

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.06.010

油蒿群落不同恢复阶段的土壤水分 空间异质性及植被特征

朱林峰¹, 张宇清¹, 秦树高¹, 关红杰¹, 张举涛¹, 高浩¹, 杨路明¹, 高宏仙²

(1. 北京林业大学 水土保持学院 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站,
北京 100083; 2. 宁夏盐池县环境保护和林业局, 宁夏 盐池 751500)

摘 要: [目的] 分析沙地恢复不同阶段(流动沙地、半固定沙地、固定沙地)油蒿(*Artemisia ordosica*)群落的土壤水分空间变异规律以及植被响应特征,为荒漠地区植被恢复提供科学依据。[方法] 利用经典统计学与地统计学相结合的方法进行分析。[结果] (1) 从流动沙地到固定沙地的演替过程中,土壤水分逐步减少,其空间结构呈现出明显的斑块状和条带状布局特点,同时沙地土壤水分空间异质性逐步增加,土壤水分在不同恢复阶段均表现出随着土层深度的增加,空间相关性逐渐增强的特征。(2) 在沙地恢复过程中,油蒿种群的植被覆盖度、生物量、密度呈现逐渐增加的趋势,而植被特征的空间变异性则趋于减弱。(3) 在流动沙地和固定沙地上,油蒿种群特征与土壤水分呈现显著负相关($p < 0.01$)。[结论] 油蒿种群的植被格局在一定程度上改变了土壤水分的空间异质性与分布格局。

关键词: 油蒿群落; 土壤水分; 空间异质性; 植被格局

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0058-06

中图分类号: S152.7

Spatial Heterogeneity of Soil Moisture and Vegetation Characteristics in *Artemisia Ordosica* Community at Different Succession Stages

ZHU Linfeng¹, ZHANG Yuqing¹, QIN Shugao¹, GUAN Hongjie¹,
ZHANG Jutao¹, GAO Hao¹, YANG Luming¹, GAO Hongxian²

(1. Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Environmental Protection and Forestry Bureau of Yanchi County, Yanchi, Ningxia 751500, China)

Abstract: [Objective] The research investigated the spatial patterns of soil moisture and the responses of vegetation in *Artemisia ordosica* community at different succession stages(shifting dunes, semi-fixed dunes and fixed dunes) in order to provide scientific basis for vegetation restoration in desert region. [Methods] The experiment was conducted in three *Artemisia ordosica* communities and the data were analyzed by classical statistical and geo-statistical method. [Results] (1) In the succession of shifting dunes to fixed dunes, soil moisture of *Artemisia ordosica* community was gradually getting worse. And the spatial distribution of soil moisture was obviously characterized by a strip-like or patchy structure; Meanwhile the spatial variability of soil moisture was increasing. The spatial autocorrelation of soil moisture gradually increased with the increase of soil depth in all three *Artemisia ordosica* communities. (2) In the revegetation process, community coverage, biomass and density gradually increased, while spatial variation of community characteristics decreased. (3) Community characteristics of *Artemisia ordosica* had significantly negative correlation with soil moisture in shifting dunes and fixed dunes. [Conclusion] Vegetation pattern of *Artemisia ordosica* largely influenced the spatial distribution and heterogeneity of soil moisture.

Keywords: *Artemisia ordosica* community; spatial heterogeneity; soil moisture; vegetation pattern

收稿日期:2014-05-16

修回日期:2014-05-28

资助项目:国家重点基础科学(973)研究发展计划项目“沙区土壤水分时空分布格局与区域分异规律”(2013CB429901);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD16B02)

第一作者:朱林峰(1989—),男(汉族),江苏省宜兴市人,硕士研究生,研究方向为荒漠植被生态水文。E-mail:1013760238@qq.com。

通信作者:张宇清(1971—),男(汉族),宁夏自治区盐池县人,副教授,硕士生导师,主要从事荒漠化防治方向研究。E-mail:zhangyqbifu@gmail.com。

土壤水分是将土壤、植被与气候链接起来的关键因子,其含量的大小与分布格局影响着荒漠生态系统的恢复与重建,并且对于评估土地植被承载力具有重要意义^[1-3]。由于受气候、土壤、植被、地形等因素的影响,沙区土壤水分在时间和空间上表现出比较高的变异性^[4-6]。因此,研究沙地土壤水分时空变异性在量化局部水文、揭示植被的空间结构与演替过程具有重要作用。土壤水分变异特征在不同的研究尺度上影响因素不尽相同,在较小的坡面尺度上,植被状况则是主要影响因子^[7-8]。同时,在干旱地区,土壤水分是制约植被演替的关键因素,在很大程度上决定植物的生长状况和分布格局^[9-10]。近年来,土壤水分与植被间相互关系的研究已经成为荒漠生态系统生态水文的一个热点问题^[11]。已有研究表明,土壤水分和植被的时空分布具有一定的同步性,并且植被特征与深层土壤水分显著正相关^[12-13];经过长期人工固沙植被的演变,植被盖度、物种丰富度、土壤有机碳、土壤全氮和电导率逐步增加,而灌木在群落中的优势度和盖度降低,土壤含水量逐渐减少^[14],同时沙地土壤水分的空间异质性有所增加^[15]。这些研究对深入认识土壤-植被系统提供了一定的基础。

油蒿(*Artemisia ordosica*)是毛乌素沙地重要的植被恢复物种之一,也是面积最大的固沙植物种(占沙区总面积的 31.2%),在沙区植被的恢复与重建过程中具有极其重要的地位^[16]。鉴于毛乌素沙地油蒿灌丛植被的重要性,国内外学者对油蒿展开了大量研究。张军红等^[17]研究认为降水补给深度是导致油蒿群落土壤水分时空变异的重要因素;Yang 等^[18]研究发现半固定沙地油蒿较固定沙地的自相关性更强,斑块化更加明显;胡旭等^[19]研究认为土壤水分的空间异质性并不一定可以影响生物量的异质性。前人对油蒿的土壤水分状况、种群空间格局、空间异质性等展开了深入研究,然而将油蒿群落土壤水分与植被的空间分布相结合的研究相对较少,对于这种单一种群

斑块形成的机理认识尚有不足。因此,本研究通过选取典型油蒿样地,进行土壤水分监测和植被调查,旨在揭示油蒿群落不同恢复阶段土壤水分空间异质性及植被特征,探讨沙区油蒿种群土壤水分与植被之间的相互关系,为荒漠地区植被恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在宁夏盐池荒漠生态系统定位观测研究站进行,站区地理位置为北纬 37°40′—37°43′,东经 107°12′—107°17′,海拔高度约 1550 m,位于毛乌素沙地西南缘,属典型的温带大陆性气候。该区全年干燥少雨,多年平均降水量 290 mm,降水主要集中在 7—9 月,大约占全年降水量的 63%,年均潜在蒸发量为 2 050 mm,年均气温 7.7 °C,昼夜温差大,无霜期约 130 d。土壤类型主要为风沙土,结构松散,风沙运动强烈。研究区植被以低矮、稀疏的沙生灌木和旱生草本植物为主,当地主要植物种有:油蒿、杨柴(*Astragalus mongolicum*)、沙柳(*Salix psammophila*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、针茅(*Stipa capillata*)、赖草(*Leymus secalinus*)、沙米(*Agriophyllum arenarium*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 水分测定 在处于不同恢复阶段(流动沙地、半固定沙地、固定沙地)的油蒿林地中,各设置一块大小为 20 m×20 m 的试验样地,3 块样地地形与地貌特征相近,沙地类型及植被特征详见表 1。基于地统计学原理与格局分析的布点要求^[20],每块样地以 2 m×2 m 大小的网格间距布设采样点 100 个。于 2013 年 8 月,在每个网格中心采用 TDR 土壤水分速测仪测定 3 块样地共 300 个样点的土壤体积含水率(简称土壤含水率),每个测点分 0—20 cm,20—40 cm 和 40—60 cm 三层测定土壤含水率,调查前半个月未有降水,土壤水分较为稳定。

表 1 试验样地基本情况

沙地类型	植被及地表特征	土壤粒径分布/%			pH 值	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	植被 盖度/%
		黏粒(< 0.002 mm)	粉粒(0.002~ 0.02 mm)	砂粒(0.02~ 2 mm)				
流动沙地	沙米、油蒿等,无结皮,土壤疏松,易风蚀	0.34	1.65	98.01	8.85	22.95	1.47	7.86
半固定沙地	油蒿、杨柴、针茅等,土壤紧实性增加,盖度 30%结皮层	0.61	3.28	96.11	8.44	24.03	1.53	18.01
固定沙地	油蒿、杨柴、赖草等,土壤较为紧实,盖度 80%结皮层	1.65	9.36	88.99	8.37	26.08	1.24	43.02

1.2.2 TDR 仪器标定 为保证试验数据的可靠性,将野外实地 TDR 监测与烘干法相结合,进行数据校正。在试验样地选取 3 个 50 cm 深的土壤剖面,以 10

cm 为间距,用 TDR 测定各层土壤水分,同时采用环刀取土测其容重,并且回实验室烘干法测定水分含量。将 15 组数据进行回归分析,分析结果表明,烘干

法与 TDR 测得水分数据显著线性相关($p < 0.01$), 相关系数为 $R^2 = 0.945$ 。表明校正后的土壤水分值与传统的烘干法所测值相符, 能比较准确地反映样地土壤水分状况。

1.2.3 植被调查 2013 年 8 月, 调查 300 个小样方内每丛油蒿的株高、冠幅、密度、盖度、生物量。盖度由每个小样方内植物地上部分垂直投影面积占样方面积的百分比确定; 油蒿地上地上生物量采用生长方程进行估算^[21]:

$$Q = a(A \cdot H)^b \quad (1)$$

式中: Q ——地上生物量(g); A ——冠幅面积(cm^2); H ——株高(cm); a ——生长系数(g/cm^3); b ——生长指数。 a, b 由样地内随机选取 20 丛油蒿, 测定其株高、冠幅、地上生物量, 回归模拟得出。经测算, 油蒿地上生物量的生长方程为:

$$Q = 0.005(A \cdot H)^{0.804} \quad (R^2 = 0.87)$$

继而结合样地的植被调查数据, 估算出样地内的所有油蒿地上生物量。

1.3 数据分析处理

采用 SPSS 20.0 对土壤水分、植被数据进行经典统计分析, 计算每块样地不同深度土壤含水率、种群特征的均值(Mean)、标准差(SD)和变异系数(C_v), 用

来评估土壤水分、植被的平均状况和总体变异。采用单因素方差分析(取 $\alpha = 0.01$ 显著水平), 检验土壤水分、种群特征在不同沙地间的差异。对研究区不同深度土壤水分进行 Kolmogorov—Smirnov 非参数检验, 验证其是否符合正态分布, 满足半方差函数的计算以及模型拟合的要求; 利用地统计学软件 GS+ 9.0, 根据 RSS, R^2 选取最优理论模型以及相关参数——块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)、结构方差比 $[C/(C_0 + C)]$ 、变程(A)和分维数(D), 对土壤水分数据进行变异函数分析和分维分析; 并利用 ArcGIS 9.3 中的地统计模块进行克里格空间局部插值, 比较不同样地间土壤水分、油蒿生物量的空间分布差异。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分的空间变异特征

由表 2 可知, 3 块样地土壤含水率变化范围为 2.97%~8.87%, 试验期间, 流动、半固定、固定沙地 0—60 cm 土壤含水率均值分别为 7.27%, 6.12% 和 4.57%。单因素方差分析表明, 在沙地恢复过程中, 油蒿林地 0—60 cm 的土壤水分含量差异极显著($p < 0.01$), 土壤含水率表现为: 流动沙地 > 半固定沙地 > 固定沙地。

表 2 样地 0—60 cm 平均土壤含水率统计特征(样本数=100)

沙地类型	均值	最小值	最大值	标准偏差	变异系数	偏度	峰度	K-S 检验	
								Z 值	p 值
流动沙地	7.27 ^a	4.30	8.87	0.77	0.10	-0.77	2.99	0.67	0.76
半固定沙地	6.12 ^b	4.80	7.53	0.85	0.14	-0.32	-0.12	0.58	0.88
固定沙地	4.57 ^c	2.97	7.83	0.97	0.21	0.89	0.70	1.16	0.13

注: 不同的小写字母表示差异显著($p < 0.01$ 水平), 下同; K-S 检验中, 当 $p > 0.05$ 时, 表示服从正态分布。

从变异系数(C_v)可以看出(表 2), 不同恢复阶段的油蒿林地的土壤水分均表现为中等变异性($C_v = 0.1 \sim 1$)。0—60 cm 土壤水分在不同恢复阶段的变异系数大小次序表现为: 流动沙地 < 半固定沙地 < 固定沙地, 可见在恢复过程中, 各层土壤水分空间变异性逐步上升, 这主要因为土壤水分在灌丛植被的影响下, 进行重新分配, 产生了空间变异^[22]。表 2 给出的仅是从经典统计的角度刻画土壤水分状况, 只能整体上反映其变异特征, 不能定量地描述其内部变异结构特征, 因此有必要对其进行变异函数分析(表 3)。空间异质性比 $C_0/(C_0 + C)$ 表示自相关部分引起的空间变异性程度高低, 该系数越高, 表示由随机性因素引发的空间异质性较高, 相反, 则由结构性部分引起的空间变异性程度较大。当异质性比值为 $< 0.25, 0.25$

$\sim 0.75, > 0.75$ 时, 分别表示强烈相关、中等相关、弱相关^[23]。由表 3 可知, 流动沙地 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土壤含水率结构性比分别为 0.27, 0.13 和 0.11, 半固定沙地为 0.46, 0.41 和 0.09, 固定沙地为 0.44, 0.35 和 0.29, 样地各层土壤含水率异质性比均 < 0.75 , 表现出中等以上的空间自相关。土壤水分空间异质性比在不同恢复阶段均表现出随土层深度增加而下降的趋势(表 3), 最低值是在各试验地的 40—60 cm。说明样地深层土壤水分受结构性因子影响较大, 土壤质地、土壤母质带来的异质性更强; 然而土壤浅层, 随机性因素引起的空间变异性而占主导地位, 主要由风沙运动、土壤蒸发、根系吸水、生物土壤结皮等因素引起。土壤水分表现出随着土层深度的增加, 空间相关性逐渐增强的特征。

表 3 试验样地土壤水分半方差函数最优模型及其有关参数

沙地类型	深度/cm	理论模型	块金值 C_0	基台值 (C_0+C)	结构比 $C_0/(C_0+C)$	变程 A	决定 系数 R^2	分维数
流动沙地	0—20	球状模型	0.19	0.69	0.27	6.28	0.98	1.89
	20—40	球状模型	0.10	0.80	0.13	4.09	0.61	1.89
	40—60	球状模型	0.09	0.79	0.11	3.32	0.69	1.96
半固定沙地	0—20	高斯模型	0.30	0.66	0.46	8.91	0.97	1.81
	20—40	指数模型	0.21	0.51	0.41	5.14	0.72	1.93
	40—60	指数模型	0.11	1.12	0.09	10.83	0.91	1.89
固定沙地	0—20	指数模型	0.82	1.85	0.44	10.59	0.71	1.98
	20—40	高斯模型	0.77	2.19	0.35	24.40	0.98	1.83
	40—60	球状模型	0.66	2.22	0.29	18.98	0.99	1.71

2.2 植被的响应特征

由表 4 可以看出,在沙地恢复过程中,植被的盖度、生物量、密度呈现明显的上升趋势($p < 0.01$,除固定沙地油蒿密度之外)。油蒿的植被盖度、生物量、密度的变异系数则呈现出:流动沙地 > 半固定沙地 > 固

定沙地(除固定沙地油蒿生物量之外),植被特征的变异性与土壤水分变异性表现出相反的趋势。可见在沙地恢复过程中,油蒿种群随着恢复年限的增加,植被覆盖度、生物量、密度呈现增加的趋势,油蒿种群变异性则表现出减弱的过程。

表 4 样地植被特征统计特征

项目	沙地类型	均值	最大值	最小值	标准偏差	变异系数	偏度	峰度
盖度/%	流动沙地	7.86 ^a	50.00	1.00	6.80	0.86	3.32	15.69
	半固定沙地	18.01 ^b	50.00	6.00	8.52	0.45	1.18	1.53
	固定沙地	43.02 ^c	70.00	8.00	13.98	0.32	-0.67	-0.67
生物量/(g·m ⁻²)	流动沙地	32.16 ^a	342.16	0.35	52.49	1.63	3.12	12.64
	半固定沙地	64.22 ^b	212.75	14.83	33.82	0.53	1.64	4.35
	固定沙地	97.45 ^c	544.16	27.80	63.95	0.65	24.01	24.01
密度/(丛·m ⁻²)	流动沙地	0.33 ^a	8.00	0.00	0.88	2.66	6.90	57.72
	半固定沙地	1.76 ^b	5.00	0.50	0.71	0.40	0.88	3.15
	固定沙地	1.58 ^b	3.00	0.25	0.55	0.35	0.33	0.03

2.3 土壤水分与植被的空间格局

在变异函数理论分析基础上,运用克里金最优内插值法绘制三块调查样地的土壤水分、生物量的空间分布图(图 1)。由图 1 可以看出,调查样地 0—60 cm 土壤平均含水量在空间上呈现明显的斑块状和条带状分布特点。流动沙地油蒿生物量的东南与西南方向上分布着两个高值区域,与之对应相同的位置,土壤水分却呈现出两个低值区域,植被与土壤水分表现出相反的空间格局。Pearson 相关分析显示(表 5),流动沙地植被因子与土壤水分表现出显著的负相关关系($p < 0.01$),流动沙地上植被分布较好的区域水分条件相对较差,这主要是由于植被建设初期,流动沙地水分条件较好,土壤水分的空间格局决定建群种油蒿的分布格局,故油蒿长势较好的区域,消耗的水分较多,土壤含水率低。表 5 显示,当到达植被建设的中期的半固定沙地阶段,群落尚未稳定,植被分布受到养分条件、水分、地形等多因素的干扰,植被与土

壤水分没有得到相关关系($p > 0.01$)。植被恢复后期的固定沙地阶段,油蒿种群相对稳定,植被生长主要受制于土壤水分,故再次与土壤水分表现出显著的负相关关系($p < 0.01$)。

显然,在小尺度上,地表植被盖度、空间分布格局对土壤水分产生重要影响,不同学者在研究植被—土壤水分关系的时候得出的结果不尽相同,史丽丽等^[24]研究发现祁连山臭草植被盖度与表层土壤水分表现出强烈的正相关关系,王蕙等^[13]研究发现在黑河过渡带的灌木植被灌幅、盖度与 0—40 cm 土壤水分含量呈现显著负相关,潘艳霞等^[25]在沙坡头地区研究发现植被盖度与表层土壤水分的相关性未达到显著水平。造成这些差异的原因是植被类型、降雨条件、立地条件的不同,草本植物相对木本植物对土壤水分的需求量较少,对于土壤水分的反应较为敏感,易呈现出正相关关系;而研究对象为灌木时,耗水量大于草本,故显示出负相关关系,本研究对象为油蒿

属于半灌木植物,故也得出类似结论;而当研究区植被为灌草结合时,相关性并未达到显著。由图 1 可以看出,植被建设初期土壤水分的分布控制着油蒿种群植被格局,导致油蒿的斑块状分布,继而植被通过其空间格局的分配模式和植物蒸腾,改变地表土壤蒸发、降水的入渗等水文过程,对水分空间分布进行了

二次分配,当到达群落稳定阶段的固定沙地阶段,植被的发展受限于土壤水分状况,植被空间结构表现出与土壤水分相反的分布格局,可以说油蒿种群在很大程度上改变了土壤水分的空间异质性与分布格局,同时自身对土壤水分变化做出相应的响应,提高了在干旱地区的竞争力。

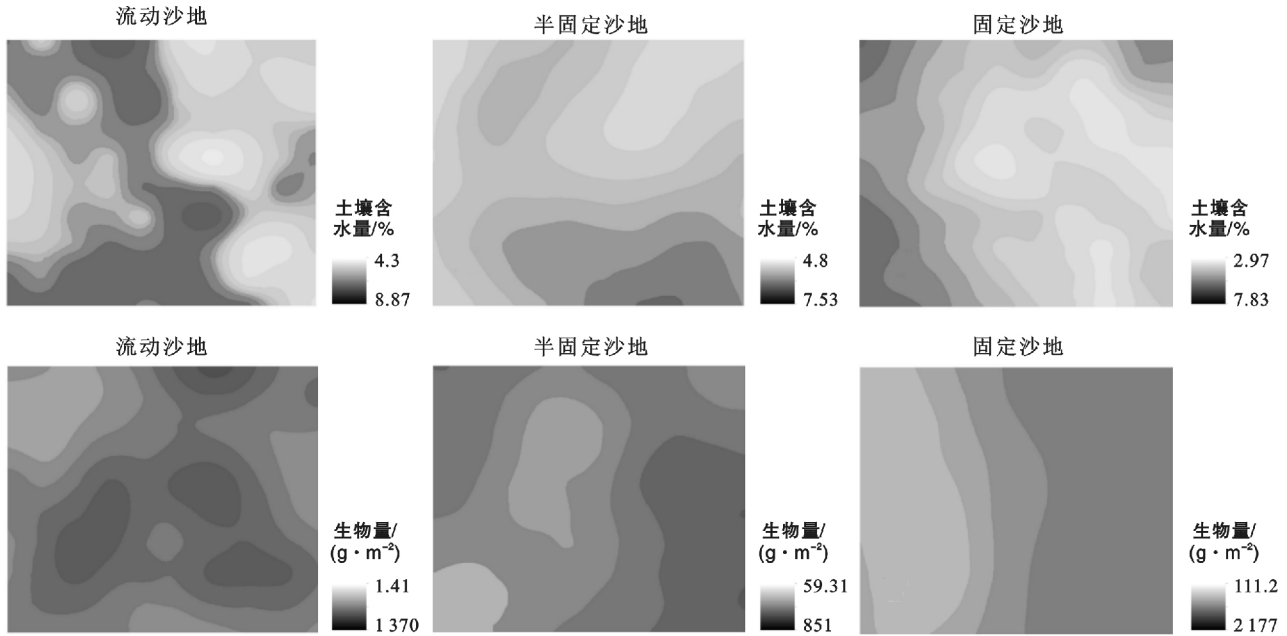


图 1 不同恢复阶段 0—60 cm 土壤平均含水率和油蒿生物量空间分布

表 5 不同恢复阶段各层土壤含水率与种群特征间的相关系数矩阵

沙地类型	种群特征	土层/cm		
		0—20	20—40	40—60
流动沙地	盖度	-0.31**	-0.26**	-0.32**
	生物量	-0.27**	-0.23*	-0.31**
	密度	-0.25*	-0.20	-0.22*
半固定沙地	盖度	0.08	-0.02	-0.08
	生物量	-0.22*	-0.10	-0.04
	密度	0.06	-0.01	-0.17
固定沙地	盖度	-0.12	-0.32**	-0.15
	生物量	0.04	-0.20*	-0.21*
	密度	0.08	0.01	-0.01

注:**表示 $p < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关; *表示 $p < 0.05$ 水平(双侧)上显著相关。

3 结论

(1) 从流动沙地到固定沙地的演替过程中,土壤水分逐步减少,其空间结构呈现出明显的斑块状和条带状布局特点,同时沙地土壤水分空间异质性逐步增加。土壤水分在不同恢复阶段均表现出随着土层深度的增加,空间相关性逐渐增强的特征。

(2) 在沙地恢复过程中,油蒿种群植被覆盖度、生物量、密度呈现逐渐增加的趋势,而种群特征的空间变异性则趋于减弱。

(3) 在流动沙地和固定沙地上,油蒿种群植被特征与土壤水分显著负相关($p < 0.01$),油蒿种群的演替改变了沙地土壤水分状况,植被格局在一定程度上改变了土壤水分的空间异质性与分布格局。

[参 考 文 献]

- [1] Albertson J D, Montaldo N. Temporal dynamics of soil moisture variability; 1. Theoretical basis[J]. Water Resources Research, 2003, 39(10): 197-204.
- [2] Pan Yanxia, Wang Xinping. Factors controlling the spatial variability of surface soil moisture within revegetated-stabilized desert ecosystems of the Tengger Desert, Northern China[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(11): 1591-1601.
- [3] 李新荣, 马风云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 217-222.
- [4] Li Xinrong, Ma Fengyun, Xiao Honglang, et al. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(1): 1-16.

- [5] Southgate R I, Masters P, Seely M K. Precipitation and biomass changes in the Namib Desert dune ecosystem [J]. *Journal of Arid Environments*, 1996, 33(3): 267-280.
- [6] Li Haidong, Shen Weisou, Zou Changxin, et al. Spatio-temporal variability of soil moisture and its effect on vegetation in a desertified aeolian riparian ecotone on the Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 479(5): 215-225.
- [7] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(9): 11865-11877.
- [8] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1): 259-281.
- [9] 张萍萍. 黑河中游荒漠景观土壤有机碳水分变异性及植物多样性研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [10] Southgate R I, Masters P, Seely M K. Precipitation and biomass changes in the Namib Desert dune ecosystem [J]. *Journal of Arid Environments*, 1996, 33(3): 267-280.
- [11] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology [J]. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2): 147-186.
- [12] 马晓东, 李卫红, 朱成刚, 等. 塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征 [J]. *生态学报*, 2010, 30(15): 4035-4045.
- [13] 王蕙, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异 [J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1731-1739.
- [14] Zuo Xiaolan, Zhao Xueyong, Zhao Halin, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Plant and Soil*, 2009, 318(1/2): 153-167.
- [15] Li Xingrong. Influence of variation of soil spatial heterogeneity on vegetation restoration [J]. *Science in China Series (D): Earth Sciences*, 2005, 48(11): 2020-2031.
- [16] 张德魁, 王继和, 马全林, 等. 油蒿研究综述 [J]. *草业科学*, 2007, 24(8): 30-35.
- [17] 张军红, 吴波, 杨文斌, 等. 不同演替阶段油蒿群落土壤水分特征分析 [J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1597-1603.
- [18] Yang Hongxiao, Zhang Jintun, Li Zhendong, et al. Comparative study on spatial patterns of the *Artemisia ordosica* population in the Mu Us sandy land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 1901-1910.
- [19] 胡旭, 王海涛, 何兴东, 等. 干旱和半干旱区油蒿对土壤空间异质性的响应 [J]. *中国沙漠*, 2007, 27(4): 588-564.
- [20] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 150-193.
- [21] Ebuy J, Lokombe J P, Ponette Q, et al. Allometric equation for predicting aboveground biomass of three tree species [J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2011, 23(2): 125-132.
- [22] 李新荣. 干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响 [J]. *中国科学(D): 地球科学*, 2005, 35(4): 361-370.
- [23] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field scale variability of soil properties in central low a soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [24] 史丽丽, 赵成章, 樊洁平, 等. 祁连山地甘肃臭草斑块土壤水分与植被盖度空间格局 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 285-291.
- [25] 潘颜霞, 王新平. 荒漠人工植被区浅层土壤水分空间变化特征分析 [J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 250-256.