

艾比湖湿地不同植物群落下土壤水盐空间变异性

徐莉^{1,2}, 李艳红^{1,2}, 海米提·依米提^{1,2}, 李磊^{1,2}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆维吾尔自治区重点实验室 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:以艾比湖湿地为研究区,运用传统统计学和地统计学相结合的方法对 4 种典型植物群落下土壤水盐含量变化进行了研究。结果表明:(1) 4 种植物群落中,碱蓬群落、盐节木群落和梭梭群落土壤含盐量呈中等变异,而芦苇群落土壤水盐则呈现较强的差异性;(2) 随着土层深度的增加,盐节木群落和梭梭群落中土壤含水量差异性不大,碱蓬群落和芦苇群落则呈下降趋势,而对于土壤盐分,除梭梭群落外,其余 3 种植物群落各土层盐分呈降低趋势,且表层盐分含量相对较高;(3) 在空间结构性分析中,不同植物群落下土壤含水量和盐分在一定区域范围内空间特结构性显著,能较好地满足高斯模型分布,由于受气候、距湖距离、湖面积波动及土壤类型等因素作用,4 种植物群落中土壤含水量和盐分均具有较强的空间自相关性;(4) 对土壤水盐含量变化的相关性分析中,4 种植物群落下土壤水盐含量与其关联性都相对较小,其中碱蓬群落和芦苇群落呈正相关关系,盐节木群落和梭梭群落呈负相关关系。总体来说,碱蓬群落和芦苇群落土壤水盐总变异趋势大于梭梭群落和盐节木群落,说明距湖远近对土壤水盐空间变化有一定的影响。

关键词:艾比湖湿地;水盐特征;空间变异性;相关性

文献标识码:A

文章编号:1000-288X(2013)06-0279-06

中图分类号:S153, Q948

Spatial Variability of Soil Moisture and Salinity in Different Plant Communities in Ebinur Lake Wetland

XU Li^{1,2}, LI Yan-hong^{1,2}, Haimit Yimit^{1,2}, LI Lei^{1,2}

(1. College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi,

Xinjiang 830054, China; 2. Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: Spatial variability of soil moisture and salinity in four typical plant communities in the Ebinur Lake wetland was analyzed by traditional statistics and geo-statistics methods. The results indicate that: (1) Apart from the strong variability in the *Phragmites* community, soil moisture and salinity are of medium variation in the other plant communities; (2) With soil depth increasing, the variability of soil moisture in the *Haloxylon ammodendron* community and *Halocnemum strobilaceum* community shows no obvious change while that of *Suaeda salsa* community and *Phragmites* community goes declining. As for soil salinity, apart from the *Haloxylon ammodendron* community, the variability of soil salinity was reduced gradually from top to bottom in the other plant communities with the high salt content in the surface layer; (3) The spatial structural analysis shows that the distribution of soil moisture and salinity is well accorded to the Gaussian model in certain areas with strong spatial autocorrelation affected by climate condition, distance from the lake, area fluctuation of the lake and soil types of four plant communities; (4) As for the correlations of the soil moisture and salinity among four kinds of plant communities, all correlations are relatively small, of which correlation between *Suaeda salsa* community and *Phragmites* community is positive, and that between *Halocnemum strobilaceum* community and *Haloxylon ammodendron* community was negative. The variabilities of soil moisture and salinity in the *Suaeda salsa* community and *Phragmites* community are generally bigger than

收稿日期:2013-01-30

修回日期:2013-03-29

资助项目:国家自然科学基金地区基金项目“艾比湖湿地生态环境演变及生态修复研究”(41171036);自治区社科基金项目资助(11BJY016);国家自然科学基金地区基金项目资助(41161010);新疆师范大学研究生创新基金项目(20121203)

作者简介:徐莉(1986—),女(汉族),新疆自治区博乐市人,硕士研究生,研究方向为干旱区气候与环境。E-mail:xuli1986317@126.com。

通信作者:李艳红(1977—),女(汉族),新疆自治区石河子市人,教授,硕士生导师,主要从事干旱区气候及遥感技术在气象气候学中应用。E-mail:lyh0704@126.com。

those in the *Haloxylon ammodendron* community and *Halocnemum strobilaceum* community showing that distance from the lake affected spatial variability of soil moisture and salinity.

Keywords: Ebinur Lake wetland; moisture and salinity characteristics; spatial variability; correlation

在干旱、半干旱地区的特定气候条件下,土壤环境的变化是影响植被分布的重要因素,特别是土壤水盐的空间异质性特点是植被分布空间异质性的主要原因。针对土壤空间异质性的研究,传统的方法多限于定量描述,而忽视了不同测定参数之间的关系以及与测定区域之间的空间关系。但是,随着地理信息技术和地统计学方法的发展,该方法被引入到土壤特性空间变异分布特征的研究中,通过地统计学方法对变量的空间结构的认识,可以对变量进行插值和对相关变量值进行预测^[1],从而能够更好地反映土壤空间分布特征对植被的影响,并在东部湖泊、黄河三角洲、森林及山前平原等地取得值得借鉴的成果^[2-7]。

新疆自治区艾比湖地处天山北坡,是国家级重要的湿地保护功能区。艾比湖在调节气候,涵养水源,保护生物多样性及维持区域生态平衡等方面具有十分重要的作用。艾比湖湿地作为典型的干旱区内陆湖泊湿地的代表,由于降水稀少,蒸发旺盛,土壤盐渍化成为影响该地区农业发展的主要因素之一。许多学者^[8-11]对艾比湖湿地的水分、养分、盐分等土壤理化性质、植物群落及植物群落与土壤理化性质相关关系等方面做了较多研究。土壤含水量和盐分是影响艾比湖植物空间分布特征的主要因子^[8],前人多集中在对整个流域土壤空间分布特征^[12]及土壤有机质^[13]的研究上,而对艾比湖流域不同植物群落下土壤水盐空间变化特征的研究甚少。因此,选择以艾比湖湖滨湿地沿湖分布的不同植物群落作为研究对象,根据野外实地调查,结合地理信息技术和地统计学方法,在大尺度上综合考虑湿地内各个样方内植被特征和水盐信息,分析不同植物群落下土壤水盐含量空间变化特征以及相同植物群落下土壤水盐的相关性。在一定尺度上,土壤空间变异性的研究有助于了解干旱区植物群落空间分布格局,同时为干旱区湖泊湿地的生态环境的修复与重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖湿地自然保护区(82°36′—83°50′E, 44°30′—45°09′N)位于新疆维吾尔自治区博州境内,是新疆地区第一大咸水湖。总面积 2 670.85 km²,属典型温带大陆性干旱气候,年均气温 5℃,多年平均降水量为 105.17 mm,潜在蒸发量为 1 315 mm,是降

水量的 12.5 倍。艾比湖湿地是准噶尔盆地西南缘最低洼地和水盐汇集中心。土壤类型为砂土,砂粒组成中以粉砂(平均 64.08%)、极细砂(平均 21.60%)两种砂粒为主。艾比湖湖水矿化度程度较高,可达到 139.6 g/L。自然植被种类较多,常见的有白刺(*Nitraria tangutorum*),芦苇(*Phragmites australis*),碱蓬(*Suaeda glauca*),盐节木(*Halocnemum strobilaceum*),盐爪爪(*Kalidium foliatum*),柽柳(*Tamarix chinensis*),骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*),花花柴(*Karelinia caspia*),梭梭(*Haloxylon ammodendron*)等。

1.2 研究方法

2012 年 5 月中旬,在对艾比湖湿地自然保护区进行野外调查的基础上,根据典型植物群落的不同,在博河、精河、奎屯河及鸟岛附近各设置 1 个 100 m × 100 m 的大样方。4 个样方中的典型植物群落分别为芦苇群落、碱蓬群落、梭梭群落及盐节木群落(表 1)。在 4 个大样方中分别以五点法设置 5 个 10 m × 10 m 小样方,总计 20 个样方。分别调查每个样方内植被的种类、数量、高度、胸径、冠幅,并记录各样方的海拔、经纬度、地理地貌等小环境因素。在每个样方内,选取有代表性的部位挖取土壤剖面,分 4 层取样(0—5 cm, 10—20 cm, 30—40 cm 及 50—60 cm),自上而下逐层采集土样并放入密封袋中用于全盐量的测定。剖面数目为 20 个,共采集 80 个土壤样品。同时,在每个剖面,在相应层次用铝盒取 3 个土壤样品用于土壤含水量的测定(烘干法)^[14]。土样在实验室风干,碾碎后过 60 目筛,标记后封口袋,在阴凉干燥处贮存备用。全盐量测定采用水土比(5:1)烘干残渣法^[14],重复 3 次。

应用传统统计学与地统计学理论及半方差函数理论模型^[2,15]相结合的方法,对比分析不同植物群落下的土壤水盐含量的分布特征。所有的实验数据均通过狄克松(Dixson)法, $p=0.01$ 水平下的异常值检验,并在 DPS, Excel 及 GS⁺ 9.0 等软件上进行绘图。

表 1 艾比湖湿地不同植被群落样地的植被特征

| 采样点 | 经纬度 | 海拔/ m | 群落描述 | 距湖距离/ km |
|-----|----------------------------|----------|-------|-------------|
| 1 | 82°43′33.9″E, 44°50′44.1″N | 192 | 碱蓬群落 | 4.17 |
| 2 | 82°49′40.7″E, 44°49′36.9″N | 190 | 芦苇群落 | 1.27 |
| 3 | 83°16′13.3″E, 44°49′50.8″N | 201 | 盐节木群落 | 8.82 |
| 4 | 83°16′07.6″E, 44°41′18.5″N | 205 | 梭梭群落 | 8.31 |

2 结果与分析

2.1 不同植物群落下土壤剖面平均水盐含量统计特征

对不同植物群落下土壤水盐含量进行统计分析(表 2)。一般变异函数的计算要求数据符合正态分布,否则可能存在比例效应^[16]。对所有数据通过 Komlogorov—Smirnov 法进行正态检验 ($p < 0.05$) 并将不服从正态分布的经对数转化后呈正态分布,变异函数计算采用的数据为对数转化后的数据。结果显示,4 种植物群落下土壤剖面平均含水量和盐分含量服从正态分布或对数正态分布。土壤剖面平均含水量和盐分含量从高到低依次分别为:盐节木群落 > 碱蓬群落 > 芦苇群落 > 梭梭群落和盐节木群落 > 芦苇群落 > 碱蓬群落 > 梭梭群落,可见,4 种植被群落下土壤水盐含量变化具有相对统一性,其中盐节木群落下土壤平均水分和盐分含量较高,这主要是由于该研究区位于湖区低洼地带,地下水位高的原因所致,因此该地也易发生土壤盐渍化。通过单因素方差分析可知,不同样地之间土壤含水量存在极显著性差异 ($F = 8.033, p = 0.0085 < 0.01$),盐分含量 ($F = 3.845, p = 0.0386 < 0.05$) 也存在显著性差异。变异系数 (C_v) 是描述土壤特性参数空间变异性程度的指标,依据 Nielsen 分级标准^[17],当 $C_v \leq 10\%$ 时为弱变异性,当 $10\% < C_v < 100\%$ 时为中等变异性,当 $C_v \geq 100\%$ 时为强变异性。从变异程度来看,土壤剖面平均含水量的变异系数从高到低依次为:芦苇群落 > 碱蓬群落 > 梭梭群落 > 盐节木群落,芦苇群落土壤含水量变异系数为 $116.78\% > 100\%$,属强变异性,其它各植物群落土壤含水量为中等变异;土壤剖面平均盐分的变异系数从高到低依次为:碱蓬群落 > 芦苇群落 > 梭梭群落 > 盐节木群落,其土壤盐分均为中等变异,说明土壤水盐变化易受到气候、微地形及湖面积波动等结构性因素的影响,与距湖远近具有一致性,距湖越近土壤水盐变异程度越大。

表 2 土壤含水量和含盐量的统计特征值

| 植物群落 | 土壤特征 | 均值 | 标准差 | 变异系数/% | 分布类型 |
|-------|-------|-------|------|--------|------|
| 碱蓬群落 | 含水量/% | 6.20 | 5.23 | 84.29 | N |
| | 含盐量/% | 0.61 | 0.15 | 25.19 | n |
| 芦苇群落 | 含水量/% | 3.10 | 3.62 | 116.78 | n |
| | 含盐量/% | 0.70 | 0.17 | 23.87 | n |
| 盐节木群落 | 含水量/% | 16.23 | 5.53 | 34.06 | N |
| | 含盐量/% | 0.79 | 0.09 | 11.66 | N |
| 梭梭群落 | 含水量/% | 3.05 | 2.55 | 83.55 | N |
| | 含盐量/% | 0.50 | 0.06 | 12.42 | n |

注:N 表示服从正态分布;n 表示服从自然对数正态分布。

2.2 土壤剖面各层水分和盐分变化特征

不同植物群落下各层土壤水盐含量也存在差异。各层土壤含水量在 4 种植物群落下表现出不同的变化趋势(图 1)。由图 1 可知,盐节木群落和梭梭群落下各层土壤含水量的差异性不大。碱蓬群落和芦苇群落下,土壤含水量由表层向下呈现出逐渐下降趋势,但有各自变化的特点。碱蓬群落在 0—20 cm 土层含水量较高,而芦苇群落在 0—5 cm 土层含水量较高。由图 2 可知,土壤盐分变化则与水分不一致,碱蓬群落、芦苇群落和盐节木群落土壤层由表层向下盐分在水平方向上表现出随深度增加而减少的趋势,梭梭群落表现为增加趋势,其中碱蓬群落和芦苇群落表土积盐主要分布在 0—5 cm 土层。这主要是受研究区局部部位地下水埋深的高低、微地形起伏、距湖距离与湖面积波动及土壤母质等因素综合作用的结果。由于研究区属于自然保护区,受人为活动干扰较少,因而保护区外围人类活动如大面积的农田灌溉用水和艾比湖入湖水量的变化对湖周土壤水盐变化也有一定的影响。

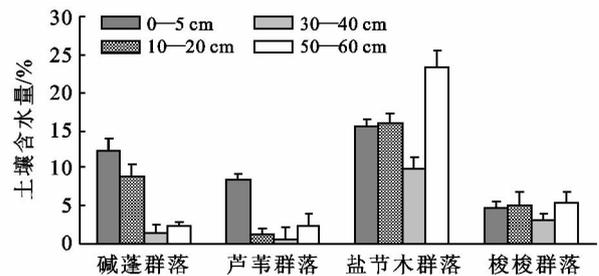


图 1 不同植物群落下各层土壤含水量变化特征

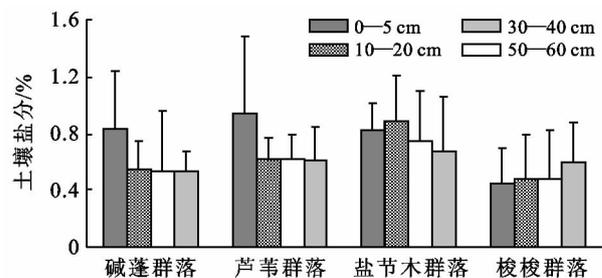


图 2 不同植物群落下各层土壤盐分变化特征

2.3 土壤水盐的空间变异性分析

根据半方差函数理论及计算模型得出不同植被群落下土壤水盐变异函数模型及相关参数(表 3,图 3)。可以看出土壤剖面平均含水量和盐分的半方差理论模型均符合高斯模型。表 3 中 C_0 为块金值; $C_0 + C_1$ 为基台值; $C_0 / (C_0 + C_1)$ 可以表明土壤性质空间相关性的程度。如果 $C_0 / (C_0 + C_1)$ 小于 25%, 表现为强空间相关性;在 25%~75% 之间为空间相关性

中等;大于 75%为空间相关性很弱;若比值接近于 1,说明在整个尺度上具有恒定的变异^[18]。4 种植被群落下土壤剖面平均含水量和盐分含量的 $C_0/(C_0 + C_1)$ 值均小于 25%,可见,不同植物群落下土壤剖面平均水盐含量均表现为较强的空间自相关性。通过对结构方差和块金值与基台值的比值分析可知,研究区不同植物群落下土壤水盐的空间差异主要属于结构性差异,由当地小气候、土壤类型等结构性因素引起,并且在不同植物群落下结构性差异在总变异中所

占比不同,碱蓬群落和芦苇群落土壤剖面平均水盐含量的块金常数和基台值明显高于梭梭群落和盐节木群落,表明前者的总变异程度大于后者。从自相关距看,变程反应区域化变量空间相关范围的大小,与观测尺度以及取样尺度上影响土壤水盐的各种生态过程的相互作用有关。梭梭群落下土壤含水量和芦苇群落下土壤盐分的相关距离都明显高于其它植被群落,说明这两种植被群落土壤水盐的空间变异范围较大。

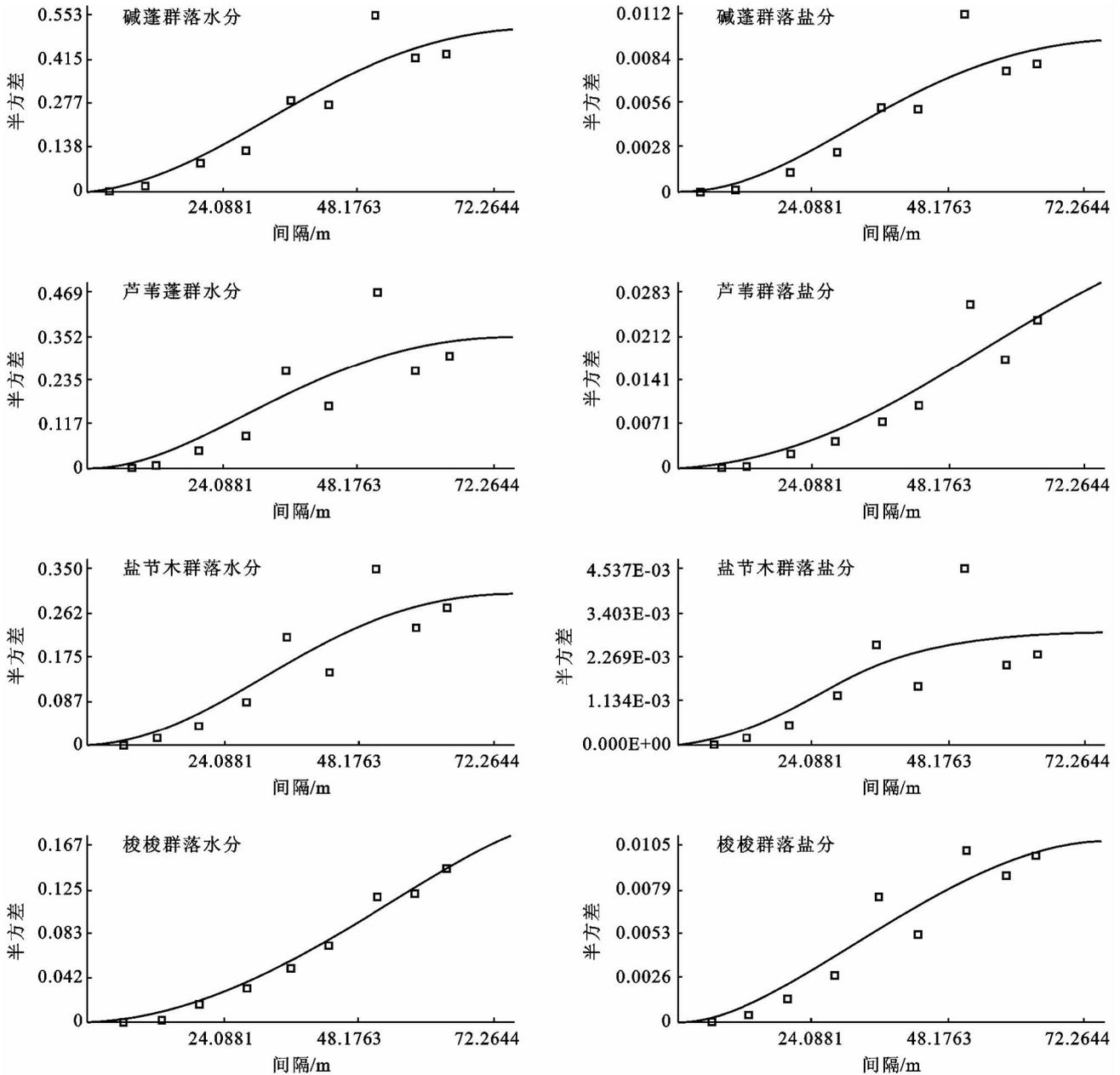


图 3 土壤水分和盐分的半方差函数

2.4 土壤水盐含量变化与植物群落的相关性分析

为了充分说明不同植物群落下土壤水盐变化特征,对研究区 4 种植物群落中土壤含水量和盐分进行

了对比相关分析(表 4)。

由表 4 可以看出,盐节木群落和梭梭群落呈负相关关系,其中盐节木群落中土壤盐分和含水量呈显著

负相关($p < 0.05$);碱蓬群落和芦苇群落呈正相关且无显著正相关性。从表4可以看出,对于研究区4种植物群落中,土壤含水量和盐分在碱蓬群落和芦苇群落中关联性较大,但不呈现密切相关;而在盐节木群

落和梭梭群落中其关联性没有,其中盐节木群落对其的关联性最小。表明在研究区内的4种植物群落下,土壤水盐量的含量变化对4种植物群落影响都相对较小。

表3 土壤水分和盐分的半方差模型及其参数(高斯模型)

| 类型 | 土壤特征 | 块金值 C_0 | 基台值 $(C_0 + C_1)$ | 空间相关性 $[C_0 / (C_0 + C_1)]$ | 变程 a/m | 决定系数 R^2 | 残差 RSS |
|-------|-------|-----------|-------------------|-----------------------------|----------|------------|----------|
| 碱蓬群落 | 含水量/% | 0.001 000 | 0.532 | 0.001 9 | 75.17 | 0.89 | 0.033 90 |
| | 含盐量/% | 0.000 010 | 0.010 | 0.001 0 | 74.13 | 0.86 | 0.000 02 |
| 芦苇群落 | 含水量/% | 0.001 000 | 0.362 | 0.002 8 | 69.46 | 0.75 | 0.051 50 |
| | 含盐量/% | 0.000 100 | 0.051 | 0.002 0 | 138.56 | 0.87 | 0.000 11 |
| 盐节木群落 | 含水量/% | 0.000 100 | 0.312 | 0.000 3 | 71.19 | 0.83 | 0.021 30 |
| | 含盐量/% | 0.000 001 | 0.003 | 0.000 4 | 56.81 | 0.66 | 0.000 01 |
| 梭梭群落 | 含水量/% | 0.000 100 | 0.273 | 0.000 4 | 128.86 | 0.99 | 0.000 34 |
| | 含盐量/% | 0.000 010 | 0.011 | 0.000 9 | 76.38 | 0.92 | 0.000 01 |

表4 不同植物群落下土壤水盐相关性分析

| 群落类型 | 土壤特性 | 含水量 |
|-------|------|---------|
| 碱蓬群落 | 盐分 | 0.321 |
| 芦苇群落 | 盐分 | 0.228 |
| 盐节木群落 | 盐分 | -0.022* |
| 梭梭群落 | 盐分 | -0.344 |

注: *表示 $p < 0.05$ 时相关性显著。

3 结论

(1) 各植物群落距湖距离由近到远依次为:芦苇群落<碱蓬群落<盐节木群落<梭梭群落。4种植物群落下土壤水盐含量变异系数除芦苇群落土壤含水量属于强变异性外,其它均为中等变异,且水分变异程度高于盐分,说明其变异程度与距湖距离相关,距湖越近的植物群落,土壤水盐变异程度较大。各植物群落下各层土壤水盐含量也存在差异,其中以碱蓬群落和芦苇群落下土壤水盐变化较为显著,说明湖周植物受艾比湖入湖水量变化和保护区外围用水的影响。因而,合理管理和分配保护区外围用水量对艾比湖湖周植物分布有一定的作用。

(2) 从空间结构性分析来看,不同植物群落下土壤含水量和盐分在一定的区域范围内具有空间结构特征,均较好地符合高斯模型分布,并且各群落下土壤含水量和盐分具有较强的空间自相关性。说明随机性因素对土壤水盐含量空间分布的贡献较小,其变异主要受气候、土壤母质、地形等结构性因素引起,且碱蓬群落和芦苇群落的总变异程度大于梭梭群落和盐节木群落。

(3) 土壤水盐变化会影响植物群落的空间分布

格局,与此同时,在同一气候和土壤条件下,植物群落的变化能够影响土壤水盐含量。通过研究表明,艾比湖湖滨湿地沿湖不同植物群落下土壤水盐空间变化受气候、距湖远近及湖面积波动、土壤类型及成土母质等结构性因素的影响,植物本身对土壤水盐的适应程度也不同。李尝君等^[19]通过研究艾比湖克隆植物表明在较强的水盐胁迫环境下,克隆植物会倾向于集群分布,认为这种集群分布一方面会增强克隆植物种群耐盐耐旱能力,另一方面能改善植株生长的水盐胁迫环境。宋同清等^[20]认为在中小尺度上,微生物和土壤理化性质等因素可能是导致群落物种组成与格局的变化的推动力。Weiner等^[21]认为土壤的异质性可以降低不同植物对资源的竞争,同时植物对不同土壤条件的需求或偏好必然影响到个体或种群在群落中的分布。所以,结合不同植物群落下土壤水盐的空间变异特征,对于有限水盐条件下植被结构和分布的优化尤显重要,在这方面有待于进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 潘成忠,上官周平. 土壤空间变异性研究评述[J]. 生态环境,2003,12(3):371-375.
- [2] 刘付程,史学正,潘贤章,等. 太湖流域典型地区土壤磷素含量的空间变异特征[J]. 地理科学,2003,23(1):77-81.
- [3] 杨劲松,姚荣江. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究[J]. 地理科学,2007,27(3):348-353.
- [4] 张忠华,胡刚,祝介东,等. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J]. 植物生态学报,2011,35(10):1038-1049.
- [5] 赵振勇,王让会,尹传华,等. 天山南麓山前平原土壤盐分空间异质性对植物群落组成及结构的影响[J]. 干旱区地理,2007,30(6):839-845.

- [6] 王晓燕,陈洪松,王克林,等.不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究[J].水土保持学报,2006,20(2):110-113.
- [7] 李禄军,蒋志荣,车克钧,等.绿洲—荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J].水土保持学报,2007,21(1):123-127.
- [8] 杨晓东,吕光辉,张雪梅,等.艾比湖湿地自然保护区8个乔灌木种空间分布格局分析[J].植物资源与环境学报,2010,19(4):37-42.
- [9] 杨晓东,傅德平,袁月,等.新疆艾比湖湿地自然保护区主要植物的种间关系[J].干旱区研究,2010,27(2):249-256.
- [10] 何静,高翔,吕光辉,等.艾比湖自然保护区植物群落的数量分类及土壤环境解释[J].新疆农业科学,2010,47(5):1030-1035.
- [11] 刘晓星,吕光辉,杨晓东,等.艾比湖流域5种土壤类型的酶活性和理化性质[J].干旱区研究,2012,29(4):579-585.
- [12] 金海龙,白祥,满中龙,等.新疆艾比湖湿地自然保护区土壤空间异质性研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(2):150-157.
- [13] 王合玲,张辉国,秦璐,等.新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素[J].生态学报,2012,32(16):4969-4980.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [15] 宋新山,何岩,汪永辉.水土化学场理论在松嫩平原盐渍土研究中的应用[J].地理科学,2003,23(1):72-76.
- [16] 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,1999:162-192.
- [17] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability[M]. Wageningen: PUDOC, 1985: 2-30.
- [18] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等.河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征:变异函数与Kriging插值分析[J].地理学报,2000,55(5):555-566.
- [19] 李芸君,吕光辉,贡璐,等.艾比湖湿地自然保护区克隆植物群落空间格局及其对水盐胁迫的响应[J].干旱区研究,2013,3(1):122-128.
- [20] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等.木论喀斯特峰丛洼地森林群落空间格局及环境解释[J].植物生态学报,2010,34(3):298-308.
- [21] Weiner J, Wright D B, Castro S. Symmetry of below-ground competition between *Kochia scoparia* individuals[J]. Oikos, 1997,79(1):85-91.

(上接第 278 页)

- [13] Johnes P J, Heathwaite A L. Modeling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(3): 269-286.
- [14] 庄永涛.渭河临潼断面以上流域非点源总氮负荷研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2002.
- [15] 薛利红,杨林章.面源污染物输出系数模型的研究进展[J].生态学杂志,2009,28(4):755-761.
- [16] 梁常德,龙天渝,李继承,等.三峡库区非点源氮磷负荷研究[J].长江流域资源与环境,2001,16(1):26-30.
- [17] 段亮,段增强,夏四清.太湖旱地非点源污染定量研究[J].水土保持通报,2006,26(6):40-43.
- [18] 李根,毛峰.我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估[J].中国水土保持,2008(2):9-11.
- [19] Beaulac M N, Reckhow K H. An examination of land use nutrient export relationships[J]. Water Resources Bulletin, 1982,18(6):1013-1024.
- [20] Frink C R. Estimating nutrient exports to estuaries [J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20(4): 717-724.
- [21] 陆建忠,陈晓玲,肖靖靖,等.改进的输出系数法在农业污染源估算中的应用[J].华中师范大学学报,2012,46(3):374.
- [22] 焦艳平,马香玲,艾万祥,等.岗南、黄壁庄水库上游流域非点源污染负荷估算[J].南水北调与水利科技,2010,8(2):96.
- [23] 曹彦龙,李崇明,郭劲松,等.重庆三峡库区非点源污染来源分析及负荷计算[J].重庆建筑大学,2007,29(4):2.
- [24] 沈珍瑶,刘瑞民,叶闽,等.长江上游非点源污染特征及其变化规律[M].北京:科学出版社,2008:348-358.
- [25] 韩明明.云南省昆明禄劝彝族苗族自治县[OL].(2011-01-25)[2013-05-26].云南:www.ynszxc.gov.cn, 2009.