

网络出版时间:2018-03-27 09:33 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.08.014
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180327.0931.028.html

渭北地区土壤剖面电导率年内动态变化及影响因素

樊会敏^{1,2}, 张蓉蓉^{3a}, 许明祥^{1,2,3b}, 张圣民^{3b}, 李彬彬^{1,2}

(1 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 林学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】研究陕西渭北地区土壤电导率动态变化及其影响因素,旨在为渭北地区土壤盐碱化治理提供理论依据。【方法】在陕西渭北土壤盐碱化集中的区域富平县、临渭区、蒲城县、大荔县、合阳县共选择28个农田土壤作为监测点,按土壤表层盐分含量的高低,分为高含盐量区和低含盐量区,分别于2015年8月(夏季)、2015年11月(秋季)、2016年2月(冬季)、2016年5月(春季)测定监测点土壤电导率、含水量和温度。【结果】1)土壤电导率在高含盐量区年内动态变化为夏季>春季>秋季>冬季,在低含盐量区动态变化为春季>夏季>秋季>冬季;高含盐量区受水分、温度、海拔和是否灌溉各因素综合影响,低含盐量区受温度和海拔影响较大。2)年内土壤剖面上,温度对电导率的影响大于水分对电导率的影响,且温度的影响程度随土层深度的增加呈减小趋势,水分的影响程度随土层深度的增加呈增加趋势。3)夏、春、冬季土壤电导率受水分的影响较大,年内土壤含水量在15%~30%时对土壤电导率有明显影响。【结论】渭北地区剖面土壤电导率在各季节间存在差异,四季内的主要影响因素是水分,土壤剖面中的主要影响因素是温度和水分。

[关键词] 土壤电导率;年内动态;土壤盐碱化;渭北地区

[中图分类号] S156.4

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2018)08-0107-09

Seasonal changes and influencing factors of soil electrical conductivity in soil profile of Weibei region

FAN Huimin^{1,2}, ZHANG Rongrong^{3a}, XU Mingxiang^{1,2,3b}, ZHANG Shengmin^{3b}, LI Binbin^{1,2}

(1 Research Center of Institute of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 a College of Natural Resources and Environment, b College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】Changes and the influencing factors of soil electrical conductivity in soil profile of Weibei region were investigated to provide basis for soil salinization governance in the region. 【Method】A total of 28 farmland soil monitoring sites were selected in Fuping, Linwei, Pucheng, Dali and Heyang, where soil salinization was concentrated in Shaanxi. According to surface soil salt content, the study areas were divided into high salt content and low salt content areas. Soil electrical conductivity, water content and temperature were measured in August 2015 (summer), November 2015 (autumn), February 2016 (winter), and May 2016 (spring). 【Result】1) The soil electrical conductivity in high salinity area was in the order of summer > spring > autumn > winter, and in the low salinity area was in the order of spring > summer > autumn > winter. High salinity area was affected by various factors including water content, temperature, altitude and irrigation while low salinity area was greatly influenced by altitude and temperature. 2)

[收稿日期] 2017-04-28

[基金项目] 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-TZ-G10);国家科技基础性工作专项(2014FY210100)

[作者简介] 樊会敏(1991-),女,陕西宝鸡人,硕士,主要从事土壤盐碱化调控及机理研究。E-mail: fhuiminn@foxmail.com

[通信作者] 许明祥(1972-),男,陕西吴起人,研究员,博士,主要从事土壤质量演变与调控研究。
E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

Compared with soil water, temperature was more important in influencing electrical conductivity in soil profiles. The influence of temperature reduced with the increase of soil depth, while the influence of water increased with the increase of soil depth. 3) In summer, spring and winter, soil electrical conductivity was primarily influenced by water content, especially when water content was in the range of 15%—30%.

【Conclusion】 Great difference in soil electrical conductivity was observed among different seasons and soil layers, and soil water content and temperature were the main influencing factors.

Key words: soil electrical conductivity; seasonal variation; land salinization; Weibei region

土壤盐渍化是农业生态环境退化的重大问题之一,严重制约着我国农业和社会经济的发展^[1-3]。我国土壤盐渍化面积约占可利用土地面积的 4.88%,其中耕地盐渍化面积约占全国耕地面积的 6.62%^[4],可见盐碱地是我国重要的后备土地资源。渭北地区是陕西省的第二大粮仓^[5],但由于该地区存在地下水矿化度大、排水不畅等问题,导致农田土壤次生盐渍化存在季节性的变化。因此,研究渭北地区土壤盐渍化年内动态变化,对合理利用土地资源、促进国民经济发展具有重要意义。

土壤盐分剖面分布具有明显的年内和年际动态变化。土壤盐分运移受到土壤类型、地形、地下水位、气候和人为活动等的影响^[6-7]。土壤水、热、盐三者之间有着直接密切的影响,盐随水走,土壤水分带动盐分的运移,温度则是土壤盐分运移的内在动力^[8-9]。降雨和气温变化、耕作管理等人为活动的影响,将会导致土壤剖面盐分分布在年内发生明显的动态变化。目前有关土壤盐渍化年际动态变化研究侧重于从不同年限的土壤性质、气候、地下水埋深等方面,通过多年盐碱化动态研究,进行土壤盐碱化趋势预测和预防^[10-11];年内动态变化侧重于从土壤剖面展开研究,通过分析土壤剖面盐分离子的年内动态变化及相关影响因素,探讨人为活动(深松耕、秸秆还田、灌溉等)对土壤盐渍化的次生影响^[12-13]。年内动态研究区域主要集中在松嫩平原、河套地区、新疆干旱灌区等土壤盐碱化问题突出的地区^[14-16],而陕西渭北地区土壤盐碱化年内动态研究开展较少,区域土壤盐碱化动态变化规律尚不清楚。土壤电导率是表征土壤水溶性盐的一个重要指标,也是快速测定土壤含盐量的有效方法,用电导率可直接表征土壤盐渍化程度^[17-20]。本试验以陕西渭北南部地区为研究区,用土壤电导率表征土壤盐分状况,就土壤水分、温度、海拔等因素对土壤电导率的影响展开讨论,探究渭北南部地区农田土壤盐渍化年内动态变化,分析不同含盐量区、不同土壤剖面、不同季节下土壤电导率的影响因素,为渭北地区农田土壤

盐碱化的科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在陕西渭南市的临渭区、大荔县、富平县、蒲城县、合阳县,位于 34°33.24′~35°8.64′N, 109°18.98′~110°15.99′E,以上县区是渭北农田土壤盐碱化的典型区域,地下水含盐量高(5.06~17.21 g/L)。研究区属大陆性季风气候,年平均气温 11.3~13.6℃,年平均蒸发量普遍大于 1700 mm,年降水量为 500 mm 左右,干旱指数大于 3。研究区属盆地地貌,地势南北高、中间低、东西开阔,成土母质中的可溶性盐类会随水迁移至排水不畅的低平地区,发生土壤盐碱化。全区有交口抽渭和洛惠两大灌区,有洛河、渭河、黄河 3 条河过境,为研究区提供了充足的灌溉水源,全区多年平均径流量 8.88 亿 m³。

1.2 样地选取

在渭北土壤盐碱化集中的富平县、临渭区、蒲城县、大荔县、合阳县,通过走访调查,选择 28 个农田土壤作为监测点。按照已知盐分的高低程度,以表层(0~20 cm)土壤含盐量 2 g/kg 为界限,可将 28 个监测点分为低含盐量(<2 g/kg)和高含盐量(≥2 g/kg)各 14 个(图 1)。低含盐量采样点是在 2015 年 7 月走访调查过程中得知在近 5 年已发生过土壤盐碱化的区域,高含盐量采样点是采样时期(2015 年 8 月)已经存在土壤盐碱化的区域,通过监测这些点的土壤盐碱化动态变化,可以了解渭北土壤盐碱化的年内动态变化。

1.3 土样采集及指标测定

分别于 2015 年 8 月(夏季)、2015 年 11 月(秋季)、2016 年 2 月(冬季)、2016 年 5 月(春季),用土壤水分-温度-电导率仪(英国 Delta 公司,型号 HH2)对土壤电导率(mS/cm)、含水量(V/V,%)和温度(℃)进行野外监测,为了减小野外测定数据的误差,每个点分 6 层(0~10,10~20,20~30,30~

40,40~50,50~60 cm)测定。其中,20~40 cm 土层的温度、含水量、土壤电导率值由 20~30 cm 土层和 30~40 cm 土层加权平均得到,40~60 cm 土层的温度、含水量、土壤电导率值由 40~50 cm 土层和

50~60 cm 土层加权平均得到。在中国气象数据网下载研究区内降雨量和气温数据。每个监测点的海拔用手持 GPS 测得,每个监测点年内灌溉信息由 2015 年 7 月的走访调查获得。

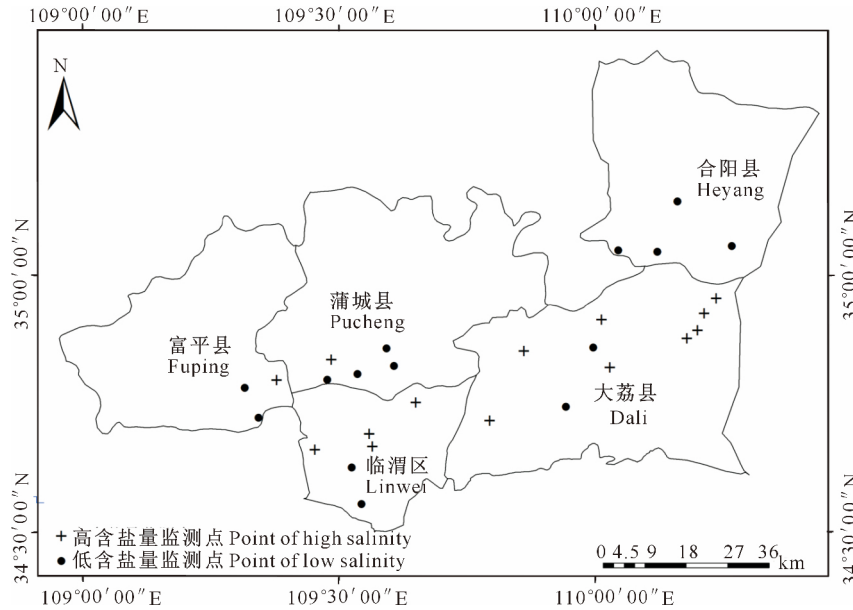


图 1 陕西渭北地区不同采样点的位置

Fig. 1 Location of sample points in Weiwei region

1.4 数据分析

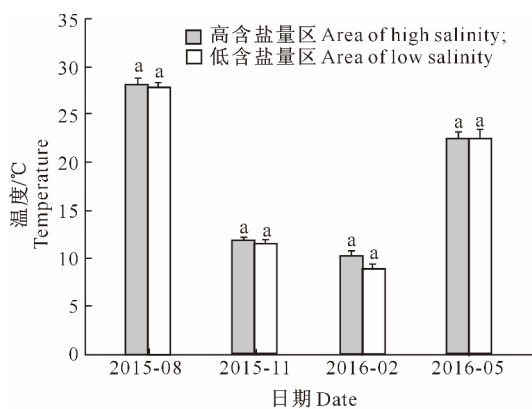
利用 Excel 2007 进行数据预处理, Sigmaplot 10.0 进行图形绘制。通过 Person 相关性分析表征土壤电导率与温度、含水量之间的相关关系。对定性指标赋值量化(如:有灌溉赋值 1,无灌溉赋值 0),采用一般线性回归模型 (GLM) 中的方差分量估计^[21],计算各影响因素在土壤电导率变异(方差)中

所占的百分比,用其表征不同土层间、不同季节、不同含盐量区各因子对土壤电导率的影响程度。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量、温度及降雨量、气温的年内动态

陕西渭北不同含盐量区土壤温度和含水量的变化见图 2 和图 3。



不同字母表示 2 个含盐量区间差异显著 ($P < 0.05$)。图 3 同 Different letters mean significant difference between high and low salinity areas ($P < 0.05$). Fig. 3 is same

图 2 陕西渭北不同含盐量区土壤温度的比较(0~60 cm 土层)

Fig. 2 Comparison of soil temperature at areas with different salt contents in Weiwei region

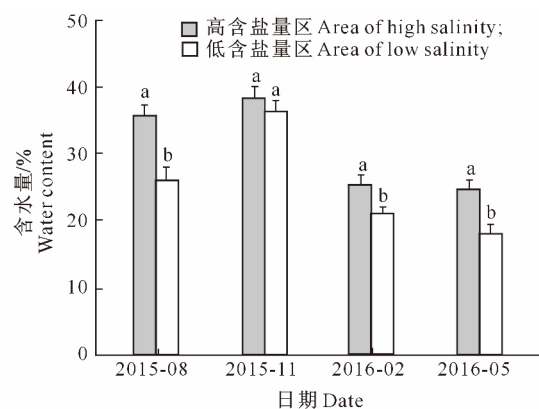


图 3 陕西渭北不同含盐量区土壤含水量的比较(0~60 cm 土层)

Fig. 3 Comparison of soil water content at areas with different salt contents in Weiwei region

高含盐量区和低含盐量区土壤剖面温度在 4 个季节均无显著性差异,土壤温度顺序表现为夏季>春季>秋季>冬季>(图 2)。秋季 0~60 cm 土层土壤含水量在高含盐量区和低含盐量区之间无显著差异,在其他季节两者之间均存在显著差异,0~60 cm 土层土壤含水量表现为秋季>夏季>冬季>春季。夏、秋两季土壤含水量比较接近,在 26%~

40%;春、冬两季土壤含水量比较接近,在 15%~30%(图 3)。降雨量在年内变化表现为 2015 年 11 月(49.8 mm)>2015 年 8 月(37.8 mm)>2016 年 5 月(29.9 mm)>2016 年 2 月(4.1 mm);气温在年内变化表现为 2015 年 8 月(26.08 °C)>2016 年 5 月(20.15 °C)>2015 年 11 月(8.03 °C)>2016 年 2 月(4.43 °C)(图 4)。

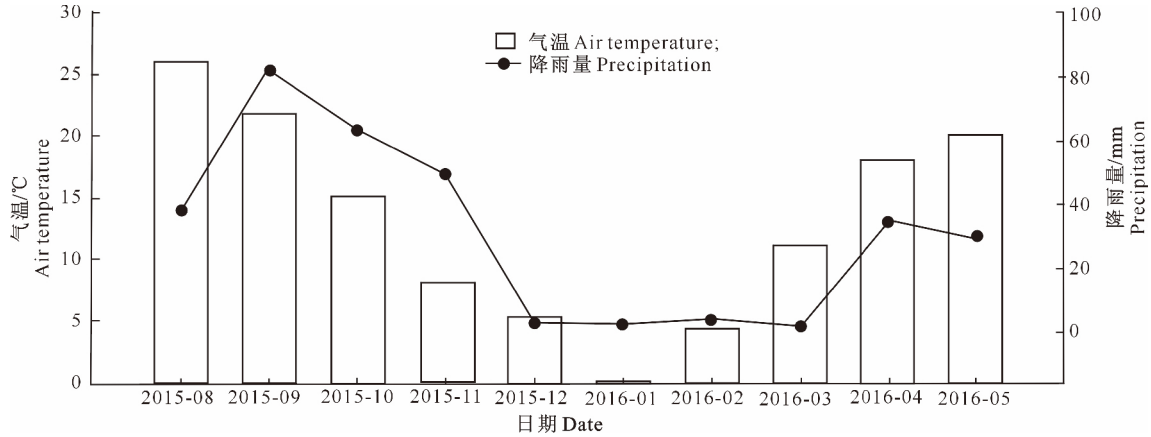


图 4 陕西渭北地区降雨量和气温的年动态变化

Fig. 4 Rainfall and air temperature variations within a year in Weibei region

2.2 土壤剖面含水量、温度和电导率的年变化

图 5 显示,与低含盐量区相比,高含盐量区夏季土壤电导率与秋、冬、春季存在明显差异,夏季电导率最高。在高含盐量区平均电导率由高至低的顺序依次为夏季(5.50 mS/cm)>春季(3.44 mS/cm)>秋季(3.10 mS/cm)>冬季(2.75 mS/cm);在低含盐量区平均电导率由高至低的顺序依次为春季

(2.39 mS/cm)>夏季(2.21 mS/cm)>秋季(1.81 mS/cm)>冬季(1.48 mS/cm)。0~60 cm 土层电导率总体上随着土层深度的增加呈增大趋势,这种变化趋势在低含盐量区更明显。在 10~20 cm 土层处,高含盐量区夏季的电导率值最大,为 6.24 mS/cm。

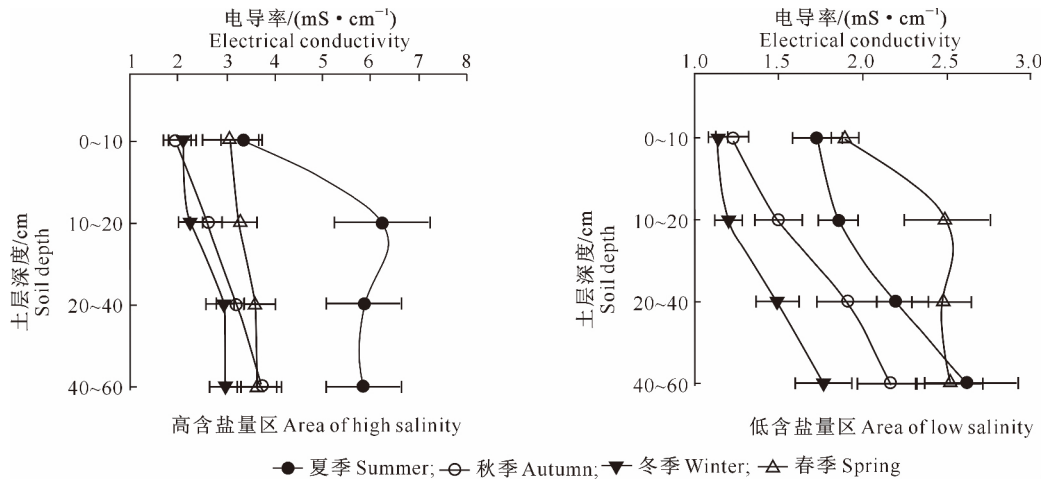


图 5 陕西渭北不同含盐量区土壤剖面电导率的动态变化

Fig. 5 Variations of electrical conductivity in soil profiles in Weibei region

图 6 显示,高含盐量区春、秋季土壤含水量随着土层深度的增加呈增加趋势,土壤含水量均以 40~60 cm 土层最大,分别为 26.05%,41.63%;夏、冬季

土壤含水量随土层深度增加呈先上升后降低趋势,均以 20~40 cm 土层最大,分别为 38.07%,28.69%。低含盐量区春季含水量随土层深度增加呈

先降低后上升趋势,以 20~40 cm 土层最小,为 15.89%;夏季土壤含水量随土层深度的增加呈增大趋势,以 40~60 cm 土层最大,为 28.20%;秋、冬季

土壤含水量随土层深度增加呈先上升后降低趋势,均以 20~40 cm 土层最大,分别为 37.71%, 24.24%。

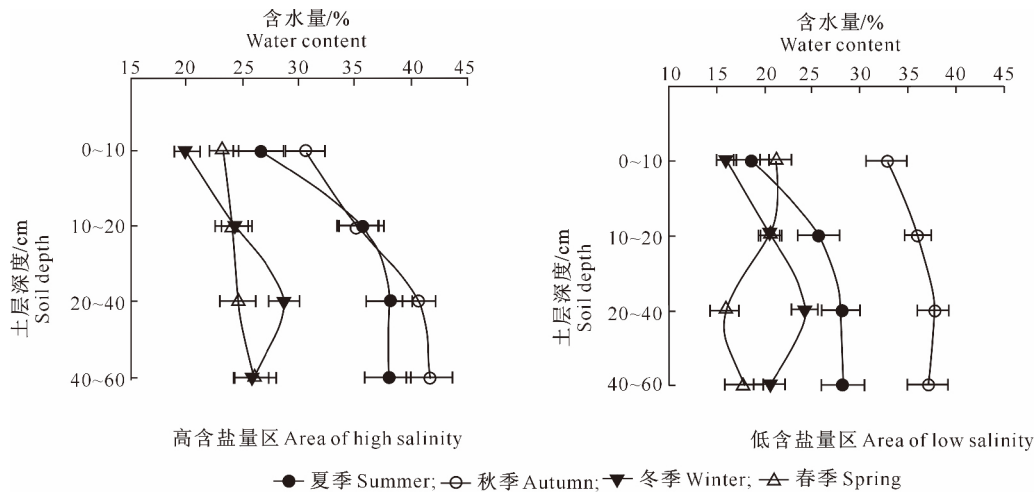


图 6 陕西渭北不同含盐量区土壤剖面含水量的动态变化

Fig. 6 Variations of water content in soil profiles in Weibei region

图 7 显示,高含盐量区春、夏季土壤温度随土层深度的增加呈减小趋势,最大值(0~10 cm 土层)分别为 25.65 和 31.82 °C;秋季土壤温度随土层深度的增加总体呈增加趋势,最大值(40~60 cm 土层)为 12.86 °C;冬季土壤温度随土层深度的增加先降后升,最大值(0~10 cm 土层)为 12.29 °C,最小值(20~40 cm 土层)为 9.19°C。低含盐量区春、夏季

土壤温度随土层深度的增加呈减小趋势,最大值(0~10 cm 土层)分别为 23.75 和 29.62 °C;秋、冬季土壤温度随土层深度的增加先降后升,秋季土壤温度最大值(40~60 cm 土层)为 12.35 °C,最小值(10~20 cm 土层)为 10.85 °C,冬季土壤温度最大值(0~10 cm 土层)为 10.12 °C,最小值(20~40 cm 土层)为 7.91 °C。

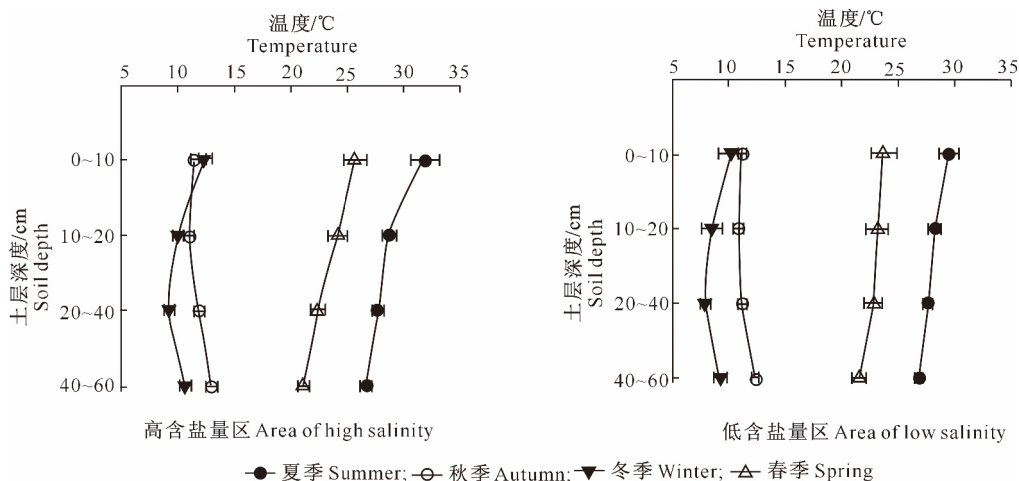


图 7 陕西渭北不同含盐量区土壤剖面温度的动态变化

Fig. 7 Variations of temperature in soil profiles in Weibei region

2.3 土壤电导率动态变化的影响因素

表 1 显示,土壤温度在各季节几乎未对电导率产生显著影响,春、冬季各层土壤电导率均受土壤含水量的显著或极显著影响。但从年内各土层电导率与温度和含水量相关性(表 2)来看,电导率受到含

水量和温度的显著或极显著影响,含水量对电导率的影响随着土层深度的增加而增大,温度对电导率的影响随土层深度的增加而减小。对 0~60 cm 土层而言,土壤含水量和温度对电导率的影响程度相当;但在耕作层(0~20 cm)和犁底层(20~40 cm),

温度与电导率的相关系数大于含水量与电导率;在 于温度与电导率。
底土层(40~60 cm),含水量与电导率的相关系数大

表 1 不同季节各土层土壤电导率与含水量、温度的相关性

Table 1 Correlation of soil electrical conductivity, water content and temperature in each soil profile in different seasons

季节 Seasons	指标 Index	土壤电导率 Soil electrical conductivity				
		0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~60 cm
夏季 Summer	土壤含水量 Soil water content	0.441*	0.135	0.338	0.302	0.337
	土壤温度 Soil temperature	0.215	0.174	0.081	0.046	0.146
秋季 Autumn	土壤含水量 Soil water content	0.149	0.340	0.493**	0.340	0.466*
	土壤温度 Soil temperature	-0.029	-0.058	0.222	0.456*	0.231
冬季 Winter	土壤含水量 Soil water content	0.681**	0.405*	0.620**	0.616**	0.637**
	土壤温度 Soil temperature	0.383*	0.373	0.250	0.182	0.290
春季 Spring	土壤含水量 Soil water content	0.389*	0.572**	0.602**	0.625**	0.750**
	土壤温度 Soil temperature	0.003	-0.139	-0.107	-0.165	-0.103

注:*,** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 置信度水平时相关性显著(双尾)。表 2 同。

Note: * and ** indicate that the correlation is significant at the 0.01 level and 0.05 level (2-tailed), respectively. The same table 2.

表 2 不同土层土壤电导率年平均值与含水量、温度的相关性

Table 2 Correlation of soil electrical conductivity, water content and temperature in each soil profile within a year

指标 Index	土壤电导率 Soil electrical conductivity				
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~60 cm
土壤含水量 Soil water content	0.214*	0.263**	0.337**	0.447**	0.367**
土壤温度 Soil temperature	0.570**	0.456**	0.344**	0.316**	0.377**

表 3 结果表明,夏季、冬季和春季土壤含水量对电导率的贡献率大于温度,秋季土壤温度对电导率的贡献率大于土壤含水量。土壤含水量对春季电导

率的贡献率最大,对秋季电导率的贡献率最小;土壤温度对秋季电导率的贡献率最大,对春季电导率的贡献率最小。

表 3 土壤温度和含水量对不同季节土壤电导率的贡献率

Table 3 Contributions of soil water content and temperature to electrical conductivity in different seasons %

指标 Index	贡献率 Contribution rate			
	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring
土壤含水量 Soil water content	92.59	29.09	66.67	95.45
土壤温度 Soil temperature	7.41	69.09	33.33	4.55

表 4 显示,从不同含盐量区来看,不同地区的电导率还可能受到地形因素和是否灌溉的影响。在高含盐量区电导率受到各因素的综合影响,各因素对

电导率的贡献率相差不大;在低含盐量区电导率主要受土壤温度和海拔的影响。

表 4 不同因素对陕西渭北不同含盐量区电导率的贡献率

Table 4 Contribution of each index to electrical conductivity in different salt areas %

不同区域 Different area	贡献率 Contribution rate			
	含水量 Water content	温度 Temperature	海拔 Altitude	有无灌溉 Whether irrigation
高含盐量区 Area of high salinity	23.08	26.15	23.08	29.23
低含盐量区 Area of low salinity	13.51	45.95	40.54	0.00

对土壤含水量影响电导率的范围作进一步分析,结果(图 8)表明,土壤电导率随着土壤含水量的增加总体呈增大趋势,土壤含水量在 15%~30%

(相当于土壤质量水含量 11%~21%)时,其对土壤电导率有明显影响。

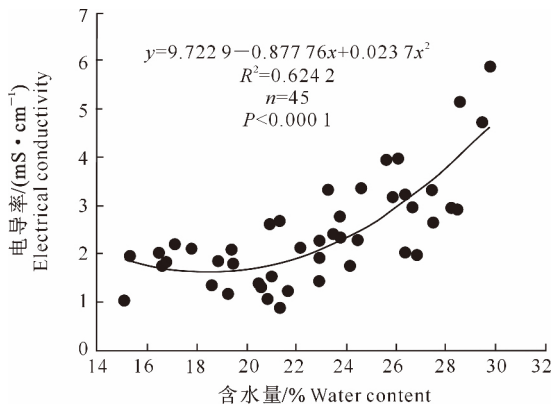


图 8 陕西渭北地区土壤含水量对电导率的影响

Fig. 8 Influence of soil water content on electrical conductivity in Weibei region

3 讨 论

土壤剖面中影响电导率动态变化的主要因素是温度和水分,水分的运动带动着盐分的运移,温度则为土壤水分运移提供动力。本研究中,土壤含水量与电导率平均值的相关关系随着土层深度的增加而增大;在各季节土壤温度对土壤电导率的影响总体不显著,土壤温度与土壤电导率平均值相关性随着土层深度的增加而减小。从两个研究区来看,高含盐量区电导率受各种因素的综合影响,低含盐量区电导率主要受温度和海拔的影响。有无灌溉在高含盐量区的贡献率大于低含盐量区,说明灌溉在一定程度上影响着土壤电导率。根据走访调查笔者发现,研究区农作物以冬小麦和夏玉米为主,每年在夏季(7—8月份)和冬季(12—1月份)有2次灌溉,灌溉方式主要是大水漫灌(占51.85%)和沟灌(占44.44%),灌溉水源包括引渭(占42.31%)、引黄(占23.08%)、引洛(占11.54%)、井水(占23.08%)灌溉,地下水水质约74.07%属于微咸水,约11.11%属于咸水。可见,研究区有较大面积的大水漫灌和较大比例的咸水灌溉,在排水不畅的低洼地区,大水漫灌容易发生土壤次生盐渍化^[22]。

盐随水走,土壤水分变化直接影响盐分的迁移。本研究中,土壤电导率整体上随土层深度的增加呈增大趋势,但高含盐量区夏季土壤电导率在10~20 cm土层最高,说明该土层处有盐分累积现象,这可能是由于高含盐量区夏季土壤水分在20~40 cm土层有最大值,且10~20 cm土层土壤温度大于20~40 cm土层,在蒸发条件下,20~40 cm土层的盐分随水上行,聚集到10~20 cm土层所致。剖面土壤

电导率与含水量平均值极显著相关,在四季中土壤含水量对电导率的贡献率也较大。刘广明等^[23]研究表明,在同一含盐量水平下,土壤电导率也会因含水量的不同而有差异。本研究结果表明,土壤含水量在15%~30%(相当于土壤质量含水量11%~21%)时对土壤电导率有明显影响。这与孙宇瑞^[24]的研究结果相似。因此当土壤含水量在此范围内时,要重视盐渍化土壤水分管理,保证排水通畅,防止涝灾引起的土壤次生盐渍化。

与受海水长期浸渍的滨海盐碱土^[25]、气候干旱及生态环境脆弱的黄河中上游盐渍土^[26]、地下水矿化度较高且地形低洼的东北半湿润-半干旱草原-草甸盐渍区^[27]相比,陕西渭北地区土壤盐渍化具有受季风气候影响的季节性消长特点。

本研究中,土壤电导率有着季节性变化特征,土壤电导率在高含盐量区呈现出夏季>春季>秋季>冬季的趋势,在低含盐量区呈现出春季>夏季>秋季>冬季的趋势。这可能与一年之内的降雨量和蒸发量有关。降雨一方面会对表层盐分有缓冲降低的作用^[6],另一方面又会引起低洼地区发生盐碱涝灾^[14]。高温会造成土表蒸发强烈,为补给蒸发消耗,土壤的毛管水吸力增强,加速水盐向上土表迁移^[28]。笔者调查发现,研究区2015年8月温度最高,在高温蒸发条件下,剖面土壤中的盐分随水上升,水去盐留,使得夏季高含盐量区土壤含盐量达到一年中最高值;5月份和8月份类似,蒸发高于11月和2月,盐分整体呈上行趋势,使得低含盐量区土壤含盐量在春季达到一年中最高值,夏季次之。2015年11月降雨量在一年中最高,这个季节由于强降雨造成的盐碱涝灾较突出;2月份属于研究区的冻土消融期,这个时期土壤水分运动比较活跃,消融后地下水位下降,造成电导率降低,使得冬季的电导率在一年中达到最小^[29]。

综上,针对渭北地区夏季和春季农田土壤盐分含量较高、盐分在10~20 cm土层有累积、表层土壤电导率受土壤温度影响较大的现象,为减轻土壤盐碱化危害,耕作管理上可考虑对土壤盐碱化较严重的农田以种植冬小麦为宜,夏季和春季宜种植浅根作物,同时推广秸秆覆盖,降低土壤温度,抑制盐分向表土迁移聚集^[30]。

4 结 论

1) 土壤电导率在高含盐量区呈现出夏季>春季>秋季>冬季的趋势,在低含盐量区呈现出春

季>夏季>秋季>冬季的趋势。

2) 高含盐量区电导率受到水分、温度、海拔、是否灌溉等因素的综合影响,低含盐量区主要受到温度和海拔的影响;在夏、春、冬季电导率均受水分影响较大。

3) 在 0~60 cm 土层土壤电导率主要受到土壤水分和温度的影响显著,温度对电导率的影响随着土层深度增加而减小,水分对电导率的影响随着土层深度的增加而增加。从年内尺度来看,水分对电导率的影响大于温度,土壤水分在 15%~30% 时对电导率具有明显影响。

[参考文献]

- [1] Herbert E R, Boon P, Burgin A J, et al. A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands [J]. *Ecosphere*, 2015, 6(10): 1-43.
- [2] 张晓光, 黄标, 梁正伟, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究 [J]. *土壤*, 2013, 45(2): 1332-1338.
Zhang X G, Huang B, Liang Z W, et al. Study on salinization characteristics of surface soil in western Songnen plain [J]. *Soils*, 2013, 45(2): 1332-1338.
- [3] Bezborodov G A, Shadmanov D K, Mirhashimov R T, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 138: 95-102.
- [4] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837-845.
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 837-845.
- [5] 白鹏翔. 陕西省渭北地区农田内涝盐碱灾害与治理对策 [J]. *陕西水利*, 2011(4): 7-8, 11.
Bai P X. Farmland waterlogging saline-alkaline disasters and countermeasures in Shaanxi Weibei region [J]. *Shaanxi Province Water Conservancy*, 2011(4): 7-8, 11.
- [6] 何斌. 湿润气候下滨海盐土水盐动态及影响因素研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
He B. Study on dynamic of soil moisture content and salinity and its influencing factors in coastal saline soil under humid climate [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [7] 王雪梅, 柴仲平, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 干旱区土壤盐渍化及其影响因子分析: 以渭干河库车河三角洲绿洲为例 [J]. *土壤*, 2009, 41(3): 477-482.
Wang X M, Chai Z P, Tashpolat · Tiyp, et al. Analysis of soil salinization and influential factors in arid region: a case study in the delta oasis of Weigan and Kuqa rivers [J]. *Soils*, 2009, 41(3): 477-482.
- [8] 郭全恩, 王益权, 郭天文, 等. 半干旱地区环境因素与表层土壤积盐关系的研究 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 957-963.
Guo Q E, Wang Y Q, Guo T W, et al. Relationship between environment factors and topsoil salt accumulation in semi-arid regions in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 957-963.
- [9] 朱宏伟, 夏军, 曹国栋, 等. 盐渍化弃耕地土壤盐分动态及其影响因素 [J]. *土壤*, 2013, 45(2): 1339-1345.
Zhu H W, Xia J, Cao G D, et al. Dynamic change of soil salinity in salinization abandoned farmland and affecting factors [J]. *Soils*, 2013, 45(2): 1339-1345.
- [10] 张霞, 李占斌, 李鹏. 洛惠渠灌区地下水动态变化规律研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(8): 223-226.
Zhang X, Li Z B, Li P. Investigation on dynamical rules of groundwater in Luohui trench irrigation district [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(8): 223-226.
- [11] 闫侃. 干旱条件下灌区地下水水盐动态分析及预测 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
Yan K. Analysis and prediction of water and salt dynamic in groundwater under drought condition [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2010.
- [12] 李芙蓉, 杨劲松, 吴亚坤, 等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响 [J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1101-1107.
Li F R, Yang J S, Wu Y K, et al. Effects of straw mulch at different depths on water-salt dynamic changes of coastal saline soil in north Jiangsu province [J]. *Soils*, 2013, 45(6): 1101-1107.
- [13] 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 等. 不同耕种时间下土壤剖面盐分动态变化规律及其影响因素研究 [J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 429-438.
Li B F, Xiong H G, Zhang J B, et al. Dynamic of soil salt in soil profiles different in cultivation age and its affecting factors [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 429-438.
- [14] 徐薇薇, 宋鹏, 乔木, 等. 塔里木盆地西南缘灌区低洼农田水盐运移特征 [J]. *中国沙漠*, 2014(1): 148-152.
Xu W W, Song P, Qiao M, et al. Soil water and salt migration of low-lying parts of irrigation area in the southwest Tarim Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2014(1): 148-152.
- [15] 张红, 杨建锋, 章光新, 等. 苏打盐渍土剖面盐分动态变化特征分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2007(4): 117-122.
Zhang H, Yang J F, Zhang G X, et al. Analysis of salt dynamic characters in saline-sodic soil sections [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007(4): 117-122.
- [16] 娄婷. 河套灌区土壤盐分分布及其影响因素初步分析 [D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2015.
Lou T. Preliminary study on soil salinity distribution and the factors in Hetao irrigation district [D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2015.
- [17] 韩跃, 马风云, 解国磊, 等. 黄河三角洲盐碱地混交林土壤电导率的空间异质性 [J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(5): 84-89.
Han Y, Ma F Y, Xie G L, et al. Spatial heterogeneity of soil e-

- lectrical conductivity in a mixed plantation of the Yellow River Delta Saline Land [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(5): 84-89.
- [18] 白慧东,刘焱选,初振东,等. 滨海平原区土壤电导率的空间变异规律研究 [J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2007, 25(5): 571-574.
- Bai D H, Liu Y X, Chu Z D, et al. Research on spatial variability of soil electrical conductivity in Coastal Plain [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2007, 25(5): 571-574.
- [19] Ramsis B S, Clause J O, Robert W F. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization [J]. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7: 46.
- [20] Heydari N, Gupta A D, Loof R. Salinity and sodicity influences on infiltration during surge flow irrigation [J]. *Irrigation Science*, 2001, 20: 165-173.
- [21] 许明祥,王征,张金,等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应 [J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5405-5415.
- Xu M X, Wang Z, Zhang J, et al. Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5405-5415.
- [22] 管孝艳,王少丽,高占义,等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系 [J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1202-1210.
- Guan X Y, Wang S L, Gao Z Y, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1202-1210.
- [23] 刘广明,杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究 [J]. *土壤通报*, 2001, 32(S1): 85-87.
- Liu G M, Yang J S. Study on the correlation of soil salt content with conductivity and soil water content [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(S1): 85-87.
- [24] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2000(4): 39-41.
- Sun Y R. Experimental survey for the effects of soil water content and soil salinity on soil electrical conductivity [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000(4): 39-41.
- [25] 胡纪常,祝寿泉. 滨海盐渍土的碱化问题 [J]. *土壤学报*, 1981, 18(3): 281-289.
- Hu J C, Zhu S Q. On the alkalization of salt affected soils in Coastal Region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1981, 18(3): 281-289.
- [26] 魏博娴. 中国盐碱土的分布与成因分析 [J]. *水土保持应用技术*, 2012(6): 27-28.
- Wei B X. The distribution of saline-alkali soil and cause analysis in China [J]. *Application Technology of Soil and Water Conservation*, 2012(6): 27-28.
- [27] 温利强. 我国盐渍土的成因及分布特征 [D]. 安徽合肥: 合肥工业大学, 2010.
- Wen L Q. Origin and distribution characteristics of saline soil in China [D]. Hefei, Anhui: Hefei University of Technology, 2010.
- [28] Hillel D E, Parlange J Y. Wetting front instability in layered soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36(5): 697-702.
- [29] 罗金明,邓伟,张晓平,等. 冻融季节苏打盐渍土的水盐变化规律 [J]. *水科学进展*, 2008(4): 559-566.
- Luo J M, Deng W, Zhang X P, et al. Variation of water and salinity in sodic saline soil during frozen-thawing season [J]. *Advances in Water Science*, 2008(4): 559-566.
- [30] 孙博,解建仓,汪妮,等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐动态的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2011(4): 180-184.
- Sun B, Xie J C, Wang N, et al. Effect of straw mulching on water-salt dynamic of saline soil [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011(4): 180-184.