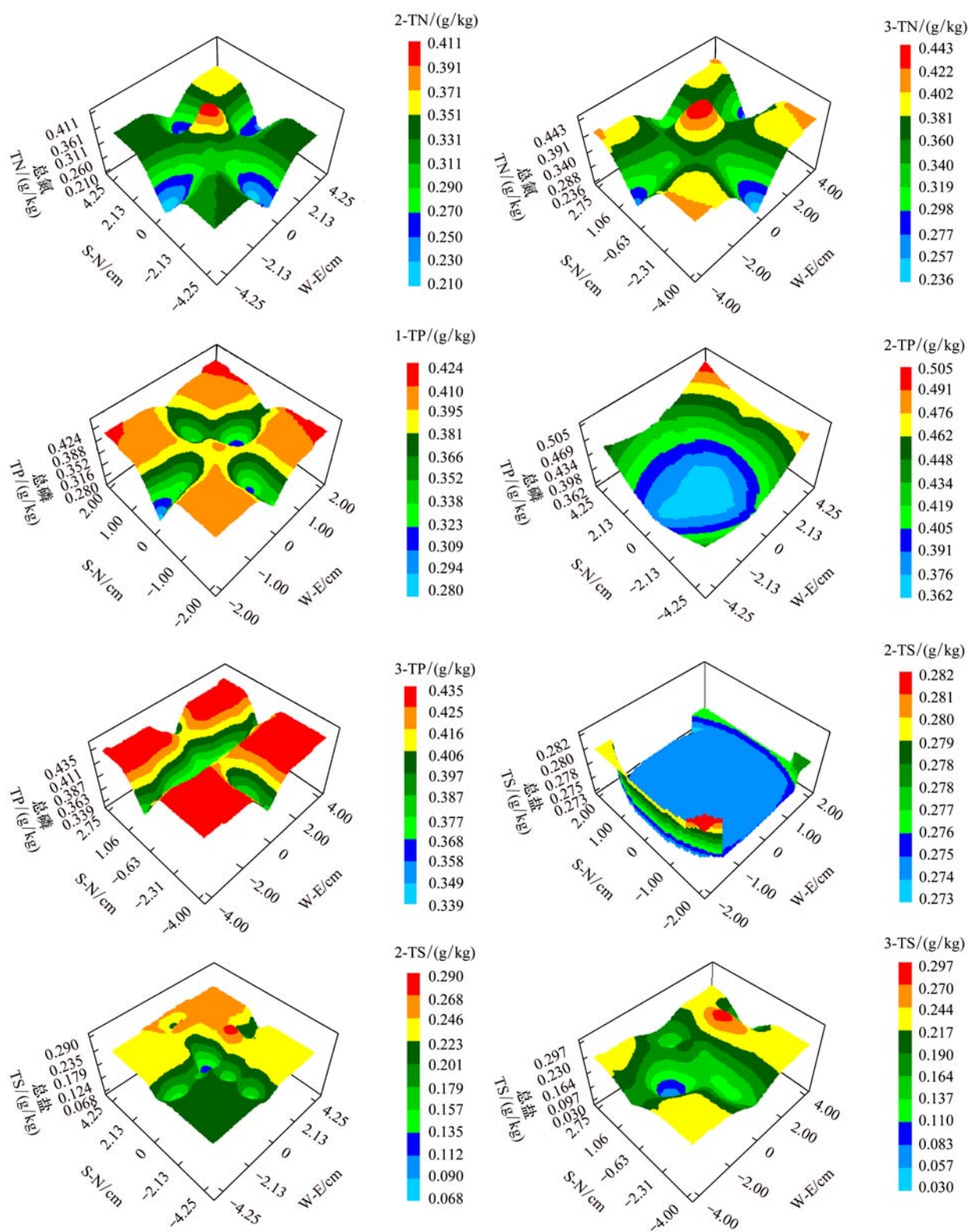


图3 斑块尺度苔藓结皮土壤水分(WC)、有机质(OG)、总氮(TN)、总磷(TP)、总盐(TS)的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil water (WC), organic matter (OG), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total salt (TS) with moss crusts at the patch scale



性状的空间分布情况,由图可知,样方尺度土壤 WC 和苔藓结皮覆盖范围一致性最高,结皮覆盖区域的土壤水分含量明显高于无结皮覆盖区;OG、TN 和 TS 的高值区主要出现在苔藓结皮分布区,低值则分布在裸地;TP 的分布和其它因子不同,主要表现为四周高中间低,其分布范围和苔藓结皮的相关性较差。此外,由图 2 可知,样方尺度,土壤各性状并不是均匀分布,有比较明显的梯度分布特征,在样地的西南和东南角形成了显著的肥岛和水岛。图 3 是斑块尺度土壤各性状的空间分布,由图可知,3 个不同大小的苔藓结皮斑块土壤 WC、OG、TN 均形成了典型的水肥岛,其含量都呈现出由斑块中心向四周逐渐降低的趋势。与样方尺度的变化类似,TP 在斑块尺度也呈现出与其它 4 性状相反的变化趋势,即中间低,四周高。斑块尺度 TS 的变化没有明显的规律,出现了与样方尺度不同的空间分布特征,其空间异质性在斑块尺度几乎消失不见。

### 3 讨论

空间异质性是一个依赖于尺度的生态学概念<sup>[1]</sup>。因此,空间异质性程度与尺度的大小有极重要的关系。本研究中,土壤 WC、OG、TN、TP 和 TS 均在样方尺度表现出较高的空间异质性,这主要是由于结皮覆盖区和裸地土壤理化特性差异较大引起,而处于斑块内不同位置的土壤性状差异较样方尺度降低,因而空间异质性程度也相应降低。张元明等<sup>[28]</sup>,对生物结皮不同层次土壤有机质进行分析比较发现在 0—5 cm 表层土壤中,有机质含量顺序为:苔藓、地衣结皮 > 藻结皮 > 无结皮区。陈荣毅等<sup>[29]</sup>报道古尔班通古特沙漠中苔藓结皮层有机质含量最高,其次为地衣结皮,藻类结皮层土壤有机质含量较低,整体上生物结皮覆盖区的土壤有机质含量显著高于无结皮覆盖区,从而造成土壤有机质的空间异质性。王雪琴<sup>[30]</sup>等,李卫红等<sup>[31]</sup>报道由于地形对水分、养分、热量的重新分配作用,使得沙丘不同部位被不同生物结皮类型所占据,从而改变其下的土壤理化特性。上述研究证实生物结皮使得沙漠土壤具有空间异质性,但这些研究都是在同一尺度对土壤性状空间分布进行分析,只能定性描述生物结皮土壤性状的空间异质性,并不能明确这种异质性发生的尺度范围;再者上述研究主要是将不同

类型生物结皮与裸地土壤性状进行比较,对于结皮内土壤性状是否均质分布尚不清楚。

本研究表明在样方和斑块两个不同尺度藓类结皮土壤性状均存在中等程度的空间变异,这与王翠萍<sup>[32]</sup>的研究结果一致,她认为黄土高原藻结皮土壤水分含量具有中等程度的变异,且变异组成以空间自相关为主,占到总变异的 95% 以上,对照裸地变异由随机因素引起,不存在空间自相关。本研究表明苔藓结皮斑块内土壤性状变异强度与斑块面积没有明显的相关性,说明大斑块和小斑块内土壤性状的变异无差异。由图 3 可知,各斑块内土壤性状呈环状递减(TP 除外)。苔藓植株个体非常矮小,个体间的长势差异并不大,不会造成土壤性状在空间分布上的较大差异,因此推测这种差异主要是边缘效应引起。通常情况下,面积较大的斑块边缘所占的比例较小,而面积小的斑块其边缘所占的比例却较大。藓类结皮是一种微小斑块,其边缘所占的比例较景观上的大斑块要高很多,因而边缘效应也更加显著,不容忽略。本研究中土壤 WC、OG、TN 等因子呈现出中间高四周低的特点,这可能与斑块边缘水分蒸散较快,蒸散量较中心区域大,因而土壤水分含量较低;此外,边缘部分受风吹、雨蚀的强度较中心部分大,因而土壤养分、水分的流失较中心高;再者,距中心越远所处的环境越不稳定,抵御环境变化的能力也越差,因而保持水分、养分的能力也较低,从而使土壤水分、养分出现中心高、四周低的空间分异现象。

全磷在两个不同尺度表现出与其它属性相反的空间异质性,这主要和磷素本身的性质有关,磷素属于难溶性元素,其代谢迁移速率非常缓慢。在自然界中,磷的迁移主要受水分驱动。土壤中磷的迁移主要与雨水的淋溶息息相关,同一个斑块,降水之后,由于边缘部分和裸地相连,而裸地蒸发强烈,失水较快,使土壤水分含量快速下降,造成裸地与斑块边缘形成较大的水势差,促使斑块边缘土壤水不断向裸地流动,从而间接的造成了斑块中心水分向边缘的迁移,随着水分的迁移磷素也随之移动,因此磷会出现中间低四周高的现象。

### References:

- [1] Bai Y F, Xu Z X, Li D X. On the small scale spatial heterogeneity of soil moisture, carbon and nitrogen in *Stipa*

- Communities of the Inner Mongolia Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1215-1223.
- [ 2 ] Wang H T, He X D, Gao Y B, Lu J G, Xue P P, Ma D. Density in *Artemisia Ordosica* successional community in response to spatial heterogeneity of soil moisture and organic matter. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1145-1153.
- [ 3 ] Gallardo A. Spatial variability of soil properties in a flood plain forest in northwest Spain. *Ecosystems*, 2003, 6(6): 564-576.
- [ 4 ] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, Huenneke L F, Jarrel W M, Virginia R A, Whitford W G. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, 247(4946): 1043-1048.
- [ 5 ] Pickett S T A, Cadenasso M L. Spatial heterogeneity in ecological systems. *Science*, 1995, 269(5222): 331-334.
- [ 6 ] Dutilleul P, Legendre P. Spatial heterogeneity against heteroscedasticity: An ecological paradigm versus a statistical concept. *Oikos*, 1993, 66(1): 152-171.
- [ 7 ] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling-a review. *Hydrological Processes*, 1995, 9(3/4): 251-290.
- [ 8 ] Zhao J, Liu H J, Sui Y Y, Zhang X Y, Meng K. Analysis for spatial heterogeneity of organic matter content and available nutrients in blacksoil crop area with different scales. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 41-45.
- [ 9 ] Robertson G P, Crum J R, Ellis B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Oecologia*, 1993, 96(4): 451-456.
- [ 10 ] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, Cross A F. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(1): 364-374.
- [ 11 ] Schlesinger W H, Pilmanis A M. Plant soil interactions in deserts. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1/2): 169-187.
- [ 12 ] Yi L P, Ma J, Li Y. Soil salt regime in rhizosphere of desert halophytes in different soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1139-1143.
- [ 13 ] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H. Influencing mechanism of several shrubs and sub-shrubs on soil fertility in Keerqin sandy land Chinese. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 802-806.
- [ 14 ] Hu X, Wang H T, Lu J G, Cong P F, He X D, Gao Y B, Dong Z B. Response of *Artemisia ordosica* population to spatial heterogeneity of soil in arid and semi-arid regions. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(4): 588-592.
- [ 15 ] Enoki T, Kawaguchi H, Iwatsubo G. Topographic variations of soil properties and stand structure in a *Pinus thunbergii* plantation. *Ecological Research*, 1996, 11(3): 299-309.
- [ 16 ] Itoh A, Yamakura T, Ohkubo T, Kanzaki M, Palmiotto P A, LaFrankie J V, Ashton P S, Lee H S. Importance of topography and soil texture in the spatial distribution of two sympatric dipterocarp trees in a Bornean rainforest. *Ecological Research*, 2003, 18(3): 307-320.
- [ 17 ] Delcourt H R, Delcourt P A. Quaternary landscape ecology: Relevant scales in space and time. *Landscape Ecology*, 1988, 2(1): 23-44.
- [ 18 ] Greene R S B, Tong-way D J. The significance of ( surface ) physical and chemical properties in determining soil surface condition of red-earths in rangelands. *Australian Journal of Soil Research*, 1989, 27(1): 213-225.
- [ 19 ] Li C J, Li Y, Ma J. Scale characteristics of spatial heterogeneity of soil chemical properties in Gurbantunggut desert. *Acta Pedagogica Sinica*, 2011, 48(2): 302-308.
- [ 20 ] Wu L Z, Cai Z C. The relationship between the spatial scale and the variation of soil organic matter in China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(9): 965-972.
- [ 21 ] Shen H L, Wang J H, Li M. Study on the spatial heterogeneity and distribution patterns of wild licorice in Ningxia. *Pratacultural Science*, 2007, 24(7): 18-21.
- [ 22 ] Belnap J, Prasse R, Harper K T. Influence of biological soil crusts on soil environments and vascular plants // Belnap J, Lange O L, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management*. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 281-300.
- [ 23 ] West N E. Structure and function of microphysical soil crusts in wild land ecosystems of arid to semiarid regions. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20: 179-223.
- [ 24 ] Zhang Y M, Cao T, Pan B R. A review on the studies of bryophyte ecology in arid and semi-arid areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 129-1134.
- [ 25 ] Zhang J, Zhang Y M, Downing A, Cheng J H, Zhou X B, Zhang B C. The influence of biological soil crusts on dew deposition in Gurbantunggut Desert, Northwestern China. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(3/4): 220-228.
- [ 26 ] Bao S T. *Agricultural Soil Analysis*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.
- [ 27 ] Zhao R F, Chen Y N, Hong C X, Li W H, Bai Y G. Study on spatial variability and pattern of soil salinity of the oasis in the headstreams of the Tarim River Basin: A case study on Yuepuhu oasis. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 135-144.
- [ 28 ] Zhang Y M, Yang W K, Wang X Q, Zhang D Y. Influence of cryptogamic soil crusts on accumulation of soil organic matter in Gurbantunggut Desert, northern Xinjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3420-3425.
- [ 29 ] Chen R Y, Zhang Y M, Pan B R, Wu N, Wang H L, Nie H L. Relation between disturbance and spatial heterogeneity of soil nitration in Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2): 257-265.
- [ 30 ] Wang X Q, Zhang Y M, Wang Y C, Wan J P, Xu M. Eco-environment change of biological crusts on longitudinal dune surface in Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(5): 711-716.
- [ 31 ] Li W H, Ren T R, Zhou Z B, Liu J R. Study on the soil

physicochemical characteristics of biological crusts on Sand-dune surface in Gurbantunggut Desert, Xinjiang Region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 619-625.

- [32] Wang C P. Effects of Soil Algae Crust on Soil Moisture in Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forest University, 2009.

#### 参考文献:

- [1] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. *生态学报*, 2002, 22(8): 1215-1223.
- [8] 赵军, 刘焕军, 隋跃宇, 张兴义, 孟凯. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 41-45.
- [12] 弋良朋, 马健, 李彦. 不同土壤条件下荒漠盐生植物根际盐分特征研究. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1139-1143.
- [13] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 802-806.
- [14] 胡旭, 王海涛, 卢建国, 丛培芳, 何兴东, 高玉葆, 董治宝. 干旱和半干旱区油蒿对土壤空间异质性的响应. *中国沙漠*, 2007, 27(4): 588-592.
- [19] 李从娟, 李彦, 马建. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征. *土壤学报*, 2011, 48(2): 302-308.
- [20] 吴乐知, 蔡祖聪. 中国土壤有机质含量变异性与空间尺度的关系. *地球科学进展*, 2006, 21(9): 965-972.
- [21] 沈海亮, 王季槐, 李明. 宁夏野生甘草分布空间异质性及分布格局研究. *草业科学*, 2007, 24(7): 18-21.
- [24] 张元明, 曹同, 潘伯荣. 干旱与半干旱地区苔藓植物生态学研究综述. *生态学报*, 2002, 22(7): 1129-1134.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 赵锐锋, 陈亚宁, 洪传勋, 李卫红, 白云岗. 塔里木河源流区绿洲土壤含盐量空间变异和格局分析—以岳普湖绿洲为例. *地理研究*, 2008, 27(1): 135-144.
- [28] 张元明, 杨维康, 王雪芹, 张道远. 生物结皮影响下的土壤有机质分异特征. *生态学报*, 2005, 25(12): 3420-3425.
- [29] 陈荣毅, 张元明, 潘伯荣, 吴楠, 王红玲, 聂华丽. 古尔班通古特沙漠土壤养分空间分异与干扰的关系. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 257-265.
- [30] 王雪芹, 张元明, 王远超, 王金平, 徐曼. 古尔班通古特沙漠生物结皮小尺度分异的环境特征. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 711-716.
- [31] 李卫红, 任天瑞, 周智彬, 刘加珍. 新疆古尔班通古特沙漠生物结皮的土壤理化性质分析. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 619-625.
- [32] 王翠萍. 黄土荒漠地表藻类结皮的土壤水分效应研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.