放牧干扰后自然恢复的退化沙质草地土壤性状的空间分布*

苏永中 赵哈林 李玉霖
(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘 要 用地统计学的方法, 研究了科尔沁沙质退化草地不同强度放牧干扰(重度放牧和适度放牧)后自然恢复过程中 0~ 15 cm 土层土壤有机碳、全氮、pH 和电导率在 10 m 尺度上的空间异质性特征。结果表明, 重牧后的恢复草地比适度放牧后的恢复草地呈现出显著低的有机碳和全氮含量及其显著高的变异性。在取样尺度的空间分布上均表现出显著的空间结构特征, 自相关尺度分别为 22.2~ 29.4 m 和 25.5~ 39 m, 结构性方差占样本方差的 87.2%~ 88.2% 和 65.5%~ 85.9%。全氮的自相关尺度大于有机碳。土壤 pH 和电导率在取样的尺度内不存在局部格局, 而可能受更大尺度的格局控制。放牧引起的植被斑块状分布和沙化裸斑的出现是土壤碳、氮空间变异的主要因素; 土壤异质性尺度的改变又可能影响着植被的恢复演替和分布格局。

关键词 退化沙质草地; 放牧; 恢复; 土壤性状; 空间异质性
中图分类号 S15 文献标识码 A

在干旱、半干旱的草地生态系统中, 土壤要素的小尺度空间异质性分布是一个普遍的特征[1~4]。土壤资源的异质性除受到种群的生物学特性和植物个体大小影响外[4,5], 草地长期的过度放牧是异质性增加的一个重要外因[1,6]。Jaramilla 和 Detling[6] 研究表明, 家畜的选择性采食和尿斑沉积, 增加了草地的结构异质性和功能异质性。Schlesinger 等[2] 研究表明, 长期过度放牧引起的土壤属性(如土壤水分、养分)空间异质性是导致草地群落被荒漠灌木侵入的重要因素, 侵入的灌木进一步在其灌丛下聚集养分, 导致灌丛肥岛(Islands of fertility)的发育, 促进了这些灌木在群落中的定居, 加速了被荒漠灌木入侵草地的荒漠化。因此, 土壤属性空间异质性的变化被认为是干旱、半干旱草地土地荒漠化的一个重要指标。

地处中国北方半干旱农牧交错带的科尔沁沙质草地是中国温带典型退化草原之一。由于长期过度放牧等人类活动, 科尔沁草地原生景观已演变为平缓起伏的流动沙地、半固定沙地、固定沙地和丘间低地镶嵌分布的斑块状破碎化景观, 原生植被被杂草群落取代, 前人对此已作过详细的描述[7]。在较小的空间尺度上, 由于受微地形、放牧干扰、风蚀作用以及生物地球化学循环等作用的共同影响, 在退化的沙质草地群落内部又具有明显的中小尺度土壤养分及植物斑块分布格局的空间异质性。特别是由于过度放牧引发的强烈风蚀作用导致草地沙漠化的发生和发展, 风蚀裸沙斑块的出现, 使群落成为一个高度异质化的景观。因此, 中小尺度上土壤异质性的增加是这种退化沙质草地向沙漠化演变的重要标志之一, 探讨退化沙质草地放牧演变、恢复过程与土壤异质性的关系, 将有助于揭示草地退化和恢复的机理。本文用传统统计学和地统计学的方法分析比较了科尔沁沙地退化沙质草地在过度放牧和适度放牧干扰后自然恢复过程中草地土壤化学性状的中小尺度的空间异质性特征, 为揭示沙漠化的生物学反馈机制和退化生态系统恢复机理提供依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域

研究地点位于科尔沁沙地中南部内蒙古通辽市奈曼旗境内(42°55′ N, 120°42′ E), 本区属温带大陆性半干旱气候, 年均温 6.4 ℃, 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, 年平

* 国家重大基础研究发展规划项目"中国北方沙漠化过程及其防治研究"(G2000048704)资助
作者简介: 苏永中(1966~), 男, 甘肃古浪人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤学和恢复生态学方面的研究。E-mail: stnm@ns.lzb.ac.cn
收稿日期: 2002-12-13; 收到修改稿日期: 2003-02-27

均风速 3.5 m s^{-1}, 大风日数 20~ 60 d。退化沙质草地的地表类型均为沙基质, 土壤类型为风沙土, 疏松的结构极易遭受风蚀。

研究样地为典型的退化沙质草场, 地表特征平缓开阔, 1992 年开始作为中国科学院奈曼沙漠化研究站的放牧观测场, 进行了连续 5 a 围封放牧试验, 设重度放牧、中度放牧、轻度放牧和无放牧 4 个梯度[8]。在围封前由于长期放牧已发生轻度沙漠化, 但植被类型、地表和土壤环境特征均一, 植被以禾本科类和非禾本科的杂草为主, 灌木和半灌木很少[8]。5 a 放牧试验后, 各放牧处理的地表特征和植被状况已发生明显分异, 重牧处理风蚀裸斑增加, 已向严重沙漠化演变[8, 9]。1997 年停止放牧试验后, 继续围封进行自然恢复。本文主要探讨不同强度放牧干扰后自然恢复过程中土壤异质性分布, 揭示过度放牧对沙质退化草地长期的负面影响, 包括重度放牧后自然恢复(HGR)和适度(中度和轻度)放牧后自然恢复(MGR) 2 个处理。

1.2 取样分析

在 2 个处理的样地上, 设置 5 条长 200 m 相互平行的样线, 样线间隔 10 m, 沿每条样线间隔 10 m, 用土钻取 0~ 15 cm 深度混合样(在 1 m^2 范围内取 3 钻混合)。土样带回室内处理后, 用重铬酸钾、硫酸氧化—外加热法测定土壤有机碳, 用凯氏法测定全氮[10](意大利产 DK6, UDK140 分析仪); 土壤 pH 和电导率(EC) 分别用 1∶1 水土比悬液和 1∶5 土水比浸提液, 用德产 Multiline F/SET-3 分析仪直接测定。

1.3 数据分析

对每个处理的土壤性状值用传统统计学方法进行基本统计特征的计算, 并进行单样本的频数分析。用 t 检验分析 2 个处理之间土壤性状的显著性差异。各因子变异函数(Semivariogram)的计算按公式(1)进行:

$$\gamma(h) = [1/2N(h)] \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad i = 1 \sim N \qquad (1)$$

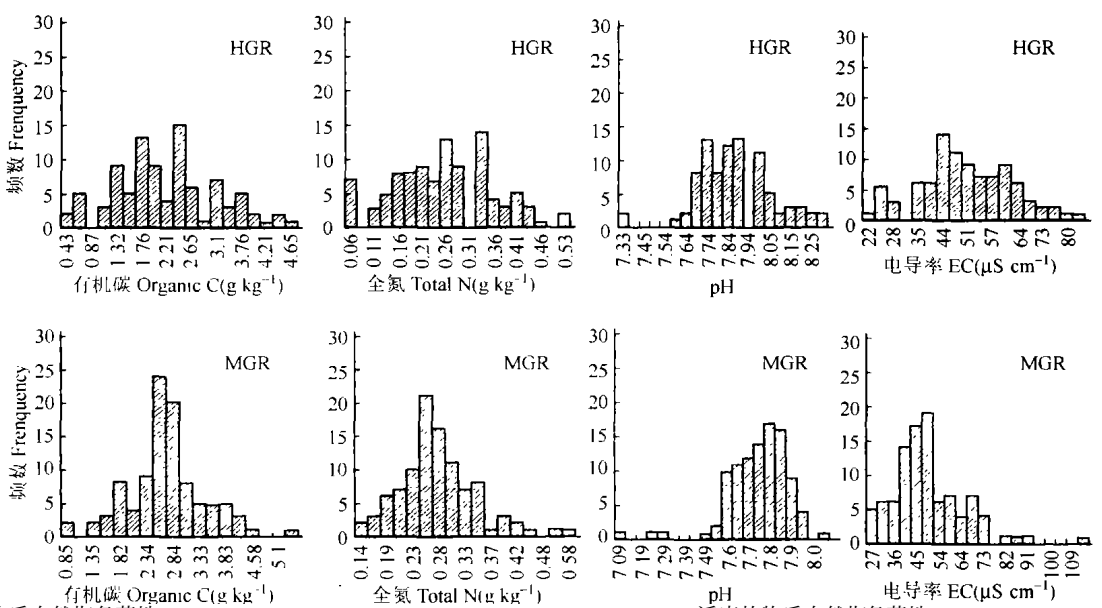
式中 $N(h)$ 是距离等于 h 时的点对数, $Z(x_i)$ 是样点 Z 在位置 x_i 的实测值, $Z(x_i + h)$ 是与 x_i 距离 h 处样点的值。

对计算出的各土壤性状的变异函数, 绘出曲线图, 并建立变异函数的理论模型。通过模型中的块金值(Nugget, C_0), 基台值(Sill, $C + C_0$), 变程(Range, α), 块金值(C_0) 与基台值之比($C/(C + C_0)$) 等参数定量的分析各因子的空间变化规律[11]。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤属性参数的统计特征值与对比分析

对 2 个处理各土壤属性值的频数分析表明, 各土壤性状均呈正态或近正态分布(图 1)。进一步分析表明, 各性状值的中值和平均值均比较接近(表 1), 表明土壤性状的中心趋向分布并不被异常值所决定, 而且近正态分布的土壤性状并不存在比例效应。



HGR: 重牧后自然恢复草地 Natural recovering grassland after heavy grazing for 5 years; MGR: 适度放牧后自然恢复草地 Natural recovering grassland after moderate grazing for 5 years

图 1 土壤性状频数分布

Fig. 1 Histogram of soil properties

表 1　土壤性状的统计特征值

Table 1　Statistical characteristics of soil properties

土壤性状 Soil properties	处理 Treatment	样本数 Sample number	平均数 Mean	中数 Median	标准差 SD	变异系数 CV%	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	偏度系数 Skewness	峰值系数 Kurtosis
有机 C(g kg^{-1})	HGR[1)]	100	2.32	2.30	0.97	41.8	4.65	0.43	0.27	−0.48
Organic C	MGR[2)]	100	2.72	2.70	0.74	27.0	5.57	0.85	0.43	1.7
全 N(g kg^{-1})	HGR	100	0.257	0.253	0.104	40.5	0.53	0.06	0.17	−0.28
Total N	MGR	100	0.279	0.268	0.072	27.2	0.58	0.14	1.04	2.73
pH(H_2O)	HGR	100	7.88	7.89	0.173	22.0	8.3	7.33	−0.14	1.13
	MGR	100	7.74	7.76	0.145	18.7	8.05	7.09	−1.6	4.88
电导率(μS cm^{-1})	HGR	100	49	49	12.8	26.1	83	22	0.16	−0.03
EC	MGR	100	50	48	14.4	28.8	114	27	1.36	3.29

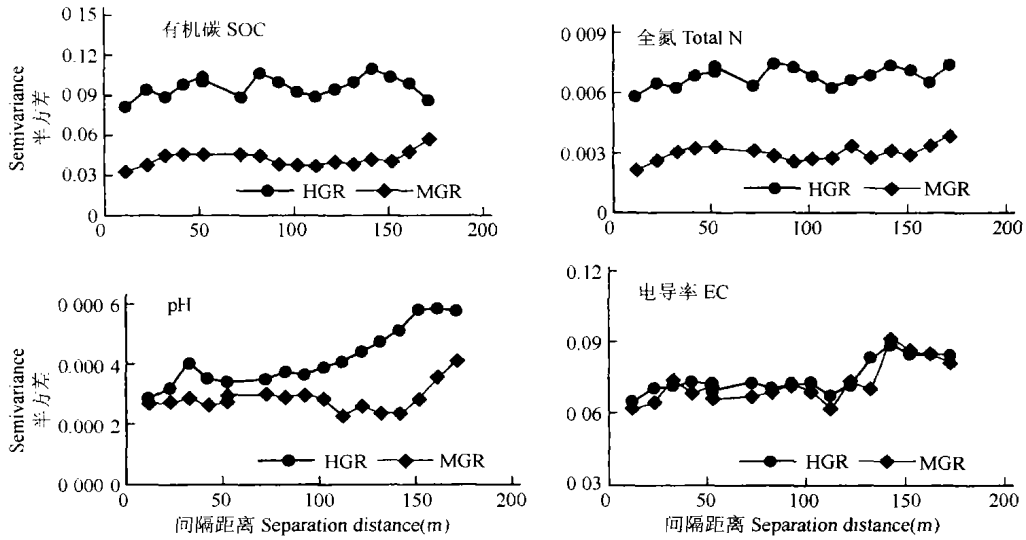
1) HGR: 重牧后自然恢复草地 Natural recovering grassland after heavy grazing for 5 years; 2) MGR: 适度放牧后自然恢复草地 Natural recovering grassland after moderate grazing for 5 years

处理之间比较, 重牧后恢复的草地土壤有机 C 和全 N 变动在 0.43~ 4.65 g kg^{-1}和 0.05~ 0.53 g kg^{-1}, 最大值是最小值的 10.8 和 10.6 倍; 适度放牧后恢复草地土壤有机 C 和全 N 变动在 0.85~ 5.57 g kg^{-1}和 0.14~ 0.58 g kg^{-1}, 最大值是最小值的 6.6 和 4.1 倍。从平均值分析, 土壤有机 C 和全 N, 重牧后恢复草地较适度放牧后恢复草地分别低 17.3% 和 8.6%, t 检验达极显著水平(有机 C, F= 10.75, t= 3.477, p= 0.001; 全 N, F= 14.48, t= 1.789, p< 0.000 1)。土壤性状的变异系数(CV)可以提供土壤异质性的信息[12], 在研究的尺度范围草地土壤有机 C 和全 N 的变异系数变动在 27%~ 41.8% 之间, 表明退化沙质草地有较高的土壤 C、N 分布的变异性。重牧后恢复区 C、N 的变异系数分别是适度放牧后恢复区的 1.55 和 1.48 倍, 说明重度放牧导致了土壤异质性的增加。这主要是由于重度放牧导致植被的极度破坏, 地表出现风蚀裸斑, 草地呈现出小尺度高度破碎化的斑块状景观, 停止放牧后, 在风蚀裸斑处植被的恢复很慢。重度放牧后恢复区土壤 pH 略高于适度放牧后恢复区, 但差异不显著(F= 2.53, t= 6.225, p= 0.113); 土壤电导率处理之间无明显差异。土壤 pH 和电导率的变异系数处理间基本相同, 说明不同强度放牧对土壤 pH 和电导率的分布影响较小。

2.2　不同处理土壤属性的空间结构特征

从半方差分析结果可以看出(图 2, 表 2), 退化沙质草地 0~ 15 cm 土壤有机 C 和全 N 含量均存在显著的空间结构特征, 土壤有机 C 结构性方差占样本方差的 87.2%~ 88.2%, 全 N 为 65.5%~ 85.9%, 空间自相关距离有机 C 为 22.2~ 29.4 m, 全 N 为 25.5~ 39 m。从块金效应分析, 块金值和基台值土壤全 N 明显小于有机 C, 这表明, 退化沙质草地土壤全 N 比有机 C 有相对较均一的空间分布。这主要是由于放牧导致的草地沙漠化演变中土壤有机 C 的损失明显快于全 N 的损失, 而在植被恢复的早期阶段随着凋落物的输入土壤有机 C 的积累和恢复又明显快于土壤全 N 的恢复。表 2 数据也表明, 土壤有机 C 和全 N 块金方差/基台值之比(C_0/(C_0+C))较小, 反映了空间自相关部分引起的空间变异性程度高, 而随机部分引起的空间变异性较小。这种主要由系统变异引起的空间异质性是由于放牧导致了植被格局的变化进而导致土壤属性分布的变化, 以及沙漠化的发生导致草地呈现小尺度上的斑块化的结果。

两个处理之间比较, 土壤有机 C 和全 N 的块金值和基台值重牧后恢复区显著高于适度放牧后恢复区, 而空间自相关距离则相反。表明: (1) 土壤有机 C 和全 N 在小于最小取样距离的尺度上, 重牧后恢复区比适度放牧后恢复区存在较大的空间变异; (2) 重牧后恢复区有较大的系统内总变异; (3) 重牧后土壤有机 C 和全 N 分布的均一性显著降低, 在小范围内的变异加强, 整体分布趋于复杂。



HGR: 重牧后自然恢复草地 Natural recovering grassland after heavy grazing for 5 years;
MGR: 适度放牧后自然恢复草地 Natural recovering grassland after moderate grazing for 5 years

图 2 土壤性状变异函数曲线

Fig. 2 Semivariogram of soil properties

表 2 土壤性状变异函数理论模型及相关参数

Table 2 Semivariogram models of soil properties and corresponding parameters

土壤性状 Soil properties	处理 Treatment	理论模型 Theory model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill C_0+C	块金值/基台值 Nugget/Sill $C_0/(C_0+C)$	变程 Range A_0(m)	决定系数 R^2	残差 RSS
有机 C	HGR	Exp.[1)]	0.011 4	0.096 8	11.8	22.2	0.271	6.87E-04
Organic C	HMR	Exp.	0.005 6	0.043 8	12.8	29.4	0.25	4.06E-04
全 N	HGR	Exp.	0.001	0.007 1	14.1	25.5	0.242	5.45E-06
Total N	HMR	Sph.[2)]	0.001 1	0.003 2	34.4	39	0.369	2.09E-06
pH(H_2O)	HGR	Sph	2.72E-04	5.88E-04	46.3	300.5	0.638	5.32E-08
	HMR	Linear[3)]	2.34E-04	3.56E-04	65.7	–	0.252	1.64E-07
电导率	HGR	Linear	0.061 7	0.092 3	66.8	–	0.561	7.25E-03
EC	HMR	Linear	0.061 7	0.084 7	72.8	–	0.646	9.49E-04

1) Exp: 指数模型 Exponential model; 2) Sph: 球状模型 Spherical model; 3) Linear: 线性模型 Linear model

土壤 pH 和电导率呈现出与土壤有机 C 和全 N 不同的空间分布格局,结果表明,在重牧后恢复区土壤 pH 的半方差函数表现为球状模型,但随机部分引起的空间变异占到了 46.3%,其空间自相关距离已远大于取样的尺度范围;土壤电导率和适度放牧后恢复区土壤 pH 的半方差函数均表现为线性模型。一方面说明土壤 pH 和电导率在取样尺度内不存在局部格局,而可能有更大的格局控制[11]。另一方面土壤电导率相对较大的块金值表明可能存在更小尺度上的空间变异,如放牧家畜的尿斑沉积以及植物个体下和个体之间凋落物的积累和分解的差异,均会造成养分离子的异质性分布。在研究的尺度上,过度放牧下由于裸沙斑块的出现可能影响到土壤 pH 的变化,但适度放牧下植被保持了相对均一的盖度,对土壤性状的影响相对较小。

3 讨论和结论

在干旱半干旱草地生态系统中,土壤性状的小尺度空间异质性是一个普遍的现象[2~4]。已有的研究表明,在植物个体尺度上土壤养分的异质性往往发生在几厘米或几米的空间尺度上[2~4, 13]。Schesinger 等[2] 研究发现,毛格兰马草(*Bouteloua eripoda*)草地土壤氮素在小于 20 cm 和 20~700 cm

两个尺度上均具空间结构特征; 白永飞等[3] 和王其兵等[13] 在 0.5 m 的取样尺度上研究了覆盖均匀的内蒙古针茅草原土壤有机碳和全氮的空间异质性, 其空间自相关尺度分别为 1.9~ 6.2 m 和 8.19~ 8.69 m。本项研究以科尔沁已退化的沙质草地为对象, 主要探讨草地沙漠化的发生引起草地景观的破碎化和斑块状分布而导致的土壤性状异质性。在研究中以分辨率为 10 m 的取样间隔为空间尺度, 忽略植物个体对异质性的影响。结果表明, 退化沙质草地土壤有机碳和全氮在研究的尺度上呈现出高度的空间异质性, 其空间自相关距离分别为 22.2~ 29.4 m 和 25.5~ 39 m, 全氮的空间自相关距离大于有机碳, 这与其它地域草地土壤在更小尺度上的研究结果是一致的[3, 13]。土壤有机碳和全氮的水平和分布是度量草地生态系统功能恢复与维持的关键指标之一, 也是影响植物分布、植物功能群组成和群落物种多样性的重要因素[14]。因此可以推断, 土壤碳、氮的空间分布格局, 不仅决定了草地群落或种群基本斑块的大小, 而且对植物个体、种群及群落水平的生态学进程也有着重要的影响, 如种子及幼苗形成、植物的养分供应潜力、群落物种多样性和初级生产力等。

草地生态系统放牧退化的主要原因是超载过牧和不合理的放牧方式对生态系统各组分及其协调关系的破坏, 以及对生态系统物质循环能量的衰减[15]。Schesinger 等[1, 2] 认为, 半干旱草地长期过牧导致的土壤水分、养分等资源的时空异质性的增加是草地荒漠化的一个重要指标。本项研究的结果表明, 过度放牧后恢复的草地土壤有机碳和全氮不仅其含量水平显著低于适度放牧后恢复的草地, 而且有显著高的空间异质性。以前的研究已表明, 沙质草地在连续的过度放牧下已超出了其承载能力和承受干扰的阈限, 导致沙漠化的发生和发展, 草地呈现出裸沙斑块镶嵌分布的高度异质化景观[8, 9, 16]。土壤碳、氮分布的异质性特征很好地反映了草地景观放牧演变的趋势。在自然恢复过程中, 土壤碳、氮分布的结构特征又强烈影响着植被恢复演替的方向。在过度放牧后恢复区, 群落向灌丛化和斑块化演变的趋势明显, 而适度放牧后恢复区植被的分布相对均一。因此, 退化沙质草地土壤性状分布的尺度变化可以作为预测草地沙漠化程度的一项定量指标, 并可用来描述草地群落在人类活动干扰下的演替过程和变化趋势。

参 考 文 献

[1] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, *et al*. Biological feedbacks in global desertification. Science, 1990, 247: 1 043~ 1 048

[2] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, *et al*. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. Ecology, 1996, 77(2): 364~ 374

[3] 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): 1 215~ 1 223. 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 (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1 215~ 1 223

[4] Hook P B, Burke I C, Lanenroth W R. Heterogeneity in soil N and C associated with individual plants and openings in North American shortgrass steppe. Plant and Soil, 1991, 138(2): 247~ 256

[5] Armesto J J, Pickett S T A, McDonell M J. Spatial heterogeneity during succession: A cyclic model of invasion and exclusion. *In*: Kosola J, Pickett S T A. eds. Ecological Heterogeneity. New York: Springer-Verlag, 1991. 256~ 269

[6] Jaramillo V J, Detling J K. Small-scale heterogeneity in a semi-arid North American grassland. Ⅱ. Cattle grazing of simulated urine patches. Journal of Applied Ecology, 1992, 29(1): 9~ 13

[7] 刘新民, 赵哈林, 赵爱芬. 科尔沁沙地风沙环境与植被. 北京: 科学出版社, 1996. 145~ 171. Liu X M, Zhao H L, Zhao A F. Wind-sand Environment and Vegetation in the Horqin Sandy Land, China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1996. 145~ 171

[8] 徐斌, 赵哈林, 刘新民, 等. 不同放牧强度下天然沙质草场植物群落分异特征及沙漠化发生机理试验研究. 兰州大学学报(自然科学版), 1994, 30(4): 137~ 142. Xu B, Zhao H L, Liu X M, *et al*. An experimental study on the differential characteristics of plant communities under the different grazing gradation and the mechanism of desertification in the natural sandy rangeland (In Chinese). Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1994, 30(4): 137~ 142

[9] 赵哈林, 根本正之, 大黑俊哉, 等. 内蒙古科尔沁沙地放牧草地的沙漠化机理研究. 中国草地, 1997, 3: 15~ 23. Zhao H L, Nemoto M, Ohkuro T, *et al*. Desertification mechanism of grazing grassland in Horqin Sandy Land in Inner Mongolia (In Chinese). Grassland of China, 1997, 3: 15~ 23

[10] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 7~ 59. Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. ed. Physical and Chemical Analysis Methods of Soils (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 7~ 59

[11] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. Wang Z Q. Geo-statistics and Its Application in Ecology (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999

[12] 张宏, 史培军, 郑秋红. 半干旱地区天然草地灌丛化与土壤异质性关系研究进展. 植物生态学报, 2001, 25(3): 366~ 370. Zhao H, Sheng P J, Zhen Q H. Research progress in relationship between shrub invasion and soil heterogeneity in a natural semi-arid grassland (In Chinese). Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(3): 366~ 370

[13] 王其兵, 李凌浩, 刘先华, 等. 内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析. 植物生态学报, 1998, 22(5): 409~414. Wang Q B, Li L H, Liu X H, *et al*. Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen in an Xilin river basin grassland, Inner Mongolia (In Chinese). Acta Phytoecologica Sinica, 1998, 22 (5): 409~414

[14] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响. 植物生态学报, 2001, 25(6): 648~655. Wu Y, Liu Q, Qiao Y K, *et al*. Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties (In Chinese). Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(6): 648~655

[15] 任海, 彭少麟. 恢复生态学导论. 北京: 科学出版社, 2001. 36~40. Ren H, Peng S L. Restoration Ecology(In Chinese). Beijing: Science Press, 2001. 36~40

[16] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤性状特征. 中国沙漠, 2002, 22(4): 333~338. Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, *et al*. Characteristics of grassland soils in post-grazing restoration in Horqin Sandy Land (In Chinese). Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 333~338

SPATIAL PATTERN OF SOIL CHEMICAL PROPERTIES IN DEGRADED SANDY GRASSLAND UNDER POST-GRAZING NATURAL RESTORATION IN HORQIN SANDY LAND

Su Yongzhong Zhao Halin Li Yulin

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

Abstract Geostatistics was used in studying spatial variation of soil organic carbon, total nitrogen, pH and electrical conductivity in a degraded sandy grassland ecosystem under two different grazing patterns, heavy grazing (HGR) and moderate grazing (MGR) to examine effect of grazing intensity on spatial heterogeneity of the properties. One hundred soil samples were taken from the soil layer 0~15 cm in depth of a grid of 10 m × 10 m under each grazing pattern. The results showed that soil organic carbon and total nitrogen contents were significant lower and their coefficients of variation significant higher under HGR than under MGR. Geostatistical analysis of soil heterogeneity revealed that organic carbon and total nitrogen show strong spatial dependence with exponential or spherical semivariograms on the studied scale. 87.2%~88.2% of the variation in soil organic carbon was found within the distance from 22.2~29.4 m, and 65.5%~85.9% of the variation in total nitrogen was found within the distance from 25.5~39 m. The distance of spatial autocorrelation in soil organic carbon and total nitrogen was greater under HGR than under MGR, suggesting that overgrazing resulted in an increase in soil heterogeneity. Soil pH and electrical conductivity did not show spatial autocorrelation within the studied scale, and they were probably controlled by a bigger scale and process. The distribution of vegetation patchs and the bare sand ones resulting from grazing was the main cause of the increase in soil heterogeneity and indicated extent of desertification of the grassland. The changes in heterogeneity in the distribution of soil properties may in turn influence restoration process and distribution pattern of the vegetation.

Key words Degraded sandy grassland; Grazing; Restoration; Soil properties; Spatial heterogeneity.