

DOI: 10.5846/stxb202004060813

康满萍, 赵成章, 白雪. 苏干湖湿地土壤全盐含量空间异质性及影响因素. 生态学报, 2021, 41(6): 2282-2291.

Kang M P, Zhao C Z, Bai X. Spatial heterogeneity and influencing factors of total soil salinity in Sugan Lake wetland. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2282-2291.

苏干湖湿地土壤全盐含量空间异质性及影响因素

康满萍, 赵成章*, 白雪

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: 土壤盐分的空间异质性是影响湿地植被格局形成和演变的主要因素之一, 对于认识内陆盐沼湿地盐分的空间分布及其对环境的响应机制具有重要意义。利用经典统计学、地统计学和 Kriging 插值等方法研究了苏干湖盐沼湿地浅层剖面 0—50 cm 土层全盐含量的空间异质性与地下水位埋深、植被覆盖度间的相互作用关系。结果表明: (1) 苏干湖湿地 0—10 cm、10—30 cm 和 30—50 cm 土层的全盐含量均值分别为 204.41、18.62、15.89 g/kg; (2) 土壤全盐含量随着土层深度的增加变异性由强变弱, 随机空间变异和总异质性程度由高变低, 受结构性因素的影响具有强烈的空间相关性, 且变程值介于 5.2—8.49 km, 0—10 cm、10—30 cm 全盐含量具有各向异性特征, 而 30—50 cm 的各向异性比接近于 1, 表现为各向同性; (3) 各层土壤全盐含量具有较强的空间异质性, 高、低值中心呈斑状镶嵌分布, 土壤全盐含量与地下水埋深间呈正相关, 与植被覆盖度间呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。苏干湖内陆盐沼湿地土壤全盐含量空间异质性主要受植被覆盖度的影响, 而地下水埋深的变化增加了其空间变异的复杂性, 体现了内陆盐沼湿地土壤理化空间系统的复杂性和非均质性。

关键词: 内陆盐沼湿地; 土壤全盐量; 地下水位埋深; 植被覆盖度; 空间异质性; 地统计学

Spatial heterogeneity and influencing factors of total soil salinity in Sugan Lake wetland

KANG Manping, ZHAO Chengzhang*, BAI Xue

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

Abstract: The spatial heterogeneity of soil salinity is of great significance to understand the spatial distribution of salinity in inland salt marsh wetlands and its response mechanism to the environment. In this paper, the classical statistics, geostatistical, and Kriging interpolation were used to study the interaction between the spatial heterogeneity of the total salt content in the 0—50 cm soil layer of the shallow section the Sugan Lake salt marsh and the depth of the groundwater level and the vegetation coverage. The research area was located in Sugan Lake wetland at the intersection of the Altun Mountains and the Qilian Mountains in the northwest of the Qaidam Basin ($94^{\circ}10'33''$ — $94^{\circ}14'43''$ E, $39^{\circ}01'25''$ — $39^{\circ}05'32''$ N), and the elevation is between 2795—2808 m. The results indicates that: (1) the average values of total salt content in the soil layers of 0—10 cm, 10—30 cm and 30—50 cm in the Sugan Lake wetland are (204.41 ± 11.8) g/kg, (18.62 ± 0.92) g/kg, and (15.89 ± 0.81) g/kg, respectively. (2) With the increase of soil depth, the variation of soil total salt content changes from strong to weak. Random spatial variability and total heterogeneity degree change from high to low, which has strong spatial correlation under the influence of structural factors. The range of variation is between 5.2—8.49 km. The total salt content of 0—10 cm, 10—30 cm has anisotropic characteristics, while the anisotropy ratio of 30—50 cm is close to 1, showing isotropy. (3) There is a strong spatial heterogeneity of soil total salt content in each layer, and the high and low

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461013, 41861009)

收稿日期: 2020-04-06; 网络出版日期: 2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaocz@nwnu.edu.cn

value centers distributed in the patches. The total salt content of soil is positively correlated with groundwater depth, and highly significantly negative correlated with the vegetation coverage ($P < 0.01$). The spatial heterogeneity of soil total salt content in inland salt marsh wetland of Sugan Lake is mainly influenced by vegetation coverage. The variation of groundwater depth increases the complexity of its spatial variability, which reflects the complexity and heterogeneity of the soil physical and chemical spatial system of inland salt marsh wetland.

Key Words: inland salt marsh wetland; total soil salinity; groundwater level; vegetation coverage; spatial heterogeneity; geostatistics

湿地生态系统是湿地生物和非生物要素间物质循环和能量流动相互作用的空间区域^[1],土壤是湿地生态过程的重要参与者和载体,土壤全盐含量的空间异质性是土壤盐分运移对环境因子的响应^[2],对认识土壤全盐含量与群落环境、生态水文之间的响应机制具有重要意义^[3]。土壤全盐含量能够反映耕作层土壤盐渍化的程度和状态^[4],控制着土壤的性状和发育方向,影响生态水文环境的稳定性及生物多样性^[5],是地质地貌、气候、土壤质地、群落环境和生态水文过程等一系列地理环境因子共同作用的结果^[6];"盐随水来,盐随水去",水分是土壤盐分运移的载体,地下水位埋深的变化直接关系到土壤水带和毛管水带的连接状态,影响土壤中盐基离子随地下水带运移积累至土壤表层的过程^[7-8];植被覆盖度作为植被生长状况直观量化的指标,不仅反映了植物群落的外貌和性质,而且能够通过改变地表水分蒸发和植被蒸腾作用,影响盐基离子随水分蒸发运移,进而影响土壤全盐含量的表聚性和异质性^[9];土壤理化属性的空间异质性特征与生态水文过程和群落学环境间的相互作用对于维持内陆盐沼湿地生态系统的稳定性具有重要意义。

内陆盐沼湿地是干旱半干旱气候条件下地表过湿或季节性积水、土壤盐渍化并发育多种盐生植物的沼泽湿地^[10],是生态水文过程特殊、环境高度异质的湿地生态系统^[11],土壤盐分一定程度上决定盐沼湿地植被群落生长、分布格局及湿地生态系统的结构、功能稳定性,在较小尺度上植被生长状况和地下水位的动态变化共同作用影响土壤全盐含量非均质性特征,体现了土壤盐分、植被和地下水相互作用共同维持内陆盐沼湿地生态系统的稳定性机制。因此,探讨内陆盐沼湿地土壤全盐含量空间分布及其对地下水位埋深、植被覆盖度的响应机制,对于深入理解湿地特殊的生态水文过程及其维持湿地生态系统功能具有十分重要意义。

苏干湖湿地是我国典型盐渍土分布且湿地生态序列基本保持原始状态的盐沼湿地生态系统,具有特殊的生态水文过程、土壤理化空间系统的非均质性特征和湿地植被呈斑块化分布,体现了苏干湖内陆盐沼湿地的复杂性。目前,地统计学已广泛地应用于干旱区土壤盐分特征^[12]、盐分与植被^[13]、地下水的关系^[14]等方面开展了广泛研究,许多学者围绕内陆盐沼湿地的研究集中在生物量分配^[15]、种群分布格局^[16]及其性状对环境的适应^[17]等方面,对苏干湖湿地的群落组成^[18]、鸟类多样性^[19]、生态脆弱性评价^[20]、水循环的影响^[21]等方面做了大量的研究,但针对内陆盐沼湿地土壤全盐含量空间分布的随机性、结构性特征及其对生态水文环境响应方面的研究相对较少,特别是对内陆盐沼湿地土壤全盐含量的空间分布格局及其与地下水位埋深、植被覆盖度间的相互作用机理认识尚不清晰。鉴于此,本研究采用经典统计学、地统计学和 Kriging 插值等方法研究了苏干湖盐沼湿地浅层剖面 0—50 cm 土层全盐含量的空间异质性,并探讨了土壤全盐含量与地下水位埋深、植被覆盖度间的相关性,试图明晰苏干湖内陆盐沼湿地浅层土壤全盐含量的空间分布格局及其对地下水位埋深、植被覆盖度间的关系,旨在能够更好的理解内陆盐沼湿地土壤盐分含量的空间结构形态及其与地下水位埋深、植被覆盖度间相互响应机制的认识,对湿地生态系统稳定性维持机制提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

苏干湖湿地位于甘肃省酒泉市阿克塞哈萨克族自治县阿勒腾乡境内(93°47'53"—94°04'26"E, 38°50'07"—38°56'27"N),处于阿尔金山、党河南山与赛什腾山之间的花海子-苏干湖盆地的西北端,海拔

2795—2808 m,属内陆高寒半干旱气候,年平均气温 3—6℃,年均降水量 35.5—70.6 mm,蒸发量 1228—2495 mm,大风天气盛行,沙尘暴发生频率高。湿地面积约 100500 hm²,其水系属于柴达木内流水系中西北端的一个独立水系,发源于党河南山的大、小哈尔腾河出山口潜流于地下,在海子盆地成泉涌露,汇成河网,流入大、小苏干湖,消耗于泉水溢出带和湖面的蒸发蒸腾,地下水位埋深在 0—7 m 间。土壤以草甸土、草甸沼泽土、盐土、草甸盐土和沙土等为主,受地理环境因素的影响,土壤盐渍化严重,植被为应对寒冷、干旱和土壤盐渍化等生境条件,形成了独特的区域性生态特征,如植株矮小、多丛生且有泌盐功能,主要植物有赖草(*Leymus secalinus*)、芦苇(*Phragmites australis*)、碱地风毛菊(*Saussurea runcinata*)、盐角草(*Salicornia europaea*)、西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、水麦冬(*Triglochin maritimum*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集与分析

以 2017 年 9 月 14 日 Landsat 卫星影像数据为参考,结合苏干湖湿地群落学调查,在苏干湖湿地内布置采样点(图 1),鉴于干旱区春、秋两季的聚盐高峰及盐分的表聚性特点,采样时间选取为 2017 年 9 月,在实地勘察时结合研究区的地质地貌、植被类型等自然地理因素布置采样点,由于研究区分布了较大面积的沼泽化草甸、河流和湖泊等难到达区域,影响部分采样点的布设范围和距离,在此基础上兼顾了样点的代表性和均匀性,尽可能规则分布,以便于进行统计分析。研究选定共 101 个采样点,平均间距约 5 km,对采样点进行编号,每个样点上用土钻分层采集土壤样品,取样深度为 0—10 cm、10—30 cm、30—50 cm,每层取 2 个样品混合,用相对应编号的铝盒密封装好,并用 GPS 定位,记录样点周围的植被、作物生长状况、土壤质地等信息。土壤盐分样品测试在室内进行,将样品在室内自然风干、敲碎、除去石砾、新生体、植物残根等杂物后,过 1 mm 筛,选择水土比 5:1 浸提,用双指示剂中和法测定 CO₃²⁻、HCO₃⁻,用 AgNO₃ 滴定法测定 Cl⁻;EDTA 间接滴定法测定 SO₄²⁻;EDTA 络合滴定法测定 Ca²⁺、Mg²⁺,差减法测定 K⁺、Na⁺,全盐量等于 8 个离子含量之和^[22]。

1.2.2 地下水位埋深和植被覆盖度数据获取

在采集土壤样品的采样点上用铁铲挖至地下水流出,待水位稳定后测量地下水埋深^[23](图 1),在 ArcGIS 10.3 软件下将 101 个点位的地下水埋深值进行空间插值,通过数据掩膜剪裁苏干湖湿地地下水埋深的栅格图像。

选取苏干湖湿地 2017 年 9—10 月云量小于 10% 的 Landsat-8 卫星遥感数据,其空间分辨率为 15 m×15 m。利用 ENVI 5.1 对原始影像进行辐射定标、FLAASH 大气校正和标准假彩色波段的融合等预处理,计算归一化植被指数(NDVI),采用像元二分模型计算苏干湖湿地的植被覆盖度,结合 ArcGIS 中点提值工具提取对应 101 个土壤采样点的植被覆盖度值,然后应用克里金插值进行空间插值。

1.2.3 研究方法与数据处理

半方差函数是地质统计学解释土壤特性空间变异结构的理论基础,是解释变量空间分布的随机性和结构性特征的数学统计方法^[24]。在地质统计学中,为避免存在比例效应,数据处理分析采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验所测数据,符合正态分布的数据进行地统计学分析($P>0.05$),应用 GS+9.0 对不符合正态分布的数据源进行对数转换,利用 GS+ 软件进行半方差值计算、模拟与检验,得出的半方差函数模型。半方差函数的计算公式为:

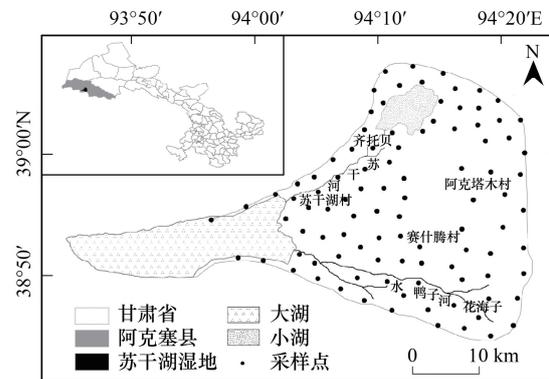


图 1 苏干湖湿地野外调查数据采样点

Fig. 1 Sampling points of field survey data of wetland in Sugan Lake

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

式中, $r(h)$ 为变异函数; h 为步长, 即样点空间距离, $n(h)$ 是样点距离为 h 时的点对总数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值。变异函数(半方差函数)主要由理论模型、块金值、基台值、变程和块金值效应值等参数组成, 是地统计学中研究空间变异性的关键函数, 反映了变量的空间格局或空间相关类型、范围等^[25]。

2 结果分析

2.1 土壤全盐含量的统计特征

苏干湖湿地土层 0—50 cm 全盐含量特征参数均表现出明显差异性(表 1), 土壤全盐均值、变化幅度随着土层深度的增加呈减小趋势。0—10 cm 土壤全盐含量值较高, 其值介于 15.81—485.83 g/kg, 变化值为 470 g/kg, 标准差为 118.75, 10—30 cm 土层的全盐含量值介于 2.06—58.76 g/kg, 变化值为 56.7 g/kg, 标准差为 9.25, 30—50 cm 土层的全盐含量值介于 1.68—39.9 g/kg, 变化值为 38.22 g/kg, 标准差为 8.1, 其中 0—10 cm 土壤盐分含量高, 变化幅度、标准差值相对较大, 其离散程度较大, 空间分布变化复杂, 10—30 cm 和 30—50 cm 土层土壤盐分的含量值较低, 变化幅度相对较小, 其空间积聚渐趋稳定。

土壤作为时间和空间上的连续体, 其自然属性的变异是多因素相互作用的结果, 变异系数 Coefficient of Variation(CV)可以反映一组变量的离散程度, 运用变异系数(CV)的大小判定变异的强弱, $CV \leq 10\%$ 为弱变异性; $10\% < CV < 100\%$ 为中等变异性; $CV \geq 100\%$ 为强变异性^[26]。由表 1 可知, 苏干湖盐沼湿地土层 0—10 cm 全盐含量 $CV \geq 100\%$ 为强变异性, 土层 10—30 cm 和 30—50 cm 全盐含量的变异系数分别为 9.26% 和 8.18%, $CV \leq 10\%$ 为弱变异性, 表层土壤盐分变异明显, 而随着土层深度的增加土壤盐分受这些因素的影响减弱, 变异强度随之降低。

表 1 苏干湖湿地各层土壤全盐含量的统计特征值

Table 1 Statistical characteristic values of soil total salt content of different layers in the wetland of Sugan Lake

土层深度 Soil depth/cm	平均数 Mean/ (g/kg)	标准差 SD	最小值 Min/ (g/kg)	最大值 Max/ (g/kg)	变异数 Coefficient of Variation/%	偏斜度 Skewness	峰度 Kurtosis	P	分布类型 Distribution type
0—10	204.41	118.75	15	485.83	122.72	0.31	-0.96	0.02	LN
10—30	18.65	9.25	2.06	58.76	9.26	0.92	2.18	0.3	N
30—50	15.89	8.1	1.68	39.90	8.18	0.52	0.17	0.2	N

N: 正态分布 Normal distribution; LN: 对数正态分布 Logarithmic normal distribution

2.2 土壤全盐含量的空间异质性

2.2.1 土壤全盐含量的变异函数理论模型

在地统计学中, 为避免存在的比例效应, 采用 SPSS 软件的样本 K-S 检验(显著水平 $\alpha = 0.05$) 数据是否符合正态分布或近似正态分布。结果表明, 研究区土壤全盐含量服从正态分布(表 1), 满足地统计学对于二阶平稳假设条件的要求, 可直接进行地统计学分析。各层土壤全盐含量的变异函数理论模型及参数(表 2), 苏干湖湿地 0—10 cm 土壤全盐含量的半方差函数符合球状模型, 10—30 cm、30—50 cm 符合指数模型; 各层土壤全盐含量的决定系数在 0.62—0.72 间, 残差值较小, 其值介于 0.06—2.56 间, 根据决定系数和残差值, 研究区各层土壤全盐含量的理论模型达到显著性水平, 模型的拟合程度较好。

2.2.2 土壤全盐含量的空间异质性分析

块金值是(C_0)由测量误差和空间变异共同作用引起的, 反映区域化变量的随机异质性程度; 基台值($C_0 + C$)包括结构性变异和随机性变异在内的系统总变异, 表示变量空间异质性的强弱。根据苏干湖湿地各层土壤全盐含量的变异函数理论模型及相应参数如表 2 所示, 0—10 cm 土壤全盐含量的块金值和基台值偏大, 其

值分别为 430 和 14030, 土壤全盐含量的随机变异程度和系统总变异程度较强, 随土层深度的增加块金值和基台值呈减小变化; 10—30 cm 和 30—50 cm 土壤全盐含量的块金值和基台值相对较小且相差不大, 块金值分别为 4.7 和 6.3 间, 基台值为 64.5 和 82.56, 空间异质性相对较弱且空间变异趋于稳定。

块金效应值(C_0/C_0+C)表示自相关部分导致的空间变异在总空间异质性中的贡献比例, 反映其空间结构特征, 当块金效应值 $>75\%$ 、 $25\%—75\%$ 、 $<25\%$ 时, 分别表明系统的空间相关性较弱、中等、较强^[27]。苏干湖内陆盐沼湿地各层土壤全盐含量的块金效应值均 $<25\%$, (表 2), 表明在研究尺度上土壤全盐含量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, 随土层深度的增加呈倒 U 型。

2.2.3 土壤全盐含量的尺度效应

变程是土壤全盐含量空间异质性的尺度函数, 是衡量最大变异程度的空间距离, 代表土壤盐分空间相关范围, 在变程之内具有空间自相关性, 反之则是独立的^[28], 其大小决定着空间异质性的尺度。苏干湖湿地各层土壤全盐含量的变程值介于 5.2—8.49 km 间, 变程值随土层深度增加逐渐增大, 各层土壤盐分空间自相关的尺度存在差异性, 0—10 cm 土壤全盐含量异质性的变程相对较大, 在 5.2 km 的范围之内具有空间自相关性, 自相关引起的空间变异性强; 土层 10—30 cm、30—50 cm 全盐含量的变程介于 6.73—8.49 km 间, 空间自相关尺度随深度增加呈增大趋势; 本实验土壤全盐含量的设计尺度为 5 km, 介于各层土壤全盐含量的变程范围内, 所以符合地统计学取样的要求, 能够反映土壤全盐含量的空间格局信息。

表 2 苏干湖湿地各层土壤全盐含量的变异函数理论模型及相关参数

Table 2 Theoretical model of variation function and related parameters of total salt content of different layers of sugan Lake Wetland

土层深度 Soil depth/cm	理论模型 Theory model	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill (C_0+C)	块金效应 Nugget effect (C_0/C_0+C)/%	变程 Range/ km	残差 Residual (RSS)	R^2
0—10	球体	430	14030	3.06	5.2	2.56	0.72
10—30	指数	6.3	82.56	7.6	6.73	0.32	0.71
30—50	指数	4.7	64.5	7.3	8.49	0.06	0.63

2.2.4 土壤全盐含量的各向异性

各向异性是空间异质性程度的重要部分, 各向异性较高, 空间异质性程度也较强, 空间异质性不仅与尺度有关, 还与方向有关^[29], 为进一步分析土壤全盐含量空间变异的方向性, 对 0—50 cm 全盐含量在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向上的变异函数分析发现(图 2), 0—10 cm 土壤全盐含量的半方差函数具有明显的方向性, 表现为在 135° 方向上的变异函数值低于其他 3 个方向, 且随着距离的增大, 其他 3 个方向上的变异函数值与 135° 方向上的变异函数值的比值逐渐增大, 意味着土壤全盐含量步分析土壤全盐含量空间变异的方向性, 对 0—50 cm 各层土壤全盐含量在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的空间异质性程度也较高; 10—30 cm 土层的全盐含量在 90° 方向上的变异函数值高于其他 3 个方向, 135° 方向上的变异函数值低于其他 3 个方向, 且随着距离的增大, 其他 3 个方向上的变异函数值与 135° 方向上的变异函数值的比值逐渐减小, 30—50 cm 土层的全盐含量在 4 个方向的函数值比值呈波动变化, 基本接近于 1, 表现为各向同性(图 2)。

2.3 土壤全盐含量、植被覆盖度和地下水位埋深的空间分布格局

2.3.1 土壤全盐含量的空间分布图

在变异函数理论及结构分析基础上, 利用克里金插值方法绘制土壤全盐含量的空间分布(图 3)。苏干湖盐沼湿地 0—50 cm 土壤全盐含量均值介于 8—168 g/kg, 高值和低值中心呈斑状镶嵌分布, 高值中心主要分布在小苏干湖周边及小苏干湖以南泉水出露的局部地带, 低值中心主要分布在大苏干湖以东及水鸭子河流下游的滩地(图 1、图 3); 各层土壤全盐含量的空间分布存在差异性, 0—10 cm 土壤全盐含量值介于 15—485.8 g/kg, 高、低值区域差值较大, 空间分布同 0—50 cm 均值的空间分布存在相似性; 10—30 cm、30—50 cm 土壤全盐含量的差值相对较小, 高值和低值中心呈斑状镶嵌分布, 空间连续性较差, 空间破碎化程度较高。

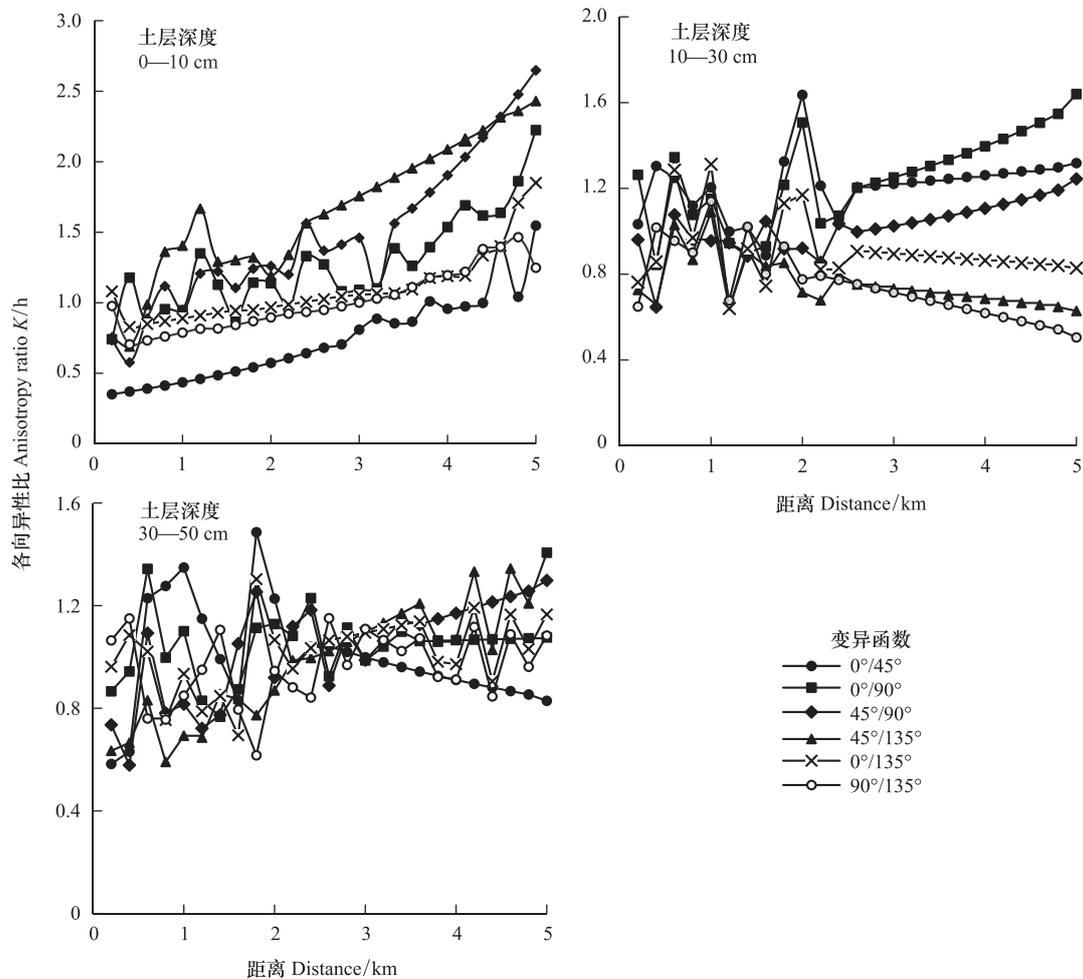


图2 苏干湖湿地土壤全盐含量的各项异性比

Fig.2 the different ratios of soil total salt content in Sugan lake wetland

2.3.2 植被覆盖度和地下水位埋深的空间分布

研究区植被覆盖度由湿地中心向南北方向逐渐降低,在局部地带高值和低值中心呈斑块状镶嵌分布(图4),低植被覆盖度主要在湿地边缘地带和大、小苏干湖周边的积水洼地,多以戈壁和裸地为主,盐生植被植株矮小稀疏,高植被覆盖区主要分布在小苏干湖以南的泉水出露地带和水鸭子河下游的滩地(图1、图4)。地下水位埋深值介于0—6 m间,其空间分布呈条带状分布(图5),东-西方向变化相对平稳,南-北方向变化较大,地势较低的湿地中心是地表水和地下水的汇集中心,泉水出露,水位埋深介于0—3 m间,在地势相对较高的湿地南、北边缘地带水位埋深介于3—6 m。

2.4 土壤全盐含量与植被覆盖度和地下水位埋深的相关性分析

通过相关分析方法得到苏干湖湿地各层土壤全盐含量与地下水位埋深、植被覆盖度间的相关系数图(图6),本研究发现,全盐含量与植被覆盖度间呈极显著负相关($P < 0.01$),相关系数值介于0.61—0.79,随土层深度的增加两者间的相关性减弱,高植被覆盖区域,土壤全盐含量较低,低植被覆盖区域,土壤全盐含量较高。各层土壤全盐含量与地下水埋深与间呈正相关关系,相关系数介于0.34—0.37,地下水位埋深对土壤全盐含量的影响存在阈值,在地下水位埋深0—1 m的范围内,各层土壤全盐含量随地下水位埋深的增加呈增加趋势;在1—3 m的范围内,土壤全盐含量既有高值值亦存在低值;当地下水位埋深大于3 m,各层土壤全盐含量随地下水位埋深的增加呈减少趋势。

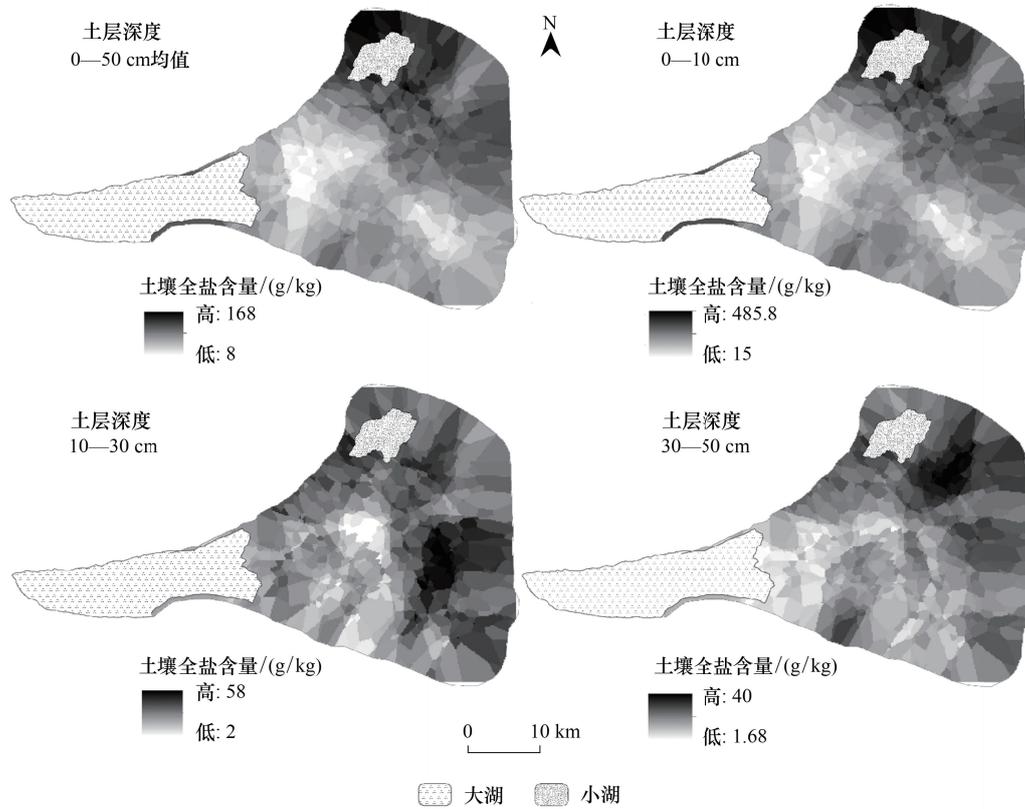


图3 苏干湖湿地土壤全盐含量空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of soil total salt content in Suga Lake

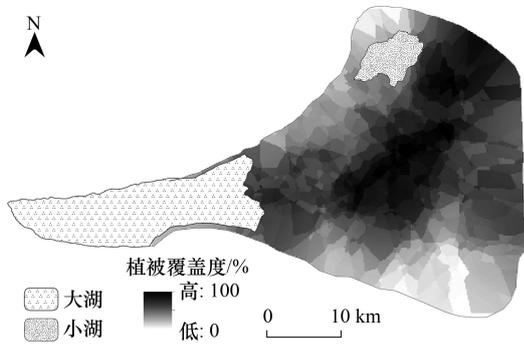


图4 苏干湖湿地植被覆盖度空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of vegetation coverage in Suga Lake

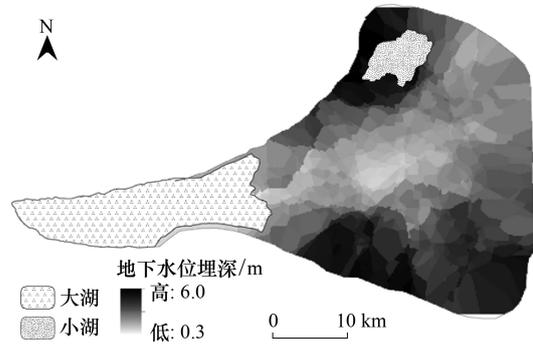


图5 苏干湖湿地地下水位埋深空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of groundwater table depth in Suga Lake

3 讨论

空间异质性是土壤全盐量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^[30]。土壤全盐含量的空间异质性受结构性因素和随机性因素综合作用形成的,其结构性因素使同一层面的空间相关性增强,随机性因素使其空间相关性减弱,并朝同质化、均一化方向发展^[31-32]。研究发现,苏干湖湿地各层土壤全盐含量空间上具有非均质性和表聚性特征,受结构性因素的影响,各向异性较高,由自相关引起的空间变异程度较强(表2),土壤全盐含量的均值、变化幅度和变异强度随

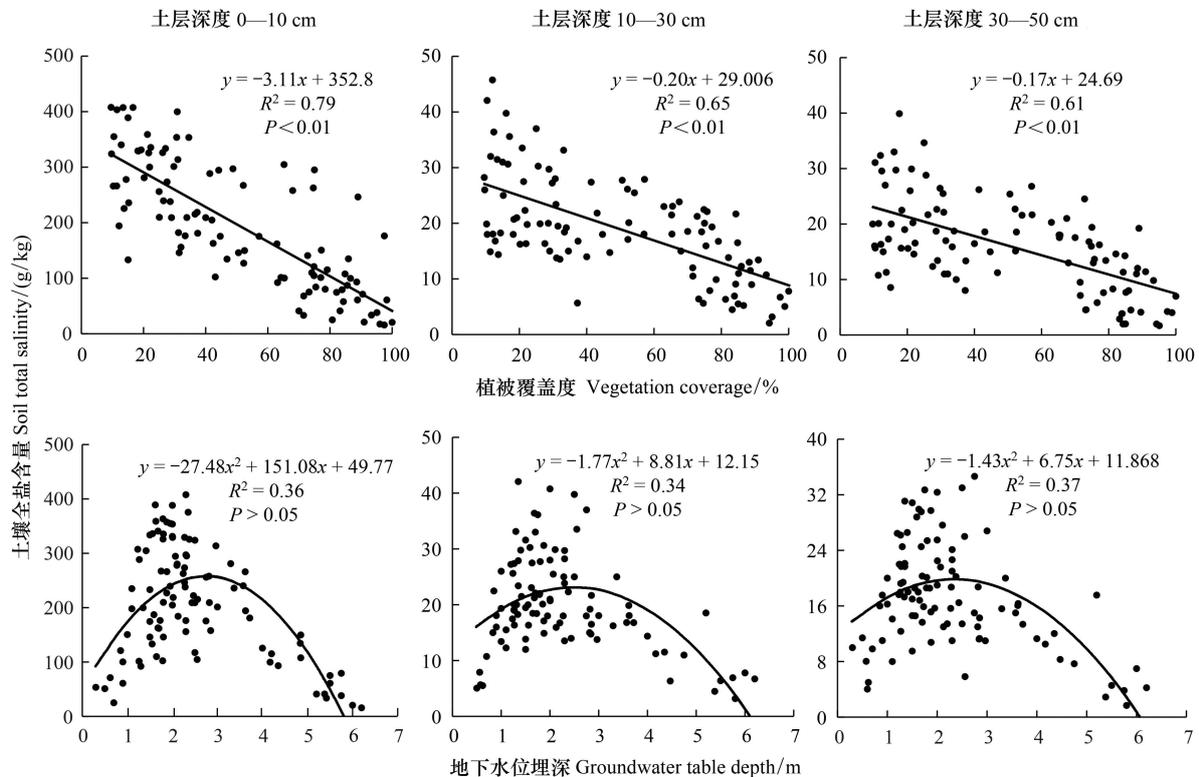


图6 土壤全盐量与植被覆盖度、地下水位埋深间的相关系数图

Fig.6 Correlation between vegetation coverage and groundwater table depth and soil salinity in wetland content

土层深度的增加呈减少趋势,且0—10 cm 土壤全盐含量受结构性影响因素更显著,其空间随机变异程度和自相关引起的异质性较10—30 cm、30—50 cm 土层更强(表2)。主要原因有:(1)苏干湖湿地干旱少雨,蒸发量大于降水量,土壤母质含盐重,土壤盐渍化特点显著,低洼封闭的地势、地形条件致使盐分随地表水和地下径流汇集到盆地中心无法移出,以盐基离子形式集聚土层包气带中,成为盐分存储区,在强烈蒸发作用下,土壤包气带及地下水中的可溶性盐在土壤毛细管作用下随上升水流蒸发、浓缩、积累于地表,呈现出土壤盐分“表聚”现象,长期积累在地表形成厚约3—5 cm 的盐壳和大小各异的盐坑,土壤全盐含量大,这与我们采样调查时所观察到的现象相一致,土壤盐分受多重因素的影响具有表聚性和非均质性特征;(2)采样时正值秋季(枯水期),持续的蒸发作用增强了表层土壤盐分的聚积,这可能也是导致表层积盐现象比较重要的因素之一,这与张海威^[33]的研究相一致。

水、盐是盐沼湿地生态系统的重要组成部分,是影响植被生长状况和分布格局的关键因子^[14],植被的正向演替改善土壤的理化性状,其分布格局和冠层结构通过对光照资源的截获能力和对地表的遮阴、覆盖作用来降低局部环境的温度,减弱地表水分蒸发,进而影响土壤全盐含量的表聚性和异质性^[34]。研究发现,苏干湖湿地各层土壤全盐量受植被盖度的影响较为显著,两者间呈极显著负相关关系($P < 0.01$),高植被覆盖区域,土壤全盐含量较低,低植被覆盖区域,土壤全盐含量较高(图6),这与植被的聚集分布格局和冠层结构对蒸发作用的影响相关。主要原因有:(1)在大、小苏干湖周边和湿地中心的淡水泉出露地带,地下水位埋深适宜植被的生长,湿地植被生长较好呈斑块状集群状分布,受植被盖度的遮阴作用,地表蒸发作用较弱,0—10 cm 积盐相对较轻,盐分以盐基离子的形式存在土层包气带中,10—50 cm 土层盐分含量存在高值区(图1、图3);(2)在小苏干湖周边受季节性水淹和高盐环境胁迫影响下植被生长期缩短,生长期完成之后,盐生植物体内的大量盐基离子回归土壤,增加了土壤全盐含量;另一方面,由于研究区植株普遍矮小,覆盖度相对较低(图4),地表裸露面积较大,在强烈的蒸发作用下可溶性盐随土壤毛细管水向上运动,在表层积聚盐分含量增

加,这与郭文聪的研究相一致^[35]; (3) 盐生植被耐盐力强, 植被根系发达, 从深层土壤或地下水中吸取水分的同时伴随大量的水溶性盐类进入到植物体内, 当植被死亡后堆积于地表, 水溶性盐类便累积于土壤表层, 从而引起表层土壤全盐量的增加; 部分泌盐植物在生长过程中将体内的盐分泌出来, 就地积累在植株附近, 斑块化尺度上的盐生植被其冠层结构和植株泌盐性共同导致 0—10 cm 土壤全盐含量的表聚性和非均质性特征, 而 10—50 cm 土层盐分含量相对较高, 该范围内其变异性还有可能受植被本身的生物学特性(根系深浅)、土壤质地等因素的影响, 使不同土层结构存在差异, 导致不同土层的土壤盐分空间结构发生变化。

水分是土壤盐分运移的载体, 地下水位的动态变化通过土层中毛细管作用, 进而对土壤中盐基离子在土层中的运移积累产生影响^[36]。研究发现, 苏干湖湿地各层土壤全盐含量高值和低值中心呈斑状镶嵌分布, 地下水位埋深呈条带状分布(图 5), 土壤全盐含量与地下水埋深与间呈正相关关系, 相关系数介于 0.34—0.37, 不同地下水位埋深对土壤全盐含量的影响存在差异性。(1) 大苏干湖以东, 小苏干湖以南的湿地中心泉出露地带, 地下水位埋深范围介于 0—1 m(图 5), 低洼的地势条件是水盐的汇集中心, 受水淹和河流的淋溶、携带作用的影响, 土壤全盐含量相对较低(图 1、图 3); 局部地带, 地下水位埋深大于 1 m, 土壤水带与毛管水带连接, 水盐运移路径畅通, 在强烈的蒸发作用下, 土壤中的基盐离子和可溶性盐随地下水运移至地表积聚, 导致 0—10 cm 全盐含量相对较高, 该区域土壤全盐含量随地下水埋深增加呈增大趋势;(2) 在湿地南、北部边缘地带, 地势相对较高, 埋深范围介于 4—6 m(图 1、图 5), 土壤水带和毛管水带处于断裂状态, 通过土壤空隙间的毛管力输送的水分逐渐减少, 水盐运移相对困难, 土壤盐分较低(图 3), 该区域土壤全盐含量随着地下水埋深变化的增加呈减少的趋势(图 6); (3) 在小苏干湖周边区域, 地下水位埋深值介于 3—6 m 间, 丰水期受水淹及周边山地积雪融水携带的盐分堆积, 枯水期, 水去盐留, 在强烈的蒸发作用下浅层剖面的基盐离子和可溶性盐随地下水运移至地表积聚, 土壤全盐含量较高(图 3); 总体而言, 苏干湖盐沼湿地地下水位埋深对土壤全盐含量的影响存在阈值, 其变化增加了土壤全盐含量空间分布变异的复杂性, 这与丁建丽等^[37]的研究相一致。

4 结论

苏干湖内陆盐沼湿地各层土壤全盐含量相对较高, 具有非均质性和表聚性特征, 且受结构性因素的影响, 具有各向异性特征, 且其值相对较高, 空间变异程度较强, 其空间分布呈斑状镶嵌分布, 土壤全盐含量的空间异质性主要受植被覆盖度的影响, 两者间呈极显著负相关($P < 0.01$), 与地下水埋深间呈正相关关系, 地下水位埋深对土壤全盐含量的影响存在阈值, 增加了其空间变异的复杂性, 但各层间全盐含量的变化特征、分布格局及与覆盖度间、地下水位埋深的相关性存在差异性。今后的研究将进一步综合考虑将土壤质地、水带的分布情况和盐生植被群落的生长特性、功能性状等诸多因子对土壤全盐含量的影响, 进一步认识干旱区盐沼湿地特殊的生态水文过程、复杂的土壤理化属性和群落环境对湿地生态演替的影响。

参考文献 (References):

- [1] 武小钢, 杨秀云, 边俊, 朱焯, 曹晔. 长治城市湿地公园滨岸区植物群落特征及其与土壤环境的关系. 生态学报, 2015, 35(7): 2048-2056.
- [2] 赵宣, 郝起礼, 孙婴婴. 典型毛乌素沙漠-黄土高原过渡带土壤盐渍化空间异质性及其影响因素. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1761-1768.
- [3] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征. 生态学报, 2019, 39(9): 3322-3332.
- [4] 张雪妮, 李岩, 何学敏, 杨晓东, 吕光辉. 荒漠植物功能性状及其多样性对土壤水盐变化的响应. 生态学报, 2019, 39(5): 1541-1550.
- [5] Minden V, Kleyer M. Ecosystem multifunctionality of coastal marshes is determined by key plant traits. *Journal of Vegetation Science Advances*, 2015, 26(4): 651-662.
- [6] 陈文业, 赵明, 张继强, 李广宇, 吴三雄, 袁海峰, 窦英杰, 吴婷, 陈旭, 罗文莉, 朱丽, 邴丹琿, 冯颖, 孙飞达, 谈嫣蓉. 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, 2015, 37(6): 1670-1679.
- [7] 卢龙辉, 瓦哈甫·哈力克, 彭菲, 张琴琴, 袁玉芸. 新疆克里雅绿洲地下水与表层土壤特征的最优插值. 干旱区地理, 2017, 34(6): 1304-1312.

- [8] 窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 田峰, 于丹丹, 周利颖, 梁志航. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响. 水土保持学报, 2019, 33(3): 246-253.
- [9] Zhang L, Pan Y X, Lv W, Xiong Z T. Physiological responses of biomass allocation, root architecture, and invertase activity to copper stress in young seedlings from two populations of *Kummerowia stipulacea* (maxim.) Makino. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 104: 278-284.
- [10] 王继伟, 赵成章, 赵连春, 王小鹏, 李群. 内陆盐沼芦苇根系形态及生物量分配对土壤盐分因子的响应. 生态学报, 2018, 38(13): 4843-4851.
- [11] Tripathi R, Nayak A K, Shahid M, Raja R, Panda B B, Mohanty S, Kumar A, Lal B, Gautam P, Sahoo R N. Characterizing spatial variability of soil properties in salt affected coastal India using geostatistics and kriging. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(12): 10693-10703.
- [12] Yu J B, Li Y Z, Han G X, Zhou D, Fu Y Q, Guan B, Wang G M, Ning K, Wu H F, Wang J H. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(2): 589-599.
- [13] 刘玉斌, 韩美, 潘彬, 刘延荣. 黄河三角洲新生湿地植物生物量和土壤含盐量空间分布. 湿地科学, 2017, 15(3): 364-368.
- [14] 张骛, 王振华, 王久龙, 李文昊. 蒸发条件下地下水对土壤水盐分布的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(06): 229-233+253.
- [15] 赵连春, 赵成章, 王小鹏, 文军. 秦王川湿地怪柳分布与环境因子的关系. 生态学报, 2018, 38(10): 3422-3431.
- [16] 王小鹏, 赵成章, 王继伟, 赵连春, 文军. 秦王川盐沼湿地角果碱蓬种群聚集分布格局与特征. 生态学报, 2018, 38(11): 3943-3951.
- [17] 赵连春, 秦爱忠, 赵成章, 段凯祥, 王继伟, 文军. 嘉峪关草湖湿地植物功能群组成及其性状对不同生境的响应. 生态学报, 2020, 40(3): 822-833.
- [18] 武发思, 鄢金灼, 蔡泽平, 冯虎元. 大、小苏干湖浮游藻类的群落组成特点研究. 水生生物学报, 2009, 33(2): 264-270.
- [19] 包新康, 张立勋, 刘迺发, 宋森, 赵伟. 大、小苏干湖湿地鸟类多样性季节变化. 动物学杂志, 2007, 42(6): 131-135.
- [20] 马真臻, 王忠静, 顾艳玲, 夏婷. 中国西北干旱区自然保护区生态脆弱性评价——以甘肃西湖、苏干湖自然保护区为例. 中国沙漠, 2015, 35(1): 253-259.
- [21] 张博. 跨流域调水苏干湖盆地水循环响应数值模拟[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [23] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 温小虎, 高猛, 邵宏波. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2423-2430.
- [24] 高峻, 何春霞, 张劲松, 孟平. 太行山干瘠山地土壤厚度空间变异及草灌群落分布特征. 生态学报, 2020, 40(6): 2080-2089.
- [25] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 162-192.
- [26] 张仁铎. 空间变异理论及应用. 北京: 科学出版社, 2005.
- [27] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, Parkin T B, Karlen D L, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [28] 韩丹, 程先富, 谢金红, 邓良. 大别山区江子河流域土壤有机质的空间变异及其影响因素. 土壤学报, 2012, 49(02): 403-408.
- [29] 颜亮, 周广胜, 张峰, 隋兴华, 平晓燕. 内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析. 生态学报, 2012, 32(13): 4017-4024.
- [30] Yang Y, Dou Y X, Liu D, An S S. Spatial pattern and heterogeneity of soil moisture along a transect in a small catchment on the Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 466-477.
- [31] 段凯祥, 张松林, 赵成章, 彭鑫波, 隗伟超, 杨鹏, 杨晔, 姜右锦, 骆艳. 嘉峪关草湖湿地土壤水分含量与植被盖度的空间格局. 生态学杂志, 2019, 38(3): 726-734.
- [32] Zhao Y, Feng Q, Yang H D. Soil salinity distribution and its relationship with soil particle size in the lower reaches of Heihe River, Northwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 810.
- [33] 张海威, 张飞, 李哲. 不同环境背景下的艾比湖区域土壤水盐差异性特征研究. 干旱区地理, 2017, 40(3): 606-613.
- [34] Mei X M, Ma L, Zhu Q K, Wang S, Zhang D, Wang Y. Responses of soil moisture to vegetation restoration type and slope length on the loess hillslope. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(3): 548-562.
- [35] 郭文聪, 樊贵盛. 原生盐碱荒地的盐分积累与运移特性. 农业工程学报, 2011, 27(3): 84-88.
- [36] 蒋志云, 李小雁, 张思毅, 吴华武, 马育军, 胡中民. 基于电磁感应成像植被斑块土壤水盐效应研究. 生态学报, 2019, 39(24): 9188-9199.
- [37] 丁建丽, 陈文倩, 陈芸. 干旱区土壤盐渍化灾害预警——以渭-库绿洲为例. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1079-1086.