磁化水灌溉条件下黄河三角洲刺槐林地土壤盐分时空分布特征及变化规律

阎腾飞[1], 刘秀梅[2,3], 刘合满[1], 王华田[2], 洪 弦[1], 贺 闯[1], 王壮壮[1]

(1. 信阳农林学院, 河南 信阳 464000; 2. 山东农业大学
黄河下游森林培育国家林业局重点实验室, 山东 泰安 271000; 3. 上海市环境学校, 上海 200135)

摘 要: [目的] 探明磁化水灌溉条件下土壤盐分含量时空分布特征及变化规律,为滨海盐碱地磁化水灌溉技术提供理论依据。[方法] 以黄河三角洲东营市河口区新营造刺槐人工林地为研究对象,分析了淡水灌溉(FW)、磁化淡水灌溉(MFW)、地下浅表层微咸水灌溉(GW)和磁化地下浅表层微咸水灌溉(MGW)4种措施下土壤盐分含量的时空分布特征及变化规律。[结果] 2种磁化处理灌溉方式均能降低滨海盐碱地土壤盐分含量;不同灌溉处理的土壤盐分含量均值皆表现出:GW>CK>FW>MGW>MFW,土壤盐分含量随土层深度增加而降低。[结论] ①磁化水灌溉能够降低土壤盐分表聚,尤其在春、秋季适时采用磁化水灌溉,能够抑制土壤返盐,在 20—40 cm 土层效果更明显一些。②通过磁化地下浅表层微咸水进行适度灌溉,可以为该地区节约用水资源,有效地促进盐碱地土壤脱盐。

关键词: 磁化水; 滨海盐碱地; 黄河三角洲; 刺槐林地; 土壤盐分; 时空分布

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2019)05-0135-08 **中图分类号**: S151, S156.4

文献参数: 阎腾飞, 刘秀梅, 刘合满, 等. 磁化水灌溉条件下黄河三角洲刺槐林地土壤盐分时空分布特征及变化规律[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 135-142. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.019; Yan Tengfei, Liu Xiumei, Liu Heman, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and variation laws of soil salinity at *Robinia pseudoacacia* forest land in yellow river delta irrigated with magnetized water [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 135-142.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Variation Laws of Soil Salinity at *Robinia Pseudoacacia* Forest Land in Yellow River Delta Irrigation with Magnetized Water

Yan Tengfei[1], Liu Xiumei[2,3], Liu Heman[1], Wang Huatian[2], Hong Xuan[1], He Chuang[1], Wang Zhuangzhuang[1]

(1. *Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang He'nan* 464000, *China*;
2. *Key Laboratory of State Forestry Administration for Silviculture of the Lower Yellow River, Shandong Agriculture University, Taian, Shandong* 271000, *China*; 3. *Shanghai Environmental Science School, Shanghai* 200135, *China*)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial distribution characteristics and variation of soil salinity irrigated with magnetized water was explored in order to provide a theoretical basis for the magnetized water irrigation technology of coastal saline-alkali soil. [Methods] The coastal saline-alkali land of a *Robinia pseudoacacia* plantation in Dongying City was used as the research site to analyze the spatiotemporal distribution and evolution of soil salinity under four measures of freshwater irrigation (FW), magnetized freshwater irrigation (MFW), subsurface shallow brackish water irrigation (GW), and magnetized subsurface shallow brackish water irrigation (MGW). [Results] The two types of magnetized irrigation treatments (MFW and MGW) reduced the soil salinity in the coastal saline-alkali soil. The average salt content of the different irrigation

收稿日期: 2019-03-18 **修回日期**: 2019-05-07
资助项目: 国家林业局 948 项目"高矿化度地下水磁化脱盐技术引进及其在林业灌溉中的应用"(2011-2015); 山东省农业重大应用技术创新计划项目"磁化水灌溉技术在农业节肥节水及面源污染防治中的应用研究与示范"(鲁财农指[2016]36 号)
第一作者: 阎腾飞(1986—),男(汉族),河南省漯河市人,讲师,硕士研究生,主要从事人工林经济林栽培研究。E-mail: 632847311@qq.com。
通讯作者: 刘秀梅(1988—),女(汉族),山东省滨州市人,博士研究生,主要从事林木生理生态研究。E-mail: 874158791@qq.com。

treatments in the different soil layers followed the order: GW > CK(no irrigation) > FW > MGW > MFW and the soil salinity in the different soil layers decreased with an increase of soil depth. [Conclusion] ① Magnetization treatment significantly reduced the soil salt accumulation in the surface soil layer. Especially in the spring and autumn, the use of magnetized water irrigation can inhibit the return of salt to the soil, with the effect being more obvious in the 20—40 cm soil layer. ② Moderate irrigation by magnetizing subsurface shallow brackish water could save water resources for the region and effectively promote soil desalination in saline-alkali soils.

Keywords: magnetized water; coastal saline-alkali land; the Yellow River delta; *Robinia pseudoacacia* forest land; soil salinity; spatial and temporal distribution

中国是一个水资源相对匮乏的国家,人均淡水资源占有量及单位土地面积水资源占有量均低于世界平均水平。提高农业水资源利用效率和开发新的农业水源成为缓解农业用水供需矛盾的主要途径[1]。中国拥有丰富的地下咸水资源,合理开发利用微咸水资源可以有效缓解淡水资源紧缺的矛盾。有研究表明[2-4],利用微咸水灌溉不仅不会影响作物生长,还能提高部分作物和果树的产量。然而长期使用微咸水灌溉也面临着土壤可溶性盐分含量过高,使用不当会导致土壤退化、污染水源等问题,给农业环境和生态系统带来一系列严重后果。因此,开展微咸水灌溉应用技术研究,对于促进农业的安全稳定和可持续发展具有重要意义。磁化水处理技术是当前开展盐碱地治理的一项较新技术,在世界各国得到了广泛的应用[5-6]。相关研究表明,磁化水灌溉能够显著改善盐渍化土壤脱盐效果,增强植物抗逆性,提高作物产量和水分利用效率;对高矿化度地下水磁化后灌溉,能有效减轻对植物的伤害,促进根系生长,活化土壤养分,提高作物产量和质量[5,7-8]。在中国,关于磁化水技术在农林业中的应用,目前尚属初级阶段,研究的重点主要集中在对土壤的脱盐效果、作物生理生化特性和产量影响、水分利用效率等方面[9-11]。因此,了解磁化水灌溉条件下的土壤水盐运移规律,能更好地推广应用磁化技术。国内外学者对盐渍土水盐迁移规律采用传统统计学和地统计学的方法进行了大量的研究,管孝艳等[12]结合 GIS 技术分析了河套灌区沙壕渠土壤电导度 EC 值的空间变异特征及地下水埋深对土壤盐分分布的影响,宗含等[13]研究了膜下滴灌对盐荒地土壤盐分变化规律,李娟等[14]研究了不同排水模式对盐碱地土壤改良效应的影响,而关于磁化水灌溉对土壤水盐时空变化规律的研究未见报道。

黄河三角洲地区属于典型的滨海盐碱地类型,由于自然和人为活动等因素,造成该区土地次生盐碱化严重、淡水资源匮乏,使得植被生态系统脆弱,严重制约着当地农林业的发展[15-16]。本试验以黄河三角洲山东省东营市河口区新营造的刺槐林地为研究对象,利用不同处理的水源进行灌溉,通过分析土壤盐分的时空分布及变化规律,以期为滨海盐碱地磁化水灌溉技术提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于山东省东营市河口区新户镇北李村刺槐人工林基地(118°34′08″N,37°44′37″E)。属暖温带大陆性季风气候,雨热同季,四季分明。年平均气温 12.5 ℃,年降水量 550～600 mm,多集中在夏季,7—8 月份降水量约占全年降水量的一半,盐渍化黏壤土,地下 10 m 以上浅表层地下水矿化度 7.4 g/L。

1.2 试验设计

2015 年 4 月初,在 467 hm^2 刺槐人工林内西北方向选择当年刺槐新造林地作为试验地,选用 2 a 生幼树当年造林,保存率 95%,试验地块面积 90 m×240 m,林木栽植株行距 2 m×2 m,南北行,靠近外围 2 行为保护行。以自来水作为灌溉淡水。在试验地南头打 10 m 深水井,引地下水作为浅表层微咸水。利用磁化器(型号 A400p,出水量 20 m^3/h,磁感应强度 1400Gs,Magnetic Technologies L. L. C.,迪拜)分别接入两种灌溉水磁化灌溉。沿树行铺设滴灌设施,沿主管道引 3 m 长滴管,每个滴管 5 个滴头,沿树盘环形铺设,每次灌溉持续灌水 2 h,春秋旱季 10 d 灌溉一次,雨季不灌溉。沿东西向每隔 22.5 m 设置一试验处理,分别为淡水灌溉(FW)、磁化淡水灌溉(MFW)、磁化地下浅表层微咸水灌溉(GW)、地下浅表层微咸水灌溉(MGW)。在试验地旁边选相同面积地块采用相同采样方法作为对照,对照不采用任何灌溉方式(自然降水)。

1.3 采样及测定方法

研究区面积约为 2.16 hm^2,矩形取样,沿东西向 5.5,16.5,27.5,38.5,53.9,64.9,75.9,86.9 m 处,南北向 10,30,50,70,90,110,130,150,170,190,210,230 m 处,采用网格法取样,共 96 个取样点,均为单点采样。采样时间分别为 4 月 10 日,4 月 25

日,5 月 10 日,5 月 25 日,6 月 20 日,8 月 20 日,9 月 20 日。土壤盐分测定采用雷磁电导仪(DDS-308A,上海雷磁)测定土壤浸提液(土水比 1∶5)的电导度,用 LY/T1215-1999 标准计算全盐含量。

1.4　数据处理

相对偏差[17]:测点 i 处测定时间 j 时土壤水分(S_{ij})相对偏差(δ_{ij})的计算公式为

$$\delta_{ij}=(S_{ij}-\overline{S}_j)/\overline{S}_j \tag{1}$$

式中:$S_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}S_{ij}$,$n$——测点总个数。

任一测点 i 处土壤盐分平均相对偏差计算公式为:

$$\overline{\delta}_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\delta_{ij} \tag{2}$$

式中:m——试验测点总次数。

任一测点 i 处土壤盐分平均相对偏差的标准偏差($\sigma(\delta_i)$)计算公式为:

$$\sigma(\delta_i)=\sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{j=1}^{m}(\delta_{ij}-\delta_i)^2} \tag{3}$$

采用 3 倍标准差的原则对数据序列的特异值进行异常检验和修正[18]。运用 SPSS19.0 对土壤盐分数据进行描述统计分析。利用 surfer14.0 地学制图软件绘制土壤盐分空间分布等值线图。

2　结果与分析

2.1　不同层次土壤盐分含量的统计特征值

由表 1 可知,0—20 cm 土壤盐分含量平均值变化范围为 2.75～7.77 g/kg,在 4 月 25 日达到最大值;从变异系数来看,5 月 25 日表现为强变异性,其他各日期均表现为中等变异强度。20—40 cm 土壤盐分含量平均值变化范围为 2.77～5.78 g/kg,在 4 月 25 日达到最大值;从变异系数来看,各日期均表现为中等变异强度。40—60 cm 土壤盐分含量平均值变化范围为 2.69～5.14 g/kg,在 4 月 25 日达到最大值;从变异系数来看,各日期均表现为中等变异强度。各土层各日期土壤盐分含量值分布均呈正态分布。

表 1　不同层次土壤盐分统计特征值

取样深度	日期	分布类型	最大值/(g·kg^{-1})	最小值/(g·kg^{-1})	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数	$p(K-S)$
0—20 cm	0410	正态	12.8	1.71	6.66	2.59	0.38	−0.62	0.39	0.278
	0425	正态	14.4	2.09	7.77	3.10	0.45	−0.38	0.46	0.447
	0510	正态	14.25	1.59	6.81	3.07	0.58	−0.29	0.47	0.350
	0525	正态	14.90	1.76	7.11	2.66	−0.42	0.91	1.14	0.172
	0620	正态	8.57	1.19	3.67	1.75	0.01*	−0.53*	0.51	0.819*
	0820	正态	6.85	0.85	2.75	1.39	1.00	0.60	0.51	0.139
	0920	正态	8.78	1.17	3.96	1.80	0.76	0.06	0.52	0.456
20—40 cm	0410	正态	10.4	1.51	5.16	1.98	0.45	−0.66	0.38	0.326
	0425	正态	12.25	2.24	5.78	2.56	0.86	0.08	0.45	0.275
	0510	正态	11.00	1.24	4.90	2.32	0.74	0.06	0.49	0.350
	0525	正态	9.63	2.25	5.05	1.74	0.65	−0.15	0.35	0.393
	0620	正态	7.98	1.27	3.93	1.61	0.61	−0.29	0.42	0.384
	0820	正态	5.82	1.00	2.77	1.19	0.78	0.10	0.46	0.367
	0920	正态	6.78	1.05	3.63	1.34	0.36	−0.47	0.42	0.788
40—60 cm	0410	正态	9.14	1.31	4.75	1.86	0.48	−0.56	0.41	0.500
	0425	正态	11.40	1.55	5.14	2.25	0.96	0.68	0.45	0.243
	0510	正态	10.85	1.61	4.73	2.45	1.12	0.35	0.57	0.06
	0525	正态	8.99	1.48	4.43	1.60	0.63	0.20	0.36	0.395
	0620	正态	8.29	1.54	4.15	1.67	0.66	−0.14	0.47	0.407
	0820	正态	5.87	0.71	2.69	1.20	0.79	0.09	0.47	0.162
	0920	正态	8.03	1.07	3.73	1.48	0.86	0.40	0.40	0.265

注:* 表示对数转化后的值。

2.2　不同处理土壤盐分含量的时空稳定性分析

将不同土壤层次不同灌溉处理土壤盐分含量平均相对偏差,每种灌溉处理 24 个采样点由小到大排列,描述其时间稳定性,其中误差线为各测点标准差(见图 1)。由图 1,图 2 和图 3 可以看出,淡水灌溉条件下 0—20,20—40,40—60 cm 各土层土壤盐分含量平均相对偏差变化范围为 −36.4%～95.8%,−45.4%～68.7%,−36.5%～70%,标准差变化范围为 11.8%～56.3%,11.8%～53.6%,15.88%～47.38%。磁化淡水灌溉条件下 0—20,20—40,40—60 cm 各土层土壤盐分含量平均相对偏差变化范围为 −30.5%～60.9%,−39.6%～61.2%,−38%～62.5%,标准差变

化范围为 14.2%～67.6%，9.7%～63.25%，11.2%～69.1%。这表明磁化淡水灌溉相较于淡水灌溉各土层土壤盐分含量时间稳定性较强，各测点土壤盐分含量数据离散程度较大。淡水灌溉和磁化淡水灌溉处理条件下各土层土壤盐分含量数据之间时间稳定性和数据离散度差异不明显。

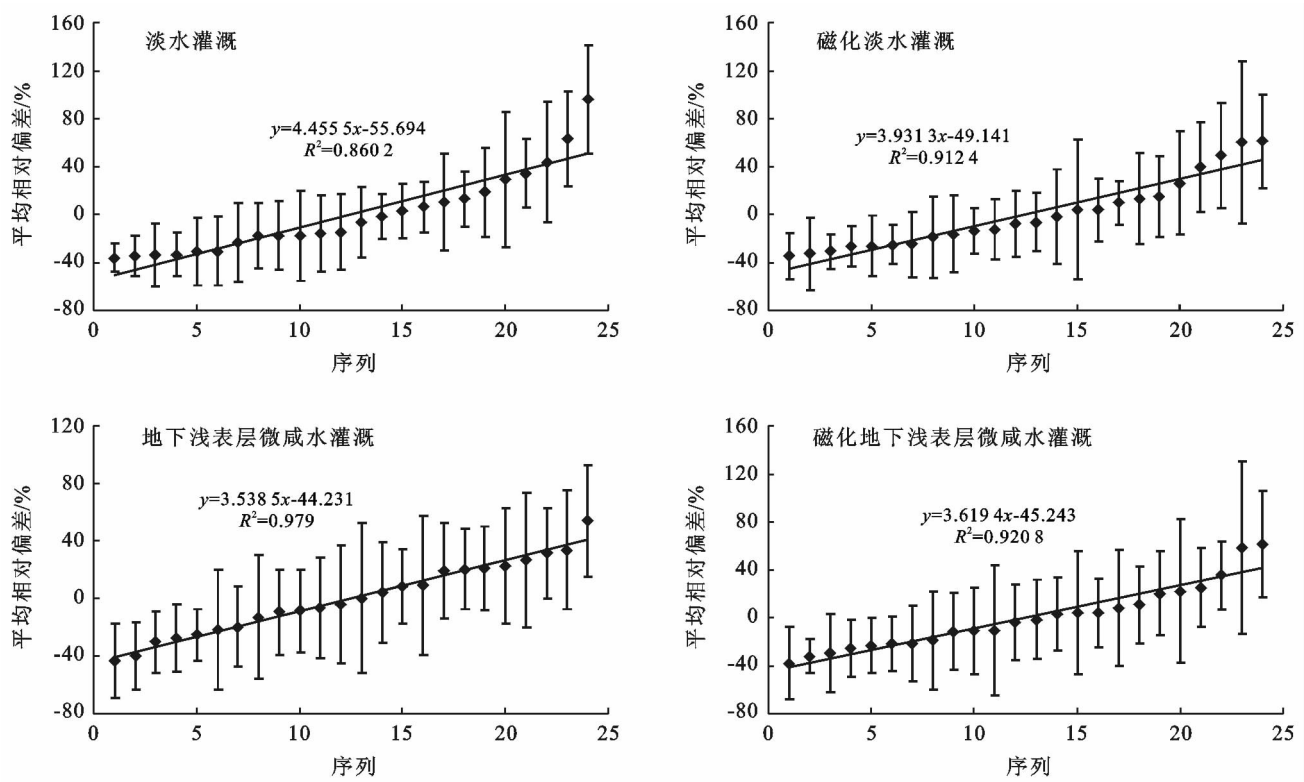


图 1 不同灌溉处理 0－20 cm 土层土壤盐分值平均相对偏差变化

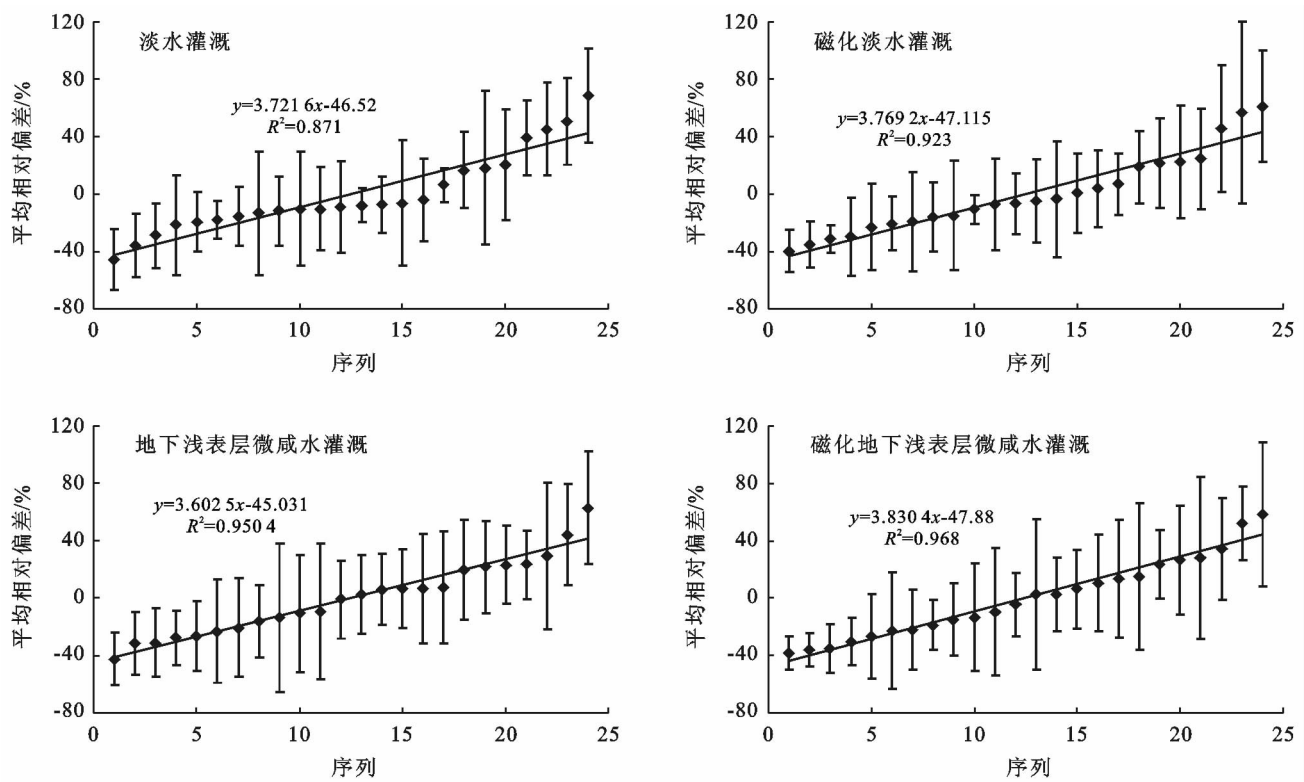


图 2 不同灌溉处理 20－40 cm 土层土壤盐分值平均相对偏差变化

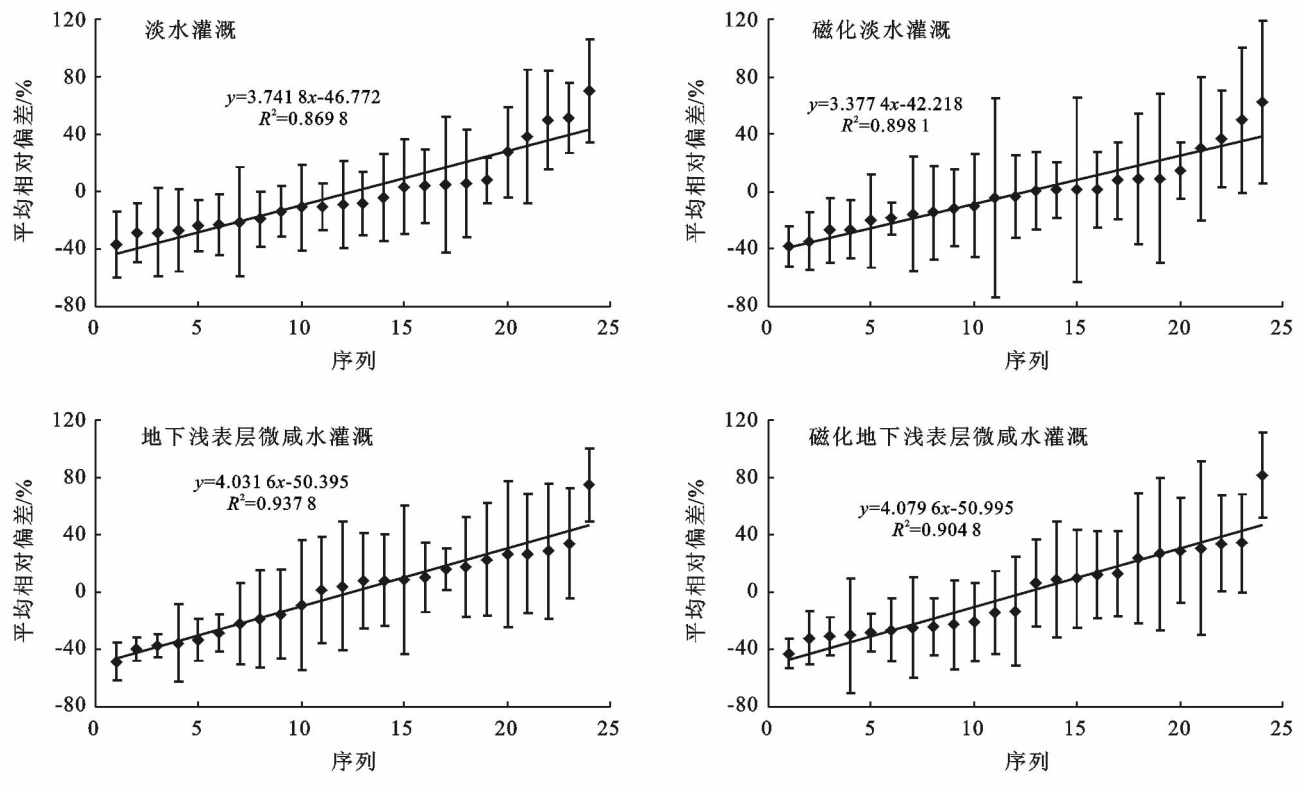


图 3　不同灌溉处理 40—60 cm 土层土壤盐分值平均相对偏差变化

地下浅表层微咸水灌溉条件下 0—20,20—40,40—60 cm 各土层土壤盐分含量平均相对偏差变化范围为−38.2%～61%,−38.3%～58.1%,−42.7%～81.3%,标准差变化范围为 14.6%～72.3%,11.3%～56.4%,10.5%～60.5%。磁化地下浅表层微咸水灌溉条件下 0—20,20—40,40—60 cm 各土层土壤盐分含量平均相对偏差变化范围为−43.6%～53.9%,−42.4%～62.5%,−48.1%～74.4%,标准差变化范围为 18.1%～51.9%,18.3%～51.8%,8.26%～51.5%。这表明磁化地下浅表层微咸水灌溉较地下浅表层微咸水灌溉各土层土壤盐分含量时间稳定性较强,各测点土壤盐分含量数据离散程度较小。地下浅表层微咸水灌溉和磁化地下浅表层微咸水灌溉条件下各土层土壤盐分含量随土层深度增加时间稳定性减弱,数据离散程度随土层深度增加减小。

由图 4 可以看出,不同灌溉处理不同层次土壤盐分含量均值均表现出:GW＞CK＞FW＞MGW＞MFW,不同土层土壤盐分含量随着土层深度增加逐渐降低。这表明磁化处理能够显著降低各土层土壤盐分含量,提高土壤盐分淋溶。磁化淡水灌溉处理相较淡水灌溉处理 3 个土壤层次上分别降低了 12.5%,12.3%,9.2%,磁化浅表层微咸水灌溉处理相较浅表层微咸水灌溉处理 3 个土壤层次上分别降低了 10.8%,10.8%,9.2%。这表明磁化处理对于土壤盐分含量的淋溶作用随着土壤深度的增加逐渐降低。这与王渌[13]、李夏[11]等的研究结果是一致的。

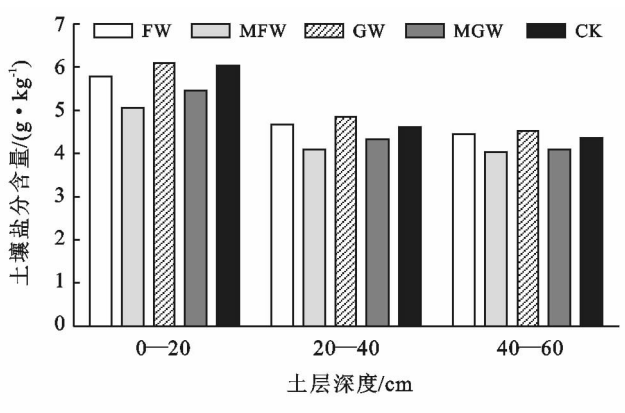


图 4　不同灌溉处理各土层土壤盐分含量

由图 5 可以看出,4 种灌溉处理条件下各土层土壤盐分含量季节动态变化规律均表现出春季升高夏季降低秋季缓慢回升的变化趋势。这是由于春季气温逐渐升高,土壤水分蒸发上升,土壤盐分随着水分蒸发上移,土壤盐分含量增大;进入夏季以后,降水增多,盐分随着降水下移;进入秋季以后,土壤水分蒸发回升,盐分重新上移,土壤盐分含量升高。从土壤盐分含量值上来看,淡水灌溉和浅表层微咸水灌溉处理

各土层土壤盐分含量在春季 0—20 cm＞20—40 cm＞40—60 cm，在夏季 40—60 cm＞20—40 cm＞0—20 cm，在秋季 0—20 cm 土壤盐分含量最高，明显大于其它两个层次。磁化淡水和磁化浅表层地下水灌溉处理土壤盐分含量值在 4 月 10 日和 5 月 25 日表现出 0—20 cm＞20—40 cm＞40—60 cm，在 4 月 25 日、5 月 10 日和 9 月 20 日表现出 0—20 cm＞40—60 cm＞20—40 cm，在 6 月 20 日表现出 40—60 cm＞20—40cm＞0—20 cm。在 4 月 25 日、5 月 10 日和 9 月 20 日都表现出了 20—40 cm 土层土壤盐分含量较低的现象，这表明磁化处理措施在春、秋季均能有效地降低 20—40 cm 土层土壤盐分含量。

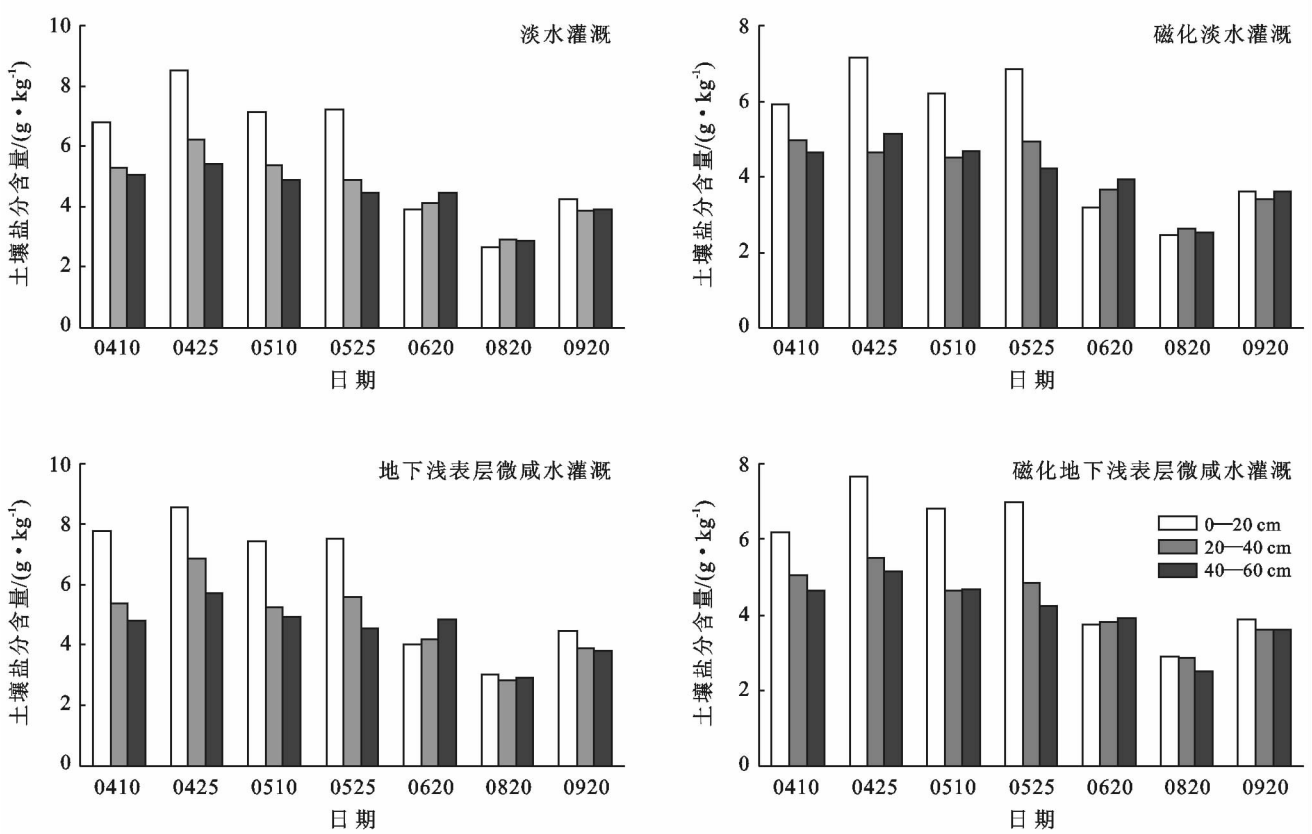


图 5 不同灌溉处理各土层土壤盐分含量的季节变化

对不同层次土壤盐分分布特征进行相关性分析(见表 2)，可知不同层次与土壤盐分分布具有显著的正相关关系。因此，为了更好地描述滨海盐碱地不同灌溉方式处理条件下土壤盐分时空分布特征，以 0—20 cm 土壤层次盐分分布绘制不同时期土壤盐分分布特征的等值线图(图 6)。

由图 6 可以看出，表层土壤盐分含量空间分布在 4 月 10 日时磁化处理区域盐分含量明显降低，随着春季气温升高，地表水分蒸发增强，盐分上行，部分区域出现了“积盐”现象；进入雨季后，降水增多，土壤盐分下压，磁化处理区域土壤盐分降低；随着雨季的深入，盐随水走，盐分分布特征“鱼眼”区域增多(高土壤盐分含量区域)，各处理区域间分布无规则；进入秋季以后，磁化灌溉处理措施实施，处理区土壤盐分含量开始下降。

表 2 不同土层土壤盐分含量均值相关性

土壤深度/cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
0—20	1	0.873**	0.745**
20—40	0.873**	1	0.845**
40—60	0.745**	0.845**	1

注：** 表示在 0.01 水平上显著相关。

3 讨 论

液态水经过磁场切割的磁化处理后，可以明显降低灌溉水含盐量，从而降低土壤盐分含量[7,9,19]。本研究中，2 种磁化灌溉处理措施对滨海盐碱地土壤盐分都表现出了明显的脱盐效果，显著地降低土壤中各层次的土壤含盐量，尤其在春、秋季对 20—40 cm 土层土壤盐分脱盐效果最为明显，这与卜东升等[20]的研究结果相一致。这表明磁化灌溉水处理技术能够有效地降低滨海盐碱地土壤盐分含量，通过磁化地下

浅表层微咸水进行适度灌溉,可以有效地为该地区节约用水资源,提高农业产能效益。

通常土壤盐分的时空分布是一个相对稳定性结构[21],具有一定的空间依赖性。在本研究中,由于采用了 4 种不同的灌溉处理措施,各土壤层次土壤盐分分布特征值都表现为中等变异强度,磁化灌溉处理措施对土壤盐分的时空分布稳定性产生了一定的影响,这可能也是导致局部区域出现土壤“积盐”现象的原因。从土壤盐分的空间分布来看,在磁化处理灌溉水后,磁化处理区域起到了良好的脱盐效果,随着时间的推移和水分蒸发等因素的综合影响,磁化处理区域对土壤表层脱盐效果降低,但在 20—40 cm 土层深度仍表现出了较好的脱盐效果。进入雨季后,降雨量增大,磁化灌溉措施暂停,但磁化区域相较未磁化灌溉区域仍表现出了较好的土壤盐分含量的稳定性,磁化处理显示出了较好的土壤盐分空间结构稳定性。在秋季,磁化水处理区域土壤盐分含量明显低于未处理区域。

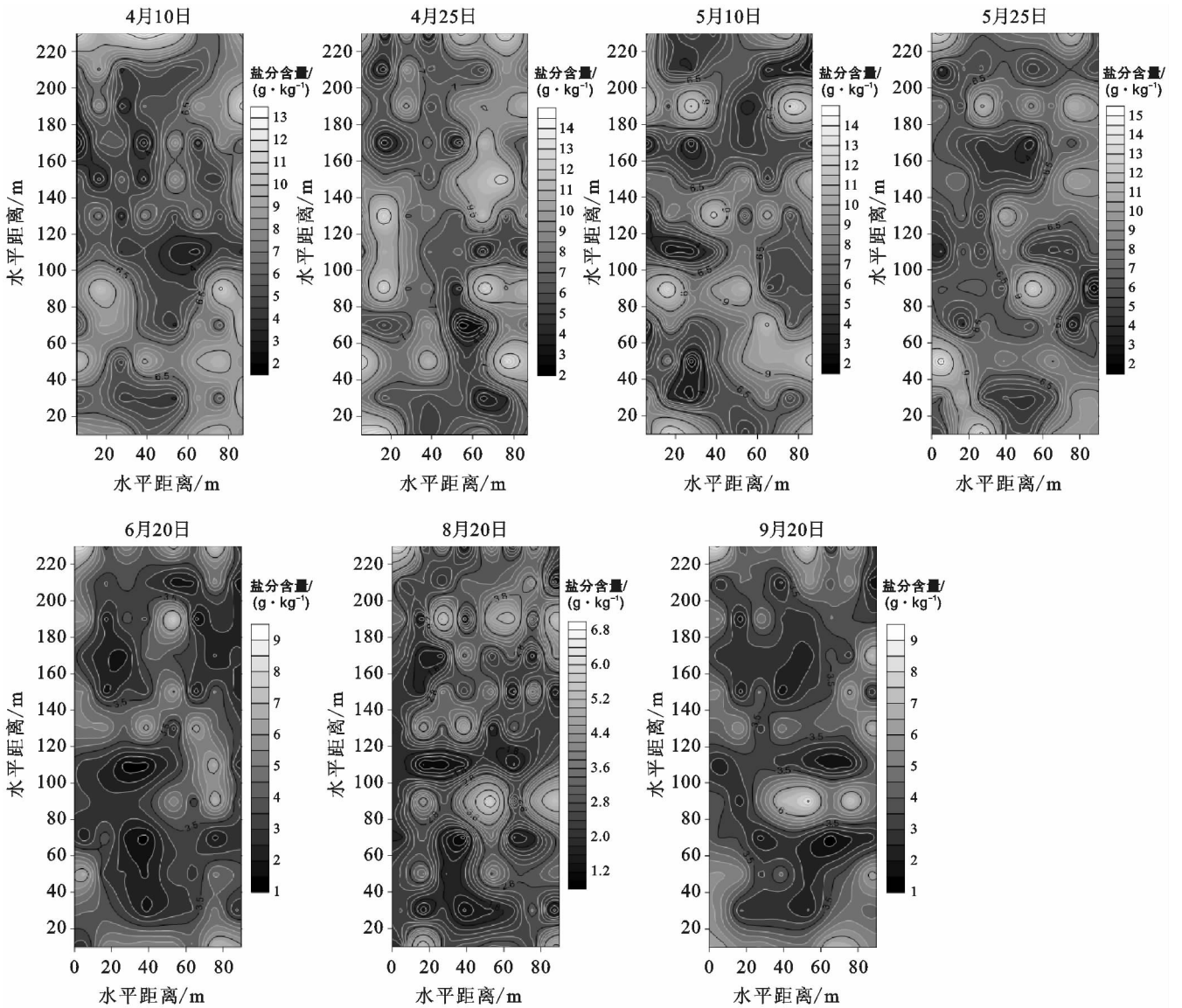


图 6　0—20 cm 土层土壤盐分含量空间分布特征

土壤中盐分的分布与水分密切相关,土壤水分是土壤盐分迁移的重要载体,即通常所说的“盐随水走”。研究表明,土壤盐分会随着地表水分蒸发向表面聚集,称为“表聚”现象[22]。在本研究中,不同灌溉处理措施下土壤盐分都表现出了“表聚”现象,对比磁化灌溉处理和未磁化灌溉处理措施的时间动态变化,磁化处理措施能够有效降低土壤盐分表聚。

土壤盐分含量的变化除了受降雨和土壤水分蒸发的影响,还受植被覆盖度的变化以及地下水埋深的影响[23-24]。本研究中四月份刺槐刚刚展叶,土地裸露

面积大，土壤盐分含量上升。五月份刺槐枝叶生长发育加快，郁闭度逐渐增大，抑制土壤水分蒸发，土壤盐分含量出现回落。进入雨季以后，降雨量增大，土壤盐分下行，地下水埋深上移，土壤盐分迅速下降。秋季土壤水分蒸发增强，枯落的枝叶也带回了大量的盐分，土壤盐分含量回升；全年土壤盐分含量表现为春、秋季积盐，夏季脱盐。

由于田间试验的限制，本研究在布设试验地时未进行隔离处理，不同试验处理之间的边际效应势必对试验结果产生一定影响。因此，对不同灌溉处理之间的脱盐效果精准分析是下一步的研究方向。土壤盐分含量的时空变化受多种因素的综合影响，本研究亦未进行相关因素的观测，试验数据有一定的局限性。

4 结 论

（1）两种磁化处理灌溉方式均能够降低滨海盐碱地土壤盐分含量，通过磁化地下浅表层微咸水进行适度灌溉，可以为该地区节约用水资源，有效地促进盐碱地的土壤脱盐。

（2）不同灌溉处理的不同层次土壤盐分含量均值均表现出：GW＞CK＞FW＞MGW＞MFW，不同土层土壤盐分含量随着土层深度增加逐渐降低。磁化水灌溉能够显著的降低土壤表层的含盐量，对滨海盐碱地土壤盐分具有较好的淋溶效果。淋溶作用随着土壤深度的增加逐渐降低。

（3）磁化处理措施能够降低土壤盐分表聚，尤其是在春季温度回升，土壤水分蒸腾不断增强的情况下，适时采用磁化水灌溉能够对土壤盐分的上行起到抑制作用，对 20—40 cm 土层的抑盐效果更明显一些。

[参 考 文 献]

[1] 丁倩. 磁化微咸水膜下滴灌土壤水盐分布及棉花生长特征研究[D]. 西安：西安理工大学，2018.

[2] 王辉. 我国微咸水灌溉研究进展[J]. 节水灌溉，2016(6)：59-63.

[3] 刘静，高占义. 中国利用微咸水灌溉研究与实践进展[J]. 水利水电技术，2012，43(1)：101-104.

[4] 王全九，单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报，2015，46(12)：117-126.

[5] 万晓，王华田. 磁化水处理技术在农林业中的应用进展[J]. 中国农学通报，2014，30(6)：52-55.

[6] 王艳红，杨小刚. 磁化水处理技术及其在农业上的应用[J]. 农业工程，2014，4(5)：74-77.

[7] 王洪波，王成福，吴旭，等. 磁化水滴灌对土壤盐分及玉米产量品质的影响[J]. 土壤，2018，50(4)：762-768.

[8] 张瑛，刘秀梅，张志浩，等. 磁化水处理对镉胁迫下欧美杨幼苗光合及生长特性的影响[J]. 中国生态农业学报：中英文，2019，27(2)：305-313.

[9] 李夏，乔木，周生斌. 磁化水滴灌对棉田土壤脱盐效果及棉花产量的影响[J]. 干旱区研究，2017，34(2)：431-436.

[10] 刘秀梅，毕思圣，张新宇，等. 磁化微咸水灌溉对欧美杨I-107 微量元素和碳氮磷养分特征的影响[J]. 生态学报，2017，37(20)：6691-6699.

[11] 王渌，郭建曜，刘秀梅，等. 磁化水灌溉对盐渍化土壤生化性质的影响[J]. 核农学报，2018，32(1)：150-156.

[12] 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.

[13] 宗含，高龙，王雅琴，等. 膜下滴灌条件下盐荒地土壤盐分变化规律研究[J]. 干旱地区农业研究，2018，36(6)：7-12.

[14] 李娟，叶胜兰，牛岩. 不同模式对盐碱地土壤环境改良效应的研究[J]. 中国农村水利水电，2018(9)：193-198.

[15] 徐双，柳新伟，崔德杰，等. 不同施肥处理对滨海盐碱地棉花生长和土壤微生物及酶活性的影响[J]. 水土保持学报，2015，29(6)：316-320.

[16] 孙池涛，张俊鹏，冯棣，等. 滨海盐碱农田排水沟土壤水盐分布特征研究[J]. 中国农村水利水电，2018(8)：19-21.

[17] Vachaud G, Passerat De Silans A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probabilitydensity function[J]. Soil Science Society of America Journal，1985，49(4)：822-828.

[18] 刘广明，吕真真，杨劲松，等. 典型绿洲区土壤盐分的空间变异特征[J]. 农业工程学报，2012，28(16)：100-107.

[19] 刘秀梅，王渌，王华田，等. 磁化微咸水灌溉对土壤交换性盐基离子组成的影响[J]. 水土保持学报，2016，30(2)：266-271.

[20] 卜东升，奉文贵，蔡利华，等. 磁化水膜下滴灌对新疆棉田土壤脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报，2010，26(S2)：163-166.

[21] 赵文举，唐学芬，李宗礼，等. 压砂地土壤盐分时空变异规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报，2016，24(1)：12-21.

[22] 韩万海，王增丽. 不同灌溉模式对土壤水盐分布及棉花产量的影响[J]. 中国农村水利水电，2018(11)：26-29，34.

[23] 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[J]. 生态学报，2019，39(9)：3322-3332.

[24] 王卓然，赵庚星，高明秀，等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. 生态学报，2016，36(4)：1040-1049.