

基于 EMI 的小泊湖退化湿地土壤盐分的空间分布

魏俊奇¹, 李小雁^{1,2}, 蒋志云¹, 刘磊¹, 肖雄¹

(1. 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 2. 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)

摘要: 采用电磁感应(EMI)、地统计学半变异函数和 Kriging 空间插值方法研究小泊湖退化湿地土壤盐分的空间分布。结果表明:土壤表观电导率(ECa)和 0—40 cm 土壤盐分含量呈线性显著正相关,说明在小泊湖湿地土壤表观电导率的变化可以用以反映土壤盐分含量的变化;半变异函数分析表明,土壤盐分具有强空间相关性 $[C/(C_0+C)>0.5]$,其空间分布主要是由结构性因素引起的;高斯模型($R^2=0.98$)插值土壤盐分表明,土壤盐分空间分布与退化湿地的空间分布表现出明显的一致性,放牧活动强烈的退化区域土壤盐分相对较高,说明小泊湖湿地退化后土壤盐分含量高于未退化湿地,土壤盐分含量在一定程度上能反映湿地退化的程度,可为湿地退化防治监测提供依据。

关键词: EM38; 土壤盐分; 土壤电导率; 青海湖

中图分类号: S156.4; K928.43

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0284-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.047

Spatial Distribution of Soil Salinity in a Degraded Wetland of Xiaopo Lake Based on EMI

WEI Junqi¹, LI Xiaoyan^{1,2}, JIANG Zhiyun¹, LIU Lei¹, XIAO Xiong¹

(1. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: In this study, we studied the spatial distribution of soil salinity in a degraded wetland of Xiaopo Lake based on a combined method of electromagnetic induction (EMI) with semi-variation function in the Geo-statistical methods and the Kriging of the spatial interpolation. Significant correlation between the apparent electrical conductivity and soil salinity content indicated that apparent electrical conductivity could be used to characterize the variation of soil salinity in the degraded wetland. The result of semi-variation function showed that there was a strong spatial autocorrelation ($C/(C_0+C)>0.5$) for the spatial distribution of soil salinity, which meant that the distribution of salinity was mainly caused by the structural factors. By interpolating soil salinity with Kriging method, we found that the spatial distribution of soil salinity was obviously consistent with the spatial pattern of the degraded wetland, and the areas with high soil salt content were the areas where the grazing activity was strong. Soil salt content of the degraded wetland was higher than that of the non-degraded wetland, so the content of the soil salt could reflect the degree of degradation of the degraded wetland to some extent, which can offer an effective basis for the prevention and control of the wetland degradation.

Keywords: EM 38; soil salinity; soil electrical conductivity; Qinghai Lake

小泊湖湿地是青海湖湿地的重要组成部分,在防止区域沙化方面发挥着重要作用,同时也为周边野生动物的栖息及繁衍提供了绝佳的环境。在气候变化与人类活动影响下,小泊湖湿地退化趋势明显,植被覆盖面积减少且质量变差。湿地退化会导致其空间分布格局发生变化,加剧湿地破碎化和景观分离程度^[1],对当地农业、牧业、旅游业的发展具有显著影响。湿地土壤的理化性质随其退化也发生改变。有

研究指出,湿地退化之后,土壤盐分含量会发生改变^[2-3]。郑云云^[4]在对辽河口湿地退化过程土壤环境变化的研究中,得出退化区中部土壤易溶盐含量高于未退化区及退化区边缘的结果。目前,对小泊湖湿地的研究多集中于植物多样性^[5]、土壤呼吸^[6]和土壤酶活性^[7],而对小泊湖湿地退化与土壤盐分关系研究较少。对比研究原生湿地与退化湿地的土壤盐分差异,分析土壤盐分的空间异质性特征及其影响因素,对于

收稿日期:2016-05-15

资助项目:国家自然科学基金重点项目“青海湖流域生态水文过程与水分收支研究项目”(41130640)

第一作者:魏俊奇(1993—),女,硕士研究生,主要从事水文土壤学研究。E-mail:jqwei@mail.bnu.edu.cn

通信作者:李小雁(1970—),男,博士,教授,主要从事水文土壤学研究。E-mail:xyli@bnu.edu.cn

认识气候变化及人类活动影响下的湿地退化过程具有十分重要的意义。然而,由于传统的土壤盐分测定需要破坏原状土样,缺乏在田间尺度上连续动态非破坏的测定技术,而且用传统采样分析法确定土壤盐分的分布状况费时费力,所采样品的体积及采样个数常常达不到反映区域空间变异所需要的样本数量^[8]。因此,需要实时的高分辨率测量来满足对土壤盐分空间分布的研究。

电磁感应方法(Electromagnetic induction, EMI)因不需要与土壤直接接触,具有低成本、高精度、非破坏性和高效率的特点,能够在样地尺度上进行大面积测量,从而获得大量的数据,提高整体空间的估算精度,能够很好的解决传统采样费时费力、样本量不足的问题。电磁感应方法(EMI)测得的土壤表观电导率(Apparent electrical conductivity, ECa)随着土壤盐分、土壤黏土含量、土壤水分含量的变化而变化^[9],能够间接指示土壤的物理和化学性质^[10]。因此,自上世纪 70 年代以来,已经有研究者在假定其他土壤性质一致的情况下,用电磁感应方法推断土壤性质^[11]。之后电磁感应方法又被广泛应用于土壤盐分的估计与土壤盐分的空间变异研究^[12]和区域土壤性质的制图^[13]。电磁感应方法在湿地植被的研究中主要集中在植被的空间区划^[14],但是对于湖滨退化湿地空间分布的研究还很罕见。本研究基于电磁感应方法探讨原生湿地与退化湿地之间的土壤盐分差异,推断退化湿地土壤盐分的空间分布,为恢复重建湿地生态过程提供数据支撑,这对维护湿地的功能具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

小泊湖湿地位于青海湖湿地东侧(100°46'E,36°42'N),距青海湖湖东种羊场西北约 10 km,是青海湖水位下降后遗留下的沼泽化草甸,西至青海湖岸,北至沙丘

地带,南至莲花沙山,东至环湖东路约 0.8 km,面积约 14.8 km²,平均海拔 3 212 m。年平均气温为-0.8~1.1℃;年降水量为 324.5~412.8 mm,多集中于 5—9 月份;年蒸发量为 1 502 mm;年日照时数较长,为 2 430~3 330 h;大风日数较多,冬春季节以西北风和西风为主,夏秋季节以东南风和东北风为主。研究区域内有一条流量、流速均较小的淡水河自东向西汇入青海湖。受海拔高度及高寒气候的影响,小泊湖湿地植物以草本植物为主,而且因受湖陆风和河流流向的影响,植物生长范围呈现出东西向长、南北向窄的现象^[5]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 依据植被状况在小泊湖沼泽湿地选择 3 个样地:HB1、HB2 和 HB3。通过样方调查和植被数量分析的方法,对研究区的草地特征进行了调查和分析(表 1),HB1 有 10 个物种,以华扁穗草为优势种,其次为灯芯草、喜马拉雅嵩草、海韭菜等;HB2 有 7 个物种,以海韭菜为优势种,其次为紫大麦草、早熟禾等,但在 HB2 中出现的早熟禾、蒲公英、海乳草在 HB1 和 HB3 中没有出现;HB3 有 10 个物种,以灯芯草为优势种,其次是海韭菜、华扁穗草等。HB2 草本生物量比 HB1、HB3 在 7 月份下降 31.28%~33.05%;物种数和高度减少,增加了蒲公英这一菊科植物;HB2 盖度比 HB1、HB2 下降 11.61%~28.27%。湿地的退化主要是指由于自然环境的变化,或是人类对湿地自然资源不合理地利用而造成的湿地生态系统结构破坏、功能衰退、生物多样性减少、生物生产力下降以及湿地生产潜力衰退、湿地资源逐渐丧失等一系列生态环境恶化的现象。植被盖度的降低、物种多样性的减少和群落组成成分的简单化,是植被退化的主要特征,结合已有草地退化程度划分标准^[15]以及湿地退化标准^[16],将 HB2 设为退化区,HB1 和 HB3 设为退化区 HB2 两侧的对照区。

表 1 研究区植被调查结果

样地	主要物种	草本高度/cm	草本层盖度/%	草本物种数(个)	草本层生物量/(g·m ⁻²)
HB1	华扁穗草、灯芯草	4.91	90.63	10	221.83
HB2	海韭菜、紫大麦草	3.00	65.01	7	152.44
HB3	海韭菜、灯芯草	6.10	73.55	10	227.70

注:HB2 为退化湿地;HB1 和 HB3 为 HB2 两侧的未退化湿地;* 为 2015-07-23 日采集的草本层生物量。

1.2.2 土壤表观电导率(ECa)的获取 土壤表观电导率(ECa)的测量采用由加拿大 Geonics 公司研发的基于电磁感应原理的 EM 38 电导率仪。测量前仪器开启 30 min,使仪器处于稳定状态,并对仪器相位和仪器调零。同时,仪器在使用中尽可能避免金属物体、电线之类的物体。首先,采用样点模式在 HB1、HB2、HB3 将 EM 38 置于距离地面 10 cm 高度进行垂直模式的土壤表观电导率的测量,测量结果记为

ECv10;在进行 ECv10 测量的样点同时按深度 0—10,10—20,20—30,30—40 cm 进行土壤样品的采集,每个深度在 3 个样地各重复采样 3 次,共采集 216 个样品。采集的土壤样品用于土壤盐分的实验室测定。其次,采用样线模式进行空间 ECa 的测量:在 60 m×100 m 的区域内设计 11 条 EM 38 测量路线,行驶路线间距 3 m,每次测量时采用距离地表 10 cm 高度的垂直模式并确保行驶路线笔直。

1.2.3 土壤盐分测定 土壤可溶性盐按 1 : 5 土水比配制土壤溶液,测量土壤浸出液的电导率值。

1.2.4 土壤蒸发的测定 土壤蒸发的测量采用小型蒸渗仪法。在不破坏周围土壤结构的情况下,在 HB1、HB2 的草地(HB2CD)和土丘(HB2TQ)、HB3 样地分别取原状土装入高 15 cm,内径 10 cm 底部密封的 PVC 管中。将蒸渗仪置于原土壤位置处,蒸渗仪内土壤表面与蒸渗仪外土壤表面齐平,分别在每天早上 8:00 和晚上 20:00 对蒸渗仪进行称重,蒸渗仪早晚的质量差即为观测当日的实际土壤蒸发,共测量 4 d。

1.2.5 植被样方调查 分别在样地 HB1、HB2、HB3 内随机选取 3 个 1 m×1 m 的样方进行植被调查,记录每个样方内的植物物种数、植被总盖度和各物种的分盖度及植株高度,并齐地剪取样方内所有地上植株,清检出所有活体植株装袋后带回实验室烘干,获取地上总生物量。

1.3 土壤盐分空间 Kriging 插值方法

首先,检验数据是否符合正态分布,不满足正态分布要求的,将试验数据转换为服从正态分布的数据,再运用地统计学的方法来定量化研究土壤盐分的空间变异^[17]。半方差函数是克里格(Kriging)法进行最优内插的基础。根据所得到的半方差函数模型,应用克里格法进行插值,绘制出研究区土壤盐分的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 土壤表观电导率(ECa)与土壤盐分的回归分析

土壤盐分、水分及有机质含量、土壤质地、结构和孔隙率等都不同程度地影响着土壤表观电导率的取值,且各因素对土壤表观电导率的影响程度不同。有研究者发现土壤盐分和含水量对土壤表观电导率的影响明显大于其他各因素^[18]。本试验中,HB1 和 HB2 的 0—40 cm 均为粗砂土,HB3 的 0—20 cm 为粗砂土,20—30 cm 为面砂土,30—40 cm 含有粘土;HB1、HB2、HB3 的容重分别是 1.24,1.22,1.24,而且 HB1、HB2 和 HB3 的土壤含水量均长期处于饱和状态,因此土壤质地、土壤水分、土壤容重不会构成各样地间土壤表观电导率空间差异的主导因素,将 EM 38 测得的土壤表观电导率(ECv10)作为自变量,0—10,10—20,20—30,30—40 cm 的土壤盐分平均得到的 0—40 cm 的土壤盐分作为因变量,进行回归分析(图 1)。从图 1 可以看出,0—40 cm 土壤盐分与土壤表观电导率的决定系数为 0.70($P<0.01$),即 0—40 cm 的土壤盐分与土壤表观电导率存在显著的线性关系,这与姚荣江等^[19]在黄河三角洲地区的研究结果相一致。说明在小泊湖湿地运用 EM 38 测得的土壤表观电导率能够很好的表征土壤盐分。

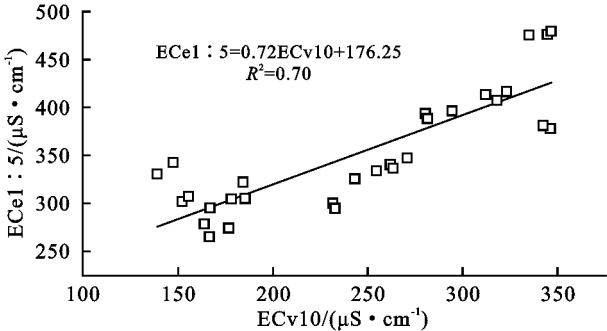


图 1 土壤表观电导率(ECa)与土壤盐分的回归分析

2.2 土壤表观电导率的地统计分析

土壤表观电导率的半方差变异函数的参数分析(图 2)显示,土壤表观电导率空间插值选择高斯模型。半方差变异函数中的块金值 C_0 与基台值(C_0+C)的比值 $C_0/(C_0+C)$ 可以用来表示随机因素引起的异质性占总的土壤表观电导率的空间异质性的强弱程度。当 $0<C_0/(C_0+C)<25\%$,说明土壤表观电导率的空间相关性强,当 $25\%\leq C_0/(C_0+C)\leq 75\%$ 时说明土壤表观电导率的空间相关性为中等,当 $C_0/(C_0+C)>75\%$ 时表示土壤表观电导率的空间相关性很弱,当比值接近 1,则说明在整个尺度上土壤表观电导率具有稳定的变异特征。本文 $C_0/(C_0+C)<0.20$,说明土壤表观电导率具有强空间相关性,其空间分布是由结构性因素(气候、母质、地形、土壤类型、地下水运动等)引起的。同时,交叉验证的结果中土壤表观电导率的回归系数接近于 1.00,回归系数的平均标准差为 0.01,这表明通过 Kriging 预测的土壤表观电导率值与实际的土壤表观电导率值拟合较好。

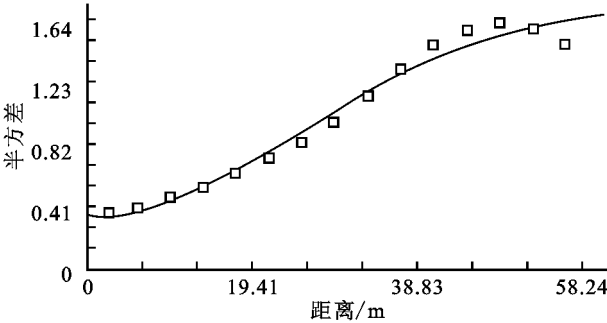
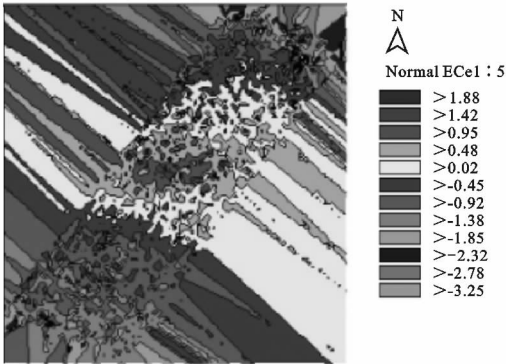


图 2 土壤表观电导率的半变异函数

Kriging 空间插值图反映了研究区土壤表观电导率的空间分布特征,由插值结果(图 3)可知,土壤表观电导率具有明显的空间异质性,表现为不同表观电导率的土壤呈条带状分布,中间样地最高,两边较低且值相近。土壤表观电导率最高值分布在退化区 HB2,低值分布在未退化区 HB1 和 HB3。根据土壤表观电导率与土壤盐分间的显著线性正相关性可知,退化样地 HB2 的土壤盐分要显著高于未退化样地 HB1、HB3,即土壤盐分在退化湿地与未退化湿地下具有不同的含量特征。Xie 等^[20]证明土壤盐分是植

被属性的重要影响因素,杨劲松等^[21]在黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究中也发现裸露地盐分较高。因退化湿地的土壤表观电导率要明显高于未退化湿地,因此通过对土壤表观电导率的观测,EMI 能够成为揭示湿地退化的有效工具。同时 EMI 反演的土壤盐分信息,也能够成为湿地退化的预警,并进一步为湿地退化的防治提供依据。



注:Normal ECe 1 : 5 表示将 ECv10 正态分布转换之后的数据。

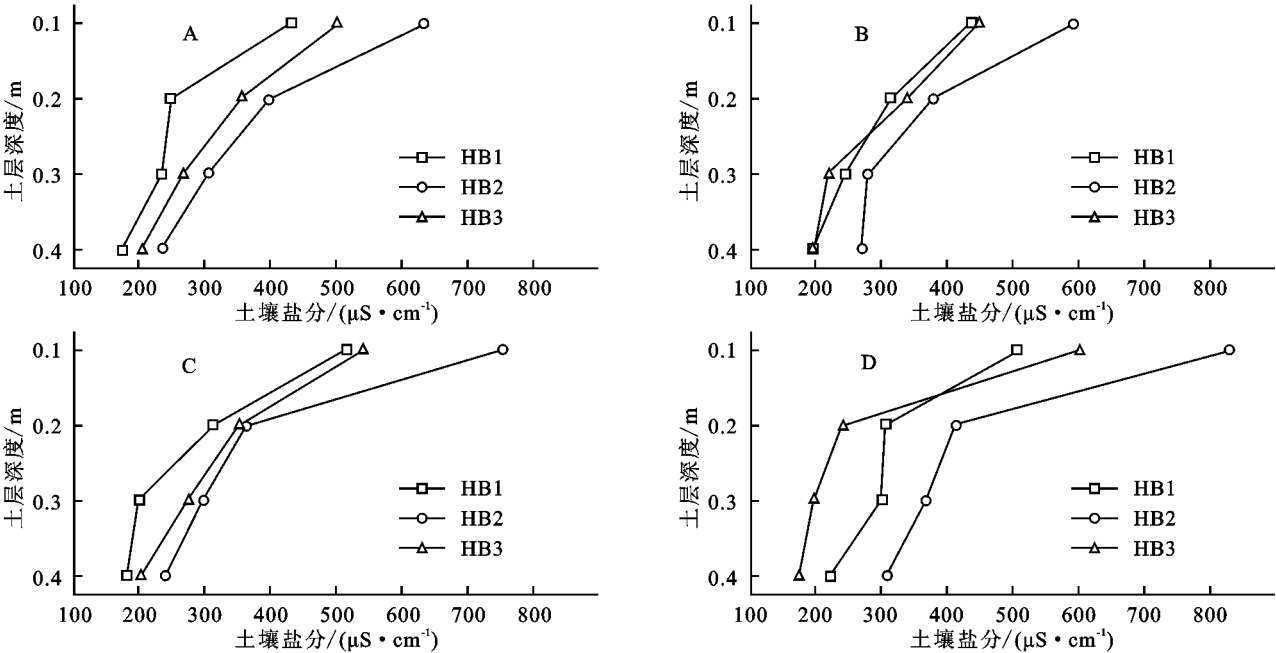
图 3 土壤盐分的空间分布

2.3 土壤盐分的分布特征

样地 HB1、HB2 和 HB3 不同深度土壤盐分随时间变化过程见图 4。3 个样地在 2015 年 6 月 22 日,7

月 11 日,7 月 23 日,8 月 17 日的平均土壤盐分均表现为 HB2>HB3>HB1,HB2、HB3 和 HB1 的土壤盐分平均值分别为 418. 21,317. 00 305. 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$,与电磁感应方法测得的土壤盐分的空间分布相一致。3 个样地的土壤盐分垂直分布规律也较一致,土壤盐分均在表层达到最大值,并从表层向下依次降低。之前也有研究者发现土壤盐分聚集表层,与本文研究结论相同^[21]。盐分向表层富集,会使土壤趋于盐渍化,导致植物生长受到阻碍,最终导致植物死亡。

在 HB1、HB2CD、HB2TQ、HB3 表层进行的土壤蒸发试验结果表明,退化区 HB2 无论是草地(4. 06 mm)还是土丘(3. 89 mm)的蒸发量均比未退化区(HB1,3. 45 mm;HB3,3. 65 mm)大(表 2),这主要是由于退化样地(HB2)植被盖度小,地上生物量低,地表多有裸露,在太阳直射的情况下地表温度要高于未退化样地,并由此导致退化样地具有较高的蒸发量。土壤盐分表聚与深层土壤以及地下水中的可溶性盐类在地表持续的蒸发作用下借助毛细管作用上升并聚集于表层这一现象有关,使得随着土壤深度的增加而土壤盐分逐渐减少,而且湿地地下水资源丰富和水位埋深浅等也可能是表层土壤盐分聚集的影响因素^[22]。



注:A、B、C、D 分别表示 2015 年 6 月 22 日,2015 年 7 月 11 日,2015 年 7 月 23 日,2015 年 8 月 17 日的 HB1、HB2、HB3 的土壤盐分垂直分布。

图 4 土壤盐分垂直分布

表 2 土壤表层蒸发量测定结果					mm
测定日期(年-月-日)	HB1	HB2CD	HB2TQ	HB3	
2015-08-14	4. 12±0. 76	5. 68±0. 56	5. 12±0. 14	5. 87±0. 91	
2015-08-15	2. 37±0. 25	2. 97±0. 11	3. 33±0. 31	3. 52±0. 53	
2015-08-16	4. 81±0. 73	4. 07±0. 85	3. 29±0. 08	3. 17±1. 32	
2015-08-17	2. 50±0. 52	3. 55±0. 24	3. 82±0. 26	3. 72±0. 63	
平均值	3. 45±1. 20	4. 06±1. 14	3. 89±0. 78	3. 65±1. 04	

注:HB1 和 HB3 为未退化区;HB2CD、HB2TQ 分别表示退化湿地 HB2 样地中的草地和土丘,蒸发测定结果以蒸发量±标准差表示。

3 结论

- (1)在小泊湖湿地,0—40 cm 土层深度的土壤盐分与 EM 38 测得的土壤表观电导率(ECa)存在显著的线性关系($P<0.01$),小泊湖湿地土壤表观电导率的变化可以用来指示土壤盐分的变化。
- (2)研究区土壤盐分具有强空间变异性,其空间分布呈现条状带,退化区土壤盐分高,未退化区土壤

盐分低。该研究结果表明,基于电磁感应方法的 EM 38 能够用于湿地土壤盐分的大面积持续观测,能够为湿地退化提供预警,并能够为湿地的恢复治理提供依据。

参考文献:

- [1] 王根绪,李元寿,王一博,等.近40年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化[J].地理学报,2007,62(5):481-491.
- [2] 黄蓉,王辉,马维伟,等.尕斯库勒湖湿地退化过程中土壤理化性质的变化特征[J].水土保持学报,2014,28(5):221-227.
- [3] 冯小平,王义东,郭长城,等.长期垦殖与退化对七里海芦苇沼泽土壤盐分的影响[J].湿地科学,2014,12(3):388-394.
- [4] 郑云云.辽河口退化湿地土壤理化性质及其对芦苇生长影响[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [5] 程雷星,陈克龙,杨仕兵,等.青海湖流域小泊湖湿地植物种间关系研究[J].干旱区地理,2014,37(5):1005-1011.
- [6] 刘志凌,陈克龙,王记明,等.青海湖小泊湖湿地不同群落土壤呼吸及温湿度因子响应[J].绿色科技,2013(8):73-75.
- [7] 杨英,耿玉清,黄桂.青海小泊湖区沼泽化草甸、草甸和沙地的土壤酶活性[J].湿地科学,2016,14(1):20-26.
- [8] 蒋志云,李小雁,张志华,等.基于 EM38 电导率仪土壤水分探测研究[J].干旱区研究,2015,32(1):48-55.
- [9] Friedman S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2005,46(1/3):45-70.
- [10] Sudduth K A, Kitchen N R, Wiebold W J, et al. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2005,46(1):263-283.
- [11] Doolittle J A, Brevik E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies[J]. Geoderma, 2014,223/225:33-45.
- [12] Lesch S M, Corwin D L, Robinson D A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2005,46(1/3):351-378.
- [13] Anderson-Cook C M, Alley M M, Roygard J K F, et al. Differentiating soil types using electromagnetic conductivity and crop yield maps[J]. Soil Science Society of America Journal,2002,66(5):1562-1570.
- [14] Atwell M, Wuddivira M, Gobin J, et al. Edaphic controls on sedge invasion in a tropical wetland assessed with electromagnetic induction[J]. Soil Science Society of America Journal,2013,77(5):1865-1874.
- [15] 李博.中国北方草地退化及其防治对策[J].中国农业科学,1997,30(6):1-9.
- [16] 张晓龙,李培英.湿地退化标准的探讨[J].湿地科学,2004,2(1):36-41.
- [17] 李哈滨,王政权.空间异质性定量研究理论与方法[J].应用生态学报,1998,9(6):651-657.
- [18] Zhu Q, Lin H, Doolittle J. Repeated electromagnetic induction surveys for determining subsurface hydrologic dynamics in an agricultural landscape[J]. Soil Science Society of America Journal,2010,74(5):1750-1762.
- [19] 姚荣江,杨劲松.基于电磁感应仪的黄河三角洲地区土壤盐分时空变异特征[J].农业工程学报,2008,24(3):107-113.
- [20] Xie Y, Qiu K, Xu D, et al. Spatial heterogeneity of soil and vegetation characteristics and soil-vegetation relationships along an ecotone in Southern Mu Us Sandy Land, China[J]. Journal of Soils and Sediments,2015,15(7):1584-1601.
- [21] 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.
- [22] 赵锐锋,陈亚宁,洪传勋,等.塔里木河源流区绿洲土壤含盐量空间变异和格局分析:以岳普湖绿洲为例[J].地理研究,2008,27(1):135-144.