

科尔沁沙地退化植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间异质性

左小安, 赵哈林, 赵学勇, 郭铁瑞, 张铜会, 罗亚勇, 苏娜, 冯静

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所奈曼沙漠化研究站, 兰州 730000)

摘要:采用地统计学分析方法研究了沙地退化植被恢复过程中(封育0 a的流动沙丘、封育11 a的流动沙丘和封育20 a的流动沙丘)土壤有机碳和全氮的空间异质性,探讨了它们与植被恢复演替和地形特征变化的关系.结果表明,随着流动沙丘的固定和封育年限的增加,植被盖度、丰富度、物种多样性、土壤有机碳和全氮含量(0~20 cm)逐渐增加.在流动沙丘植被恢复过程中,土壤有机碳和全氮的结构方差与基台值的比值 $C/(C_0 + C)$ 均大于65%,反映出它们具有明显的空间自相关性;土壤有机碳和全氮含量的空间自相关范围分别为58.39 m和91.00 m(封育0 a)、28.59 m和23.61 m(封育11 a)和63.31 m和61.05 m(封育20 a).由半方差函数及其参数和空间分布格局图分析表明,其空间异质性在所研究的尺度上表现出先增大(封育0~11 a)后减小(封育11~20 a)的变化特点.沙丘植被恢复过程中植被盖度、丰富度、物种多样性与土壤有机碳和全氮均有极显著的正相关关系($p < 0.01$).分析表明沙丘植被变化和地形特征影响着土壤有机碳和全氮在沙丘上的空间分布,沙丘植被恢复演替过程极大地影响了土壤有机碳和全氮的积累及其空间异质性变化.

关键词:科尔沁沙地;土壤有机碳和全氮;地统计学;空间异质性;植被演替

中图分类号:X144 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2009)08-2387-07

Spatial Heterogeneity of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen of Sandy Grassland in the Restoration of Degraded Vegetation in Horqin Sandy Land, Northern China

ZUO Xiao-an, ZHAO Ha-lin, ZHAO Xue-yong, GUO Yi-rui, ZHANG Tong-hui, LUO Ya-yong, SU Na, FENG Jing

(Naiman Desertification Research Station, Cold and Arid Regions of Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the field investigation and lab analysis, we used geostatistics method to examine the spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen in a 0-year fenced mobile dune (MD0), an 11-year fenced mobile dune (MD11) and a 20-year fenced mobile dune (MD20) in Horqin Sandy Land. The results showed that the average values of vegetation cover, species number and diversity, soil organic carbon and total nitrogen (0-20 cm) contents increased with the increase in fenced age of mobile dunes. Geostatistical analysis showed that the proportions of relative structural variance $C/(C_0 + C)$ of soil organic carbon and total nitrogen in each dune were over 65%, which suggested that they had obvious spatial autocorrelation. Calculated ranges of spatial autocorrelation for soil organic carbon and total nitrogen were 58.39 m and 91.00 m (MD0), 28.59 m and 23.61 m (MD11) and 63.31 m and 61.05 m (MD20), respectively. The analysis from semivariance calculated parameters and spatial distributed maps showed that the spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen firstly increased from MD0 to MD11 then decreased from MD11 to MD20. Correlation analysis indicated that there were significantly positive correlations among vegetation cover, species richness and diversity index, soil organic carbon and total nitrogen ($p < 0.01$). The analyzed results indicate that the spatial distributions of soil organic carbon and total nitrogen are most strongly related the topography features and vegetation changes in sand dune ecosystems prone to wind erosion. The accumulation and spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen in the restoration of dune degraded vegetation are greatly affected by vegetation restoration succession.

Key words: Horqin Sand Land; soil organic carbon and total nitrogen; geostatistics; spatial heterogeneity; vegetation succession

空间异质性(spatial heterogeneity)是所研究的系统特性在空间上的复杂性^[1~4],反映了生态格局和生态过程的内在特性.土壤特性的空间变异格局是生物、化学、物理过程在不同尺度上共同作用的结果^[5],研究土壤特性的空间异质性,有助于清楚地了解土壤的形成过程、结构和功能以及对植被恢复的影响.沙丘土壤特性的空间格局则常常受到放牧、地

形和植被恢复程度的影响^[6].许多研究也表明,植物

收稿日期:2008-10-09;修订日期:2009-02-18

基金项目:中国科学院西部之光人才培养计划项目;中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-431-3);国家自然科学基金项目(40601008);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB421303);中国科学院留学基金项目

作者简介:左小安(1978~),男,博士,助理研究员,主要研究方向为干旱区生态格局与过程, E-mail: xazuo@126.com

诱导的异质性在很多生态系统中已存在^[7,8],特别是土壤营养的空间异质性变化与植物的分布有着密切的关系^[9,10].在草地被灌丛替代过程中,由于灌丛的“肥岛”效应,灌丛下新的土壤营养斑块形成,从而促进了土壤养分的空间异质性^[11,12].同时,土壤空间异质性的尺度和程度对植物群落的组成结构和生态系统的演变过程有着重要的影响^[13].

科尔沁沙地是我国北方半干旱农牧交错带的典型生态脆弱区,由于近代人为过度的放牧、开垦、樵柴,致使其原始景观疏林草原植被遭到严重破坏,出现不同程度的植被退化和土地沙漠化.近年来随着禁止放牧、禁垦禁伐等良好保护措施的实施和治理,退化植被呈现恢复趋势,沙漠化呈现出整体逆转的趋势^[14].有关科尔沁沙地植被、土壤退化与恢复的研究已有大量工作^[6,15~19],但对于退化植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间异质性方面的研究较少,因此,进行有关沙地土壤恢复的生态格局、过程及相互关系,对沙漠化治理和生态恢复具有指导意义.土壤有机碳和全氮不仅是土壤组成的重要部分,而且是生态系统中极其重要的生态因子,因而一直备受生态学、土壤学等多个学科的关注.为此,本实验以该区封育恢复 0、11 和 20 a 的流动沙丘土壤为研究对象,揭示植被恢复演替过程中土壤有机碳和全氮的空间异质性规律及其影响因素,以期为退化土壤的恢复研究积累资料,为科尔沁沙地退化生态系统恢复和管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地中南部的奈曼旗境内.地理位置 120°55' E, 42°41' N, 平均海拔 360 m.该区域属温带半干旱大陆性季风气候,年均温 6.4℃, ≥ 10℃ 年积温在 3 000℃ 以上,无霜期约 150 d.年均降水量 364.6 mm,主要集中在 6~8 月,年均蒸发量 1 972.8 mm.土壤类型主要有风沙土、草甸土、沙质栗钙土和沼泽土^[16~18].气候特征是冬、春季干旱,多大风,降雨集中在夏季,水热同期,有利于植物生长.地貌类型以固定沙地、半流动沙地、流动沙地和开阔的大片甸子地相间分布为特征.植被的斑块化分布和空间异质性较强,优势植物种有沙米 (*Agriophyllum squarrosum*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、黄蒿 (*Artemisia scoparia*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、寸草苔 (*Carex duriuscula*)、差巴嘎蒿 (*Artemisia halodendron*) 和小叶

锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 等.

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

2006 年 8 月,在封育了 0、11 和 20 a 的流动沙丘上建立的 50 m × 50 m 样地,从丘顶向坡地沿东南、西北、西南、东北 4 个方向,设置 25 m 的样线,每隔 1 m 设置 1 m × 1 m 的样方调查植被特征,每个沙丘共调查样方 100 个,同时利用坡度仪测定 4 条样线上每个样方的坡度并利用三角函数计算每个取样点的相对高度.为了地统计学的分析,再在 50 m × 50 m 样地的 2500 个 1 m × 1 m 的网格内,随机选取 40 个样方进行植被特征调查.在植被特征调查的样方内,用土钻钻取 3 个 0~20 cm 深的混合土样,做土壤有机碳和全氮的测定.

1.2.2 分析方法

在每个样方内测定各种植物的盖度、多度、高度特征,应用物种重要值 = (相对高度 + 相对盖度 + 相对多度)/3,计算物种的生态重要值.通过选用物种丰富度指数、Simpson 优势度指数 (*D*) 和 Shannon-Wiener 多样性指数 (*H'*)^[16] 来计算群落的物种多样性.

按常规方法分别对土样测定土壤碳氮含量,土壤有机碳的测定用重铬酸钾容量法-外加热法,土壤全氮的测定用半微量凯氏定氮法^[6,15,19].

1.2.3 统计方法

空间异质性分析采用地统计学软件 GS5+ 进行变异函数分析和克立格空间局部插值估计.在地统计学中,半方差函数是研究变异性的关键函数,该函数可用下式表示^[2~4,6,20]:

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

式中, $r(h)$ 是半方差函数, h 为两样本间的分离距离, $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别是随机变量在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的取值, $N(h)$ 为在分离距离为 h 时的样本对总数.由 $r(h)$ 对 h 作图可得试验半方差函数图,该图由一批散点组成.根据离差平方和 (RSS) 最小原则,对试验半方差函数拟合,得到半方差函数的理论模型.一般 C_0 表示块金方差,反映的是最小抽样尺度以下变量的变异性及测量误差; C 为结构方差,表示非随机原因形成的变异; $C_0 + C$ 为基台值,表示变量的最大变异程度; $C/(C_0 + C)$ 为空间自相关度,表示的是可度量空间自相关的变异所占的比例; A 为有效变程,表示研究变量的空间变异中,空间自相关变异的尺度范围.以半方差函数的理论模型为基础,采用 Kriging 插值法,对未测点进行估

值,可绘制出土壤有机碳和全氮的空间格局图.

应用单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫(One-Sample Kolmogorov-Sminov Test)检验土壤有机碳和全氮数据是否符合正态分布规律,对不符合正态分布的数据,进行对数或者平方根等数据转换的方法转换,使转换后的数据趋于正态分布.统计分析应用SPSS 13.0 的软件,采用 LSD 和 one-way ANOVA 方法分析植被恢复过程中群落特征、土壤有机碳、全氮和地形特征在不同恢复沙丘之间的差异,以 $p < 0.01$ 为显著水平.所有数值均采用 Means $\pm$ SE 表示.

2 结果与分析

2.1 沙丘退化植被恢复过程中群落特征变化

沙丘退化植被恢复过程中植物群落统计特征如表 1 所示,由封育 0 a、封育 11 a 到封育 20 a 的流动沙丘,植被盖度、丰富度和物种多样性(H)指数逐渐增加,优势度(D)逐渐减小,且差异显著($p < 0.01$).此外,随着封育年限的增加,沙米优势度依次

减弱,差巴嘎蒿优势度先增加后减小;封育 0 a 的流动沙丘中重要值占前 3 位的植物种为沙米、狗尾草和差巴嘎蒿,封育 11 a 的流动沙丘为差巴嘎蒿、狗尾草和沙米,封育 20 a 的流动沙丘为差巴嘎蒿、狗尾草和猪毛菜.

2.2 沙丘退化植被恢复过程中土壤有机碳、全氮和地形特征的统计描述

由描述性统计结果显示(表 2),封育 0、11 和 20 a 的流动沙丘土壤有机碳、全氮、取样点相对高度和坡度特征为正态分布或者经对数、平方根转化后符合正态分布.随着流动沙丘封育年限的增加,在所研究的尺度上,土壤有机碳、全氮和取样点相对高度的平均值逐渐增加,其中不同沙丘的土壤有机碳和全氮之间存在显著差异($p < 0.01$),这些结果表明随着流动沙丘植被的恢复,土壤有机碳和全氮在逐渐增加.不同沙丘的土壤有机碳和全氮的变异幅度均先减小后增大,这表明土壤机碳和全氮在沙丘上存在不同程度的异质性分布.

表 1 植被恢复过程中群落特征统计分析¹⁾

Table 1 Statistical analysis of community characteristics in the processes of vegetation restoration					
沙丘类型	优势种/%	丰富度	盖度/%	优势度(D)	多样性(H)
MD0	沙米(57.2)	8	3.70 $\pm$ 6.14a	0.69 $\pm$ 0.31a	0.41 $\pm$ 0.44a
	差巴嘎蒿(43.9)				
MD11	狗尾草(22.0)	14	25.91 $\pm$ 22.09b	0.46 $\pm$ 0.26b	0.95 $\pm$ 0.52b
	差巴嘎蒿(28.9)				
MD20	狗尾草(16.60)	20	30.39 $\pm$ 20.49c	0.41 $\pm$ 0.17c	1.11 $\pm$ 0.41c
	猪毛菜(10.10)				

1)括号内为物种的重要值;同列中不同小写字母表示不同沙丘群落特征之间的差异显著($p < 0.01$); MD0: 封育 0 a 流动沙丘, MD11: 封育 11 a 流动沙丘, MD20: 封育 20 a 流动沙丘,下同

表 2 植被恢复过程中土壤有机碳、全氮和地形特征的统计描述性分析¹⁾

Table 2 Statistical characters of soil organic carbon, total nitrogen and topographical features in the processes of vegetation restoration								
特性	样地	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数/%	K-Sp	分布类型
有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	MD0	0.68a	0.36	0.19	1.75	52.94	0.31	正态
	MD11	0.81b	0.38	0.08	1.95	47.39	0.13	正态
	MD20	1.29c	1.06	0.08	4.94	82.66	0.13	正态
全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	MD0	0.04a	0.02	0.02	0.11	43.90	0.07	对数正态
	MD11	0.05b	0.02	0.03	0.10	33.33	0.06	对数正态
	MD20	0.08c	0.05	0.03	0.24	66.67	0.09	平方根正态
取样相对高度/m	MD0	5.18a	1.40	1.85	6.97	27.04	0.18	正态
	MD11	5.84a	2.16	1.45	8.72	36.89	0.21	正态
	MD20	7.67b	1.63	4.83	10.30	21.22	0.07	正态
坡度/ $^{\circ}$	MD0	8.52a	4.89	0.20	20.20	57.37	0.21	平方根正态
	MD11	14.19b	7.88	0.00	33.00	55.54	0.25	正态
	MD20	11.88c	7.84	0.00	32.50	65.96	0.53	平方根正态

1)同一特性同列中不同字母表示差异显著 ($p < 0.01$); K-Sp: 单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫检验值

2.3 沙丘退化植被恢复过程中土壤有机碳、全氮和地形特征的变异函数分析

沙地退化植被恢复过程中土壤有机碳、全氮和地形特征的变异函数分析如表 3 所示.从中可以看出,流动沙丘植被恢复过程中土壤有机碳、全氮和取样点相对高度的空间变异规律均能较好地拟合成变异函数的理论模型——球状模型,表明这些变量均具有明显的空间结构特征(表 3).由研究属性的结构方差与基台值的比值 $C/(C_0 + C) > 75\%$ 、 $75\% \sim 25\%$ 、 $< 25\%$ 分别表明变量的空间相关性强烈、中等、较弱^[6,20],可以得到封育 0、11 和 20 a 的土壤全氮和取样点相对高度以及封育 11 a 和 20 a 的土壤有机碳的结构方差与基台值的比值 $C/(C_0 + C)$ 均大于 75%,说明这些变量具有较强的空间自相关性;封育 0 a 的土壤有机碳具有中等的空间自相关性.这些结果表明,土壤有机碳和全氮含量在沙丘上分布的

随机变异均小于结构性变异,反映出这些变量在此研究尺度上具有明显的空间自相关格局,由空间自相关性引起的异质性占总异质性的较大比例.

由封育 0 a 到封育 11 a 年和 20 a 的流动沙丘,土壤有机碳和全氮含量的空间自相关范围分别为 58.39 m 和 91.00 m、28.59 m 和 23.61 m、63.31 m 和 61.05 m,土壤有机碳和全氮含量的空间自相关范围先减小后增加,随着沙丘植被的恢复这些变量在此研究尺度上空间依赖性先减小后增加(表 3 和图 1).这些结果表明,随着流动沙丘植被的恢复演替,土壤有机碳和全氮含量的异质性存在先增大后减小的过程.从图 2 各沙丘土壤有机碳和全氮含量的空间格局分布图可以看出,在封育 11 a 的流动沙丘上土壤有机碳和全氮分布呈现出小斑块格局,也表明随着流动沙丘封育年限的增加,其空间破碎化程度表现出先增大后减小的趋势.

表 3 植被恢复过程中土壤有机碳、全氮和地形特征的变异函数理论模型及参数

Table 3 Semivariogram models and parameters of soil organic carbon, total nitrogen and topographical features in the processes of vegetation restoration							
特性	样地	模型	C_0	$C_0 + C$	$C/(C_0 + C)$	A/m	RSS
有机碳/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	MD0	球状	0.07	0.21	0.68	58.39	0.00
	MD11	球状	0.01	0.20	0.97	28.59	0.01
	MD20	球状	0.21	2.43	0.91	63.31	0.22
全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	MD0	球状	0.05	0.34	0.85	91.00	0.01
	MD11	球状	0.03	0.11	0.76	23.61	0.00
	MD20	指数	0.00	0.00	0.90	61.05	0.00
取样相对高度/m	MD0	球状	0.00	1.99	1.00	23.50	12.00
	MD11	球状	0.01	5.22	1.00	22.80	19.10
	MD20	球状	0.00	2.70	1.00	22.20	14.20
坡度/ $(^\circ)$	MD0	球状	0.51	1.14	0.56	32.00	0.25
	MD11	线性	51.22	51.22	0.00	45.43	6.52
	MD20	球状	0.04	1.41	0.98	3.50	1.49

1) C_0 : 块金方差; C : 结构方差; $C_0 + C$: 基台值; $C/(C_0 + C)$: 空间自相关度; A: 有效变程; RSS: 离差平方和

3 讨论

沙地退化植被恢复是以流动沙丘先锋植物沙米群落的建立为起点的植被发育和群落演替的过程,也是松散沙粒基质的流动性不断降低、沙丘逐渐得到固定的过程^[18].由植被与土壤的相关分析可以看出(表 4),植被盖度、丰富度和物种多样性与土壤有机碳和全氮含量均有极显著的正相关关系($p < 0.01$),表明随着沙丘植被的恢复演替,土壤有机碳和全氮含量逐渐增加,这与其他人在该区域的研究结果相似^[15,19].植被的演替是推动土壤养分循环的关键因素之一,因为各种植物根系吸收土壤中元素的能力及植物枯枝落叶与根系含量不同,因而当枯枝落叶及根系脱落、腐烂、分解后,释放到土壤中的

元素含量亦不同,进而导致土壤养分含量的差异^[21].

由植被与土壤和地形特征的相关分析可以看出(表 4),植被盖度和丰富度与沙丘上取样相对高度均有极显著的负相关关系($p < 0.01$),表明沙丘固定过程中植被在沙丘上的分布与地形起伏程度有密切的关系.尽管土壤有机碳、全氮与取样相对高度和坡度均无显著的相关关系($p > 0.05$),但是已有研究表明地形是景观尺度上决定土壤过程的一个重要因素,地形能够影响土壤养分资源的分布及其再分配,并对其积累和损失产生影响^[22,23].在科尔沁沙地的研究^[6,24]表明,在沙丘尺度上,沙丘土壤有机碳和全氮含量从沙丘顶部到底部随着沙丘取样相对高度的下降而增加,这主要是由于沙丘土壤受到风蚀和沉

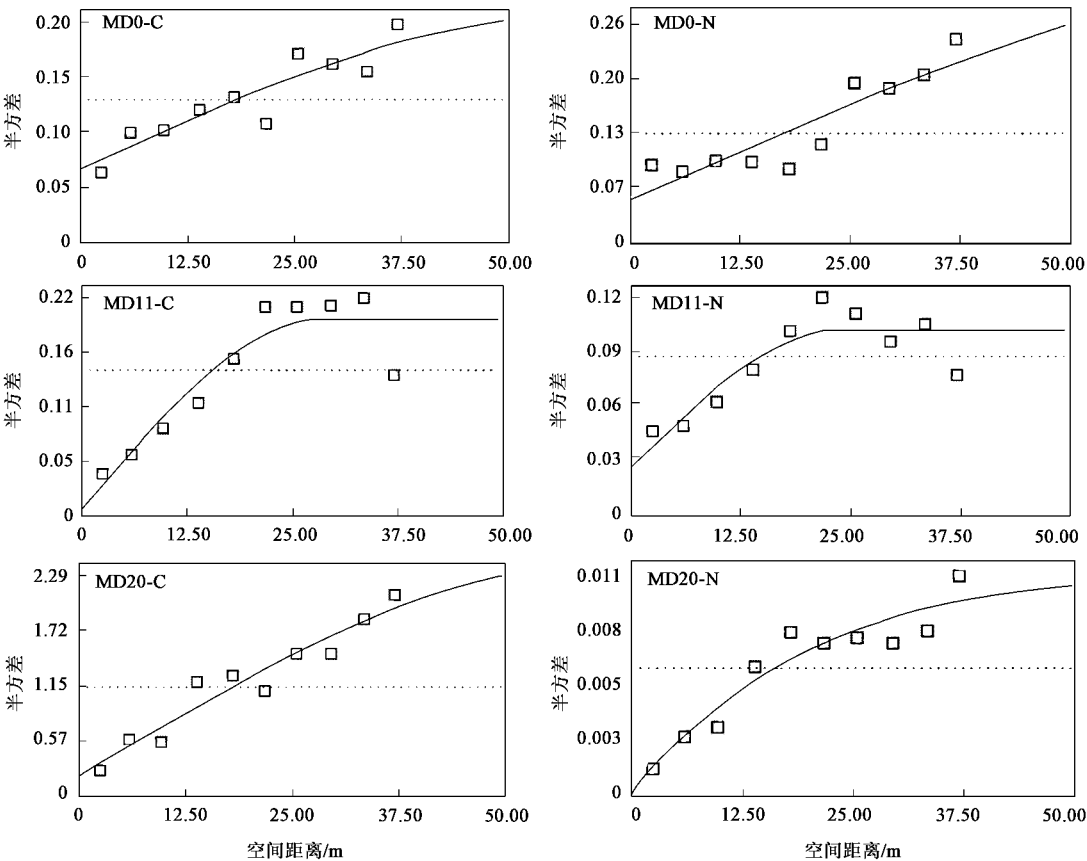


图1 植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间半方差图(C:有机碳; N:全氮)

Fig.1 Sample semivariogram maps for soil organic carbon and total nitrogen in the processes of vegetation restoration

积过程以及植物的拦截作用而导致土壤特性的再分配引起的^[22].此外,随着沙丘从坡顶到坡底植被盖度和凋落物的增加,也促进了沙丘底部土壤有机碳和全氮的积累.

对于不同生态系统研究中植物分布导致的土壤异质性已有较多的认识^[7,25],特别是植物的分布格局能够影响生物地球化学和物理过程,从而控制土壤有机碳和全氮平衡^[9].通过植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的地统计学分析,在所研究的尺度上,土壤有机碳和全氮含量(0~20 cm)的空间异质性先增加(封育0~11 a的流动沙丘)后减小(封育11~20 a的流动沙丘),其机制可能是由于土壤有机碳和全氮含量的空间异质性变化与沙丘植被的恢复演替程度和植物分布有关.

在科尔沁沙地,沙丘先锋植物沙米能够生存于易受风蚀和贫瘠的沙丘环境中,成为流动沙丘的优势植物种^[6,16,19,24].尽管沙米在流动沙丘上建立自己的种群,但由于长期的风蚀而导致的贫瘠的土壤环境,沙丘植被盖度一般不会超过10%,因此,流动沙丘土壤养分含量较低,在空间上表现出均一性分布,

空间异质性也较低.

随着沙丘退化植被区禁止放牧、樵柴和封育保护后,在该区350~500 mm的降雨条件下,流动沙丘的植被开始恢复,沙丘的流动性逐渐降低,能够适应轻度沙埋和具有无性繁殖的灌木逐渐替代沙米成为群落的优势种.研究表明,在沙丘上差巴嘎蒿灌木的建立及其形成的“肥岛效应”是土壤养分增加的一个重要原因^[26].由于差巴嘎蒿灌丛下形成了“肥力岛”,导致了沙丘土壤养分的小斑块分布格局,从而促进了沙丘土壤养分的空间异质性.同时,差巴嘎蒿灌木不仅能够截获部分土壤风蚀物质、降尘和凋落物,还能在灌丛下拦截和贮藏一部分草本植物的种子,从而有利于草本植物在灌丛下的入侵和定居^[22].随着流动沙丘的进一步固定和沙丘土壤环境的改善,封育20 a流动沙丘的差巴嘎蒿优势度下降,一、二年生草本和多年生草本植物增加并开始占据沙丘.由于草本植物种群不断扩张和繁殖,其枯枝落叶及根系脱落、腐烂、分解后促进沙丘上土壤养分含量的增加,从而又减小了土壤的空间异质性,这些分析结果与已有的研究结论相一致^[27].

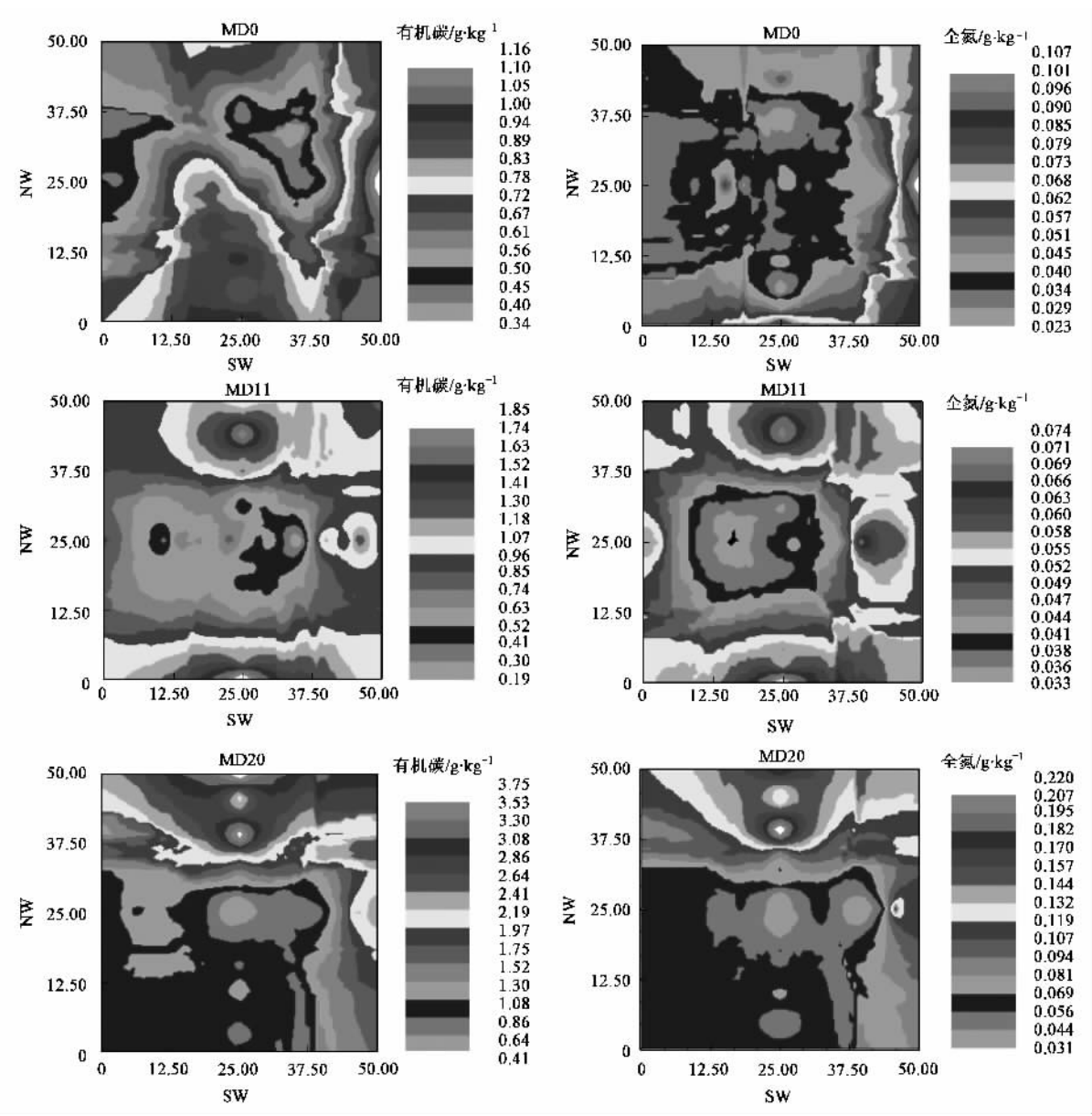


图 2 植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间分布格局

Fig.2 Maps of spatial distribution pattern for soil oranic carbon and total nitrogen in the processes of vegetation restoration

表 4 植被特征与土壤有机碳和全氮和地形特征的相关分析¹⁾(*n* = 300)

Table 4 Correlation coefficients between vegetation characteristics, soil organic carbon, total nitrogen and topographic features

	盖度	丰富度	多样性	有机碳	全氮	取样相对高度	坡度
盖度	1.00						
丰富度	0.77**	1.00					
多样性	0.74**	0.92**	1.00				
有机碳	0.59**	0.63**	0.49**	1.00			
全氮	0.63**	0.68**	0.52**	0.91**	1.00		
取样相对高度	-0.35**	-0.26**	-0.24*	-0.10	-0.10	1.00	
坡度	0.10	0.09	0.14	-0.09	-0.09	0.14	1.00

1) *表示 *p* < 0.05; **表示 *p* < 0.01

4 结论

(1)流动沙丘的固定和封育过程,一方面促进了

退化植被的恢复演替,另一方面也促进土壤碳和全氮含量的增加.流动沙丘的封育和固定过程实质是植被恢复和土壤肥力增加的过程.

(2)在流动沙丘的固定和植被恢复过程中,植被盖度、物种丰富度和多样性的增加,促进了土壤有机碳和全氮含量的的逐渐增加,而在这一过程中地形的起伏程度又影响了土壤有机碳和全氮的空间分布.

(3)沙丘退化植被恢复过程中,土壤有机碳和全氮的空间异质性在由灌丛植被替代先锋植物过程中增加,灌木的入侵和定居促进了沙丘土壤养分的空间异质性.随着沙丘进一步的固定,灌木植被逐渐退出、草本植物不断侵入和定居,又减弱了土壤有机碳和全氮含量的空间异质性.

(4)有关该区域植被恢复演替与土壤异质性的相互作用机制、植被与土壤系统在不同尺度上的相互作用,还有待于深入研究.

参考文献:

[1] Li H, Reynolds J F. On the definition and quantification of heterogeneity[J]. *Oikos*, 1995, **73**: 280-284.

[2] 贾晓红, 李新荣. 腾格里沙漠东南缘不同生境白刺 (*Nitraria*) 灌丛沙堆的空间分布格局[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7):2046-2053.

[3] 王云强, 张兴昌, 李顺姬, 等. 小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1567-1572.

[4] 李君, 赵成义, 朱宏, 等. 融雪后梭梭林地土壤水的多尺度空间异质性[J]. *中国科学(D 辑)*, 2006, **36**: 45-50.

[5] Parkin T B. Spatial variability of microbial processes in soil: a review [J]. *J Environ Qual*, 1993, **22**:409-417.

[6] Zuo X A, Zhao H L, Zhao X Y, *et al.* Spatial pattern and heterogeneity of soil properties in sand dunes under grazing and restoration in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. *Soil Till Res*, 2008, **99**:202-212.

[7] Boettcher S E, Kalisz P J. Single-tree influence on soil properties in the mountains of eastern Kentucky[J]. *Ecology*, 1990, **71**: 1365-1372.

[8] Schlesinger W H, Pilmanis A M. Plant-soil interactions in deserts [J]. *Biogeochemistry*, 1998, **42**: 169-187.

[9] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification[J]. *Science*, 1990, **247**: 1043-1048.

[10] Katherine G, Kurts P, Andrew J B. Spatial variation in nitrogen availability in three successional plant communities[J]. *J Ecol*, 1995, **83**:357-367.

[11] Whittaker R J, Willis K, Field R. Scale and species richness: towards a general hierarchical theory of species diversity [J]. *J Biogeogr*, 2001, **28**: 453-470.

[12] Zheng J, He M, Li X, *et al.* Effects of *Salsola passerina* shrub patches on the microscale heterogeneity of soil in a montane grassland, China[J]. *J Arid Environ*, 2008, **72**:150-161.

[13] Robertson G P, Crum J R, Ellis B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance[J]. *Oecologia*, 1993, **96**: 451-456.

[14] 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 近 50 a 来中国北方沙漠化土地的时间变化[J]. *地理学报*, 2004, **59**(2): 203-212.

[15] 郭铁瑞, 赵哈林, 左小安, 等. 科尔沁沙地沙丘恢复过程中典型灌丛下结皮发育特征及表层土壤特性[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4):1027-1034.

[16] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. *环境科学*, 2007, **28** (5): 18-24.

[17] 李玉强, 赵哈林, 移小勇, 等. 沙漠化过程中科尔沁沙地植物-土壤系统碳氮储量动态[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 635-640.

[18] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[19] Guo Y R, Zhao H L, Zuo X A, *et al.* Biological soil crust development and its topsoil properties in the process of dune stabilization, Inner Mongolia, China[J]. *Environ Geol*, 2008, **54**: 653-662.

[20] 贾宇平, 苏志珠, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异[J]. *水土保持学报*, 2004, **18**(1):31-34.

[21] 吴建国, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳的影响(理论方法和实践)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.

[22] Burke I C, Lauenroth W K, Riggle R, *et al.* Spatial variability in soil properties in the shortgrass steppe: the relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns[J]. *Ecosystems*, 1999, **2**:422-438.

[23] Sebasti M T. Role of topography and soils in grassland structuring at the landscape and community scales[J]. *Basic Appl Ecol*, 2004, **5**: 331-346.

[24] Zuo X A, Zhao H L, Zhao X Y, *et al.* Plant distribution at the mobile dune scale and its relevance to soil properties and topographic features[J]. *Environ Geol*, 2008, **54**: 1111-1120.

[25] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, *et al.* On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems[J]. *Ecology*, 1996, **77**: 364-374.

[26] Su Y Z, Zhang T H, Li Y L, *et al.* Changes in soil properties after establishment of *Artemisia halodendron* and *Caragana microphylla* on shifting sand dunes in semiarid Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Environ Manage*, 2005, **36**:272-281.

[27] 张继义, 赵哈林, 张铜会. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. *植物生态学报*, 2004, **28** (1): 86-92.