

DOI: 10.5846/stxb201810102190

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.

Jiang Z Y, Li X Y, Zhang S Y, Wu H W, Ma Y J, Hu Z M. Effects of vegetation patches on soil water and salt dynamics using electromagnetic induction. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9188-9199.

基于电磁感应成像植被斑块土壤水盐效应研究

蒋志云^{1,2,*}, 李小雁^{2,3}, 张思毅⁴, 吴华武⁵, 马育军², 胡中民¹

1 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631

2 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 北京 100875

3 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

4 广东省生态环境技术研究所, 广州 510650

5 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

摘要: 土壤水盐过程在植被斑块的形成与演变中起着十分关键的作用, 但其与植被斑块间的相互作用关系因研究工具的限制而缺乏深入认识。以青海湖流域芨芨草斑块群落为研究对象, 通过采用电磁感应 (EMI) 产生的表观电导率 (ECa) 成像解译土壤水分与盐分的时空动态变化, 建立芨芨草斑块分布格局与土壤水盐变化过程之间的联系。结果表明: ECa 分别与土壤水分、盐分间存在显著相关关系 ($P < 0.01$), 多元回归模型指出, ECa 变化的 81% 可由土壤水分与盐分变化来解释, 因此可用 ECa 变化表征土壤水分与盐分的变化; 此外, 强降雨事件前后 ECa 动态变化图指出, 芨芨草斑块处土壤水分增加量高于基质区, 说明芨芨草斑块能够快速聚集水分; 而不论干湿状态或不同季节, 芨芨草斑块处土壤水盐含量总是高于基质区, 表现出时间稳定性, 说明芨芨草斑块是土壤水盐的聚集区。因此, EMI 成像可揭示芨芨草斑块土壤水盐空间分布及动态变化过程, 为植被斑块的水文过程研究提供快速可靠的方法。

关键词: 电磁感应 (EMI); 土壤水文过程; 土壤盐分; 植被斑块; 青海湖流域

Effects of vegetation patches on soil water and salt dynamics using electromagnetic induction

JIANG Zhiyun^{1,2,*}, LI Xiaoyan^{2,3}, ZHANG Siyi⁴, WU Huawu⁵, MA Yujun², HU Zhongmin¹

1 School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2 Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Guangdong Institute of Eco-Environmental & Technology, Guangzhou 510650, China

5 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: The surface soil hydrology is extremely important for driving the formation and evolution of vegetation patches in water-limited ecosystems. However, the process of soil hydrology and its response to vegetation patches are unclear due to limited tools. This study chose patchy grass *Achnatherum splendens* as an indicator plant to reveal the spatial-temporal dynamics of soil water and salt, and soil water and salt responses to spatial patterns of *A. splendens* patches, were shown by electrical conductivity (ECa) images, in the study area of Qinghai Lake watershed in north-western China. The results showed that there were significant positive correlations ($P < 0.01$) between ECa , and soil water and salt. ECa could be used as a proxy for the changes of soil water and salt, because soil water and salt could explain 81% of the ECa changes based on

基金项目: 广东省科技创新战略专项资金博士启动项目 (2018A030310517); 中国博士后科学基金资助项目 (2018M643110); 国家自然科学基金项目 (41730854, 91425301)

收稿日期: 2018-10-10; **网络出版日期:** 2019-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyjiang@senu.edu.cn

the multivariate regression model. Moreover, based on the time-lapse *E_{Ca}* images, the increment of soil water under *A. splendens* patches was higher than that of matrix zones, compared with before and after intensive rainfall, meaning *A. splendens* patches acted as sink to accumulate water runoff. Analysis of temporal stability showed spatial *E_{Ca}* patterns were highly consistent with the distributions of *A. splendens* patches, and soil water and salt content under *A. splendens* patches were remarkable higher than that of matrix zones, whatever the moist conditions or seasons. This indicated that *A. splendens* patches were the accumulation area for soil water and salt. Therefore, the findings of this study proved that it is a novel method to reveal the dynamics of soil water and salt, and its responses to the spatial patterns of *A. splendens* patches by EMI method, which might provide valuable insights in understating the hydrological process of patchy vegetation.

Key Words: electromagnetic induction; soil hydrological process; soil salt; vegetation patches; Qinghai Lake watershed

非连续性植被斑块格局是一种世界范围内十分常见的自然景观,其分布区域约占全球陆地面积的 30%,广泛分布在非洲、美洲、大洋洲、欧洲及亚洲等地的干旱半干旱区^[1-3]。当前研究普遍认为,地表水文过程在植被斑块形成、维持及演变中起着十分关键的作用^[2, 4],植被斑块通过调节地表径流、入渗及土壤水分等水文过程,使其周围形成一个土壤水分富集区,而水分的运移带动养分等营养物质的聚集,从而促进植被生长、影响群落结构与生态系统功能^[5]。因此,斑块状植被与地表水文过程间相互作用关系研究,已经成为国际植物适应干旱研究的前沿与热点领域,被众多国际主流刊物时常报道^[2-3, 6-7]。

土壤水分是干旱半干旱区植被格局与结构的关键影响因素。很多研究认为,植被与水分入渗之间存在一种正反馈关系:在植被密度高的地方常会入渗更多的水分,从而使得土壤水分产生空间异质性^[8]。另外,土壤盐分也是干旱区植物生长的环境限制因子之一,影响植被格局形成^[9],高浓度盐分胁迫会扰乱水势及离子分布的动态平衡,导致植物细胞损坏、生长受阻甚至死亡^[10]。虽然目前研究已经认识到植被斑块能够影响土壤水分、盐分及养分的空间分布,汇集水分及养分从而形成“资源岛”^[8, 11-12],但大部分停留在“量”的对比上,如植被斑块与裸地间水分及养分含量的对比。然而,静态的“量”的对比通常很难反映具体的水文过程,且常得出相悖的结论。例如,很多认为植被斑块聚集水分及养分,使其水分及养分高于裸地或基质斑块^[5, 8, 12],但也有研究指出植被斑块水分低于裸地^[13]。因此,揭示植被斑块对土壤水分动态变化过程的影响,如次降雨过程中植被斑块对水分再分配过程的影响、以及不同干湿季节植被斑块土壤水分动态变化等,对认识植被斑块格局与土壤水文过程间相互作用关系具有重要意义,而这种动态的过程却因缺乏合适的观测工具而难以捕捉到,成为了植被斑块研究的难点问题^[14]。

传统研究土壤水盐的方法如烘干法、中子仪法、TDR 法,很难准确表达异质性土壤水盐空间分布及其动态变化^[14]。近年来,电磁感应方法(Electromagnetic induction, EMI)被引入土壤性质研究中,它通过产生电磁感应图像,可以用于建立与土壤性质变化间的联系,因其测定快速、准确且便捷,已经成为国内外土壤-水文-环境领域研究的热点方法^[15-18]。许多研究通过分析 EMI 所产生的土壤表观电导率(*E_{Ca}*)与土壤水分、土壤粘粒含量之间的关系,认为 *E_{Ca}* 可作为土壤的指示器,且可用来揭示植被空间格局与土壤性质间的关系^[15-19]。同样很多研究将 EMI 技术应用于土壤盐分测定,国内目前主要将电磁感应技术应用于土壤含盐量测定、土壤盐渍剖面分类与盐分空间变异等方面^[20-22]。然而,目前研究一般将 EMI 用于揭示某一种土壤性质,而同时用于分析土壤水分与盐分变化过程及其对植被斑块格局的响应的研究十分匮乏,尤其在国内还鲜有报道。因此,应用 EMI 研究植被斑块格局与土壤水盐动态过程,对于深入认识植被斑块对土壤水文过程的影响具有重要意义。

芨芨草(*Achnatherum splendens*)是广泛分布在亚欧大陆干旱半干旱区具有耐寒、耐旱、耐盐碱等优点的深根性多年生草本植物,在空间上常呈斑块状聚集分布^[23]。青海湖流域分布着大面积的芨芨草群落,其主要分布在环青海湖湖盆区北部和东南部海拔 2900—3350m 的湖岸冲洪积平原,形成一条 1—15 km 的植被带,是人畜活动的主要聚集地,且在防风固沙、水土保持及生物多样性保护方面起着重要作用^[24]。然而,近几十年来,

受气候变化与人类活动的影响,青海湖环湖地区芨芨草草地退化与生态系统功能下降等问题十分严峻,出现了草地水源涵养能力降低、水土流失、草地退化及荒漠化等现象^[25-26]。因此,选择青海湖流域芨芨草斑块群落作为研究对象,采用 EMI 方法研究土壤水分及盐分变化过程,揭示芨芨草斑块对土壤水盐动态过程及季节性变异的影响,对理解斑块植被与地表水文过程相互作用关系具有重要意义,也可为芨芨草草原生态环境恢复与治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海湖流域北岸刚察县三角城种羊场地区的芨芨草草原(37°14′52.7″N, 100°14′8.5″E),海拔约 3200 m,该地区辐射强、温差大且干旱少雨,属于高原大陆性气候。据刚察站多年气象资料分析,该地年平均气温为-0.6℃,年平均降雨量为 370.3 mm,且主要集中在生长季(5—9月),年平均蒸发量为 607.4 mm^[17-18]。芨芨草群落结构一般为 2—3 层,第一层为高大的芨芨草草丛,其他禾草植物如针茅(*Stipa krylovii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、羊草(*Leymus chinensis*)、早熟禾(*Poa malaca*)等构成第二层,第三层为一些低矮的杂草,如冷蒿(*Artemisia frigida*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等^[27]。因此,本研究将芨芨草植株冠层垂直投影区域称为芨芨草斑块,包括芨芨草以及生长在其冠层下方的其他所有植物,芨芨草斑块之间生长低矮杂草区域称为基质区(图 1)。坡度约为 1—2°,芨芨草斑块外围一般比基质区地势低,存在微地形。土壤主要是栗钙土,由寒冻锥形土(mol-cryic cambisols)发育而来,土层深度约 100 cm,浅层土壤田间持水量 29.7%—32%^[28]。

1.2 电磁感应(EMI)实验

选择典型芨芨草斑块群落分布区作为 EMI 实验样区,大小约为 60 m×60 m。EM38 大地电导率仪(Geonics Limited, Ontario, Canada)由加拿大 Geonics 公司研发,基于电磁感应原理获得土壤表观电导率(Apparent Electrical Conductivity, *ECa*),有关其工作原理、操作及校正方法已有较多详细介绍^[16, 20-22, 29]。在样区内由东至西以 3 m 间距设计 21 条样线,每次实验在设计的样线上以 1 m/s 左右的速度行驶。选择 2013—2014 年中 14 次 EMI 监测实验,2013 年 9 次,有 4 次为 2013 年 8 月 19—23 日强降雨事件雨前、雨中、雨后的监测实验,2014 年 5 次。

采用绘图法,将实验样区细分为 3 m×3 m 的网格,芨芨草斑块冠幅的垂直投影为其轮廓,将轮廓对应地绘制在坐标纸上,扫描成图后采用 ArcGIS 软件矢量化,得到芨芨草斑块空间分布图。自动气象站安装在距离实验样区约 100 m 处,主要监测降水、土壤温度、空气温湿度及辐射等。

1.3 土壤性质

1.3.1 土壤水分与盐分

实验样区内选择 20 个样点取土壤样品,其中 15 个样点选在芨芨草斑块内部,5 个在基质区中。土壤样品采集深度为 0—80 cm(基质区一般为 0—50 cm),间距为 10 cm。采集的样品带回实验室,每个样品中的一半用烘干法测土壤水分,另一半测土壤盐分。风干后过 2 mm 筛,与蒸馏水按照 1:5 的质量比例混合,过滤后采用上海雷磁 DDS-307 电导仪测土壤溶液电导率 *EC*1:5。因土壤溶液电导率与土壤含盐量之间具有极显著的相关性,一般采用土壤溶液电导率近似代替土壤含盐量^[30]。每次取土样后,采用 EM38 的 Station Mode 测定每个采样点的 *ECa* 值。2013 与 2014 年共采样 10 次(其中 9 次测土壤盐分),约 1300 个样品。



图 1 青海湖北岸芨芨草草原景观图

Fig.1 The landscape of *A. splendens* steppe in northern Qinghai Lake

1.3.2 土壤非饱和导水率

采用微型圆盘入渗仪(Decagon Devices, Inc. USA)测土壤非饱和导水率,吸力值设置为 5、20、60 mm,入渗仪底盘直径 45 mm。在实验样区内选取 5 个典型的芨芨草斑块,每个芨芨草斑块及相邻基质区各测 5 个重复,每次测量均测 3 个吸力值,总共 150 次测量。

1.3.3 其他土壤性质

用容积为 100 cm³的环刀取原状土测定土壤容重,土壤孔隙度是根据对芨芨草原状土柱进行 CT 扫描解译而得,具体实验过程与数据处理参考 Hu 等^[31]。土壤机械组成在轻工业环境保护研究所采用马尔文激光粒径分析仪测得。

1.4 径流系数

选择 3 组典型的芨芨草草丛及相邻基质区建设地表径流小区,尽量保证相似的坡度及植被覆盖。径流小区是用彩钢板围建而成,直径为 112.8 cm,插入土层深度 10 cm,在低洼处设计出水口,用塑料管连接出水口与收集桶。2014 年共收集径流 14 次,根据降雨量与径流量计算径流系数。

1.5 数据处理

1.5.1 *ECa* 数据前处理

首先通过建立 *ECa* 时间序列,去除不动点及奇异值。其次,将相同地点的重复值进行平均。因各次 *ECa* 测量时土壤温度不一致,为排除温度对 *ECa* 的干扰,将 *ECa* 数据进行温度校正,校正温度为 25℃,具体参考 Reedy 和 Scanlon^[19]:

$$EC_{25} = ECa(0.4779 + 1.3801e^{(-T/25.654)}) \quad (1)$$

式中: EC_{25} 表示校正温度为 25℃时的 *ECa* 值, T 表示实际温度(℃)。

1.5.2 *ECa* 制图过程

采用普通克里格方法插值 *ECa* 图,插值单元为 0.25 m×0.25 m,采用 ArcGIS 9.3 软件进行制图。为了分析 *ECa* 图的时间稳定性,参考 Zhu 等^[16]的研究方法,采用 *ECa* 的相对差异平均值来表征,详细计算过程如下:

$$\delta_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\delta_{ij} = \frac{ECa_{ij} - \overline{ECa_j}}{\overline{ECa_j}} \quad (3)$$

$$\overline{ECa_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ECa_{ij} \quad (4)$$

ECa_{ij} 表示第 j 天在第 i 点 E_a 值, $\overline{ECa_j}$ 是第 j 天所有点 *ECa* 的平均值, δ_{ij} 是第 j 天在第 i 点的相对差异值, N 是所有采样点总和, M 是 EMI 测量次数。

1.5.3 方差分析

土壤水分以 80 cm 土体的平均储水量(mm)表示,而土壤盐分则是土体的加权平均值(mS/m)。运用 SPSS17.0 软件采用偏相关方法检验表观电导率与土壤水分、盐分间的相关关系。采用方差分析对比芨芨草斑块、斑块边缘及草地土壤水分、盐分及其他土壤性质的差异,及土壤水盐在生长季尺度内的变化特征,建立 *ECa* 与土壤水分、盐分之间的多元回归模型并进行检验与诊断。

2 结果分析

2.1 降水分布特征

图 2 表示 2013—2014 年度研究区逐日降雨量,2013 年降雨总量为 364.09 mm,日降雨量>10 mm 的降雨事件主要分布在 8—9 月,特别指出的是,8 月 19—23 日出现 1 次连续强降雨事件,且该段时期总降雨量达 96.7 mm(8 月 20 日降雨量为 45.9 mm),占年降雨量 26.56%。2014 年降雨量为 390.40 mm,日降雨量>10 mm

的降雨事件有 10 次, 主要分布在 6—8 月。芨芨草原降雨时期主要为 4—10 月, 且分布不均匀, 日降雨量 > 10 mm 的降雨事件主要发生在 6—8 月。

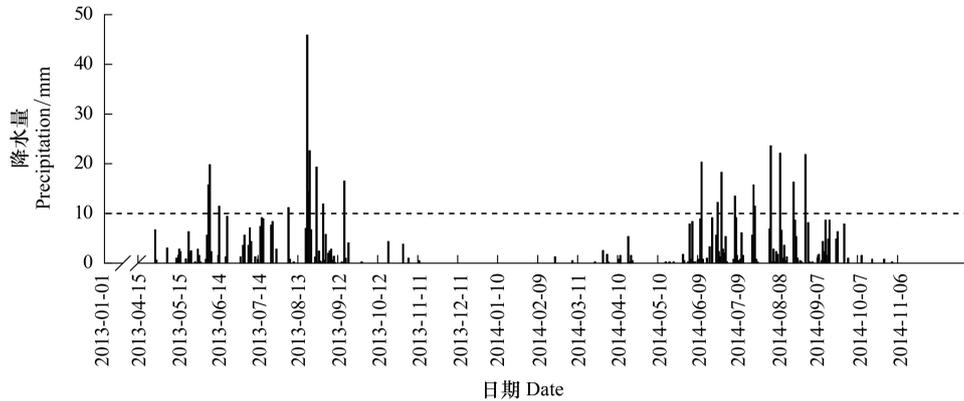


图 2 2013—2014 年芨芨草原日降雨量

Fig.2 Daily rainfall of *A. splendens* steppe in 2013 and 2014

2.2 ECa 与土壤水盐的关系

表 1 列出了表观电导率与土壤水分、盐分间的偏相关系数。结果指出, 表观电导率与土壤水分的相关关系显著 ($P < 0.01$), 且芨芨草斑块相关系数大于基质区; ECa 与土壤盐分也呈现显著的相关关系 ($P < 0.01$), 但基质区相关系数大于芨芨草斑块。对芨芨草斑块来说, ECa 与土壤水分的相关性更显著, 而基质区, ECa 与土壤盐分的相关系数稍大。总体来说, 土壤水分、土壤盐分与 ECa 之间存在显著的相关关系。

表 1 ECa 与土壤水分、盐分的偏相关系数

Table 1 Partial correlation coefficient between ECa and soil water and salinity

类型 Types	偏相关系数 Partial correlation coefficient	
	ECa/SW (控制因素: SA, ST)	ECa/SA (控制因素: SW, ST)
芨芨草斑块 Patches	0.779** (N=138)	0.542** (N=138)
基质区 Matrix	0.561** (N=48)	0.577** (N=48)
所有点 All	0.718** (N=186)	0.755** (N=186)

* * 表示在 0.01 水平上相关显著; ECa : 土壤表观电导率, SW: 土壤水分, SA: 土壤盐分, ST: 土壤温度

建立以土壤水分 (SW) 和土壤盐分 (SA) 为自变量, ECa 为因变量的初始多元线性回归模型, 通过分析标准化残差与土壤水分、盐分间的关系, 采用库克距离法去除少量极端值所产生的杠杆效应后, 建立逐步回归法改进模型如下:

$$ECa = 3.440 \times SW + 0.220 \times SA - 43.301 \quad (P < 0.01, R^2 = 0.810) \quad (5)$$

改进后模型均方差小于初始模型, 决定系数 R^2 增大, 说明改进后的模型具有较高的可靠度与准确性。 $R^2 = 0.810$, 说明土壤水分与盐分可解释 ECa 变化的 81%。

2.3 ECa 空间分布格局

图 3 给出了 2013—2014 年生长季的 ECa 空间分布图, 颜色由红-黄-绿-蓝表示 ECa 值逐渐增大, 表 2 列出了 ECa 分布图的部分统计值。在生长季初期, 如 2013 年 5 月 20 日, ECa 图大片区域呈红 (黄) 色, ECa 平均值为 19.78 mS/m, 为两年 14 次测量中最小值。进入生长季 (6—9 月), ECa 图明显朝蓝 (绿) 色变化, ECa 分布图的平均值、最小值和最大值均明显增大 (表 2)。不过每次 ECa 值的高低还与实际 AP7 (Antecedent Precipitation during the previous 7 day: 测量前 7 天的降雨量) 有关, 如 2013 年 5 月 20 日的 AP7 只有 6.3 mm, ECa 值最低, 到 6 月 10 日时 AP7 高达 44.2 mm, ECa 分布图明显变绿 (蓝)。随着 8 月 19—23 日强降雨事件后, 8 月 21、22、24 日的 AP7 分别达到 67.4、90、96 mm, ECa 分布图呈现非常显著地变化, 其中 8 月 24 日的

ECa 平均值、最小值及最大值是两年 14 次测量的最高值,最小值为 17.64 mS/m,接近 5 月 20 日的平均值。9 月 5 日的 AP7 虽然只有 20.8 mm,但因受到强降雨事件的影响, ECa 分布图与 8 月 24 日相比差异很小。

图 4 给出了 8 月 21、22、24 日、9 月 5 日和 8 月 9 日的 ECa 差值图,显著地揭示了雨后 ECa 分布图动态变化,降雨 1 天(8 月 21 日)样区整体 ECa 值基本上大于雨前,但东部及西南部呈黄色,少数地区呈红色,说明 ECa 增加幅度不大(<10 mS/m)。降雨 2 天,样区 ECa 分布差值图出现了显著变化,大部分地区呈绿色。降雨 3 天,样区 ECa 分布差值图基本呈绿(蓝色), ECa 值显著增大。2014 年 ECa 空间分布图变化趋势也基本符合类似规律。

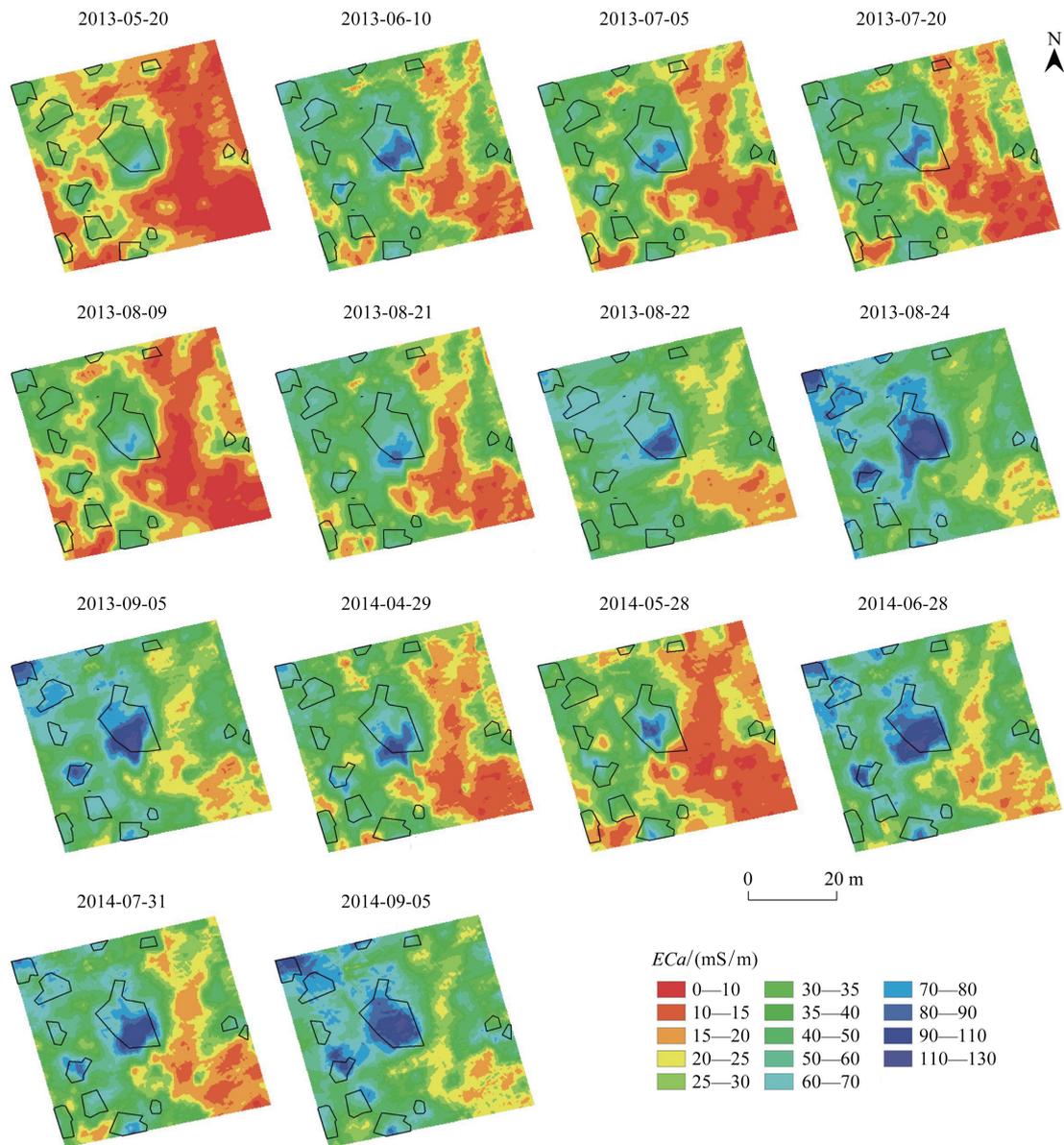


图 3 2013—2014 年 ECa 空间分布图(多边形表示芨芨草斑块)

Fig.3 Kriged ECa maps from 2013 to 2014, with polygons representing the 'meta' *A. splendens* patches

另外,相对差异值可以表示时间稳定性,若某点的值大于零,说明该点的 ECa 值始终大于整个区域的平均值,当值小于零时,则表示 ECa 值始终小于整个区域的平均值。从 ECa 相对差异图(图 5)可以发现,芨芨草斑块分布区域均是绿或蓝色区域,说明芨芨草斑块分布区域的 ECa 值始终大于平均值,而斑块间地草地的 ECa 分布区域是红色或黄色, ECa 值始终小于平均值。因此, ECa 在空间上表现出稳定的异质性现象,且芨芨

草斑块分布格局与 *ECa* 相对差异图具有很好的对应关系。

表 2 *ECa* 空间分布图统计描述

Table 2 Statistical description of *ECa* measurements at 14 days from 2013 to 2014

统计 Statistics	20/05/13	10/06/13	5/07/13	20/07/13	9/08/13	21/08/13	22/08/13
AP7 (mm)	6.3	44.2	10.41	26.16	11.94	67.4	90
最小值 Minimum/(mS/m)	2.82	5.81	3.84	4.60	4.49	6.75	12.67
最大值 Maximum/(mS/m)	72.95	95.19	88.07	91.34	77.02	88.87	100.97
平均值 Average/(mS/m)	19.78	34.00	28.71	30.78	23.67	33.51	40.75
标准差 Standard error/(mS/m)	10.39	16.15	14.62	16.11	12.30	15.08	16.06
描述	24/08/13	5/09/13	29/04/14	28/05/14	28/06/14	31/07/14	5/09/14
AP7/mm	96.7	20.8	0	0.25	42.42	0	30.48
最小值 Minimum/(mS/m)	17.64	14.34	8.29	8.07	11.64	8.82	15.31
最大值 Maximum/(mS/m)	124.22	119.54	99.76	93.61	119.14	104.55	117.73
平均值 Average/(mS/m)	49.96	45.00	33.21	26.16	44.62	39.71	48.42
标准差 Standard error/(mS/m)	20.02	19.18	16.60	13.85	20.67	18.87	19.93

AP7 表示前 7 天降雨量总和, Antecedent Precipitation during previous 7 days

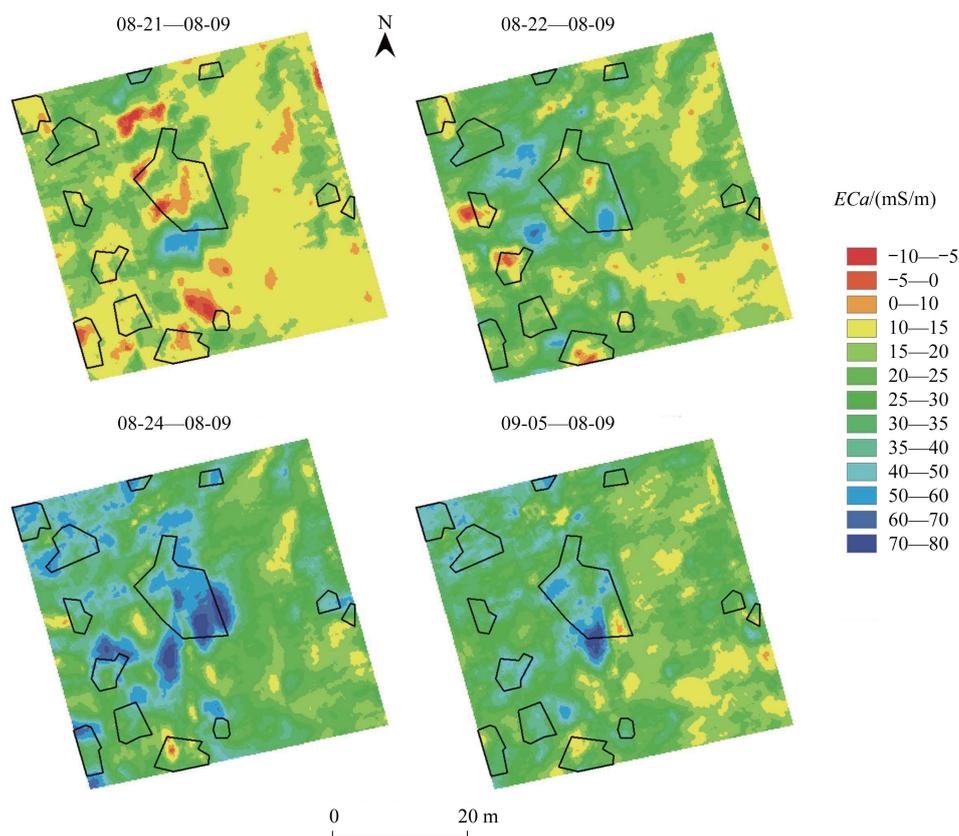


图 4 2013 年 8 月 21、22、24 及 9 月 5 日与 8 月 9 日 *ECa* 差值图(多边形表示芨芨草斑块)

Fig.4 *ECa* maps (21, 22, 24 August and 5 September) subtracted from 9 August, with polygons representing the 'meta' *A. splendens* patches

2.4 土壤性质

对比芨芨草与基质区表层土壤性质发现(表 3),芨芨草斑块表层土壤黏粒含量相对低,粉粒和砂粒含量相对高。同时,芨芨草斑块表层土壤非饱和导水率显著高于基质区,在高(-5 mm)、中(-20 mm)、低

(-60 mm) 水头下均是如此。另外, 芨芨草斑块表层土壤相具有明显的大孔隙特征, 其孔隙度 (17.69%) 显著高于基质区的孔隙度 (1.04%)。不过芨芨草斑块表现出较低的产流效率, 其径流系数显著低于基质区。因此, 芨芨草斑块因其具有较高的砂粒含量、较大的孔隙度, 所以其非饱和导水率显著高于基质区, 降雨后水分相对较易下渗进入土壤, 所以产生径流量相对于基质区较少, 基质区则表现出相对高的产流率。

图 6 给出了 2013、2014 年度生长季基质区与芨芨草斑块 0—80 cm 土壤水分与盐分含量, 芨芨草斑块的土壤水分高于基质区约 8.8%—48.2%, 尤其是在非降雨期, 如 2013 年 8 月 9 日, 芨芨草斑块的土壤水分显著高于基质区 ($P < 0.05$), 而随着强降雨后, 它们之间的差异性在缩小, 如 8 月 22 日与 9 月 5 日, 芨芨草斑块土壤水分略高于基质区。而芨芨草斑块下的土壤盐分显著高于基质区 ($P < 0.01$), 是基质区的 2.6—5.7 倍, 2013 年基质区与芨芨草斑块变化规律一致, 随着时间推移土壤盐分略微增加, 且分别基本维持在 30—40、165—185 mS/m 区间, 而 2014 年出现了相反的情况, 基质区土壤盐分先增加后减小 (20—40 mS/m)、芨芨草斑块土壤盐分则先减小后增加 (140—165 mS/m)。整体上, 土壤盐分的变化量不大。

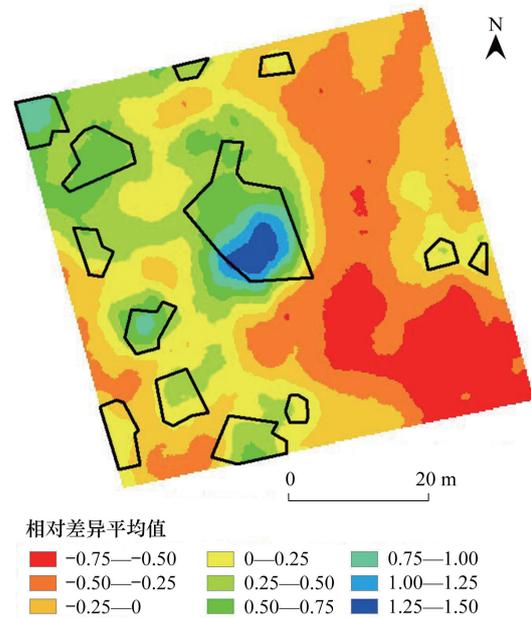


图 5 2013—2014 年 ECa 相对差异图 (多边形表示芨芨草斑块)

Fig.5 The average relative difference of ECa maps from 2013 to 2014, with polygons representing the 'meta' *A. splendens* patches

表 3 芨芨草斑块和基质区土壤性质及径流系数对比

Table 3 Particle size composition (USDA), porosity of surface soil (0—0.2 m), unsaturated hydraulic conductivity (mm/h) with 5, 20 and 60 mm suction, runoff coefficient (R_c) for *A. splendens* patches and matrix patches

类型	粒径组成			非饱和导水率			孔隙度	径流系数
	Particle size composition/%			Unsaturated hydraulic conductivity/(mm/h)				
	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	$K(5)$	$K(20)$	$K(60)$	Porosity/%	Runoff coefficient/%
芨芨草斑块 Patches	4.08±0.60 (n=15)	57.78±1.05 (n=15)	38.14±0.04 (n=15)	18.42±1.42a (n=25)	10.37±1.48a (n=25)	6.16±0.92a (n=25)	17.69±5.02a (n=15)	1.34±0.19b (n=14)
基质区 Matrix	6.69±2.01 (n=15)	56.06±1.06 (n=15)	37.25±3.04 (n=15)	13.04±0.36bA (n=25)	7.86±1.07a (n=25)	2.65±0.58b (n=25)	1.04±0.27b (n=15)	3.30±0.54a (n=14)

每列不同小写字母表示在 0.05 置信水平显著差异

3 讨论

本研究结果指出 ECa 与土壤水分、土壤盐分间十分显著的相关关系 ($P < 0.01$, 表 1), 且根据所建立的多元回归模型 ($R^2 = 0.81$) 可知, ECa 变化的 81% 是由土壤水分与盐分变化所解释, 说明可根据 ECa 的变化来反演土壤水分与盐分的变化, 这与目前许多 EMI 研究结论一致^[15-19, 21, 29]。因此, 根据 ECa 时空动态分析结果 (图 3、图 4), 芨芨草斑块分布区 ECa 增加值显著高于基质区, 说明水分在芨芨草斑块入渗速率快, 芨芨草斑块在次降雨后水分的入渗量显著高于基质区, 因此植被斑块能够影响水分再分配过程。这与 Robinson 等^[15] 采用 ECa 实时动态图反演土壤水分的动态变化, 从而识别了研究区的水分聚集区与消耗区的研究结果一致。所以在短时期内, 当土壤盐分变化小时, 土壤水分的变化主导 ECa 的变化。

次降雨事件前后 ECa 空间变化图及差值图在时间动态上主要反映了水分的动态变化, 而空间分布的差

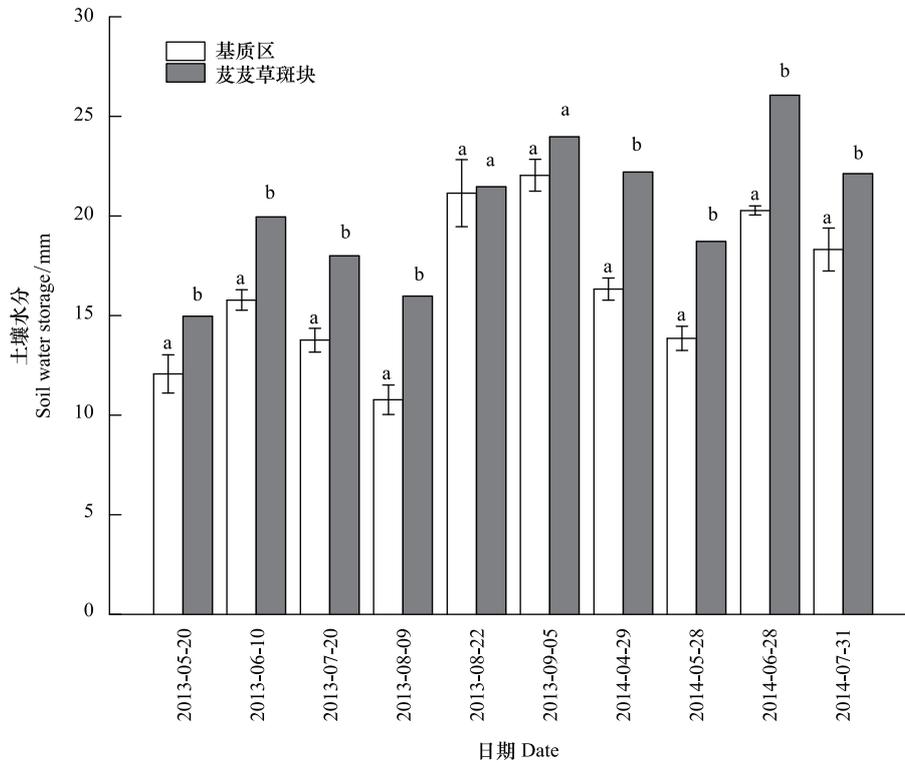


图 6 2013—2014 年芨芨草和基质区土壤水分对比图

Fig.6 Soil water storage for *A. splendens* patches and matrix patches from 2013 to 2014

同一日期不同字母表示在 0.05 置信水平显著性差异

异性则受土壤水盐的空间格局共同影响。 ECa 时间稳定性分析结果(图 5)指出芨芨草斑块的平均相对差异值均在零以上,说明在任何湿度条件下,芨芨草斑块附近 ECa 值总是相对较高,意味着芨芨草斑块总是含有相对较高的土壤水分及盐分。结合土壤性质分析结果(表 3),芨芨草斑块相比基质区来说,土壤含有相对较高的砂粒含量、表层的非饱和导水率及大孔隙率,有助于雨水以优势流的形式下渗至深层土壤^[31],这在其他生态系统中也比较常见^[32-33]。在早期,芨芨草因其较大的冠幅,能有效降低太阳辐射及风速,从而降低土壤蒸发,减少水分的散失而保蓄水分^[34]。在芨芨草斑块冠幅及其根系的作用下,其斑块下土壤性质发生了变化,更有利于水分下渗与保持,使得斑块下土壤水分显著高于基质区,与其他灌木或树木的生态水文机理类似^[35],说明芨芨草斑块具有聚水蓄水的作用。此外,芨芨草还是一种生态可塑性很强的深根性植物,根系分布密集^[34],据吴华武等人^[36]针对青海湖流域芨芨草水分利用来源研究表示,芨芨草根系吸水深度能敏锐地响应土壤水分变化,在湿润期主要利用表层土壤水,而在干旱期则转至深层土壤水。因此,芨芨草斑块对水分运移的影响及水分利用方式符合干旱地区植被水分聚集适应理论与高効用水策略^[37]。

根据 ECa 图的季节变化与土壤水分、盐分测分析结果(图 3、6、7),从早期到湿期,芨芨草斑块及基质区土壤水分均显著增加, ECa 图能敏锐地捕捉到这种变化,芨芨草斑块的土壤贮水量高于基质区;而从湿期到早期, ECa 图也能精确地反映出芨芨草斑块与基质区土壤水分的降低,但芨芨草斑块的土壤贮水量仍高于基质区(图 6)。另外,芨芨草斑块土壤盐分显著高于基质区(图 7),但随着湿度条件增加,其芨芨草斑块土壤盐分稍增多,而基质区稍减少。土壤水盐在空间上表现出一种稳定的格局,即芨芨草斑块土壤水盐总是高于基质区,这也从 ECa 图的时间稳定性分析结果中得到了验证(图 5),说明芨芨草斑块通过影响土壤水力性质从而具有明显的聚集水盐的功能。芨芨草斑块的土壤盐分含量显著高于基质区($P < 0.01$),但是在芨芨草斑块除芨芨草外其他草本物种数、盖度及地上生物量又显著低于基质区^[18],这可能说明芨芨草斑块通过创造一个高盐的环境与其他草本植物竞争。

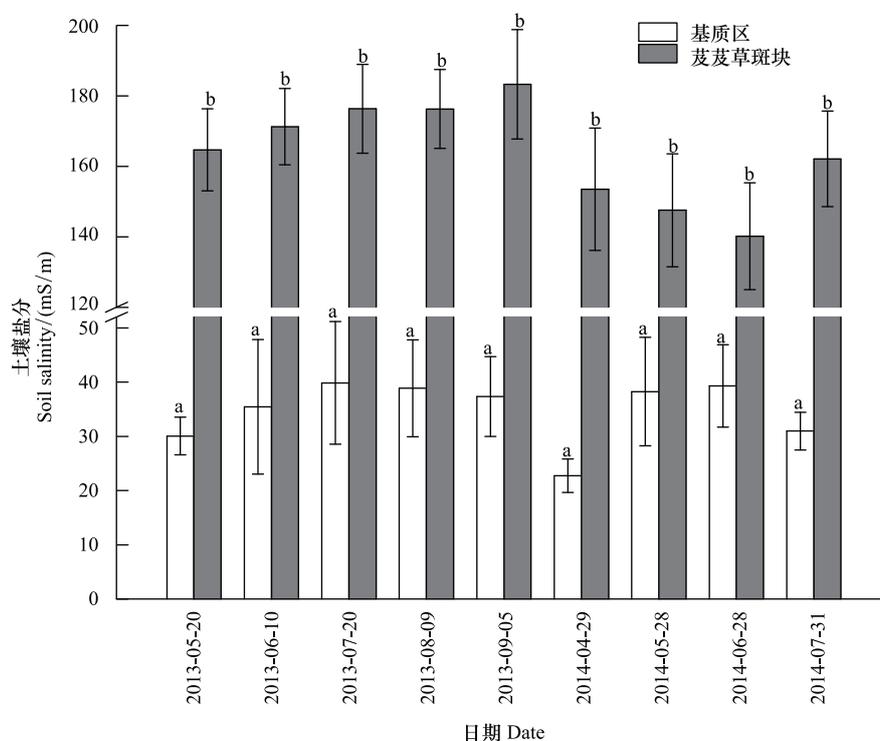


图7 2013—2014年芨芨草和基质区土壤水分对比图

Fig.7 Soil salinity for *A. splendens* patches and matrix patches from 2013 to 2014

同一日期不同字母表示方差分析通过0.05置信水平显著性检验

根系吸水、径流再分配和地下水位等可能是芨芨草斑块盐分聚集主要原因。首先,芨芨草根系主要分布在0—40 cm土壤,水平方向能延伸到冠幅外1—2 m,盐离子在根系吸收水分的过程中被运移至斑块下。王珺等^[38]同样发现芨芨草根系区盐分含量较高,其认为根系吸水是盐分运移聚集的关键因素。但由于芨芨草根系具有拒盐性,盐离子不能随水分进入芨芨草根系,周玲玲等^[39]通过解剖芨芨草根系的营养器官发现,芨芨草根系外皮层细胞与环内皮层细胞非常厚,使得盐离子难以进入中柱,从而使得根系与地上部分免受盐分胁迫。因此,由根系吸水驱动的盐离子进入芨芨草根系区而逐渐聚集。其次,径流的再分配过程也会对盐分分布产生影响^[11],径流实验分析结果(表3)指出芨芨草斑块区域径流系数显著小于基质区,由于芨芨草斑块外围地势稍低于基质区,受微地形影响,降雨后径流从基质区流向芨芨草斑块区,特别是在强降雨事件发生后芨芨草斑块可能会受到周围基质区径流的补给。最后,浅层地下水分布也可能是盐分聚集的原因之一^[40]。根据野外实际监测数据,芨芨草地下水位在2.5—2.7 m间波动,波动范围不大,地下水电导率均值约为94.4 mS/m。而依据地表水与地下水的盐水电导率管理分类,纯水<70 mS/m,微含盐水为70—200 mS/m,中含盐水为200—1000 mS/m,高含盐水为1000—2000 mS/m^[41-42],说明芨芨草地下水属于微含盐水,但地下水是否是芨芨草的水源之一,目前仍没有定论^[36],需要在未来的研究中进一步探讨。

4 结论

本文采用电磁感应方法(EMI)建立了芨芨草斑块格局与土壤水盐动态变化的联系,研究了芨芨草斑块格局对土壤水分、盐分动态变化的影响,得到以下结论:(1)青海湖流域芨芨草斑块群落土壤表观电导率(ECa)可用于表征土壤水分和盐分变化。通过 ECa 变化的影响因素分析,发现土壤水分、盐分与 ECa 具有显著相关关系;多元回归模型指出 ECa 变化的81%可由土壤水分与盐分的变化来解释,且土壤水分和盐分的解释量具有不可替代性;(2)EMI揭示了次降雨条件下芨芨草斑块能快速聚集土壤水分。次降雨后芨芨草斑块 ECa 增

加值明显高于基质区,说明水分在芨芨草斑块入渗速率高于基质区,雨水在垂直方向较易入渗至芨芨草斑块土壤中;(3)不论干湿条件或不同季节,芨芨草斑块群落土壤水分及盐分空间格局表现出时间稳定性,即芨芨草斑块土壤水盐含量一直高于基质区,说明芨芨草斑块是水分与盐分的聚集区。

参考文献 (References):

- [1] Rietkerk M, Boerlijst MC, van Langevelde F, HilleRisLambers R, van de Koppel J, Kumar L, Prins H H T, de Roos A M. Self-organization of vegetation in arid ecosystems. *The American Naturalist*, 2002, 160(4): 524-530.
- [2] Getzin S, Yizhaq H, Bell B, Erickson T E, Postle A C, Katra I, Tzuk O, Zelnik Y R, Wiegand K, Wiegand T, Meron E. Discovery of fairy circles in Australia supports self-organization theory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(13): 3551-3556.
- [3] Pringle R M, Tarnita C E. Spatial self-organization of ecosystems: integrating multiple mechanisms of regular-pattern formation. *Annual Review of Entomology*, 2017, 62: 359-377.
- [4] Muvengwi J, Mbiba M, Ndagurwa HGT, Kabvuratsiye N. Pulsing hydrology and topography determine the structure and spatial distribution of *Cubitermes* mounds in a savanna ecosystem. *CATENA*, 2016, 145: 99-106.
- [5] Cerdà A. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on runoff and erosion. *Journal of Arid Environments*, 1997, 36(1): 37-51.
- [6] Juergens N. The biological underpinnings of Namib desert fairy circles. *Science*, 2013, 339(6127): 1618-1621.
- [7] Bonachela JA, Pringle RM, Sheffer E, Coverdale T C, Guyton J A, Caylor K K, Levin S A, Tarnita C E. Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change. *Science*, 2015, 347(6222): 651-655.
- [8] Bestelmeyer BT, Ward JP, Havstad KM. Soil-geomorphic heterogeneity governs patchy vegetation dynamics at an arid ecotone. *Ecology*, 2006, 87(4): 963-973.
- [9] Srivastava DS, Jefferies RL. Mosaics of vegetation and soil salinity: a consequence of goose foraging in an arctic salt marsh. *Canadian Journal of Botany*, 1995, 73(1): 75-83.
- [10] Zhu J K. Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(2): 66-71.
- [11] Moffett KB, Robinson DA, Gorelick SM. Relationship of salt marsh vegetation zonation to spatial patterns in soil moisture, salinity, and topography. *Ecosystems*, 2010, 13(8): 1287-1302.
- [12] Peng H Y, Li X Y, Li G Y, Zhang Z H, Zhang S Y, Li L, Zhao G Q, Jiang Z Y, Ma Y J. Shrub encroachment with increasing anthropogenic disturbance in the semiarid Inner Mongolian grasslands of China. *CATENA*, 2013, 109: 39-48.
- [13] Cramer MD, Barger NN. Are Namibian "fairy circles" the consequence of Self-Organizing spatial vegetation patterning? *PLoS One*, 2013, 8(8): e70876.
- [14] Vereecken H, Schnepf A, Hopmans J W, Javaux M, Or D, Roose T, Vanderborght J, Young M H, Amelung W, Aitkenhead M, Allison S D, Assouline S, Baveye P, Berli M, Brüggemann N, Finke P, Flury M, Gaiser T, Govers G, Ghezzehei T, Hallett P, Hendricks Franssen H J, Heppell J, Horn R, Huisman J A, Jacques D, Jonard F, Kollet S, Lafolie F, Lamorski K, Leitner D, McBratney A, Minasny B, Montzka C, Nowak W, Pachepsky Y, Padarian J, Romano N, Roth K, Rothfuss Y, Rowe E C, Schwen A, Šimůnek J, Tiktak A, van Dam J, van der Zee S E A T M, Vogel H J, Vrugi J A, Wöhling T, Young I M. Modeling soil processes: review, key challenges, and new perspectives. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(5): vzj2015.09.0131.
- [15] Robinson DA, Lebron I, Kocar B, Phan K, Sampson M, Crook N, Fendorf S. Time-lapse geophysical imaging of soil moisture dynamics in tropical deltaic soils: an aid to interpreting hydrological and geochemical processes. *Water Resources Research*, 2009, 45(4): W00D32.
- [16] Zhu Q, Lin H, Doolittle J. Repeated electromagnetic induction surveys for determining subsurface hydrologic dynamics in an agricultural landscape. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(5): 1750-1762.
- [17] Jiang ZY, Li XY, Wu HW, Xiao X, Chen H Y, Wei J Q. Using electromagnetic induction method to reveal dynamics of soil water and salt during continual rainfall events. *Biosystems Engineering*, 2016, 152: 3-13.
- [18] Jiang ZY, Li XY, Wu HW, Zhang S Y, Zhao G Q, Wei J Q. Linking spatial distributions of the patchy grass *Achnatherum splendens* with dynamics of soil water and salt using electromagnetic induction. *CATENA*, 2017, 149: 261-272.
- [19] Reedy RC, Scanlon BR. Soil water content monitoring using electromagnetic induction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(11): 1028-1039.
- [20] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异及其剖面分布特征研究. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2007, 33(2): 207-216.
- [21] 李晓明, 杨劲松, 刘梅先, 刘广明, 姚荣江. 基于电磁感应的典型干旱区土壤盐分空间异质性. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 97-101.

- [22] 姚远. 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的绿洲土壤盐渍化评估与尺度效应分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.
- [23] 吴珍兰, 卢生莲. 论世界芨芨草属(禾本科)的地理分布. 植物分类学报, 1996, 34(2): 152-162.
- [24] 陈桂琛, 彭敏. 青海湖地区植被及其分布规律. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(1): 71-81.
- [25] 李凤霞, 伏洋, 杨琼, 颜亮东, 肖建设. 环青海湖地区气候变化及其环境效应. 资源科学, 2008, 30(3): 348-353.
- [26] Xin H. A green fervor sweeps the Qinghai-Tibetan Plateau. Science, 2008, 321(5889): 633-635.
- [27] 陈桂琛, 彭敏. 青海省芨芨草原的群落特征及其分布规律. 西北植物学报, 1993, 13(2): 154-162.
- [28] 朱宝文, 陈晓光, 郑有飞, 李英年. 青海湖北岸天然草地小尺度地表径流与降水关系. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1074-1079.
- [29] 蒋志云, 李小雁, 张志华, 张思毅, 李柳. 基于 EM38 电导率仪土壤水分探测研究. 干旱区研究, 2015, 32(1): 48-55.
- [30] Corwin D L, Lesch S M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 455-471.
- [31] Hu X, Li Z C, Li X Y, Liu L Y. Quantification of soil macropores under alpine vegetation using computed tomography in the Qinghai Lake Watershed, NE Qinghai-Tibet Plateau. Geoderma, 2016, 264: 244-251.
- [32] Devitt D A, Smith S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem. Journal of Arid Environments, 2002, 50(1): 99-108.
- [33] Li X Y, Yang Z P, Li Y T, Lin H. Connecting ecohydrology and hydrogeology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(7): 1133-1144.
- [34] Zhang M J, Liu M S, Li Y T, Xu C, An S Q. The combined positive effects of two dominant species in an arid shrub-herbaceous community: implications from the performance of two associate species. Plant Ecology, 2011, 212(9): 1419-1428.
- [35] D'Odorico P, Caylor K, Okin GS, Scanlon T M. On soil moisture-vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2007, 112(G4): G04010.
- [36] 吴华武, 李小雁, 蒋志云, 李静, 郑肖然, 赵殿智. 基于 δD 和 $\delta^{18}O$ 的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究. 生态学报, 2015, 35(24): 8174-8183.
- [37] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [38] 王珺, 刘茂松, 盛晟, 徐驰, 刘小恺, 王汉杰. 干旱区植物群落土壤水盐及根系生物量的空间分布格局. 生态学报, 2008, 28(9): 4120-4127.
- [39] 周玲玲, 阎平, 唐素英, 郭玉堂. 芨芨草营养器官的解剖学研究. 石河子大学学报: 自然科学版, 2002, 6(4): 298-302.
- [40] Runyan C W, D'Odorico P. Ecohydrological feedbacks between salt accumulation and vegetation dynamics: role of vegetation-groundwater interactions. Water Resources Research, 2010, 46(11): W11561.
- [41] Yadav S, Irfan M, Ahmad A, Hayat S. Causes of salinity and plant manifestations to salt stress: a review. Journal of Environmental Biology, 2011, 32(5): 667-685.
- [42] 徐国策, 刘海波, 申震洲, 王金花, 冉大川, 李占斌, 李鹏. 洛惠渠灌区地下水电导率时间稳定性分析. 农业工程学报, 2015, 31(10): 115-121.