

嘉峪关草湖湿地土壤水分含量与植被盖度的空间格局

段凯祥^{1,2} 张松林^{1,2*} 赵成章^{1,2} 彭鑫波¹ 隽伟超¹ 杨鹏¹ 杨晔¹
姜右锦¹ 骆艳¹

(¹西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; ²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 土壤水分含量是植被格局形成和演变的主要因素。探讨干旱区盐沼湿地土壤水分含量的空间异质性,有助于揭示湿地植物的环境适应机理和土壤水分与湿地植物的相互关系。本研究利用地统计学方法建立了嘉峪关草湖湿地3个不同长势(植被盖度高、中、低)假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)单优种群斑块土壤(0~90 cm)水分含量与植被盖度的变异函数理论模型,以Kriging插值法绘制了土壤水分含量与植被盖度的空间格局分布图,采用Moran *I*系数确定了湿地土壤水分含量和植被盖度的空间自相关关系,分析了湿地土壤水分含量与植被盖度的空间异质性及其相互作用关系。结果表明:草湖湿地样地土壤的平均含水量为湖边>干湖>沙丘间平地;盐分平均含量为干湖>湖边>沙丘间平地;在斑块尺度上,土壤水分含量和植被盖度均符合正态分布;各层土壤水分含量和假苇拂子茅盖度的空间结构均具有明显的斑块状分布特点,且均存在高度的空间异质性;3个样地各层土壤的水分含量和植被盖度均具有空间正相关性和空间集聚特征,60~90 cm土壤水分含量的空间集聚强度较0~30和30~60 cm土层更大,湖边样地植被盖度空间集聚特征更明显。假苇拂子茅最大限度利用土壤水分资源,提高了其对干旱生境的适应力,且在一定程度上影响小尺度土壤水分的空间分布格局。

关键词 假苇拂子茅; 土壤水分; 植被盖度; 空间异质性; 草湖湿地

Spatial pattern of soil moisture and vegetation coverage in Cao Lake wetland. DUAN Kai-xiang^{1,2}, ZHANG Song-lin^{1,2*}, ZHAO Cheng-zhang^{1,2}, PENG Xin-bo¹, JUAN Wei-chao¹, YANG Peng¹, YANG Ye¹, JIANG You-jin¹, LUO Yan¹ (¹*Institute of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China*; ²*Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China*).

Abstract: Soil moisture is a major factor driving the formation and evolution of vegetation patterns. The exploration of spatial heterogeneity of soil moisture in salt marsh wetland in arid area is helpful for revealing the environmental adaptation of wetland plants and the interaction mechanism between soil moisture and wetland plants. In this study, the variogram models of soil moisture content (0–90 cm) and vegetation coverage were established according to the vegetation cover conditions (high, medium, and low) of three *Calamagrostis pseudophragmites*-dominated population patches in the wetland of Cao Lake, Jiayuguan City, using the geostatistical method. The spatial distributions of soil moisture and vegetation coverage were mapped with the Kriging interpolation method, and the spatial autocorrelation properties of soil moisture and vegetation coverage in the wetland were determined by the Moran's *I* coefficients. Finally, the spatial heterogeneity of soil moisture and vegetation cover in wetland and their interaction relationships was ana-

国家自然科学基金项目(51068025)、甘肃省自然科学基金项目(1308RJZA302)、甘肃省油气资源研究重点实验室开放课题基金(SZDKFJJ20150606)和甘肃省生态学重点学科基金项目资助。

收稿日期: 2018-05-27 接受日期: 2018-12-10

* 通讯作者 E-mail: 13893314212@163.com

lyzed. Results showed that soil water contents in different sites of the Cao Lake wetland were in order of lakeside>dry lake>flat land between dunes, and salt content was in order of dry lake>lakeside>flat land between dunes. On the patch scale, soil moisture and vegetation cover were in line with the normal distribution model. The spatial structure of soil water content in each layer and vegetation cover of *C. pseudophragmites* in the three sites all had an obvious patch-like distribution and exhibited high degrees of spatial heterogeneity. The spatial distribution of soil moisture contents and vegetation coverage in all three plots had positive correlations and agglomeration characteristics. The spatial agglomeration intensity of soil moisture content for the 60–90 cm soil layer was larger than those of 0–30 and 30–60 cm soil layers, and the spatial clustering characteristics of vegetation cover was more obvious in the lakeside plot. Therefore, *C. pseudophragmites* maximized the use of soil water resources, and thus improved its adaptability to drought habitats, which, to a certain extent, affected the spatial distribution of soil moisture on small scale.

Key words: *Calamagrostis pseudophragmites*; soil moisture; vegetation cover; spatial heterogeneity; Cao Lake wetland.

空间异质性是指生态学过程和格局在空间分布上的不均匀性和复杂性(杜晶等,2015),是空间格局形成的主要原因(Yang *et al.*, 2017),空间异质性及其尺度依赖性生态水文学研究的核心问题之一。水文条件影响湿地生物区系的类型、生态系统的结构和功能,土壤水分具有空间异质性,其变异程度与植被类型息息相关(张泉等,2014)。作为一种选择压力,土壤水分空间异质性促使植物在进化过程中形成某种有效获取异质性资源的生态适应对策,深刻影响着植物根系的格局与动态,进而影响植被的生长发育及其分布特点(王存国等,2015; Xu *et al.*, 2015),较小尺度上植被覆盖度的空间异质性及对水分吸收的空间动态引起了土壤水分的空间变异(赵明月等,2015)。在干旱半干旱地区,一些植物为适应气候变化、放牧干扰和种间斗争的环境压力,形成了简单的单一优势种群斑块,有可能改变小尺度范围内土壤水分的分布格局,因此,在斑块尺度上研究干旱半干旱地区湿地土壤水分与植被盖度的空间异质性及其呼应关系,对深入了解湿地的生态过程、植被的空间分布格局和湿地功能维护都具有重要意义。

假苇拂子茅是典型的多年生根状茎克隆植物,是沼泽草地的优势种或主要伴生种,其单一优势种群群落是植被退化的主要表现形式之一,但是可能改变小尺度范围内土壤水分的空间结构,优化种群生长扩散的条件,从而提高其对干旱生境的适应能力(杨泉等,2014)。目前,对森林和草地土壤水分空间格局、小流域土壤水分空间异质性及其影响因子、自然条件下海滨湿地土壤水盐的空间分异及其与植被的关系已有较多研究(Savva *et al.*, 2013; 张

华兵等,2013;王甜等,2017),但现有的研究没有从斑块、尺度和关联性综合的视角分析土壤水分和植被格局的空间分布及呼应关系,对生境梯度上寒旱区盐沼湿地盐生植物和生境因子空间格局的协同变异关系与互动规律认识不清,导致无法阐明盐生植物空间格局的形成机制,而关于斑块尺度的研究主要集中于景观多样性方面,多侧重于较大空间尺度景观格局量化分析,而对斑块内部小尺度上土壤资源空间结构及其与植被相互响应研究相对不足。地统计学利用原始数据和半方差函数对区域化变量的未采样点进行无偏估值,分析自然现象的空间变异和空间相关性,是空间变异研究最普遍、最有效的方法之一(张峰等,2012)。鉴于此,本文利用地统计学方法,研究湿地小尺度假苇拂子茅斑块土壤水分和植被盖度的空间异质性,探讨其相互关系,以认识假苇拂子茅种群适应环境演变的生物学机制。

1 研究区概况

嘉峪关市草湖国家湿地公园位于长城区新城镇沙漠与农田过渡带,39°48′14″N—39°49′23″N、98°26′47″E—98°28′51″E,海拔1460~1490 m,东西长5.2 km,南北宽4.3 km,水面面积333.3 hm²。该地区为荒漠型中温带干旱大陆性气候,年太阳辐射量608.8 kJ·cm⁻²,年平均气温6.9℃,年平均降水量85.3 mm,年平均蒸发量2148.8 mm。土壤类型主要有草甸土、潮化灌淤土和风沙土,以草甸土为主。植被以喜湿耐盐的草甸植被、荒漠植被和沙生植被为主,主要有冰草(*Agropyron cristatum*)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)、小香蒲(*Typha minima*)、三棱草(*Cyperus rotundus*)、芨芨草

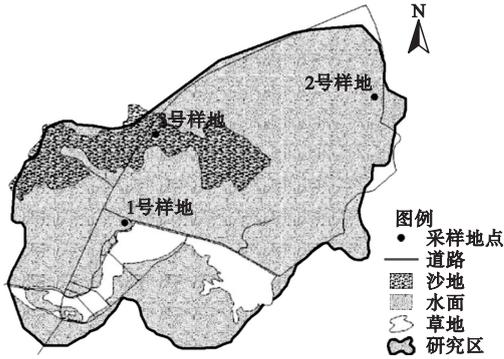


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

(*Achnatherum splendens*)、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*) 和白刺 (*Nitraria tangutorum*) 等。研究区如图1所示。

近年来,嘉峪关草湖湿地公园形成了大量的面积不等、繁茂生长的假苇拂子茅单一优势种群斑块,分布在淡水湖四周、沙丘间平地 and 沙地。

2 研究方法

2.1 样地设置

2017年8月上旬,综合考虑地形地貌、土壤类型、水源条件等因素,结合采样点具有全面性、客观性、代表性、可行性的原则,根据长势(植被盖度高、中、低)不同,选择湖边、干湖和沙丘间平地3个相对平坦的假苇拂子茅单优势种群斑块样地。湖边斑块位于湖边,土壤湿度较高;干湖样地位于干湖内,采样时为枯水期,湖泊干涸,湿度较低;沙丘间平地样地位于丘间平地,常年缺水,湿度最低。在3个斑块内部分别设置1个80 m×80 m的样区,用邻接格子法布设间距(10 m×10 m)的样点64个,用竹签标记;围绕样点设置100 cm×100 cm的样方框。采样点示意图如图2所示。

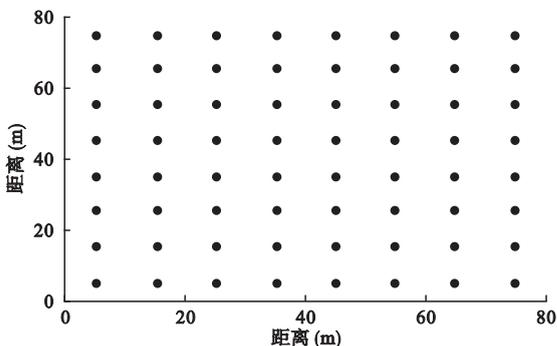


图2 研究区采样点示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling points in the study area

2.2 数据采集

在样方框内测定假苇拂子茅的盖度,重复6次取平均值。鉴于研究区假苇拂子茅根状茎主要分布在0~90 cm土层中,故用直径4 cm土钻间隔30 cm、分3层取土样,每一层重复3次;剔除样品中植物根段和枯落物等杂质,装入编号的铝盒中,实验室内105℃烘干12 h,称重,计算土壤含水量;采用土/水重量比1:5浸出、滤液烘干法测定土壤含盐量。

2.3 数据分析

2.3.1 空间结构分析 地统计学中方差函数计算要求数据符合正态分布或近似正态分布,所以数据处理分为两个步骤:①采用SPSS 22.0软件中的Kolmogorov-Smirnov (K-S)正态性检验方法判断所测数据的正态分布性,符合的直接进行地统计学分析($P>0.05$),不符合的经过对数转换或方根转换后再进行地统计学分析;②利用GS+软件进行半方差值计算。

半方差函数是地统计学中研究空间变异性的关键函数,既能描述区域化变量的结构性变化,又能描述其随机性变化,计算公式为(王幼奇等,2018):

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

式中, $\gamma(h)$ 为样本距为 h 的半方差; h 为样本距; $Z(x_i)$ 为位置 x_i 处的土壤水分或植被盖度; $Z(x_i + h)$ 为在距离为 $x_i + h$ 处的土壤水分或植被盖度; $N(h)$ 为间距为 h 的样本对总数。

通过半方差函数图得到变程 a (range)、基台值 $C+C_0$ (sill)、块金值 C_0 (nugget)和偏基台值 C (partial sill)。块金值(C_0)为变量随机部分引起的异质性,系由试验误差和小于取样尺度引起的变异,反映区域化变量的内部随机性,块金值大表示随机异质性强;块金效应($C_0/(C+C_0)$)为变量随机部分引起的空间异质性占比,比值大说明样本间的变异多由随机因素引起;结构方差比($C/(C+C_0)$)的大小反映自相关部分占总空间异质性的比例, <0.25 、 $0.25 \sim 0.75$ 和 >0.75 分别表示变量的空间自相关性较弱、中等和较强(张志坚等,2018);基台值反映全部样点的总变异,是半方差函数的极限值,越大表示总的空间异质性程度越高。描述空间尺度的变异函数的变程是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(赵科理等,2016)。

2.3.2 空间结构模拟 利用Kriging法绘制等值线

图可揭示土壤水分和植被盖度的空间分布格局。在半方差函数的基础上通过任一个点影响范围内的 n 个有效样本值 $Z(x_i)$ 的线性组合得到该点的估计值 Z_v^* (吕刚等, 2018), 即:

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中, λ_i 为与有效样本值 $Z(x_i)$ 有关的加权系数, 表示对估计值 Z_v^* 的贡献。

2.3.3 空间自相关分析 空间自相关分析 (spatial autocorrelation analysis) 检验具有空间位置的某要素的观测点与其相邻点的关联性 (Ginebreda *et al.*, 2018), 可发现空间的异质性和空间集聚性。Moran I 系数检验某一空间变量的空间分布是否存在依赖关系。Moran I 取值 $-1 \sim +1$, >0 为正相关, 为空间集聚分布; 反之则为负相关, 为空间离散分布; $=0$, 不相关, 为空间随机分布; 数值绝对值越大, 表明相关性显著。

3 结果与分析

3.1 土壤水盐特征

从表 1 可以看出, 3 个样地的土壤水分从上到下均为递增趋势, 且平均含水量湖边 > 干湖 > 沙丘间平地; 而土壤盐分随土壤深度增加的变化规律不明显, 但是平均含盐量干湖 > 湖边 > 沙丘间平地。湖边样地位于湖边, 常年丰水, 所以含水量较高; 干湖样地位于间歇性湖泊内, 采样时间为枯水期, 湖水干涸, 所以含水量较湖边样地偏低; 沙丘间平地样地位于丘间平地, 常年缺水, 所以含水量最低。干湖样地由于水分蒸发、盐分浓缩, 所以盐分含量最高且上部盐分含量较高, 盐分表聚性明显; 湖边样地水分充足, 盐分溶解于水中淋滤而去, 所以土壤含盐量较小且上部的盐分含量较低; 沙丘间平地样地常年缺水,

盐分的蒸发和淋滤作用不显著, 所以含盐量最低且中部的盐分含量最高。

3.2 土壤水分含量和植被盖度的空间分异特征

取样间隔是导致变程差异的主要原因, 本研究中变程是土壤水分和植被盖度空间变异的范围, 因而一定程度上可指导采样设计。本研究土壤剖面水分含量的变程介于 14.76 ~ 20.69 m, 植被盖度的变程为 14.88 ~ 35.11 m。而本试验土壤水分和植被盖度的设计尺度为 10 m, 所以符合地统计学取样要求, 能够反映假苇拂子茅斑块土壤水分和盖度的空间格局信息。

本文使用的土壤水分和植被盖度空间变异函数为非线性模型, 采用单样本 K-S 检验 (显著水平 $\alpha = 0.05$), 得到的相应参数值见表 2。K-S 值均大于 0.5 且少数接近于 1.0, 表明研究区土壤水分含量和植被盖度值均符合正态分布性, 各样地土壤水分拟合半变异函数的决定系数 R^2 均大于 0.8, 说明各变异函数模型能很好地反映土壤水分的空间结构特征。

由表 2 可知, 研究区土壤水分和植被盖度的块金值均大于 0 而小于 0.1, 说明均存在由变量随机因素引起的空间异质性但在容许范围内; 各样地植被盖度和不同层位的土壤水分均存在块金效应, 尽管大小不一但均在容许范围内: 植被盖度, 湖边 (23.60%) > 沙丘间平地 (20.40%) > 干湖 (0.06%); 土壤水分含量, 湖边 30 ~ 60 cm (14.4%) > 0 ~ 30 cm (13.3%) > 60 ~ 90 cm (12.0%), 干湖 60 ~ 90 cm (32.8%) > 0 ~ 30 cm (16.0%) > 30 ~ 60 cm (11.3%), 沙丘间平地 0 ~ 30 cm (17.6%) > 30 ~ 60 cm (14.7%) > 60 ~ 90 cm (2.2%); 除干湖 60 ~ 90 cm 为中等空间自相关外, 研究区各层土壤水分和植被盖度均为较强的空间自相关, 且同一样地不同层位和同一层位不同样地的土壤水分含量和植被盖度空间异质性强度

表 1 不同样地的土壤水盐特征

Table 1 Soil moisture and salinity properties in different sampling locations

样地	位置	土层 (cm)	土壤水分 (%)				土壤盐分 (%)					
			最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	
1	湖边	0~30	17.66	3.64	8.53	2.66	31.22	1.54	0.78	1.05	0.15	13.88
		30~60	23.51	5.27	14.75	4.91	33.27	2.26	0.20	0.83	0.50	60.42
		60~90	31.31	7.93	22.80	4.81	21.12	2.86	0.35	1.94	0.52	26.56
2	干湖	0~30	16.08	3.07	9.83	4.65	47.32	5.27	2.64	3.89	0.91	23.27
		30~60	23.28	2.91	14.31	6.25	43.67	5.32	1.99	3.85	1.02	26.46
		60~90	29.69	3.08	16.73	5.64	33.72	6.95	0.79	2.51	1.24	49.40
3	沙丘间 平地	0~30	5.01	1.52	2.90	0.81	27.86	1.82	0.30	0.89	0.35	39.27
		30~60	12.64	1.93	4.74	3.01	63.56	3.65	0.51	1.74	0.93	54.05
		60~90	14.66	1.61	6.13	3.60	58.77	1.74	0.66	1.03	0.30	29.14

表2 土壤水分与植被变异函数理论模型及相关参数

Table 2 Semivariogram models and their parameters for soil moisture and vegetation

样地	土层 (cm)	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 $A_0(m)$	结构方差比 $C/(C+C_0)$	决定系数 R^2	K-S 检验
湖边	0~30	指数	0.0145	0.1090	15.04	0.867	0.764	0.62
	30~60	指数	0.0860	0.5990	20.69	0.856	0.867	0.56
	60~90	球状	0.0940	0.7830	19.85	0.880	0.844	0.91
干湖	盖度	高斯	0.0456	0.1932	35.11	0.764	0.994	0.82
	0~30	指数	0.0710	0.4440	16.22	0.840	0.995	0.79
	30~60	高斯	0.0430	0.3810	16.83	0.887	0.987	0.96
	60~90	指数	0.1100	0.3350	14.76	0.672	0.967	0.83
沙丘间平地	盖度	高斯	0.0001	0.1662	14.88	0.999	0.992	0.65
	0~30	指数	0.0445	0.2528	16.37	0.824	0.962	0.74
	30~60	指数	0.0858	0.5837	20.38	0.853	0.879	0.69
	60~90	指数	0.0900	0.7377	18.52	0.878	0.863	0.86
	盖度	高斯	0.0373	0.1828	25.14	0.796	0.982	0.76

的差别都不大,多数在5%以内。垂直梯度上,土壤水分总的空间异质性大小依次为:湖边60~90 cm>30~60 cm>0~30 cm,干湖0~30 cm>30~60 cm>60~90 cm,沙丘间平地60~90 cm>30~60 cm>0~30 cm,各土层与0~30 cm土层相比,湖边样地变幅449.54%~618.35%,差异巨大;干湖变幅14.19%~24.55%,差异不大;沙丘间平地变幅130.89%~191.81%,差异较大。水平梯度上,0~30 cm土层干湖>沙丘间平地>湖边,30~60 cm土层湖边>沙丘间平地>干湖,60~90 cm土层湖边>沙丘间平地>干湖,各样地与湖边样地相比,0~30 cm土层变幅131.93%~307.34%,差异巨大;30~60 cm土层变幅2.55%~36.39%,差异不大;60~90 cm土层变幅5.79%~57.22%,差异稍大。植被盖度的空间异质性由大到小:湖边>沙丘间平地>干湖,差异较大,变幅5.38%~13.98%。

总的来说,假苇拂子茅斑块土壤水分和植被盖度的空间异质性较强;除干湖样地60~90 cm空间自相关中等外,其他样地各层土壤水分和植被盖度的空间自相关性均较强。

3.3 土壤水分含量与植被盖度的空间自相关性

利用 ArcGIS 软件计算 0~10、10~20 和 20~30 cm 土壤水分含量和植被盖度的空间自相关 Moran I 系数。从表3可以看出, Z 得分均大于1.65和 P 值均小于0.05,说明 Moran I 系数通过检验,置信度为90%;各层土壤水分含量和植被盖度的 Moran I 系数均为正值,说明土壤水分含量和植被盖度具有空间正相关性,属于空间集聚分布。

在土壤剖面上,随着深度增加,3个样地土壤水分含量的 Moran I 系数均增大;而3个样地中,湖边

样地植被盖度的 Moran I 系数最大,表明,3个样地深层土壤水分含量的空间集聚性更强烈,湖边样地植被盖度的空间集聚特征更明显。

图3表示的是各层土壤水分的 Moran I 系数随间隔距离(步长)增大的变化趋势。各样地土壤水分除干湖样地0~30 cm外,在<20 m的范围内均呈现出空间正相关,并且随着分析的间隔距离的增大而减小,在10 m的步长时,各层土壤水分变化的 Moran I 系数是60~90 cm>30~60 cm>0~30 cm,即60~90 cm层土壤水分的空间自相关高于其他地区。总体而言,空间自相关在<20 m的步长范围内,一般是60~90 cm>30~60 cm>0~30 cm,这表明0~30 cm土层的土壤水分更容易受到相领区域土壤水分的影响,而0~30 cm土层土壤水分相对于60~90 cm土层来说具有更大的随机性。正空间自相关的距离大致反映了性质相似的斑块平均半径,从图3

表3 各样地植被盖度及不同土层土壤水分 Moran I 系数
Table 3 Moran I coefficient of vegetation coverage in different plots and soil moisture in different soil layers

样地	土层	Moran I	Z 得分	P 值
湖边	0~30	0.182	1.82	0.02
	30~60	0.204	2.01	0.01
	60~90	0.279	2.13	0.02
干湖	盖度	0.315	2.08	0.01
	0~30	0.146	2.46	0.03
	30~60	0.174	1.98	0.01
	60~90	0.295	2.27	0.02
沙丘间平地	盖度	0.231	2.12	0.02
	0~30	0.139	1.92	0.02
	30~60	0.194	2.11	0.01
	60~90	0.257	2.19	0.01
	盖度	0.214	1.99	0.02

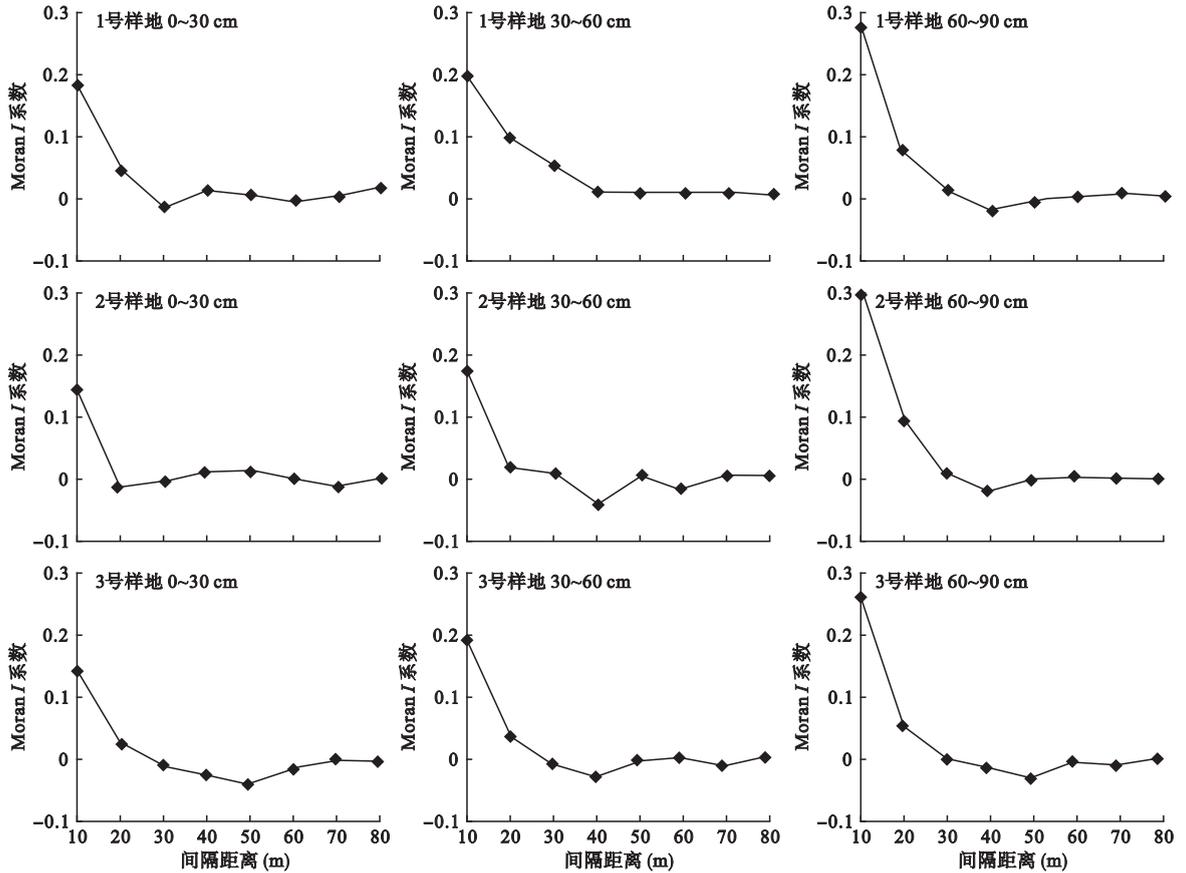


图3 不同土层土壤水分 Moran I 系数随距离的变化

Fig.3 Moran I coefficient variation of soil moisture with distance in different soil layers

可以看出,步长 <20 m 的范围内,除干胡样地 0~30 cm 外,各样地土壤水分均呈现显著的正相关($P < 0.05$),因而可以得到除干胡样地 0~30 cm 外各样地土壤水分存在正空间自相关的尺度为 20 m,干胡样地 0~30 cm 土壤水分存在正空间自相关的尺度是 10 m。

3.4 土壤水分含量和植被盖度的空间分布格局

基于土壤水分含量和植被盖度变异函数模型的计算结果,利用 Kriging 方法在 ArcGIS 软件中绘制其等值线图(图 4)。可见,各层土壤水分含量和植被盖度具有明显的空间变异性,总体呈圈层结构和镶嵌分布。湖边地土壤水分含量高低值斑块镶嵌状分布明显,显示空间破碎化程度较高;其中,60~90 cm 土壤水分含量空间分布的高值斑块与其着生假苇拂子茅盖度的高值斑块空间相似性度较高。干湖地 0~90 cm 土壤水分含量呈开环状,60~90 cm 高低值斑块镶嵌性明显,所以其空间破碎化程度较高;而其土壤水分含量高值斑块与假苇拂子茅盖度高值斑块空间分布负相关趋势明显。沙丘间平地 0~30

和 30~60 cm 土壤水分含量呈条、环状,空间分异明显,空间连续性较好;60~90 cm 土壤水分含量高低值斑块分异明显,空间连续性较好,空间破碎化程度较低,且其高值斑块与假苇拂子茅盖度高值斑块空间相似度较高。

4 讨论

空间异质性是土壤水分含量和植被盖度空间分布格局的本质属性,包括空间组成、空间构型和空间关系的异质性,反映了空间系统的复杂性和变异程度。植被斑块及其动态决定了其内部的空间格局和生态过程(邹雪辉,2015);斑块生境不同,植被的组成、结构和功能也不同。大量研究表明,土壤性状变化强烈影响植物生长和群落动态等重要生态过程(武昌,2017;Mei *et al.*,2018);而植物群落斑块又能够通过影响土壤的结构、过程和资源有效性(Erik *et al.*,2016;Tom *et al.*,2016),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影响土壤水分的空间异质性。植被盖度和土壤水分含量

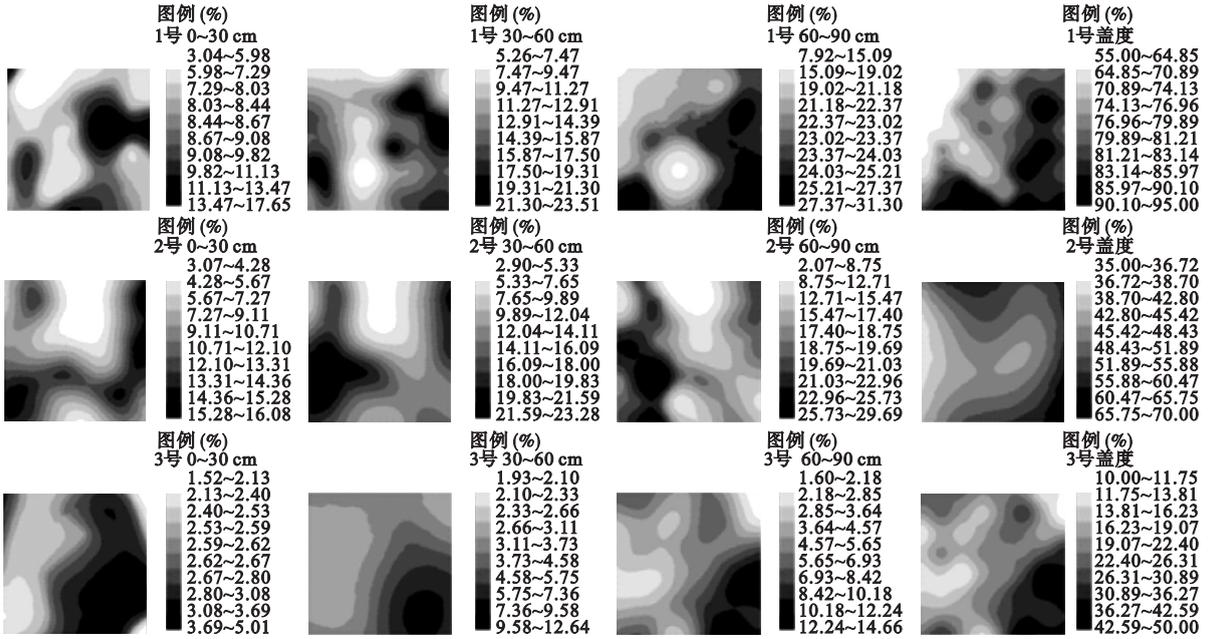


图4 草湖湿地土壤水分含量与植被盖度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil moisture and vegetation coverage in wetland of Cao Lake

的空间格局具有互动性(Huang *et al.*, 2018)。

在干旱半干旱区,土壤水分对植物的存活、生长、形态和净生产力等均具有极其重要的影响,是植物分布的主要限制因子。本研究发现,斑块内部假苇拂子茅盖度和各层土壤水分含量表现出圈层结构和斑块状分布特点,高低值区域不完全重合,不同样地的重合度不一,说明土壤水分资源不是影响植被盖度的唯一因素。这是因为假苇拂子茅是克隆生殖植物,利用间隔子在克隆分株之间进行远距离的资源运输与分享,通过根状茎营养繁殖和横向生长不断扩大生态位,摆脱非克隆植物的“固着生长”模式,以类似“同心圆”的方式进行空间扩散(高福元等,2012),在斑块内部土壤水分含量的空间分布也不均匀,假苇拂子茅的根状茎会向土壤水分含量更高的方向生长,因而在同一斑块内部不断形成新的克隆繁殖中心,并不是仅有一个繁殖中心。假苇拂子茅的克隆生长习性使其跨越并占据不同的生境资源斑块,选择性分配分株的空间位置,权衡利用生境斑块,削弱地上原生植被对有限土壤水分资源的利用度,从而提高了自身在干旱生境中的适应能力,成为单优种群。

研究区内的湿地水体是土壤水分的主要来源,假苇拂子茅单优种群斑块内的取样范围有限、样地平坦、土质相似,土壤水分含量空间格局本应具有较低的异质性,然而土壤水分含量空间分布格局具有

较高的异质性:各层土壤水分含量均呈斑块状分布且存在数个不同的高低值区域,除干湖地60~90 cm外,各层土壤水分的 $C/(C+C_0)$ 均大于75%,含量空间自相关性较强且空间集聚特征更明显。显然,在这种小尺度上,植被覆盖度及其生物量的分布情况是土壤水分空间异质性形成的重要因素,植被通过其冠层结构影响地表水分蒸发模式、降水入渗性能和土壤持水性能等(陈文业等,2015),湖边和沙丘间平地60~90 cm土壤水分含量和假苇拂子茅盖度的空间分布相似性较强,可能是植被盖度和地下根茎的分布模式引起:研究区土壤蒸发较强烈,在斑块尺度上假苇拂子茅呈集群分布,形成的密集草毡层和枯落物组成了有效的地表覆盖层,减少了土壤水分的蒸发(Zhang *et al.*, 2016);另外,假苇拂子茅的根系主要集中在60~90 cm土层,根系吸水抽拉作用导致该层土壤水分含量相对较高且和植物根系的分布格局相吻合,根系分布状况和冠层结构两者共同导致小尺度土壤水分含量空间异质性的形成。而干湖样地土壤水分含量与假苇拂子茅盖度的高值斑块呈现空间反相关趋势,可能与各土层土壤平均含盐量($3.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)相对较高有关(表1):各层平面方向上,土壤水分与盐分含量正相关;水分盐度增加,影响根系对水分资源的利用效率,从而使假苇拂子茅的生长速率降低和叶片受伤;剖面方向上,土壤水分含量与盐分含量负相关,自上而下土壤盐分含

量降低,显示较强的盐分表聚性影响地下根状茎萌生,使假苇拂子茅根芽比增加(冷家明等,2017)。

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,假苇拂子茅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,假苇拂子茅在干旱半干旱地区湿地呈聚集分布格局,形成了具有不规则分布中心的大小不等的单一优势种群斑块。

5 结 论

本研究发现,嘉峪关草湖湿地中3个不同土地类型样地的土壤平均含水量大小为湖边>干湖>沙丘间平地;盐分平均含量为干湖>湖边>沙丘间平地;在斑块尺度上,假苇拂子茅单优土壤水分含量和植被盖度均符合正态分布;各层土壤水分含量和假苇拂子茅盖度的空间结构普遍属于斑块镶嵌状分布且存在较强的空间异质性;3个样地各层土壤水分含量和植被盖度均具有空间正相关性和空间集聚特征,60~90 cm土壤水分含量的空间集聚强度较0~30和30~60 cm土层更大,湖边样地植被盖度的空间集聚特征更明显。

土壤水分含量和质量影响假苇拂子茅斑块的盖度格局,而假苇拂子茅通过克隆生长整合水分资源改变小尺度土壤水分含量的空间分布格局;假苇拂子茅通过对土壤水分资源的二次分配,达到对生境资源的更大限度利用;通过根状茎主动向水分资源较高和盐分含量较低空间的横向扩展,突破生境空间的水盐等资源限制,与土壤水分等资源有效互动,大大提高了其在干旱生境中的适应力和竞争力。假苇拂子茅对水分资源的竞争和对盐分限制的突破,削弱了原生植被的竞争力,使其无法适应而加速退化,使假苇拂子茅成为嘉峪关草湖湿地的单一优势种群斑块。由于湿地土壤的水盐成分呈聚集分布格局,因而导致假苇拂子茅的盖度分布格局大小不等、形状不规则,空间异质性较强。

参考文献

陈文业,赵明,张继强,等. 2015. 敦煌西湖荒漠-湿地生态系统植被与土壤水分空间异质性研究. 冰川冻土, 37

- (6): 1670-1679.
- 杜晶,赵成章,宋清华,等. 2015. 基于地统计学的退化草地狼毒种群土壤种子库空间异质性. 生态学杂志, 34(1): 94-99.
- 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.
- 冷家明,尚天翠,毛锦龙,等. 2017. 不同盐胁迫对假苇拂子茅种子萌发与幼苗生长的影响. 草地学报, 25(5): 1152-1155.
- 吕刚,刘雅卓,李叶鑫,等. 2018. 露天煤矿排土场边坡表层土壤水分物理性质空间变异特征. 土壤通报, 49(1): 69-77.
- 王甜,康峰峰,韩海荣,等. 2017. 山西太岳山小流域土壤水分空间异质性及影响因子. 生态学报, 37(11): 3902-3911.
- 王存国,韩士杰,张军辉,等. 2010. 长白山阔叶红松林表层土壤水分空间异质性的地统计学分析. 应用生态学报, 21(4): 849-855.
- 王幼奇,赵云鹏,白一茹,等. 2018. 中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性. 环境科学, 39(3): 1396-1403.
- 武晶. 2017. 科尔沁沙地不同生态型植物多样性与土壤含水量的关系. 辽宁林业科技, (5): 1-3.
- 杨泉,赵成章,史丽丽,等. 2014. 祁连山地甘肃臭草斑块土壤水分的空间自相关分析. 生态学杂志, 33(3): 716-722.
- 张峰,杜群,葛宏立,等. 2012. 基于地统计学和CFI样地的浙江省森林碳空间分布研究. 生态学报, 32(16): 5275-5286.
- 张泉,刘咏梅,杨勤科,等. 2014. 祁连山退化高寒草甸土壤水分空间变异特征分析. 冰川冻土, 36(1): 88-94.
- 张华兵,刘红玉,李玉凤,等. 2013. 自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究. 环境科学, 34(2): 540-546.
- 张志坚,刘苑秋,吴春生,等. 2018. 基于地统计学和GIS的江西省森林土壤养分空间分布特征. 水土保持研究, 25(1): 38-46.
- 赵科理,傅伟军,叶正钱,等. 2016. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征. 环境科学, 37(8): 3151-3159.
- 赵明月,赵文武,刘源鑫. 2015. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子——以黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, 35(14): 4625-4632.
- 邹雪辉. 2015. 松嫩盐碱化草地景观植被斑块的生态效应与动态机制(博士学位论文). 长春: 东北师范大学.
- Erik MC, Sayjro KN, Kenneth CM, et al. 2016. Experimental investigation of the effect of vegetation on soil, sediment erosion, and salt transport processes in the Upper Colorado River Basin Mancos Shale formation, Price, Utah, USA. *Catena*, 147: 650-662.
- Ginebreda A, Sabater-Liesla L, Rico A, et al. 2018. Reconciling monitoring and modeling: An appraisal of river monitoring networks based on a spatial autocorrelation approach-emer-

- ging pollutants in the Danube River as a case study. *Science of the Total Environment*, **618**: 323–335.
- Huang FF, Zhang WQ, Gan XH, *et al.* 2018. Changes in vegetation and soil properties during recovery of a subtropical forest in South China. *Journal of Mountain Science*, **15**: 46–58.
- Mei XM, Ma L, Zhu QK, *et al.* 2018. Responses of soil moisture to vegetation restoration type and slope length on the loess hill slope. *Journal of Mountain Science*, **15**: 548–562.
- Savva Y, Szlavetz K, Carlson D, *et al.* 2013. Spatial patterns of soil moisture under forest and grass land cover in a suburban area, in Maryland, USA. *Geoderma*, **192**: 202–210.
- Tom L, Timothy ES, Bruce H, *et al.* 2016. Conversion of subtropical native vegetation to introduced conifer forest: Impacts on below-ground and above-ground carbon pools. *Forest Ecology and Management*, **370**: 65–75.
- Xu XL, Zhang Q, Tan ZQ, *et al.* 2015. Effects of water-table depth and soil moisture on plant biomass, diversity, and distribution at a seasonally flooded wetland of Poyang Lake, China. *Chinese Geographical Science*, **25**: 739–756.
- Yang Y, Dou YX, Liu D, *et al.* 2017. Spatial pattern and heterogeneity of soil moisture along a transect in a small catchment on the Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, **550**: 466–477.
- Zhang X, Zhao WW, Liu YX, *et al.* 2016. The relationships between grasslands and soil moisture on the Loess Plateau of China: A review. *Catena*, **145**: 56–67.
-
- 作者简介 段凯祥,男,1992年生,硕士研究生,主要从事环境化学、环境生态学、生物地理学方面的研究。E-mail: 022412125@hncj.edu.cn
- 责任编辑 张敏
-