荒漠人工固沙植被区土壤性状的空间分布特征*

潘颜霞[1,2]　王新平[1†]　苏延桂[1,2]　何明珠[1,2]
(1　中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站, 兰州　730000)
(2　中国科学院研究生院, 北京　100039)

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES IN ARTIFICIALLY REVEGETATED DESERT AREA

Pan Yanxia[1,2]　Wang Xinping[1†]　Su Yangui[1,2]　He Mingzhu[1,2]
(1　*Shapotou Desert Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Lanzhou* 730000, *China*)
(2　*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

关键词　人工固沙植被; 荒漠; 土壤性状; 空间异质性; 地统计学
中图分类号　S153.6　　**文献标识码**　A

空间异质性为系统的某种属性在空间上的复杂性和变异性[1]。土壤学家将土壤特性在不同空间位置上存在明显差异的属性称为土壤特性的空间异质性[2], 不论在大尺度上还是小尺度上, 土壤的空间异质性均存在。自从 20 世纪 60 年代 Martheron[1]建立地统计学以来, 土壤特性的空间变异定量化研究一直是一个被关注的热点问题, 土壤特性的空间格局及其产生空间变异的主要影响因素成为异质性研究的一个重要领域。

在天然生态系统中, 植物群落的组成、活性和发育阶段影响物种之间的竞争从而对土壤属性具有潜在的显著影响。Sun 等[3]和 Zhang 等[4]对我国亚热带山区的研究结果显示土地利用类型(植被不同)的变化影响土壤性状的空间分布特征及土壤质量的变化。Bekele 和 Hudnall[5]研究了草原 - 森林过渡带碳同位素的稳定性, 结果表明虽然由于植被类型和地理位置所引起的土壤有机碳的差异不显著, 但通过碳同位素能够反映出整个试验地原来的植被类型。

先前对土壤特性空间分布的研究大多集中在农田耕作区域[6], 有关干旱荒漠地区土壤特性空间变异的研究鲜有报道。本文的研究地点设在沙坡头荒漠人工固沙植被区, 该区用于固定流动沙丘的雨养固沙植被始建于 1956 年, 最初引进的灌木主要是油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和花棒(*Hedysarum scoparium*), 之后在固定沙丘上形成了一种矮灌木和微生物土壤结皮覆被的荒漠灌木生态系统, 此外, 固定沙丘上物理性表面结构的形成和大气降尘形成的物理性结皮也导致了微生物土壤结皮的逐步形成。流动沙丘的固定导致了(1)土壤粒径减小; (2)微生物结皮厚度增加; (3)亚表层土壤厚度增加; (4)表层土壤体积水分含量增加; 荒漠化逆转过程开始[7], 其土壤特性及其空间分布特征必将发生一系列的改变, 通过对该区人工固沙过程中土壤性状变化及空间分布特征的研究, 以期为干旱荒漠地区生态工程固沙和植被恢复提供理论借鉴。

1　研究方法

1.1　试验样地描述

在 1956 年人工固沙植被区沿东西方向 90 m, 南北方向 50 m 固定一个 0.45 hm^2的样地, 样地自西向东依次为背风坡、丘间低地和迎风坡, 在整个样地内每隔 10 m 设取样点, 总共得到 60 个样点。

* 中国科学院创新方向性项目(KZCX2 - YW - 431)资助
† 通讯作者, E-mail: xpwang@lzb.ac.cn
作者简介: 潘颜霞(1981～), 女, 汉族, 山东寿光人, 硕士, 主要从事干旱区土壤水分空间异质性研究
收稿日期: 2006 - 06 - 08; 收到修改稿日期: 2006 - 11 - 03

1.2 土样采集与分析

2005 年 9 月下旬在每个样点周围 1 m 半径范围的圆内采集 4 个样点的表层(0～5 cm)土样充分混合,用四分法取大约 1 kg 样品,室内风干后密封带回中国科学院寒区旱区环境与工程研究所土壤实验室分析。土壤粒径(D)分析用 MS-S 激光粒度分析仪(英国马尔文 Malvern 仪器有限公司);有机质(OM)的测定用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮(TN)用 Kjeltec 1026 凯氏定氮仪(瑞典 Foss Tecator 公司)测定;碱解氮(HN)用扩散法;速效磷(AP)用碳酸氢钠熔融-紫外分光法;速效钾(AK)用 1 mol L^{-1} NH_4OAc浸提-火焰光度法;电导率(EC)测定用 1∶5 土水比浸提液,由 Cole-Parmer19820-20 手持式电导分析仪(美国 Cole-Parmer 仪器公司)测定;pH 值用 1∶1土水比悬液,由 PHS-4 智能酸度计(江苏江堰市电分析仪器有限公司)测定。

2 结果与讨论

2.1 土壤性状空间变异统计特征

采用单样本 Kolmogorov-Smirnov 分布检验对土壤各性状的分布类型进行检验,除速效钾经对数转换后为正态分布外,其余均为正态分布,都符合地统计学和半方差模型建立的要求。从土壤各参数的平均值看,经过近 50 年的人工固定过程,由于风化和风力搬运沉积及植被、径流等作用的结果,土壤质量状况得到明显改善,流沙固定后干旱砂质新成土趋向于一种区域性的土壤类型 ——简育正常干旱土[8]。

变异系数 CV 的大小反映了土壤各参数的空间变异性程度,CV < 10 %为弱变异,10 % ≤CV ≤30 %为中等变异,CV > 30 %为强变异[9];试验所测各参数中 pH 为弱变异(3.27 %),pH 的大小与成土母质密切相关,研究区属于干旱荒漠地区,整个试验样地的土壤均由流动风沙土发育而成,而且 pH 表达的是土壤溶液中 H^+ 含量的对数值,比直接用 H^+ 含量表示具有更小的变化性,因此其变动幅度不大;电导率、有机质和速效磷为强变异,其余参数均表现为中等变异(表 1)。

2.2 描述土壤性状空间变异的主要因素

主成分分析是研究如何将多指标问题化为较小的新指标问题的一种方法,综合后的新指标既彼此不相关,又能综合反映原来多个指标的信息[10]。

从表 2 中可以看出前 3 个主成分对方差解释的贡献率分别为 42.70 %、24.78 %和 10.48 %,占整个方差的近 80 %,能够比较全面地反映所有信息。

从各主成分的模型中(略)可以得出,第一主成分 F1 主要由 OM、TN、D 决定,其作用在第一主成分上的荷载分别为 0.866、0.837 和 0.935,第二主成分 F2 主要由速效养分(HN、AP、AK)决定,作用荷载分别为 0.78、0.621 和 0.905,第三主成分 F3 主要由变量 EC、pH 决定,作用荷载分别为 0.833、- 0.692。

表 1 土壤各性状描述性统计结果

性状	电导率 (μS cm^{-1})	pH	有机质 (g kg^{-1})	全氮 (g kg^{-1})	碱解氮 (mg kg^{-1})	速效磷 (mg kg^{-1})	粘粒 (%)	粉粒 (%)	沙粒 (%)	速效钾 (mg kg^{-1})
均值	253.5	8.57	7.57	0.57	31.1	14.10	2.70	23.42	73.88	327
标准差	101.9	0.28	2.48	0.15	7.7	5.26	0.75	6.86	7.60	76
最小值	122.8	7.66	0.71	0.16	14.7	4.24	0.64	2.19	61.68	220
最大值	562.7	9.00	14.18	0.96	47.6	28.74	4.18	34.15	97.17	540
变异系数(%)	40.18	3.27	32.76	26.32	24.6	37.31	27.78	29.29	10.29	23.37
分布类型	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	对数正态

表 2 主成分分析总方差解释表

成分	初始特征值		
	特征值	PV(%)	CPV(%)
1	3.416	42.70	42.70
2	1.983	24.78	67.49
3	0.838	10.48	77.96
4	0.692	8.649	86.61
5	0.441	5.506	92.12
6	0.313	3.911	96.03
7	0.193	2.413	98.44
8	0.125	1.560	100.0

注:PV:特征值占方差的百分数;CPV:特征值占方差百分数的累加值

2.3　土壤性状的结构特征

经典的统计学方法只能对土壤特性进行定量描述,概括土壤特性变化的全貌,而不能反映其局部的变化特征,即只在一定程度上反映样本总体,而不能定量地刻画土壤特性的随机性和结构性、独立性与相关性[10]。而地统计学方法可以克服经典统计学的这一缺陷,对土壤特性空间变化的结构性进行研究。

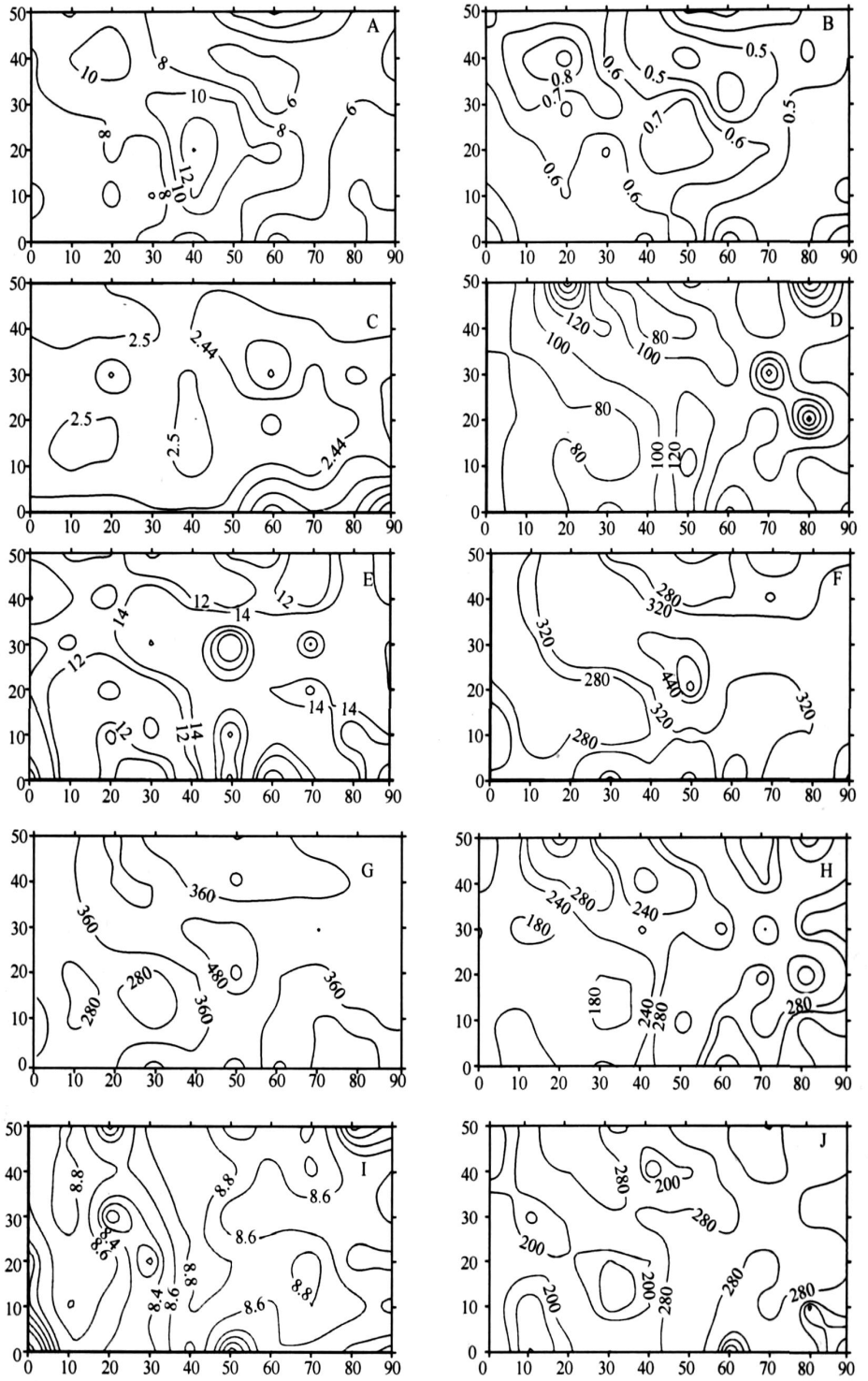
表 3　土壤各性状变异函数模型及相关参数

性状	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程 A_0	结构方差比 $C/(C_0 + C)$	决定系数 R^2
OM	球状	0.100	0.261	56.2	0.619	0.945
TN	球状	0.053	0.149	164.7	0.648	0.944
HN	线性	0.062	0.062	72.46	0	0.508
AP	线性	0.494	0.494	72.46	0	0.164
AK	线性	0.048	0.048	72.46	0	0.484
EC	球状	0.098	0.197	209.3	0.503	0.894
pH	球状	8.38×10^{-4}	1.686×10^{-3}	210.9	0.503	0.284
D	球状	0.001	0.012	210.9	0.909	0.918

应用地统计学的 GS + 软件拟合出试验所测土壤各性状的最佳理论模型(表 3),碱解氮、速效磷和速效钾为纯块金模型,变量的空间自相关不存在[1]。在荒漠生境中,土壤 N、P、K 的空间变异性分布与灌丛植被的出现高度相关[11],本试验所在地灌丛植被盖度仅为 8.64 %,零星分布于整个样地,从而导致与其紧密相关的碱解氮、速效磷和速效钾在整个样地内的分布不具有空间自相关性。有机质、全氮、电导率、pH 和粒径分形维数 D 均能较好地拟合成球状模型,各模型的 C_0 均大于 0,说明存在着由于抽样分析误差和小于最小抽样距离内的变化或随机和固有变异引起的各种正基底效应;结构方差比 $C/(C_0 + C)$ 可用来衡量空间自相关性程度,若 $C/(C_0 + C)$ 小于 25 %,空间自相关性弱;在 25 %～75 %之间,空间自相关性中等; > 75 %,空间自相关性强[12];碱解氮、速效磷、速效钾的 $C/(C_0 + C)$ 为 0,其变异全部由随机性因素引起;电导率和 pH 均为 50.3 %,有机质和全氮分别为 61.9 %和 64.8 %,这些土壤性状的空间变异由结构性和随机性因素共同引起;从 A_0 的大小来看,pH 和电导率的变程最大,分别为 210.9 m 和 209.3 m,有机质的变程最小,为 56.2 m,碱解氮、速效磷和速效钾具有相同的变程,均为 72.46 m。

分形维数 D 与块金值 C_0、基台值 $C_0 + C$ 和变程 A_0 等参数有一定的联系,不同变量 D 值之间的比较可以反映空间变异性的程度,R^2 表示应用模型对所研究对象的解释程度,在分形维数小、决定系数大所代表的方向,是指土壤性状在这些方向上的空间自相关较强,在这些方向上的空间变异受结构性因素影响也较大[13];有机质、全氮和 F1 在 NW-SE(135°)方向上的 D 最小,其相应 R^2 值也最大,说明有机质、全氮和主成分 F1 在 NW-SE(135°)方向上具有强的空间自相关,该方向上的变异要大于其他方向,且空间变异受结构性因素影响较大;碱解氮、速效磷、速效钾和 F2 的 D 值在 NE - SW(45°)方向上最小,说明碱解氮、速效磷、速效钾和 F2 在 NE-SW(45°)方向上的变异要大于其他方向,在该方向上的空间自相关性较强,受结构性因素的影响较大(表 4)。

土壤各参数不同方向上分维数的不同(表 4)表明各参数具有明显的各向异性结构,根据土壤性状各向异性变异函数的理论模型,应用点克立格法进行空间插值,绘制成研究区域内土壤各性状的空间分布格局图(图 1),更清楚地表明土壤各性状在研究区域内的分布具有明显的空间异质性,有机质、全氮含量和粒径分形维数 D 在整个研究区域内有从东南向西北方向递增的趋势,其在该方向上的分形维数也最小(表 4),试验所在的腾格里沙漠地区终年以西北风和西北西风为主,东南方受风力的影响明显高于西北方,而风蚀作用是荒漠化地区土壤养



A. 有机质 OM; B. 全氮 TN; C. 粒径 *D*; D. 主成分 F1; E. 速效磷 AP;
F. 速效钾 AK; G. 主成分 F2; H. 电导率 EC; I. pH 值; J. 主成分 F3

图 1 土壤性状和主成分空间分布插值图

分变异的重要动力,风蚀能够造成土壤表层粗化,细物质减少,同时有机质和养分质量分数也减少[14],因此,有机质、全氮含量和粒径分形维数呈现出从东南向西北递增的趋势,同时,风力作用可以加速土壤水分蒸发,降低土壤含水量,抑制植被生长,从而减少有机质和全氮含量;与主成分分析的结果一致(表 2),三者成为第一主成分的决定因子。碱解氮(未列出)、速效磷、速效钾与 F2 的变化趋势基本一致,其

空间分布从总体上看是西南低、东北高,最大值出现在研究区的中部丘间低地,碱解氮、速效磷和速效钾均为水溶性离子,土壤水分沿坡面产生径流,向中部丘间低地聚集,溶解的速效养分也随水分迁移使得该区含量明显升高。电导率反映了可溶性盐离子的多少,表现出从西南向东北递增的趋势,主成分 F3 因子得分的等值线图亦表现出明显的从西南向东北递增的趋势。

表 4　不同方向上各参数的分维数及决定系数

性状	全方向		S-N(0°)		NE-SW(45°)		E-W(90°)		NW-SE(135°)	
	D	R^2	D	R^2	D	R^2	D	R^2	D	R^2
OM	1.839	0.907	1.812	0.534	1.89	0.541	1.869	0.489	1.603	0.972
TN	1.837	0.928	1.847	0.388	1.808	0.403	1.889	0.801	1.554	0.931
HN	1.918	0.296	1.984	0.04	1.916	0.335	1.917	0.174	1.991	0.002
AP	1.977	0.067	1.921	0.505	1.895	0.307	1.964	0.096	1.924	0.376
AK	1.923	0.282	1.992	0.003	1.836	0.762	1.975	0.025	1.962	0.061
F1	1.932	0.683	1.829	0.744	1.95	0.149	1.983	0.039	1.795	0.856
F2	1.922	0.256	1.962	0.129	1.806	0.810	1.935	0.139	1.959	0.072

注:F1:第一主成分;F2:第二主成分

2.4　人工固沙植被分布对土壤空间变异的影响

在荒漠这个脆弱的生态环境中,土壤养分与植被之间存在着密切的相互关系。Schlesinger 等[11]通过系统调查分析表明,在荒漠生境中,土壤 N、P、K 的空间变异性分布与灌丛植被的出现高度相关,灌丛植被通过对这些元素的生物富集,在灌丛覆盖区形成一个个"肥岛"。对试验区人工固沙植被与土壤性状相关分析的结果表明:人工固沙植被的分布显著影响土壤资源的空间分布特征,固沙植被覆盖度与有机质、全氮、碱解氮、速效磷、粉粒、粘粒含量呈极显著正相关关系($p < 0.01$),与速效钾含量显著正相关($p < 0.05$),与沙粒含量呈极显著负相关关系($p < 0.01$)。

由于灌木植被的作用,土壤各性状均表现出一定的空间变异性,变异程度差别较大,除 pH 为弱变异外,其他土壤性状均具有中等以上的变异程度;土壤有机质、全氮、电导率和 pH 均可以较好地拟合成球状模型,具有明显的空间自相关性,其变异由结构性因素和随机性因素共同引起,且受结构性因素的影响较大;碱解氮、速效磷和速效钾均表现为纯块金模型,其变异由随机性因素引起。

土壤各性状的空间分布具有各向异性,有机质、全氮和粒径分形维数具有相同的空间分布格局,受风力作用和植被的影响较大;碱解氮、速效磷和速效钾表现出一致的空间分布特征,受灌丛植被的影响较大,随土壤水分径流向丘间低地聚集。荒漠人工固沙植被区灌木植被表现出明显的"肥岛"效应。

3　结　论

草本原生植被被以灌木为优势的群落所替代是草地退化或草地荒漠化的显著特征,反之从恢复生态学的角度讲,缀块状分布的灌丛植被是干旱、半干旱荒漠地区植被恢复或荒漠化逆转的基础[15]。位于腾格里沙漠东南缘的沙坡头人工固沙植被区始植于 1956 年,通过设立草方格沙障并栽植沙生灌木对流动沙丘进行人工固定,经过 50 年的演变过程,土壤表层生物结皮形成,粘粒、粉粒含量显著增加,由流沙发育初期的干旱砂质新成土向一种区域性的土壤类型—简育正常干旱土演变;土壤质量状况有了明显改善,荒漠化逆转过程开始。

参 考 文 献

[1] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. 96～100

[2] 赵良菊, 肖洪浪, 郭天文, 等. 甘肃省灌漠土土壤养分空间变异特征. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 70～74

[3] Sun B, Zhou S L, Zhao Q G, *et al*. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. Geoderma, 2003, 115: 85～99

[4] Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, *et al*. Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in a rehabilitating ecosystem. Pedosphere, 2004, 14(4): 501～508

[5] Bekele A, Hudnall W H. Stable carbon isotope study of the prairie-forest

transition soil in Louisiana. Soil Science, 2003, 168: 783～792

[6] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究. 土壤学报, 2003, 40(1): 79～88

[7] 王新平, 李新荣, 肖洪浪, 等. 干旱半干旱地区人工固沙灌木林生态系统演变特征. 生态学报, 2005, 25(8): 1 974～1 980

[8] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变对水环境的影响. 土壤学报, 2003, 40(6): 809～814

[9] 薛正平, 杨星卫, 段项锁, 等. 土壤养分空间变异及合理取样数研究. 农业工程学报, 2002, 18(4): 6～9

[10] 李春喜, 王志和, 王文林, 编著. 生物统计学. 北京: 科学出版社, 2000. 117

[11] Schlesinger W H, Pilmanis A M, Breemen N V. Plant-soil interactions in deserts. Biogeochemistry, 1998, 42(1/2): 169～187

[12] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1): 64～67

[13] 彭凌云, 甘海华, 吴靖宇. 江门市新会区耕地土壤有效性 Si, Ca, Mg 的空间变异特征. 水土保持学报, 2005, 19(2): 80～83

[14] 吕贻忠, 马兴旺. 荒漠化土壤养分变化的影响因素研究进展. 生态环境, 2003, 12(4): 473～477

[15] 李新荣. 干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响. 中国科学 D 辑, 2005, 35(4): 361～370