

# 祁连山地甘肃臭草斑块土壤水分与植被盖度空间格局\*

史丽丽 赵成章\*\* 樊洁平 张静 张军霞

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省湿地资源保护与产业发展工程研究中心, 兰州 730070)

**摘要** 土壤水分是植被格局形成和演变的主要因素, 土壤水分的空间异质性对于认识干旱区草原植物对环境的响应机制具有重要意义, 而在较小尺度上, 植被状况是土壤水分空间异质性的主要驱动因子。利用地统计学方法, 研究了祁连山北坡甘肃臭草单优种群斑块浅层剖面(0~30 cm)土壤水分与植被盖度的空间异质性及其关系。结果表明: 甘肃臭草斑块浅层剖面土壤水分和植被盖度均符合正态分布, 各层土壤水分均存在高度的空间异质性, 其中 80.93%~87.34% 的空间异质性是由空间自相关引起的, 植被盖度主要体现在 4.09~6.91 m 的尺度上, 而由 1 m 以下尺度随机因素引起的空间异质性占 12.66%~19.07%; 甘肃臭草在斑块尺度上各层土壤水分的空间结构表现出明显的圈层结构和斑块状分布的特点, 土壤水分高低值斑块呈镶嵌分布且具有较强的空间异质性; 甘肃臭草通过生理整合影响并在一定程度上改变了小尺度上土壤水分的分布格局, 从而实现了土壤水分资源最大限度的利用, 提高了种群在干旱生境中的适应能力和竞争力。

**关键词** 甘肃臭草; 土壤水分; 植被盖度; 地统计学; 空间格局; 祁连山地

中图分类号 Q948.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)2-0285-07

**Spatial patterns of soil moisture and vegetation coverage in *Melica przewalskyi* patches in degraded alpine grassland of Qilian Mountains, Northwest China.** SHI Li-li, ZHAO Cheng-zhang\*\*, FAN Jie-ping, ZHANG Jing, ZHANG Jun-xia (Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 285-291.

**Abstract:** Soil moisture is the key factor in the formation and evolution of vegetation pattern. The spatial heterogeneity of soil moisture has an important significance in understanding the response mechanisms of plants in arid grasslands to environment. Meanwhile, at small scales, vegetation condition is the important driving factor to the spatial heterogeneity of soil moisture. By the methods of geo-statistics, this paper studied the spatial variability of surface soil (0-30 cm) moisture content and vegetation coverage as well as their relationship in the *Melica przewalskyi*-dominant patches in degraded grassland on the northern slope of Qilian Mountains, Northwest China. In the *M. przewalskyi*-dominant patches, both the surface soil moisture content and the vegetation coverage were in line with normal distribution. In different layers at 0-30 cm depth, soil moisture content had a high degree of spatial heterogeneity, and 80.93%-87.34% of the heterogeneity was caused by spatial autocorrelation. The spatial autocorrelation in vegetation coverage was found within the distance from 4.09-6.91 m, whereas the spatial heterogeneity of vegetation coverage caused by stochastic factors at <1 m scale accounted for 12.66%-19.07%. The spatial heterogeneity of soil moisture content in *M. przewalskyi*-dominant patches showed an obviously layered and patchy structure, and the high and low moisture values had a mosaic distribution. Through physiological integration, *M. przewalskyi* affected, and in definite extent, altered the

\* 国家自然科学基金项目(91125014 和 40971039)、甘肃省科技支撑计划项目(1011FKCA157) 和甘肃省生态经济重点学科项目资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: zhaocz@nwnu.edu.cn

收稿日期: 2012-09-12 接受日期: 2012-11-20

spatial distribution of soil moisture at small scales, and thus, achieved the maximum utilization of soil water resource, and improved the adaptability and competitiveness of *M. przewalskyi* populations in arid habitats.

**Key words:** *Melica przewalskyi*; soil moisture; vegetation coverage; geo-statistics; spatial pattern; Qilian Mountains.

土壤水分具有空间上的异质性 (Entin *et al.*, 2000) 在不同尺度上引起这种异质性的主要因素不尽相同 (Famiglietti *et al.*, 1998; 邱扬等, 2007)。在较小尺度上, 植被状况是土壤水分空间异质性的主要驱动因子 (Famiglietti *et al.*, 1998; 蒙仲举等, 2009), 植被种类、覆盖度及根系分布等的差异会对土壤水分的空间分布格局产生重要影响 (李元寿等, 2008; 杨兆平等, 2010)。同时, 在干旱条件下, 土壤水分又是植物生长的限制性因子, 土壤水分的动态变化和空间分布规律在很大程度上决定着植被的空间格局 (刘新平等, 2005)。近年来, 土壤水分与植被特征的空间分布及其相互关系成为地生态学研究的一个热点问题 (陈玉福和董鸣, 2001; Wilson *et al.*, 2003), 其研究对于理解气候变化、生态水文过程及其关系有重要作用 (Webster, 1985)。在干旱半干旱地区, 一些植物种群形成简单的单一优势种群植被斑块, 对气候变化、放牧干扰和种间竞争等表现出较强的适应性。单一优势种群已成为植被退化的主要表现形式之一, 这种单一优势种群斑块可能会改变小尺度范围内土壤水分分布格局 (赵成章等, 2011), 优化种群生长扩散的条件, 从而提高了该种群对于干旱生境的适应能力。因此, 研究干旱地区斑块尺度上单一优势种群植被斑块土壤水分空间分布与植被格局呼应关系, 对于揭示干旱地区植物种群的环境响应过程与机理, 深入理解全球变化背景下植物与环境协同进化的分布区拓殖规律具有重要意义。

甘肃臭草 (*Melica przewalskyi*) 是禾本科臭草属多年生根茎植物, 味道怪异, 家畜不采食。近年来, 在祁连山北坡中山区荒漠草原与典型草原过渡带, 甘肃臭草替代了原生地带性植被的优势种西北针茅 (*Stipa krylovii*) 形成大量面积不等、繁茂生长的单一优势种群斑块 (赵成章和龙瑞军, 2008), 其分布区呈现出向低海拔区域扩散的趋势。目前, 对甘肃臭草群落土壤水分空间异质性 (史丽丽等, 2011)、甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应已有初步研究 (赵成章等, 2011), 但是现有的研究成果尚

无法解释这种单优种群斑块形成的机理, 对于甘肃臭草小尺度斑块内土壤水分和植被盖度的空间异质性, 以及甘肃臭草对于水分的适应机制的认识仍然不足。鉴于此, 本文利用地统计学方法, 研究祁连山北坡甘肃臭草斑块土壤水分和植被盖度的空间异质性, 探讨甘肃臭草斑块内部土壤水分同植被的相互作用, 旨在认识干旱半干旱山地植物种群适应环境演变的生物学机制。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

祁连山北坡地处河西走廊与青藏高原的过渡带, 具有大陆性气候和山地垂直气候特征, 生态环境脆弱, 植被以荒漠和草原为主, 在特定的地形和气候条件下主要发育并形成了荒漠草原 (1900 ~ 2450 m)、典型草原 (2450 ~ 2800 m) 和草甸草原 (2800 ~ 3800 m), 植物以旱生和中生草本以及灌木为主。研究区位于石羊河上游的月牙崖草原 (37°54'36.9"N, 101°48'22.9"E), 海拔 2640 m, 年均温 1 ~ 2 °C,  $\geq 0$  °C 的年积温为 2450 °C, 相对无霜期 80 d, 年降水量 270 ~ 300 mm, 年蒸发量 1480 ~ 1620 mm, 相对湿度 65%, 土壤以山地栗钙土为主, 植物的生长完全依赖天然降水, 无地下水补给。供试草地处于荒漠草原与典型草原过渡带, 原生植被属于典型草原亚型的西北针茅草原, 主要植物有: 西北针茅 (*Stipa krylovii*)、甘肃臭草、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、扁穗冰草 (*Agropyron cristatum*)、狼毒 (*Stellera chamaejasme*)、星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*) 等。

### 1.2 材料与方法

**1.2.1 样地设置** 于 2010 年 8 月上旬, 在地势相对平坦、坡向朝南、坡度  $< 5^\circ$  的区域, 选择 1 个形成时间 10 a 左右、直径 12 m 的近似圆形甘肃臭草单优种群斑块作为实验样地 (赵成章等, 2011), 在斑块内部设置 1 个 8 m × 8 m 的采样区, 用邻接格子法 (contiguous grid quadrats) 布设间距 (1 m × 1 m) 的取样格点 64 个, 用竹签标记所有取样点。采样区位置如图 1 所示。

**1.2.2 数据采集** 在选定的所有取样点逐一调查

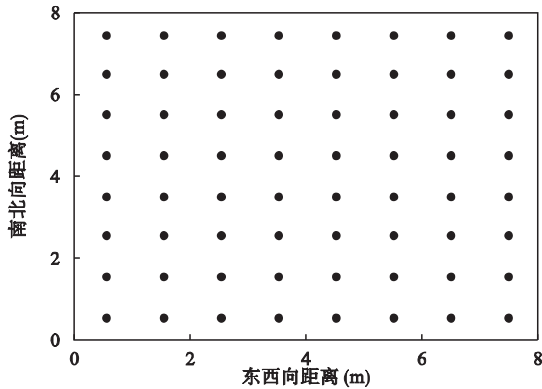


图1 空间取样设计  
Fig.1 Spatial sampling design

甘肃臭草种群生物学特征。在 50 cm×50 cm 样方框内用针刺法测定种群盖度,用计数法在同一方框内观测密度,用卷尺在样方框周围测量甘肃臭草自然高度,重复 6 次。2010 年 8 月中旬雨后第 8 天,在上述取样点进行土壤水分取样,鉴于研究区甘肃臭草的根状茎主要分布在 0~20 cm 土层中,故选择 0~30 cm 土层,首先分 3 层用土钻(直径=4 cm)每隔 10 cm 取混合土样,重复 3 次,再在每个样点用土钻(直径=4 cm)取 0~30 cm 混合土样,同样重复 3 次,所有样品均剔除明显的植物根段和枯落物等杂质,装入编号的铝盒中,带回实验室,在 105 ℃ 的烘箱内烘 12 h,取出称重,计算出各层及 0~30 cm 土层土壤质量含水量。

1.3 数据分析

1.3.1 空间结构分析 地统计学方法以区域化变量为核心,以半变异函数和 Kriging(克立格)插值为基本工具,对土壤水分和植被盖度分布特征进行空间上的分布研究,并对这些数据进行最优无偏内插估计。考虑到在地统计学中,变异函数的计算要求数据符合正态分布或近似正态分布,否则可能存在比例效应,所以数据处理分析分两个步骤:①对土壤水分和植被盖度数据用单样本 Kolmogorov-Smimov (K-S) 方法进行正态分布检验(SPSS 13.0 软件);②变异函数的计算。用于估计半方差的公式为:

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

式中,  $N(h)$  为距离等于  $h$  时的点对数,  $Z(x_i)$  为样点  $Z$  在位置  $x_i$  的实测值,  $Z(x_i+h)$  为与  $x_i$  距离为  $h$  处样点的值。

通过最优回归分析及多种线型比较筛选,综合考虑决定系数和残差发现,不同层次土壤水分和植

被盖度的半变异函数采用指数模型[公式(2)]、高斯模型[公式(3)]较合适。指数模型并不表现出有限变程,但实践中变程值近似用  $3a$  示。通过块金值、基台值、变程、块金值与基台值之比以及决定系数等参数定量地分析土壤水分和植被盖度的空间特性。

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{a}}) \quad (2)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) \quad (3)$$

式中,  $C_0$  为块金值,  $C_0+C$  为基台值,  $a$  为变程。

一般用决定系数( $R^2$ )判断模型拟合的好坏。决定系数是回归平方和占总平方和的比值,  $F$  为决定检验系数的统计量,计算公式为:

$$F = [R^2 / (1 - R^2)] [(N - K) / (K - 1)]$$

式中  $k$  为回归模型中自变量的个数,若计算的  $F$  值大于显著性水平(0.05 或 0.01)与自由度  $f$  的临界值  $F_f$  时,  $R^2$  是有意义的。

1.3.2 空间结构模拟 Kriging 法是一种估计观测样点间内插值的地学统计学方法。利用克立格插值法进一步揭示土壤水分和植被盖度的空间分布格局。克立格插值法将任一个点的估计值通过该点影响范围内的  $n$  个有效样本值  $Z(x_i)$  的线性组合得到,即  $Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$ 。式中,  $\lambda_i$  为与样点观测  $Z(x_i)$  有关的加权系数,用来表示各个样点值  $Z(x_i)$  对估计值  $Z_v^*$  的贡献。对于任一给定的区域和数据信息  $Z(x_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  存在一组加权系数  $\lambda_i$ 。当获得了某个变量的半变异函数的模拟模型后,可利用样点观测值对研究区域上未取样点的区域化变量值进行最小误差估计。

2 结果与分析

2.1 臭草斑块土壤水分空间异质性

在地统计学中,半变异函数的计算要求数据符合正态分布或近似正态分布,否则可能会存在比例效应,采用单样本 K-S 检验(取显著水平  $\alpha=0.05$ ),结果表明,研究区土壤水分含量符合正态分布(表 1)。甘肃臭草斑块各层土壤水分均符合指数模型(表 1),各层土壤水分拟合半变异函数的决定系数  $R^2$  均大于 0.8,说明指数理论变异函数模型能很好地反映土壤水分的空间结构特征。变异函数理论模型得出的相应参数如表 1 所示。块金值( $C_0$ )表示由随机部分引起的异质性,由实验误差和小于实验

表1 土壤水分与植被变异函数理论模型及相关参数

Table 1 Semivariogram models and their parameters for soil moisture and vegetation

土壤层 (cm)	模型	块金值 $C_0$	基台 $C_0+C$	变程 (m)	结构方差比 $C/(C_0+C)$	决定系数 $R^2$	K-S 检验
0~10	指数	0.2994	1.5703	5.2641	0.8093	0.86	0.62
10~20	指数	0.2458	1.9422	4.5985	0.8734	0.83	0.56
20~30	指数	0.2250	1.6650	4.0851	0.8649	0.74	0.91
植被盖度	高斯	0.4700	1.9600	4.3211	0.7602	0.89	0.82

取样尺度引起的变异 (Gambardella *et al.*, 1994), 它反映区域化变量内部随机性的程度; 研究区各层土壤水分均存在块金效应, 但是不同土层之间土壤水分的块金效应存在差异, 呈现出 U 型趋势, 0~10 cm 土壤水分块金效应较为明显 (19.07%), 10~20 cm 土壤水分块金效应较小 (12.66%), 20~30 cm 土壤水分的块金效应居中 (13.51%)。

基台值反映全部样点的总变异, 是半方差函数达到的极限值, 基台值越大表示总的空间异质性程度越高 (马风云等, 2006), 甘肃臭草斑块剖面土壤水分的基台值随土层加深呈现倒 U 型趋势 (表 1), 垂直梯度上土壤水分总的空间异质性变化规律从大到小依次为 10~20>20~30>0~10 cm。运用参数比值 ( $C/(C_0+C)$ ) 的大小判定系统内变量的空间异质性程度, 当  $C/(C_0+C)$  比值 <25%、25%~75%、>75% 时, 分别表明变量的空间自相关性较弱、中等、较强 (陈伏生等, 2003); 各层土壤水分的  $C/(C_0+C)$  均 >75%, 表明在研究尺度上土壤水分具有较强的空间自相关。在不同土层由空间自相关引起的空间异质性所占的比例有所差异, 随土层深度增加依次增大。土壤水分的变异函数分析能够表征不同土层的空间异质性尺度。在研究的甘肃臭草斑块内, 各层土壤水分在空间分布上具有明显的规律性, 存在较强的空间自相关。总的来说, 甘肃臭草斑块土壤水分具有较好的空间异质性。空间异质性导致空间格局的存在, 因而不同土层的空间分布格局也不同。

## 2.2 甘肃臭草盖度的空间异质性

半变异函数拟合的决定系数为 0.90, 表明高斯模型能较好地模拟植被盖度的空间结构特性 (表 1), 甘肃臭草的空间格局在研究尺度上表现出高度的聚集分布。从表 1 可以看出, 甘肃臭草的盖度在 <1 m 的尺度上存在较为明显的块金效应, 在以后类似的取样中应减小取样间隔, 增加植被盖度的空间信息以分析在更小尺度上影响植被盖度异质性的生态过程。由空间自相关所引起的臭草盖度空间异质

性 >75%, 因此, 在 1~4.32 m 的尺度上臭草具有较强的空间自相关性。

## 2.3 土壤水分和植被盖度空间异质性的尺度效应

空间异质性是尺度的函数, 变异函数的变程是测定区域化变量最大变异的空间距离, 在变程之内, 空间自相关存在, 变程之外空间自相关消失 (Lin *et al.*, 2005), 变程的确定能为采样设计提供一定的指导意义。土壤水分的空间格局是由不同尺度上的生态水文过程控制, 剖面各层土壤水分的变程介于 4.09~5.26 m, 植被盖度的变程为 4.32 m。随着土壤深度加深, 各层土壤水分的变程逐渐递减, 变程表现的是土壤水分空间变异的范围。有研究发现, 取样间隔是导致变程差异的主要原因 (杨兆平等, 2010)。土壤水分和植被盖度的实验设计尺度符合地统计学取样要求, 能够反映甘肃臭草斑块土壤水分和甘肃臭草盖度的空间格局信息。

## 2.4 斑块内植被及土壤水分的空间格局及相互作用

在土壤水分变异函数理论及结构分析基础上, 利用 Kriging 方法在 Surfer 软件中绘制的土壤水分的等值线图表明 (图 2), 甘肃臭草斑块 0~30 cm 土壤水含水量在小尺度上存在明显差异, 在空间上表现出明显的圈层结构和斑块状分布的特点, 水分高低值斑块镶嵌分布, 土壤水分资源表现出较强的空间异质性。甘肃臭草植被覆盖下各层土壤水分具有明显的空间变异性特征, 甘肃臭草盖度具有较好的空间联系性, 空间格局呈现出较为明显的高低值斑块, 并且从图 2 可以看出, 臭草斑块内西北和东南方向上具有两个高值分布中心。各层土壤水分也表现出明显的斑块状分布, 平均土壤水分含量整体呈斑块状不均匀分布, 0~10 cm 土壤水分具有较好的空间连续性, 变化比较平缓, 该层土壤水分空间分布的高值斑块与臭草盖度高值斑块在空间上的相似性程度较高。10~20 cm 土壤水分在西北-东南方向上呈条状分布, 且在该条状带上具有较好的空间连续性。20~30 cm 土壤水分含量整体不均匀, 空间连续性

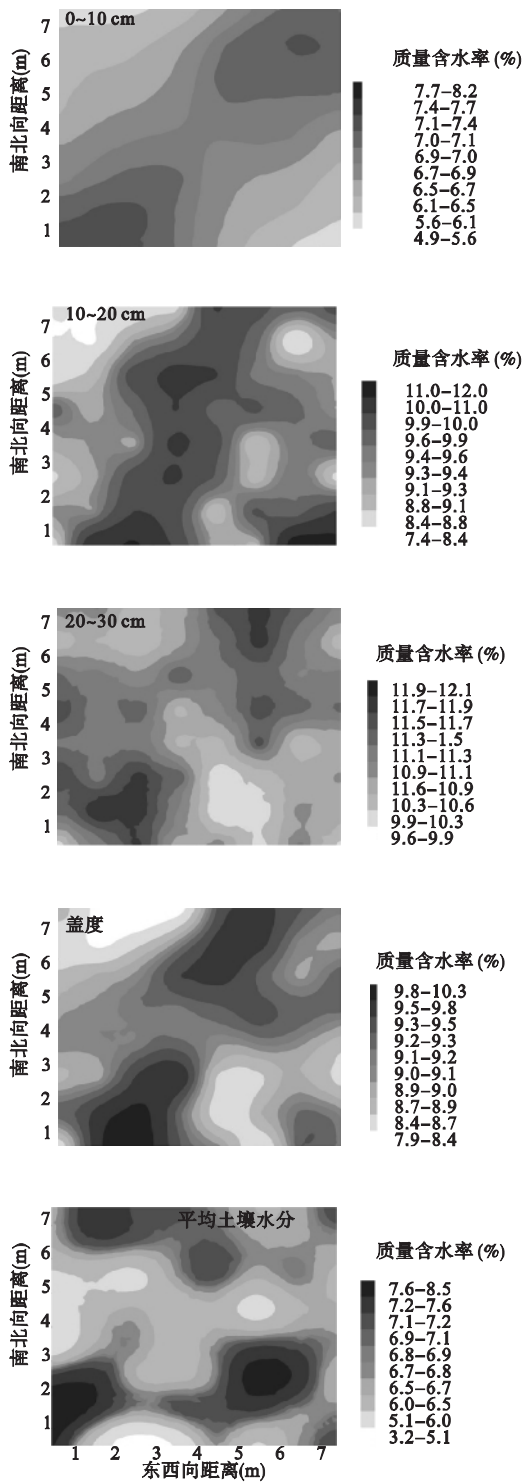


图2 土壤水分与植被空间分布示意图  
Fig. 2 Spatial distribution map of soil moisture and vegetation

较差,空间破碎化程度较高。

### 3 讨论

土壤水分空间异质性与植被盖度空间格局相互

响应,土壤水分的异质性是导致植被盖度存在差异的主要原因之一(杨兆平等,2010)。在生态系统中,空间异质性与空间格局有密切联系(肖笃宁等,1997;王政权和王庆成,2000),空间异质性是空间格局存在的基础,空间格局是空间异质性的具体表现(陈文波等,2002)。土壤水分具有高度的空间异质性(Moore *et al.*,1988),无论是在大尺度上还是小尺度上,这种空间异质性均存在。植被能够改善土壤结构,增强土壤水分的持水能力以及降水的入渗(何其华等,2003),进而影响土壤水分的空间异质性,因而不同的植被覆盖变化同样也会影响土壤水分的空间异质性(Lull & Reinhart,1955)。本研究中,甘肃臭草斑块的土壤水分和植被盖度的空间变异函数均为非线性模型,反映了土壤水分资源空间分布的非均质性以及甘肃臭草聚集分布特征。研究区内,降水是土壤水分的主要来源,供试草地地势相对平坦并且坡度 $<5^\circ$ ,取样区域范围仅为 $8\text{ m}\times 8\text{ m}$ ,并且土壤质地相对较为均一,如果仅从自然要素分析,在这样小的区域范围内土壤水分应具有较低的空间异质性,然而在甘肃臭草单优种群斑块内土壤水分具有高度的异质性特征,从表1也可看出,各层土壤水分的 $C/(C_0+C)$ 均 $>75\%$ ,各层土壤水分均具有较强的空间自相关。各层土壤水分均呈现出斑块状分布格局且存在数个互不重复的高值中心和低值区域(图2)。显然,在这种小尺度上,地表植被盖度及生物量分布格局是土壤水分空间异质性形成的重要影响因素,吴钦孝和杨文治(1998)在黄土高原植被建设与持续发展研究中也提出了相同的观点。植物种群通过其盖度分布格局和垂直梯度上生物量的分配模式,改变了地表水分蒸发、植被蒸腾模式以及降水的入渗性能,也改善了土壤的持水性能,从而影响并且改变了土壤水分的空间异质性格局。在地下 $0\sim 10\text{ cm}$ 土壤水分具有较好的空间连续性并且和甘肃臭草盖度的空间分布表现出较强相似性,这可能是由于植被盖度分布的连续性较好而引起的,本研究区土壤蒸散发较为强烈,在斑块尺度上甘肃臭草呈集群状分布,形成的密集草毡层和枯落物组成了有效的地表覆盖层,不仅减少了土壤水分的蒸发(Famiglietti *et al.*,1998;史丽丽等,2011),而且改变了土壤水分的空间异质性格局。 $10\sim 30\text{ cm}$ 土壤水分空间异质性主要是与甘肃臭草地下根茎分布的异质性有关,甘肃臭草根系层分布的差异对不同深度土壤剖面水分的影响可能不尽相同;研究发现,甘肃



臭草的根系主要集中在10~20 cm土层,该层土壤水分与表层相比破碎化程度加强,出现了数个低值区域;20~30 cm土层甘肃臭草根茎占总量的20%左右,该层土壤水分空间格局的形成机制较为复杂,小于取样尺度的随机因素引起的土壤水分异质性大于10~20 cm。

在干旱半干旱区,水分往往是植物分布的主要限制因子,并对植物的存活、生长形态和净生产力等具有极其重要的影响(Bertness & Callaway, 1994; Noble, 1997)。有研究发现,甘肃臭草是以一个点为圆心,通过营养繁殖和根状茎的横向生长不断地扩大种群的生态位空间,以类似“同心圆”的方式进行空间扩散(赵成章等, 2011; 高福元等, 2012),甘肃臭草盖度也表现出圈层结构和斑块状分布的特点,因而甘肃臭草盖度具有与土壤水分相似的空间格局。从甘肃臭草土壤水分及盖度的等值线图可以发现,在斑块内部甘肃臭草盖度的高值中心、低值区域并没有和各层土壤水分的相关区域完全重合,与10~20和20~30 cm土层的土壤水分分布格局存在较大差异。这主要是由于甘肃臭草具有多年生根状茎,能够利用根状茎进行快速的克隆繁殖,从而能在空间上通过连接物或间隔子在克隆分株之间进行运输与分享物质或资源;同时克隆植物具有空间上的移动性,从而摆脱了非克隆植物通常所具有的“固着生长”的模式(朱志玲等, 2006)。在斑块内部,甘肃臭草的根状茎会表现出主动觅食效应,即根状茎会向土壤水分资源更为丰富的方向生长,因而甘肃臭草在同一斑块内部不断形成新的克隆繁殖中心,并不是一个甘肃臭草斑块仅有一个中心(图2),这与甘肃臭草单优种群斑块的生物学分布格局研究结果相同(赵成章等, 2011)。甘肃臭草的克隆生长习性使得克隆植物可以跨越并占据不同的生境资源斑块,而且能通过选择性的放置子株来利用有利生境斑块和避免不利生境斑块,甘肃臭草通过地下根茎削弱了天然草地上原生植被对土壤资源的吸收利用,从而提高了自身在干旱生境中的适应能力。

在干旱生境下,土壤水分是影响植被分布、种群扩散的限制性因素。本研究发现,甘肃臭草通过克隆植物的生理整合影响并在一定程度上改变了小尺度内土壤水分的分布格局,对土壤水分空间分布进行二次分配,从而对生境资源达到更大限度的利用,同时也积极主动地向水分资源较高的空间扩展,和土壤水分相互响应,大大提高了在干旱生境中的适

应能力和竞争力。在原生植被无法适应而加速退化的背景下,甘肃臭草在高寒草地呈聚集分布格局,形成了具有不规则分布中心的大小不等的甘肃臭草单一优势种群斑块。

#### 参考文献

- 陈伏生,曾德慧,陈广生,等. 2003. 不同土地利用方式下沙地土壤水分空间变异规律. 生态学杂志, 22(6): 43-48.
- 陈玉福,董鸣. 2001. 毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析. 植物生态学报, 25(3): 265-269.
- 陈文波,肖笃宁,李秀珍. 2002. 景观空间分析的特征和主要内容. 生态学报, 22(7): 1135-1142.
- 何其华,何永华,包维楷. 2003. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化. 山地学报, 21(2): 149-156.
- 高福元,赵成章,卓玛兰草. 2012. 高寒山地甘肃臭草斑块特征与土壤水分的关系. 应用与环境生物学报, 18(4): 571-574.
- 李元寿,王根绪,丁永建,等. 2008. 青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性. 水科学进展, 19(1): 61-67.
- 刘新平,张铜会,赵哈林,等. 2005. 干旱半干旱区沙漠化土地水分动态研究进展. 水土保持研究, 12(1): 63-68.
- 马风云,李新荣,张景光,等. 2006. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性. 应用生态学报, 17(5): 789-795.
- 蒙仲举,高永,虞毅,等. 2009. 荒漠草原植被覆盖对土壤水分的影响. 节水灌溉, (3): 9-11.
- 史丽丽,赵成章,高福元,等. 2011. 基于地统计学的甘肃臭草群落土壤水分空间异质性. 山地学报, 29(6): 649-653.
- 王政权,王庆成. 2000. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. 生态学报, 20(6): 945-950.
- 吴钦孝,杨文治. 1998. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社.
- 邱扬,傅伯杰,王军. 2007. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 26(1): 100-107.
- 肖笃宁,布仁仓,李秀珍. 1997. 生态空间理论与景观异质性. 生态学报, 17(5): 453-461.
- 杨兆平,欧阳华,徐兴良,等. 2010. 五道梁高寒草原土壤水分和植被盖度空间异质性的地统计分析. 自然资源学报, 25(3): 426-434.
- 赵成章,高福元,石福习,等. 2011. 高寒退化草地甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应. 生态学报, 31(22): 6688-6695.
- 赵成章,龙瑞军. 2008. 石羊河上游甘肃臭草型退化草地植被恢复过程. 山地学报, 26(3): 286-292.
- 朱志玲,李德志,王绪平,等. 2006. 克隆植物的水分生理整合及其生态效应. 西北植物学报, 26(12): 2602-2614.
- Bertness MD, Callaway RM. 1994. Positive interactions in com-

- munities. *Trends in Ecology and Evolution* , **9**: 191–193.
- Entin JK , Robock A , Vinnikov KY , *et al.* 2000. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extra tropics. *Journal of Geophysical Research* , **105**: 11865–11877.
- Famiglietti JS , Rudnicki JW , Rodell M. 1998. Variability in surface moisture content along a hill slope transect: Rattlesnake Hill , Texas. *Journal of Hydrology* , **210**: 259–281.
- Gambardella CA , Mooman AT , Novak JM , *et al.* 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Science Society of America Journal* , **58**: 1501–1511.
- Lin HS , Dan W , Jay B , *et al.* 2005. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecological Modelling* , **182**: 271–290.
- Lull HW , Reinhart KG. 1955. Soil Moisture Measurement. USDA Southern For. Exp. Sta , New Orleans , LA , Occas: 140.
- Moore ID , Butch GJ , Mackenzie DH. 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE* , **31**: 1098–1107.
- Noble PS. 1997. Root distribution and seasonal production in the northwestern Sonoran desert for a C<sub>3</sub> shrub , a C<sub>4</sub> bunchgrass , and a CAM leaf succulent. *American Journal of Botany* , **84**: 949–955.
- Webster R. 1985. Quantitative spatial of soil in the field. *Advance in Soil Science* , **3**: 1–70.
- Wilson DJ , Western AW , Grayson RB , *et al.* 2003. Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30 cm depth , Mahurangi river catchment , New Zealand. *Journal of Hydrology* , **276**: 254–274.
- 
- 作者简介 史丽丽,女,1987年生,硕士研究生,主要研究方向为生物地理学。E-mail: sll19870301@126.com  
责任编辑 魏中青
-