

浑善达克沙地榆树疏林生态系统的空间异质性

刘建^{1,2}, 朱选伟¹, 于飞海¹, 董鸣^{1,2*}, 张淑敏¹, 王仁卿² (1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093; 2. 山东大学生命科学学院, 济南 250100)

摘要: 榆树疏林生态系统是浑善达克沙地的重要组成部分之一。运用生物统计学 (U 检验和相关性分析等) 和地统计学的方法 (半方差分析和空间局部插值), 研究了浑善达克沙地榆树疏林生态系统的土壤有机质 (SOM)、土壤全氮 (STN)、土壤 pH (SpH)、土壤含水量 (SWC) 和草本层盖度 (HC) 的空间异质性, 并探讨了它们之间以及与榆树空间位置的关系。研究结果表明: SOM、STN、SpH、SWC 和 HC 的分布格局均具有明显的空间异质性和空间自相关性, 它们的空间格局与榆树的空间分布有明显的相关性。在此基础上, 应用空间局部插值法, 绘制了各个性状的空间等值分布图。通过等值分布图直观的分析了榆树与各研究性状的空间格局的关系, 探讨榆树对疏林生态系统土壤性状和草本层植物分布的空间异质性的影响, 以及榆树下成为草原上的沃岛 (fertility island) 的原因。

关键词: 浑善达克沙地; 榆树疏林; 地统计学; 空间异质性

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)04-06-0029

Spatial Heterogeneity of *Ulmus pumila* Open Forest Ecosystem in Otindag Sandy Land

Liu Jian^{1,2}, Zhu Xuanwei¹, Yu Feihai¹, Dong Ming^{1,2*}, Zhang Shumin¹, Wang Renqing² (1. Lab of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. College of Life Sciences, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract: *Ulmus pumila* open forest ecosystem plays an important role in Otindag Sandy Land. Using biostatistics (U test and Pearson correlation analysis) and geostatistics (Semivariogram analysis and Kriging interpolation), the spatial heterogeneity of soil organic matter (SOM), soil total nitrogen (STN), soil pH (SpH), soil water content (SWC), and the correlations between them, as well as their relationships with herbaceous coverage (HC) and *Ulmus pumila* were studied. The results showed that spatial heterogeneity and spatial dependence were apparent in SOM, STN, SpH, SWC and HC. With Kriging interpolation in the sampling area, the contour maps for these properties were drawn. Using the contour maps, the relationship between *Ulmus pumila* and spatial heterogeneity of the studied properties was investigated. The possible reason for the formation of fertility island under the *Ulmus pumila* trees in the ecosystem was discussed.

Key words: Otindag Sandy Land; *Ulmus pumila* open forest; geostatistics; spatial heterogeneity

浑善达克沙地作为京津地区沙尘暴的重要沙源地引起了生态学界的广泛注意。榆树 (*Ulmus pumila*) 是华北地区的主要林种之一^[1], 在浑善达克沙地成片分布^[2,3]。在浑善达克沙地, 榆树一般总是以稀疏状态镶嵌在草原中, 不形成真正的森林环境, 而是表现出明显的草原化特征, 因此称为沙地榆树疏林^[4]。榆树不但是当地重要的景观植物, 而且由于榆树可以提供稳定的植被覆盖, 树形高大可以减小风速, 具有草本所无法取代的防风固沙价值。因此榆树疏林生态系统在当地具有独特的地位, 对它的生态

学研究不但有助于深化对榆树疏林生态系统的认识, 而且有助于半干旱区草地生态系统的保护途径的选择。

空间异质性是存在于许多尺度上的生态学现象之一^[5~9], 而植物的生长格局同环境异质性的相互影响是植物与环境之间相互关系的一个重要方面^[10]。对土壤异质性的研究不但可以

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KSCX1-08-02)
作者简介: 刘建 (1978 ~), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事恢复生态学和克隆植物生态学研究。

收稿日期: 2002-06-28; 修订日期: 2003-02-18

* 通讯作者

指导生态学研究中的取样策略,而且通过异质性与植物生长格局的相关性分析可以有助于理解植物和土壤异质性格局的相互影响.土壤有机质和氮素是生态系统中极其重要的生态因子,一直倍受生态学、土壤学等多个学科的关注^[11].土壤水分是沙地生态系统的重要生态因素,决定着沙地土壤的演化和土地生产力^[12].土壤 pH 值是土壤盐碱化诊断的重要依据,与土壤的形成和土壤中各种养分的有效性关系很大^[13],同时也直接影响植物的生长和分布.

目前尚缺乏榆树疏林生态系统的空间异质性的研究.本文采用地统计学方法研究了浑善达克沙地榆树疏林下的土壤有机质、土壤全氮、土壤 pH 值、土壤含水量以及草本层盖度的空间异质性,探讨了榆树疏林内土壤空间异质性格局和草本层盖度及榆树的关系,对榆树在退化草原生态系统的功能和退化沙地生态系统的恢复和管理都具有一定的参考价值.

1 研究方法

1.1 研究地点自然概况

研究地点在浑善达克沙地南缘的新近禁牧围封地内(116°01′ ~ 116°08′ E, 42°53.5′ ~ 42°57.5′ N).此围封地位于内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗,属大陆性干旱气候区,由温带典型草原退化形成的沙地、沙丘和低地相镶组成.沙丘土壤为风沙土,低地土壤为栗钙土.围封前一直是当地的夏季牧场,近年来由于过度放牧,草场退化较为严重,流动沙丘增多,2001 年初进行了围封.围封地主要草本植物为:羊草(*Leymus chinensis*),狗尾草(*Setaria* spp.),苔草(*Carex* spp.),灰绿藜(*Chenopodium glaucum*),委陵菜(*Potentilla* spp.),蒿类(*Artemisia* spp.),糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*),克氏针茅(*Stipa krylovii*)和无芒雀麦(*Bromus inermis*)等,沙丘上主要是沙米(*Agriophyllum pungens*),猪毛菜(*Salsola* spp.)和虫实(*Corispermum* spp.).乔木主要是榆树.榆树疏林的存在与沙地良好的水分供应有关,被认为是一种超地带性分布^[3].

1.2 取样方法

在榆树疏林生态系统中选择一块 20 m × 20 m 的正方形样地(图 1).根据围封地外的观察发现,这种榆树疏林是畜群休息和乘凉的地方.样地(尤其是榆树下)在围封前是畜群经常光顾和滞留的地方.样地内有 4 棵榆树,样地外 5 m 内没有榆树.然后把这块样地划分成 100 个 2 m × 2 m 的格子,分别记录样地内 4 棵榆树的胸径、高度和位置,然后分别以每棵榆树为中心,选取周围 2 m × 2 m 的区域,划分成 40 cm × 40 cm 的小格子,共得到 100 个小格子,去掉 4 棵榆树占的 5 个格子(其中一棵较大,占用了 2 个格子),剩余 95 个格子.记录每个格子的草本层盖度,并用土钻从每个格子的中心位置取 20 cm 深的土样.

野外工作在 2001 年 9 月完成,土样用封口袋带回实验室,每份样品中一部分在冰箱内保存用于测定速效成分和土壤含水量,一部分经风干、剔除杂质、研磨、过筛用于全氮、有机质及土壤 pH 的分析.

1.3 样品分析

土壤有机质的测定用重铬酸钾氧化-外加热法(GB 7857-87),土壤全氮用半微量开氏法(GB 7173-87),土壤含水量用蒸干称重法(GB 7833-87),测定结果以土壤干重的质量百分比计,土壤 pH 值用酸度计测定(GB 7859-87)^[14].

1.4 数据分析

实验数据先进行常规统计分析,然后进行半方差的计算和半方差图的绘制,半方差的定义为:

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

式中, $\gamma(h)$ 为空间相距 h 的点对的半方差, $N(h)$ 为相距 h 的点对数目, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为点 x_i 和与 x_i 相距 h 的点的某性状的观测值. $\gamma(h)$ 是距离 h 的函数, $\gamma(h)$ 随 h 的变化曲线称为半方差图.根据半方差的定义,当 $h = 0$ 时, $\gamma(h) = 0$.但在实际样本半方差图计算过程中,其近似平滑曲线并不通过原点,而是具有一个正的截距 C_0 ,地统计学上将其定义为块金

方差 (Nugget variance),它来源于远小于抽样尺度上存在的差异的误差.具有空间相关性分布的变量,其半方差先随 h 增加而增大,当 h 增加到一定程度时,半方差便维持在一定水平,不再有明显的增加,此时的 $\gamma(h)$ 称为阈值 (Sill),与此阈值相对应的空间距离 h 定义为空间自相关尺度或变程 (Range),以 a 表示.阈值与块金方差之差定义为结构方差 (C).变程是一个重要的基本参数,它给出了随机变量在空间上自相关性的尺度,相距大于变程的点之间不具备自相关性^[15, 16].变程对生态学研究取样具有重要指导意义.

为了定量化研究各性状的空间自相关性以及进行空间插值,采用球面模型对半方差图进行最优拟合.球面模型的函数表达式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C[1.5h/a - 0.5(h/a)^3] & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$$

式中各项意义同上.

本文中 SOM、SpH、SWC 和 HC 用测量值直接进行模型拟合.对于 STN,由于数据偏离正态分布,先对其测量值乘 100 进行平方根转换再进行球面模型的拟合^[16].

在半方差的计算中,使用的滞后间隔 (Lag interval) 是 40cm,即采样最小间隔.为保证在每个尺度上都有足够多的点对,有效间隔距离 (Active lag distance) 取 12 m.

建立半方差图拟合模型的另一重要作用是用于空间上随机变量的估计或插值,即通过对某一因子在空间上已抽样的数据推测未抽样地段上的数据,并进而绘制这个因子的空间等值分布图.在一定区域内未测点 x_0 的估计值可以通过 n 个已知样点来估计^[15-20].公式为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (\lambda_i \text{ 为已测点的权重})$$

根据上式,在 20 m × 20 m 的网格内每隔 10cm 作一次插值,共插值 40401 个,并根据插值做出各性状的等值分布图.

所有地统计学分析在软件 GS + (Version 5.3.1, Professional Edition)^[18]上完成.

2 研究结果

2.1 样地概况

表 1 是取样测定结果,从中可以看出榆树疏林生态系统各性状的基本情况.榆树下 4 m² 区域与整个榆树疏林 2 种大小采样区上的结果不一致,说明这些因素存在空间变异.其中榆树下 SOM、SpH、SWC 较高,草本层盖度 (HC) 较低.图 1 是样地及 4 棵榆树位置的示意图,在研究的样地中,点 (0, 0) 为西南角,点 (0, 20) 是东南角.样地整体地势较平,略倾斜,西北角最高,东南角最低.4 棵树的坐标分别为 I (5, 3)、II (17, 3)、III (11, 11) 和 IV (13, 11),胸径分别为 29.94、20.06、21.34 和 42.68 cm.

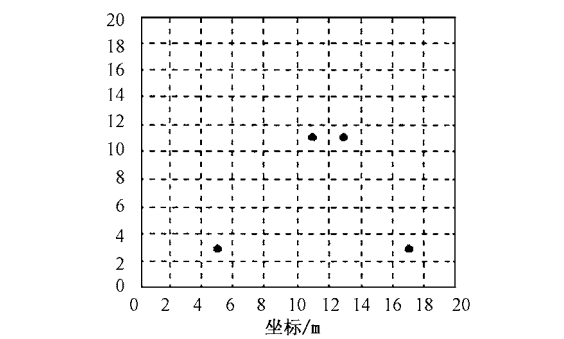


图 1 样地和榆树的位置示意图

Fig.1 The plot and the location of the trees

表 1 各性状的统计分析

Table 1 Summary of statistical analysis of the properties					
项目	采样位置	平均值	标准偏差	变异系数 / %	U 检验
SOM / %	I	1.38	0.493	35.8	9.923 ¹⁾
	N	2.05	0.451	22.0	
STN / %	I	0.10	0.039	38.1	1.912
	N	0.11	0.032	29.1	
SpH	I	7.44	0.305	4.1	13.527 ¹⁾
	N	8.44	0.654	7.7	
SWC / %	I	6.39	1.366	21.4	4.461 ¹⁾
	N	7.19	1.149	16.0	
HC / %	I	28.30	12.334	43.6	2.816 ²⁾
	N	22.57	15.784	69.9	

1) $p < 0.001$ 2) $p < 0.01$ I:榆树疏林内 N:树下 4 m² 内

2.2 各性状的相关性

从表 2 可以看出 HC 和 STN、SWC 正相关,而和 SpH 负相关,和 SOM 的相关性不显著;SOM 和 STN、SWC 以及 SpH 均正相关.

表 2 各性状间的相关性分析

Table 2 Analysis of the Pearson correlations between these properties

相关系数(<i>r</i>)	SOM	STN	SpH	SWC	HC
SOM					
STN	0. 64 ³⁾				
SpH	0. 56 ³⁾	0. 17 ¹⁾			
SWC	0. 39 ³⁾	0. 37 ³⁾	0. 21 ²⁾		
HC	0. 04	0. 35 ³⁾	- 0. 28 ³⁾	0. 31 ³⁾	

1) $p < 0. 05$ 2) $p < 0. 01$ 3) $p < 0. 001$

2.3 各性状的空间异质性

表 3 是各性状拟合模型的参数.决定系数采取 F 检验^[16, 21].图 2 是各性状半方差图.图 3 是各性状 Kriging 法插值得到的空间等值分布图.通过表 3 和图 2 可见研究区域内各性状的空间自相关尺度(变程)的情况, SOM、STN、SpH、SWC、HC 具有显著的空间异质性,其变程(空间相关尺度)分别为 7.72、10.38、2.75、18.88 和 12.1 m,除 SWC 外其他性状的变程都小于有效滞后距离,因此得出的变程是较可靠的^[16].本文的研究尺度对于小尺度下土壤异质性的研究是足够的.

表 3 各性状半方差模型参数

Table 3 Parameters of the models to the properties

项目	块金方差 (C_0)	基台值	变程 / m	空间自 相关度/ %	R^2
SOM	0.106	0.386	7.72	0.686	0.778 ¹⁾
STN	0.132	0.277	10.48	0.523	0.757 ¹⁾
SpH	0.153	0.57	2.75	0.732	0.263 ¹⁾
SWC	0.736	2.01	18.88	0.633	0.875 ¹⁾
HC	0.700	292.1	12.10	0.998	0.866 ¹⁾

1) $p < 0. 01$

图 3 是各性状在所研究样地上的等值图,它直观的显示出各性状空间异质性格局及其与榆树分布的关系.榆树 II、III、IV 周围的 SOM、STN、SpH 明显较高并呈同心圆向周围递减.榆树 I 周围 SOM、STN 分布规律不明显,但 SpH 和 SWC 明显呈同心圆向周围递减,其 SWC 在样地中是最高的.

3 讨论

3.1 各性状的相关性

HC 和 STN、SWC 呈正相关,和 SpH 呈负相关(表 2),可见草本层盖度不但受养分和水

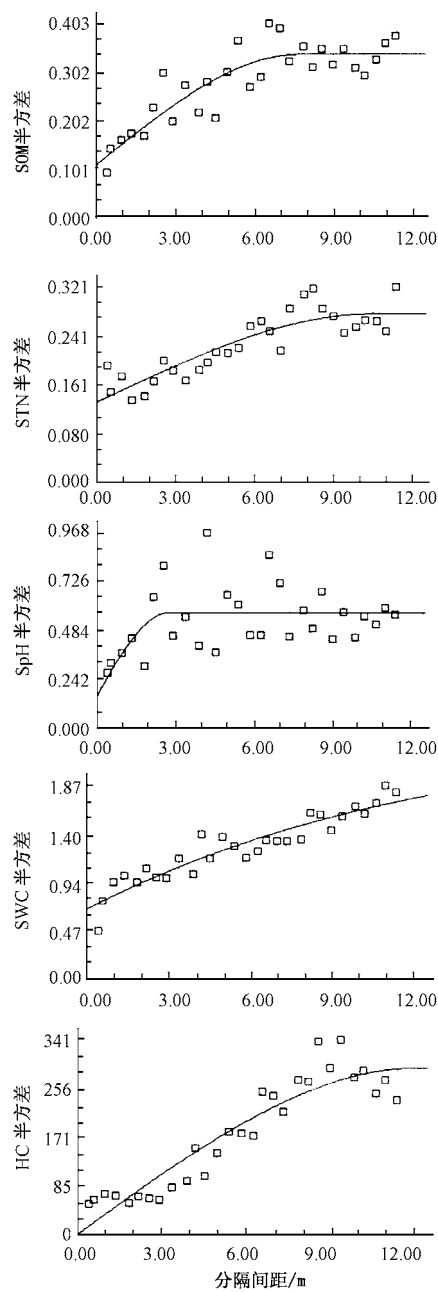


图 2 各性状半方差分析

Fig.2 Semivariograms analysis for the properties

分的影响,土壤 pH 值的影响也不可忽视. SOM 和 STN、SWC 以及 SpH 均正相关.这可能是由于有机质不但是土壤肥力的物质基础,而且能改善土壤结构,调控水分运动^[22]. SOM 与 STN 相关性极显著(表 2),同时它们的空间异质性格局也十分相似(图 3),这与以前的报道^[15, 19, 23]是一致的.

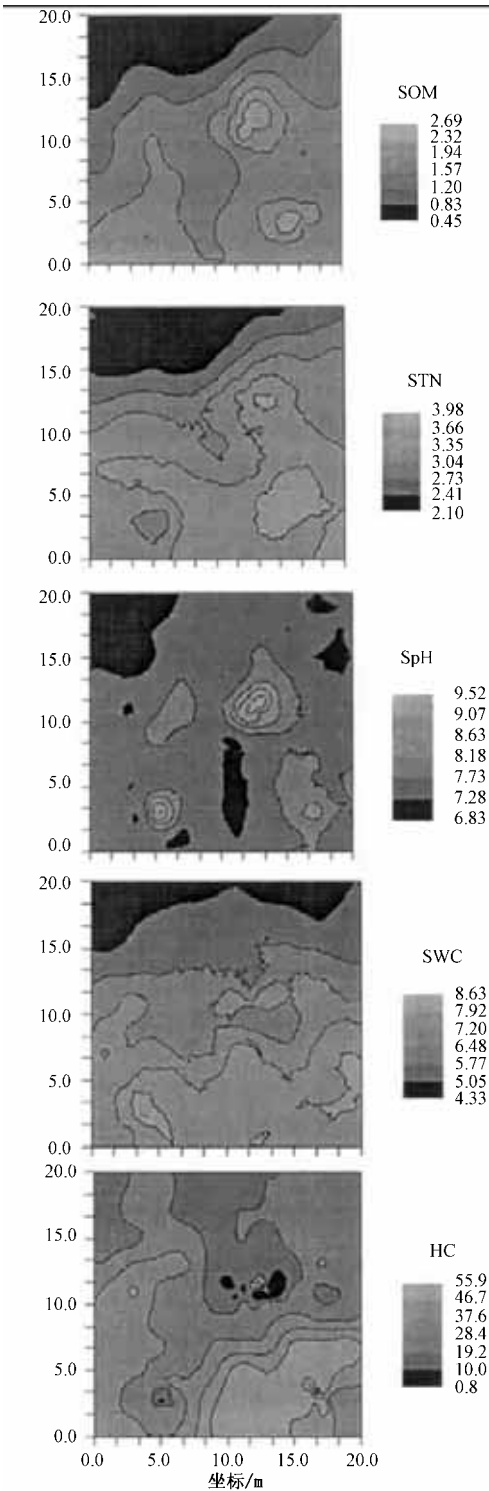


图 3 各性状的空间分布等值图

Fig. 3 Contour maps for the properties

3.2 空间异质性

运用地统计学对土壤性空间异质性进行小

尺度格局研究是当今的研究热点^[15, 19, 21, 23, 24]. 本文半方差分析表明,研究区域内的 SOM、STN、SpH 和 SWC 在所研究的尺度上具有显著的空间异质性,变程大小顺序: SWC > HC > STN > SOM > SpH. 变程的大小可能与性状本身的特性有关. 与以前的报道^[15, 19, 22]相比本研究中各性状的变程略偏大,这除了与所研究的生态子系统不同有关外,可能还与取土的深度有关. 本研究中的取土深度为 20cm,而以前的研究^[15, 19, 22]的土壤深度分别是 10cm 和 15cm,可能是土层越深性质越稳定,空间自相关的尺度也越大. 土壤某一性状的变程可能是由当地土壤的特点和这一性状本身的特性共同决定的. 土壤含水量的变程较大,推测是由水的渗透性和当地沙质土壤基质决定的. 因此在研究沙地的土壤含水量的时候,为了保证取样间的独立性,应当选择比较大的间隔,而如果研究土壤 pH 则选择较小的间隔就能保证取样间的独立性.

3.3 空间异质性与榆树的关系

榆树疏林生态系统的空间生态异质性格局与榆树位置关系明显(表 1 和图 3). 榆树 II、III、IV 周围的 SOM、STN、SpH 明显较高并呈同心圆向周围递减. 榆树 I 周围的 SpH 和 SWC 明显呈同心圆向周围渐变,其 SWC 在样地中是最高的,但 SOM、STN 较低,这可能与较高 SWC 有关. 各性状在西北角都较低可能因为西北角地势最高. 榆树下 SOM、STN、SWC 较高,但 HC 却较低,原因可能是以前牲畜的践踏和采食以及土壤 pH 的影响. 疏林中的平均土壤 pH 为 7.44,这与以前的记载^[4]几乎相同,但榆树下 4m² 内的平均土壤 pH 却达到 8.44,属于弱碱性土. 土壤 pH 值过大的危害主要是影响土壤养分的有效性,不利于土壤微生物的活动,抑制土壤有效养分的形成^[25]. 李建东等在松嫩平原的研究^[26]表明,过度放牧是当地草场盐碱化的主要原因,植被退化和土壤盐渍化互为因果,互相影响,本文中土壤 pH 与草本盖度明显负相关,进一步印证了这一点.

Schlesinger 等(1990)研究了灌木与土壤水

分和养分的异质性的关系认为,灌木周围会形成沃岛(fertility islands)^[22, 27].本研究中乔木榆树与土壤异质性也存在明显的相关性,即榆树周围也形成了沃岛,现有文献缺乏乔木与其周围的土壤空间异质性关系的研究,榆树疏林在夏季高温期是家畜避暑和乘凉的地方^[28],文献表明放牧会增加半干旱区土壤的空间异质性^[27],由此推测,榆树周围沃岛的形成除受榆树本身的生态学特性影响外,很可能还与家畜在榆树树冠下滞留时间较长有较大关系.

3.4 本研究的潜在价值

气候异常、植被盖度降低和土壤风蚀可能是近年来沙尘暴频繁发生的主要原因.浑善达克沙地的榆树疏林由于过度放牧等原因而更新不良,研究区未见胸径 6.37cm 以下的小榆树(不算当年榆苗).另外林下无草照样会发生水蚀和风蚀,在当地随处可见榆树下因为过度放牧等原因导致榆树下草本盖度很低并成为风蚀的起源地.本研究中发现榆树疏林生态系统存在明显的空间异质性,其中树下草本盖度较低,分析表明这很可能与放牧有关,为了治理风沙,必须加强对当地榆树疏林的研究和保护.

植物分布会影响土壤性状的空间格局,植物个体也会对异质性资源做出反应^[22].深入研究各种不同植物分布与土壤空间异质性格局的关系将有助于了解异质性格局下的不同植物利用资源的策略.

致谢:承蒙东北林业大学森林资源与环境学院王政权老师和中国科学院植物研究所梁士楚博士的指导和帮助,谨致谢忱.

参考文献:

- 傅立国.中国榆属的研究.东北林学院学报,1980,3:1~40.
- 中国科学院内蒙古宁夏考察队.内蒙古植被.北京:科学出版社,1985.785~786.
- 黄永梅,刘鸿雁,崔海亭.内蒙古高原东南缘森林草原过渡带景观的若干特征.植物生态学报,2001,25(3):257~264.
- 徐文铎.沙地榆树林.见:徐文铎,邹春静等著.中国沙地森林生态系统.北京:中国林业出版社,1998.209~212.
- 龚元石,廖超子,李保国.土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征.土壤学报,1998,35(1):10~15.
- Chen Y F, Yu F H, Dong M. Scale-dependent spatial heterogeneity of vegetation in Mu Us sandy land, a semiarid area of China. Plant Ecology, 2002, 162: 135~142.
- 董鸣.异质性生境中的植物克隆生长:风险分摊.植物生态学报,1996,20(6):543~548.
- 董鸣.资源异质性环境中的植物克隆生长:觅食行为.植物学报,1996,38(10):828~835.
- 陈玉福,于飞海,董鸣.毛乌素沙地沙生半灌木群落的空间异质性.生态学报,2000,20(4):568~572.
- 陈玉福,于飞海,张称意,董鸣.根茎禾草沙鞭的克隆生长在毛乌素沙地斑块动态中的作用.生态学报,2001,21(11):1745~1750.
- 张宏,史培军,郑秀红.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.
- 陈有君,关世英,李绍良,刘钟龄,梁村柱,王艳芬.内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析.干旱区资源与环境,2000,14(1):80~85.
- 王慎强,俞仁培.影响碱化土壤 pH 值测定的主要因素.土壤通报,1994,25(6):252~255.
- 刘光崧主编.土壤理化分析与剖面描述.北京:中国标准出版社,1996.121~127,166~172.
- 王其兵,李凌浩,刘先华,贺金生.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.
- 王政权.地统计学及其在生态中的应用.北京:科学出版社,1999.65~100.
- Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advances in Soil Science, 1985, 3:1~70.
- Gamma Design Software. GS+, Professional Edition (Version 5.3.1), 2001.
- Jackson R B, Caldwell M M. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants. Journal of Ecology, 1993, 81: 683~692.
- 葛剑平,郭海燕,仲莉娜.地统计学在生态学中的应用(1)——基本理论和方法.东北林业大学学报,1995,23(2):88~94.
- 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.
- 单秀枝,魏由庆,严慧峻,刘继芳,张锐.土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响.土壤学报,1998,35(1):10~15.
- Jackson R B, Caldwell M M. The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics. Ecology, 1993, 74: 612~614.
- Aubry P, Debouzie D. Geostatistical estimation variance for the spatial mean in two-dimensional systematic sampling. Ecology, 2000, 81: 543~553.
- 卫金国,吴强,马丽.林地土壤 pH 值、磷、钾、有机质和水含量具有可变和可控性.山西林业科技,2000,4:26~30.
- 李建东,郑慧莹.松嫩平原盐碱化草地改良治理的研究.东北师大学报自然科学版,1995,1:110~115.
- Schlesinger W H, Renolds J F, Cunningham G L et al. Biological Feedbacks in global desertification. Science, 1990, 247: 1043~1048.
- 廖国藩,贾幼陵(主编).中国草地资源.北京:中国科学技术出版社,1996.205.