

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

滨海盐渍农田秋季土壤盐分含量微域变异特征

赵永昶,常春艳,王卓然,王启尧,杨婧文,张术伟,李因帅,赵庚星

引用本文:

赵永昶,常春艳,王卓然,王启尧,杨婧文,张术伟,李因帅,赵庚星. 滨海盐渍农田秋季土壤盐分含量微域变异特征[J]. 农业 环境科学学报, 2022, 41(5): 1009-014-1.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1011

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响

周慧, 史海滨, 徐昭, 郭珈玮, 付小军, 李正中 农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1649-1656 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1406

艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分空间异质性分析

方丽章, 李艳红, 李发东, 朱海强 农业环境科学学报. 2019, 38(1): 157-167 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0632

农田土壤重金属空间变异多尺度分析——以北京顺义土壤Cd为例 刘伟, 郜允兵, 周艳兵, 潘瑜春, 戴华阳, 高秉博, 阎跃观

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 87-94 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0251

咸水灌溉棉田休耕期土壤胞外酶活性和微生物多样性研究

梁悦萍,李科江,张俊鹏,王广帅,高阳,孙景生,段爱旺 农业环境科学学报. 2018, 37(4): 732-740 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1514

沈阳周边农田土壤中微塑料组成与分布

时馨竹,孙丽娜,李珍,吕良禾 农业环境科学学报.2021,40(7):1498-1508 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1502



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

赵永昶,常春艳,王卓然,等. 滨海盐渍农田秋季土壤盐分含量微域变异特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 1009-1021. ZHAO Y C, CHANG C Y, WANG Z R, et al. Microscale spatial variability of soil salt content in coastal salinized farmlands in autumn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 1009-1021.



滨海盐渍农田秋季土壤盐分含量微域变异特征

赵永视,常春艳*,王卓然,王启尧,杨婧文,张术伟,李因帅,赵庚星*

(山东农业大学资源与环境学院/土肥高效利用国家工程研究中心,山东 泰安 271018)



摘 要:为研究微域尺度滨海盐渍农田土壤盐分变异特征,探究盐渍农田农艺避盐对策,本研究选取利津县和垦利区典型滨海盐 渍农田,划分受微地形、紧实度和覆盖状况影响下的典型微区,在秋季野外实地调查采样的基础上,通过统计分析、实地观测、方 差分析和数据分析对比等方法,分析了研究区秋季土壤盐分的微域变异特征。结果表明:试验区为轻、中度盐渍化农田,土壤表 层盐分微域变异特征受微地形、紧实状况、覆盖状况影响,且各微区变异系数最高可达21.0%,呈中等程度变异;在微域尺度下,麦 田不同微地形影响下土壤盐分含量垄间坡顶处较垄沟低洼处平均提高18.6%,不同紧实状况影响下土壤盐分含量紧实处较松散 处平均提高44.7%; 毛米田不同杂草覆盖土壤盐分含量裸露处较杂草茂盛处平均提高30.8%, 地膜覆盖土壤盐分含量膜外较膜内 平均提高44.7%; 棉田地膜覆盖土壤盐分含量膜外较膜内平均提高31.5%。研究表明,土壤含盐量随微地形由低到高、紧实状况由 松散到紧实、杂草覆盖状况由密到疏、地膜覆盖状况由膜内到膜外而逐渐升高。

doi:10.11654/jaes.2021-1011

关键词:滨海;盐渍农田;微域;土壤盐分;变异

中图分类号:S156.42 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)05-1009-13

收稿日期:2021-09-02 录用日期:2022-01-04

作者简介:赵永昶(1998—),男,山东济南人,硕士研究生,从事农业工程与信息技术研究。E-mail:yczhao1998@126.com *通信作者:常春艳 E-mail:chyan0103@sdau.edu.cn; 赵庚星 E-mail:zhaogx@sdau.edu.cn

*通信1F有:希住把 L-man: cnyan0105@sdau.edu.cn; 应庆生 L-man: znaogx@sdau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41877003);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010724);山东省"双一流"奖补资金(SYL2017XTTD02)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41877003); The Major Scientific and Technological Innovation Project in Shandong Province(2019JZZY010724); The Supplementary Fund for "Double First-Class" Award in Shandong Province(SYL2017XTTD02)

Microscale spatial variability of soil salt content in coastal salinized farmlands in autumn

ZHAO Yongchang, CHANG Chunyan^{*}, WANG Zhuoran, WANG Qiyao, YANG Jingwen, ZHANG Shuwei, LI Yinshuai, ZHAO Gengxing^{*} (College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai ' an 271018, China)

Abstract; This study investigated the variation characteristics of soil salinity in micro-domain coastal saline farmland and the countermeasures of salt avoidance in agricultural practices of saline farmland. Typical inshore saline farmlands in Lijin County and Kenli district were selected. Under the typical influences of the microdomain, including microtopographies, compactness and coverage conditions, variation characteristics in the saline soil salinity microdomain were studied during autumn. This was done through field observations and investigations, sampling, data collection, and statistical analysis of the data of the studied area. The results showed that the experimental area was a lightly or moderately salinized farmland. The variation characteristics of the saline soil surface microdomains were affected by the microtopography and compaction and cover condition. The maximum variation coefficient of each microregion was 21.0%, most of which showed moderate variation. At the micro-scale, soil salt content at the highest point of the ridge increased by 18.6% on an average compared with that at the foot of the hill, indicating the influence of microtopography. The soil salt content of tight and loosely compacted areas differed by 44.7% on an average, highlighting the influence of different compaction conditions. In maize fields, the salt content in exposed soil was 30.8% on an average higher than that in overgrown soil, and the salt content in soil not covered with a plastic film was 44.7% on an average higher than that under a plastic film. In cotton fields, the salt content in soil not covered with a plastic film was 31.5% on an average higher than that under a plastic film. The soil salt content increased gradually with the change of microtopography from lowto high-elevation, compactness from loose to compacted, weed mulching from dense to sparse, and mulching from inside to outside the film. In this study, the understanding of the microdomain variation characteristics of saline soil in the study area during the salt accumulation period in autumn was improved.

Keywords: coastal; saline farmland; micro-scale; soil salinity; variability

盐渍化土壤在我国干旱区、半干旱区以及滨海区 分布广泛,盐渍化严重影响土地生产力提高及农业经 济的可持续发展^[1-2],已成为国内外广泛关注的生态环 境问题。黄河三角洲受海水入侵和气候变化等驱动 力的影响,盐渍土分布范围广,土壤板结、肥力下降现 象普遍,严重危害当地农业生产^[3-4]。因此,开展农田 盐渍化土壤研究对农作物生产管理具有重要意义^[5-6]。

土壤盐分含量是盐渍化程度和状态的重要指标, 认识并掌握土壤盐分的空间变异特征是土壤盐渍化 治理的前提^[7-10]。国内外研究发现,土壤盐分变异特 征与地表植被覆盖、地形地貌等关系十分密切^[11],如 张华艳等^[12]认为地貌和土体构型会影响土壤盐分的 重新分配;KHATIBI等^[13]认为不同的植被类型能反映 出土壤盐分含量状况,土壤盐分含量也会影响植被的 分布;MARZIEH等^[14]认为土壤盐分的分布与地形地 貌密切关联。这些研究表明,土壤盐分变异系统研究 必须考虑环境因素的作用。

针对土壤盐分变异目前已开展了大量研究^[15-17]。 从研究区域看,较多学者进行了内陆干旱、半干旱区 的研究,如刘洪波等^[18]对新疆沙漠绿洲灌区盐渍化空 间分布格局和不同深度的土壤盐分水平进行了研究; 杨小虎等^[19]研究了新疆玛纳斯河流域土壤盐分的空 间分布特征;康满萍等^[20]研究了甘肃苏干湖湿地土壤 盐分含量的空间异质性;WANG等^[21]对干旱地区土壤 盐分积累的空间格局和变化规律进行了研究等。这 些研究较好揭示了干旱区土壤盐分的特征与规律,而 滨海区土壤盐分的时空变异则更为复杂,其研究可进 一步强化对土壤盐分变异的认识。

从研究尺度看,土壤盐分空间变异研究以大尺 度研究居多,而专门针对微域尺度的研究偏少,如 GEBREMESKEL 等^[22]研究了埃塞俄比亚北部半干旱 地区大区尺度的土壤盐分空间分布特征;REN等[23]研 究了干旱灌溉农业生态系统田间、运河、区域3个尺 度的土壤盐分时空变化特征等。而需要注意的是,植 被状况和地形变化等因素在较小尺度下仍会影响土 壤盐分含量的变异[24-25],如农业机械的使用不可避免 地造成农田微域地形的差异,覆膜栽培四则直接改变 农田地表微域的覆盖状况,从而导致土壤盐分的微域 差异,而这种微域特征通常在大尺度上被掩盖[27]。微 域是区域盐渍土形成的基本单元,也是其改良利用的 基本单元[28-29],因此,开展盐渍土微域性规律研究,对 农田土壤的改良和利用具有理论和生产价值。而目 前在滨海盐渍土区域,专门针对农田微域尺度土壤盐 分的分布状况和变异规律的系统研究尚未见报道。

2022年5月 赵永昶,等:滨海盐渍农田秋季土壤盐分含量微域变异特征

本文选取黄河三角洲典型滨海盐渍农田,通过实 地调查获取秋季土壤盐分数据,从微域尺度系统探究 土壤盐分的空间分布和变异规律,旨在揭示研究区秋 季积盐期微域尺度下农田土壤盐分变异特征及影响 因素,为盐渍农田的高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

通过实地调查,结合农业利用方式、土壤质地、土 体构型以及土壤盐渍化程度及其分布等,选择利津县 (采样地1)和垦利区(采样地2)作为研究样地。

采样地1位于山东省东营市利津县渤海农场一分 场(118°39′60″E,37°45′38″N),属大陆性季风气候 区,年均气温13.3℃,多年平均降雨量540mm左右,地 处黄河河道以北,为典型的滨海盐渍土农田区。主要 土壤类型为滨海盐化潮土,土壤质地以砂壤土为主。 地下水埋深浅、矿化度高。秋季多种植冬小麦,田块集 中旦地势平整,农业机械化水平高。采样地2位于山 东省东营市垦利区义林村(118°49'07"E,37°41'29" N),属大陆性季风气候区,年均气温13.2℃,多年平均降 雨量550mm左右,地处黄河河道以南,是滨海盐渍土的 典型区域。土壤质地主要为砂壤,属滨海盐化潮土类 型。地下水矿化度高、埋深浅。该村以种植棉花为主, 兼有玉米田分布,具有一定的农业机械化水平。在采样 地1选择麦田为研究区,在采样地2选择玉米田和棉田 为研究区。采样地1和采样地2均为滨海盐渍土农田区 的典型代表区域,土壤类型、质地及农田耕作管理模式 基本一致,日两地种植的作物类型代表了滨海盐渍农田 区的主要粮食作物,是本研究的理想区域。

1.2 试验设计

1.2.1 微地形试验设计

采样地1种植作物为冬小麦,采用机械种植。免 耕播种机进行播种作业时,开沟器在自重以及附加弹 簧压力作用下滚动前进,将土壤切开形成垄沟,其余 土壤被推向两侧形成垄顶,形成的垄高10~15 cm,底 宽18~20 cm,沟宽5 cm左右。在采样地1根据微地形 差异状况,选择存在垄面、垄沟且具有代表性的9个 微区(依次编号为1~9)进行土壤盐分微域变异研究, 1~9号微区长30 cm、宽15 cm,采样间距为15 cm×15 cm。图1为1~9号微区内布设样点的分布情况,每个 微区内布设6个样点,分别编号为①~⑥,①、④、⑤号 样点处于位置相对较低的垄沟低洼处,②、③、⑥号样



图 1 麦田微地形影响下单个微区采样点分布图 Figure 1 Sampling point distribution of a single microdomain under the influence of microtopography

设54个样点。

1.2.2 土壤紧实度试验设计

采样地1因采用种植机械进行翻耕、施肥和播种 等,麦田内存在种植机械碾压,从而造成微域尺度下的 土壤紧实状况差异。为研究采样地1农业机械碾压下 土壤盐分微域变异特征,在采样地1根据农业机械碾 压造成的土壤紧实差异状况,选择存在常规耕作和机 械碾压且具有代表性的6个微区(依次编号为10~15) 进行土壤盐分微域变异研究,10~15号微区大小为30 cm×30 cm,采样间距为15 cm×30 cm。图2为10~15号 微区内布设样点的分布情况,每个微区内布设6个样 点,分别编号为①~⑥,样点①、④、⑤位于有良好翻耕 状况、相对松散的部位,样点②、③、⑥位于机械碾压 过、相对紧实的部位,10~15号微区共布设36个样点。 1.2.3 地表覆盖状况试验设计

图 2 麦田紧实度影响下单个微区采样点分布图 Figure 2 Sampling point distribution of a single microdomain under the influence of compactness

秋季采样地2存在棉花田块和收割后的玉米田

www.aer.org.cn

块,玉米和棉花种植采用覆膜播种机械。玉米田覆膜 幅宽在40 cm 左右,棉田覆膜幅宽在90 cm 左右。采 样地2玉米机械收割后未进行耕作播种作业,田间存 在杂草牛长并有地膜残留,为研究采样地2杂草覆盖 下土壤盐分微域变异特征,在玉米田内选择杂草稀疏 程度不同的3个60 cm×60 cm的微区(依次编号为 16~18),微区内分别在裸地、杂草稀疏和杂草茂盛处 布设3个样点,共布设9个样点,如图3(a)所示,①、 ⑥、⑦样点几乎无杂草覆盖、②、⑤、⑧样点处杂草生 长茂盛,③、④、⑨样点杂草牛长相对稀疏,16~18号 微区共布设27个样点。

为研究采样地2残留地膜覆盖下土壤盐分微域 变异特征,在玉米田内选择存在残留地膜覆盖状况差 异的3个20 cm×40 cm的微区(依次编号为19~21), 采样间距为20 cm×20 cm,微区内布设6个样点,如图 3(b)所示,①、④、⑤样点位于膜外,②、③、⑥样点位 于膜内,19~21号微区共布设18个样点。同时为研究 采样地2棉田地膜覆盖下土壤盐分微域变异特征,在 棉田内选择存在地膜覆盖状况差异的3个50 cm×50 cm的微区(依次编号为22~24),采样间距为25 cm× 50 cm, 微区内布设6个样点, 如图3(c)所示, ①、④、 ⑤样点位于膜外,处于位置相对较低的垄沟,②、③、 ⑥样点位于膜内,处于位置相对较高的垄面,22~24 号微区共布设18个样点。

1.3 数据采集

11月份东营市气温骤降,雨量锐减,地表积盐现 象明显且稳定。利用卷尺确定采样点间距,并利用 EC110便携式盐分计测量3次表层土壤电导率,待数 值稳定后记录,取3次平均值作为各样点电导率值。 采用单点取样法采集各样点表层土样,同时记录每个 微区微地形、紧实度和覆盖状况等微域特征,并拍摄 取样点数码照片。调查采样时间为2020年11月5-6日,数据采集时天气晴朗且近一周内无降雨和田间 灌溉。

将采集的土样带回实验室进行风干,磨碎过2 mm筛,用烘干法测定土壤含盐量,最终建立野外实测 电导率(E_c , μ S·cm⁻¹)与土壤含盐量(S_t , g·kg⁻¹)之间的 关系方程(S₁=0.002 18E_c+0.727, R²=0.938 7), 并据此 对全部野外测量的电导率数据进行转换。土壤盐渍 化程度按照相关分级标准划分为5个等级(表1)[30]。

1.4 分析方法

采用 SPSS 25.0 进行 LSD 同质性检验、单因素方 差分析来表示单变量影响下的显著差异(P<0.05),并 对不同微域特征下土壤盐分的分布特征进行描述性 分析。使用 Excel 2010 和 Origin 2019 做图来反映不 同微域特征下土壤盐分的分布特点,通过对数据的分 析对比以及实地观测来表征微域尺度下不同因素 对土壤盐分变异的影响规律。变异系数能够反映 离散程度的大小,本文将变异系数划分为不同等级 (表2)[27]。

表1 土壤盐渍化程度分级标准

Table 1 Grade standard of soil salinization degree

等级 Grade	1	2	3	4	5
含盐量SS/(g·kg ⁻¹)	SS<1	$1 \leq SS \leq 2$	$2 \leq SS \leq 4$	$4 \leq SS \leq 6$	$\mathrm{SS}{\geq}6$
土壤盐渍化程度 Soil salinity level	非盐渍化	轻度 盐渍化	中度 盐渍化	重度 盐渍化	盐土



(a)玉米田杂草覆盖微区 The microdomain covered by weeds in maize field

(b)玉米田地膜覆盖微区 The microdomain covered by mulching film in maize field

(c)棉田地膜覆盖微区

The microdomain covered by mulching film in cotton field

图3 不同覆盖状况单个微区采样点分布图

Figure 3 Sampling point distribution of a single microdomain under the influence of coverage



表2 变异程度分级标准

Table 2 Grade standard of variation degree										
变异系数CV/%	CV<10	10≤CV<100	CV≥100							
变异程度 Variation degree	弱变异性	中等变异性	强变异性							

2 结果与分析

2.1 微域尺度下不同微地形土壤盐分含量及其变异特征

1~9号微区不同微地形部位的平均土壤含盐量

变化情况如图4和表3所示。各微区内,垄间坡顶处 土壤盐分含量高于垄沟低洼处,且垄沟低洼处和垄间 坡顶处土壤含盐量差异显著(P<0.05)。由表3可以 看出,1~3号微区平均数和中位数为1.17~1.19g·kg⁻¹ 和1.18~1.19g·kg⁻¹,属轻度盐渍化土壤;4~9号微区 平均数和中位数为2.44~3.03g·kg⁻¹和2.44~3.06g· kg⁻¹,属中度盐渍化土壤;在轻度盐渍化土壤的1~3号 微区内,处于垄沟低洼处的①、④、⑤号样点土壤含盐 量较低,范围在1.06~1.18g·kg⁻¹,处于垄间坡顶的②、

www.aer.org.cn





图4 不同微地形部位平均土壤含盐量

Figure 4 Average soil salinity in different microtopography

表3 麦田微地形各微区采样点土壤表层含盐量及描述性统计特征

Table 3 Soil surface salinity and descriptive statistical characteristics of microtopographic sampling points in wheat field

微区编号 Microdomain number	微地形部位 Microtopographic position	点位编号 Point number	土壤表层盐分 Soil surface salinity/ (g·kg ⁻¹)	典型部位平均值 Mean value of typical position/ (g•kg ⁻¹)	微区平均值 Mean/ (g·kg ⁻¹)	微区中位数 Median/ (g·kg ⁻¹)	标准差 SD/ (g•kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	最小值 Minimum/ (g•kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (g•kg ⁻¹)
1	垄沟低洼	1	1.13	1.12	1.17	1.19	0.07	5.6	1.06	1.24
	Bottom of ditch	4	1.18							
		5	1.06							
	垄间坡顶	2	1.21	1.22						
Highest point on ridge	3	1.24								
	6	1.20								
2	垄沟低洼	1	1.16	1.13	1.19	1.18	0.08	6.4	1.11	1.32
Bottom of ditch	Bottom of ditch	4	1.11							
		5	1.13							
	垄间坡顶	2	1.32	1.25						
	Highest	3	1.20							
	point on ridge	6	1.22							
3	垄沟低洼		1.15	1.14	1.19	1.18	0.06	4.7	1.12	1.26
	Bottom of ditch	4	1.12							
		5	1.14							
	垄间坡顶	2	1.26	1.23						
Highest	Highest	3	1.21							
	point on ridge	6	1.23							

1014

农业环境科学学报 第41卷第5期

续表3 麦田微地形各微区采样点土壤表层含盐量及描述性统计特征

Continued table 3 Soil surface salinity and descriptive statistical characteristics of microtopographic sampling points in wheat field

微区编号 Microdomain number	微地形部位 Microtopographic position	点位编号 Point number	土壤表层盐分 Soil surface salinity/ (g·kg ⁻¹)	典型部位平均值 Mean value of typical position/ (g•kg ⁻¹)	微区平均值 Mean/ (g•kg ⁻¹)	微区中位数 Median/ (g·kg ⁻¹)	标准差 SD/ (g•kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	最小值 Minimum/ (g•kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (g•kg ⁻¹)
4	垄沟低洼	1	2.34	2.30	2.44	2.44	0.17	6.9	2.19	2.63
	Bottom of ditch	4	2.36							
		(5)	2.19							
	垄间坡顶	2	2.59	2.58						
	Highest	3	2.63							
	point on ridge	6	2.51							
5	垄沟低洼	1	2.32	2.46	2.75	2.75	0.33	12.1	2.32	3.10
	Bottom of ditch	4	2.57							
		(5)	2.49							
	垄间坡顶	2	3.09	3.04						
	Highest point on ridge	3	2.92							
point on ridge	6	3.10								
6	垄沟低洼	1	2.30	2.39	2.58	2.58	0.24	9.1	2.30	2.87
	Bottom of ditch	4	2.35							
		(5)	2.53							
	垄间坡顶	2	2.87	2.77						
	Highest	3	2.63							
	point on ridge	6	2.82							
7	垄沟低洼	1	2.53	2.50	2.82	2.79	0.35	12.5	2.45	3.21
	Bottom of ditch	4	2.45							
		5	2.53							
	垄间坡顶	2	3.26	3.14						
	Highest	3	3.21							
	point on ridge	6	3.05							
8	垄沟低洼	1	2.90	2.76	3.03	3.06	0.31	10.2	2.64	3.36
	Bottom of ditch	4	2.73							
		5	2.64							
	垄间坡顶	2	3.36	3.29						
	Highest	3	3.31							
	point on ridge	6	3.21							
9	垄沟低洼	1	2.42	2.33	2.85	2.87	0.56	19.8	2.24	3.41
	Bottom of ditch	4	2.24							
		5	2.34							
	垄间坡顶	2	3.35	3.36						
	坐间坡坝 Highest	3	3.41							
	point on ridge	6	3.31							

③、⑥号样点土壤含盐量较高,范围在1.20~1.32 g·kg⁻¹,垄间坡顶处较垄沟低洼处土壤含盐量平均增高8.9%;在中度盐渍化土壤的4~9号微区内,处于垄沟低洼处的①、④、⑤号样点土壤含盐量为2.19~2.90 g·kg⁻¹,处于垄间坡顶的②、③、⑥号样点土壤含盐量为2.51~3.41 g·kg⁻¹,垄间坡顶处较垄沟低洼处土壤含盐

量平均增高23.4%;1~9号微区垄间坡顶处较垄沟低 洼处的土壤含盐量平均增高18.6%。微区内较高的 盐分水平集中在垄间坡顶部位,说明田间微地形能够 影响微域尺度土壤盐分含量的分布状况。从表3中 所示的变异系数和标准差可以看出,1、2、3、4、6号微 区变异系数和标准差为4.7%~9.1%和0.06~0.24g· kg⁻¹,属弱变异性;而含盐量相对较高的5、7、8、9号微 区变异系数和标准差为10.2%~19.8%和0.31~0.56g· kg⁻¹,属中等强度变异。可以看出,随着盐分等级的提 升,各微区土壤含盐量标准差变大,变异性趋强,差异 趋于明显。这可能是由于随着土壤盐分的提升,有更 多的盐分从垄沟低洼处随水分运移到蒸发较为强烈 的垄间坡顶处。

2.2 微域尺度下不同紧实度土壤盐分含量及其变异特征

图 5 为 10~15 号微区不同紧实状况部位的平均 土壤含盐量变化情况,以紧实和松散处样点的土壤盐 分平均值代表该部位的盐分含量。可以看出,10~15 号各微区内相对紧实处和相对松散处土壤含盐量均 有显著差异(P<0.05),呈现出紧实处土壤盐分高于松 散处土壤盐分的规律。表4为10~15号微区表层土 壤盐分含量数据及描述性统计特征,可以看出,土壤 盐分含量稍低的10~12号微区内,位于松散处的①、 ④、⑤号样点土壤盐分为1.08~1.20g·kg⁻¹,位于紧实 处的②、③、⑥号样点土壤盐分为1.26~1.55 g·kg⁻¹,紧 实处较松散处土壤盐分平均提升21.9%;在属于中度 盐渍化土壤的13~15号微区内,位于松散处的①、④、 ⑤号样点土壤盐分为1.88~2.68 g·kg⁻¹,位于紧实处的 ②、③、⑥号样点土壤盐分为3.44~4.41 g·kg⁻¹,紧实处 较松散处土壤盐分平均提升67.4%,土壤盐分提升明 显。10~15号微区紧实处较松散处土壤盐分平均增 高44.7%,微区内较高的盐分水平集中在土壤相对紧 实的部分,这说明土壤紧实程度能够影响微域尺度土 壤盐分的分布状况。10~12号微区土壤含盐量平均 值和中位数为1.19~1.33 g·kg⁻¹和1.19~1.31 g·kg⁻¹,属 轻度盐渍化土壤;13~15号微区土壤含盐量平均值和 中位数为2.91~3.35g·kg⁻¹和2.92~3.34g·kg⁻¹,属中度 盐渍化土壤。土壤含盐量水平相对较低的10~12号

微区的变异系数和标准差为8.6%~15.0%和0.10~0.20g·kg⁻¹,变异程度较弱;而13~15号微区为24.5%~31.4%和0.73~0.94g·kg⁻¹,属中等程度变异。这表明随着盐渍化程度的加重,不同紧实状况对土壤盐分差异的影响更加显著。

2.3 微域尺度下不同覆盖状况土壤盐分含量及其变 异特征

图 6 为 16~24 号微区不同地表覆盖状况部位的 土壤含盐量变化情况,以不同覆盖部位处样点的土壤 盐分平均值代表该部位的盐分含量。可以看出,在受 杂草覆盖影响的16~18号微区内,土壤含盐量呈现出 裸地>杂草稀疏处>杂草茂盛处的规律,裸地较杂草 覆盖处土壤的含盐量差异显著(P<0.05),但杂草稀疏 处和杂草茂盛处土壤含盐量差异不显著(P>0.05);在 受地膜覆盖影响下的19~24号微区中,土壤含盐量均 呈现出膜外>膜内的规律,且两者差异显著(P<0.05)。 由表 5~表7和图6可以看出,16~18号微区中处于裸 地的①、⑥、⑦号样点土壤含盐量为1.25~1.84g·kg⁻¹, 处于杂草茂盛处的②、⑤、⑧号样点土壤含盐量为 1.01~1.20 g·kg⁻¹,处于杂草稀疏处的③、④、⑨号样点 土壤含盐量为1.10~1.40g·kg⁻¹,裸地处相较杂草茂盛 处盐分平均增高30.8%,可见在裸地处土壤含盐量更 高:19~21号微区处于膜外的①、④、⑤号样点土壤含 盐量范围在1.73~1.98 g·kg⁻¹, 而处于膜内的②、③、⑥ 号样点土壤含盐量为1.20~1.39g·kg⁻¹,土壤表层盐分 膜外较膜内平均增高44.7%,膜外盐分上升明显;22~ 24号棉田微区处于膜外的①、④、⑤号样点土壤含盐 量范围在1.42~1.70 g·kg⁻¹,处于膜内的②、③、⑥号样 点土壤含盐量为1.06~1.34g·kg⁻¹,土壤表层盐分膜外 垄沟较膜内垄面平均增高31.5%,同样呈现出膜内盐 分稍低的规律。可见,地表覆盖物的存在能够在一定



www.ger.org.cn

农业环境科学学报 第41卷第5期

表4 麦田紧实状况各微区采样点土壤表层含盐量及描述性统计特征

Table 4 Soil surface salinity and descriptive statistical characteristics of each microdomain sampling point in wheat field

微区编号 Microdomain number	紧实状况 Tight situation	点位编号 Point number	土壤表层盐分 Soil surface salinity/ (g·kg ⁻¹)	典型部位平均值 Mean value of typical position/ (g•kg ⁻¹)	微区平均值 Mean/ (g•kg ⁻¹)	微区中位数 Median/ (g•kg ⁻¹)	标准差 SD/ (g•kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	最小值 Minimum/ (g•kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (g•kg ⁻¹)
10	松散	1	1.12	1.10	1.19	1.19	0.10	8.6	1.08	1.30
	Loose	4	1.11							
		5	1.08							
	紧实	2	1.30	1.28						
	Tight	3	1.29							
		6	1.26							
11	松散	1	1.12	1.13	1.23	1.24	0.12	10.1	1.09	1.40
	Loose	4	1.09							
		5	1.18							
	紧实	2	1.32	1.34						
	Tight	3	1.30							
		6	1.40							
12	松散	1	1.20	1.15	1.33	1.31	0.20	15.0	1.11	1.55
	Loose	4	1.11							
		(5)	1.16							
	紧实	2	1.42	1.50						
	Tight	3	1.55							
		6	1.54							
13	松散	1	2.48	2.50	3.35	3.34	0.94	28.1	2.35	4.41
	Loose	4	2.35							
		5	2.68							
	紧实	2	4.41	4.19						
	Tight	3	4.17							
		6	3.99							
14	松散	1	2.26	2.32	2.98	2.96	0.73	24.5	2.25	3.79
	Loose	4	2.25							
		5	2.47							
	紧实	2	3.66	3.63						
	Tight	3	3.44							
		6	3.79							
15	松散		1.88	2.09	2.91	2.92	0.91	31.4	1.88	3.89
	Loose	4	2.12							
		5	2.26							
	紧实	2	3.72	3.73						
	Tight	3	3.58							
		6	3.89							

程度上减少土壤盐分向地表的聚集。

结合表 5~表7可以看出,16~24号微区的盐分平 均值和中位数为1.17~1.62g·kg⁻¹和1.13~1.62g·kg⁻¹, 两者差距较小,表明16~24号微区均属于轻度盐渍化 土壤。虽然平均数和中位数差距较小,但各样点盐分 最大值基本都位于玉米秸秆地,表明玉米收割后田块 内缺少耕作管理措施会提高土壤含盐量水平。在不 同的覆盖条件影响下,各微区变异系数和标准差为 9.6%~21.0%和0.12~0.33g·kg⁻¹,总体上属于中等程 度变异。

3 讨论

本研究选择农田田块微域尺度,根据不同微区内 典型特征因素均匀布设样点,发现了农田微域土壤盐





Figure 6 Average soil salinity at different cover sites

分含量的差异性及与具体农艺措施的密切相关性。 类似研究也发现了土壤盐分微域变异存在较为复杂 的驱动机制^[24-25,29],因此只关注宏观大尺度上的土壤 盐分变异,通常会导致实际农业生产中对土壤盐分空 间分布认知的偏差,土壤盐分微域尺度的研究需要进 一步加强。本研究选择了微地形、紧实度和覆盖状况 3种主要因素探究微域尺度盐渍化土壤盐分变异特 征,其他类型微域的土壤盐分变异研究有待进一步的 系统探索。

本研究结果表明,存在微地形变化的微区中,土 壤表层含盐量的最高值都集中在地形较高的垄间坡 顶处,这可能与秋季雨量较少、垄间坡顶处蒸发明显、 盐分向高处聚集有关,这与前人研究的起垄措施对土 壤盐分分布影响的结果一致^[26]。而微区内被农业机 械压实的土壤表层含盐量高于相对松散的土壤,这可 能与土壤被压实后孔隙度减小、毛管作用增强,加剧 了土壤盐分的表聚现象有关^[31]。而微区裸地的土壤 盐分高于有杂草覆盖土壤,这与前人研究中地表覆盖 会抑制土壤盐分表聚的结果一致^[32]。覆盖物的存在, 有效减缓了土壤水分的蒸发,同时其根系活动也可能 会对土壤盐分有一定的抑制作用^[33]。

本研究结果可为滨海区农作物种植避盐措施提 供参考,小麦在进行机械播种耕作时,应提高机械播 种精度,保证小麦种子植于垄沟低洼处,以降低积盐 期盐渍化对小麦生长的危害^[34],同时农业机械压实过 的土壤,应及时对其进行翻耕,并控制农业机械压实过 的土壤,应及时对其进行翻耕,并控制农业机械在农田 中的使用频率。秋季休耕后玉米田内的杂草和地膜残 留能有效降低土壤盐分含量,因此可对休耕后的农田 裸露地表进行覆盖处理^[35];棉田覆膜技术能有效抑制土 壤盐分向地表运移,值得进一步推广。而综合多种有 效避盐措施,针对不同农作物播种、耕作、覆盖等规范管 理的控盐技术模式还需要进一步的试验探索。

气候因素是影响土壤盐渍化的主要因素之一,研 究区季节特征明显,秋季是以蒸发为主的积盐期,采 样的一周内无灌溉和降水,能反映研究区秋季稳定蒸 发条件下微域土壤盐分空间变异特征,但是研究区不 同季节降雨和地面蒸发情况有所差别,同时不同灌排 措施也会通过影响地下水位导致微区内土壤盐分空 间变异的差异,因此研究区在不同时间和人类活动影 响下的土壤盐分微域变异特征及调控对策有待后续 的进一步研究。

4 结论

(1)不同微地形部位土壤盐分含量差异明显,呈现中等强度的变异性,变异系数最高达19.8%。起垄后土壤盐分呈垄上聚集特征,垄间坡顶处土壤盐分含量相比垄沟低洼处最大增高43.9%,微域土壤盐分含量受微地形影响显著。

(2)不同紧实度部位土壤盐分含量差异显著,呈现中等变异,变异系数最高达31.4%。良好耕作的松散土壤的盐分含量比紧实土壤最高降低44.0%,土壤机械压实后会加剧盐渍化风险。

(3)地表不同覆盖状态对土壤盐分含量具有显著 影响。杂草覆盖可有效抑制土壤盐分表聚,使土壤盐 分含量最高降低32.6%,地膜覆盖则可最高降低土壤 盐分含量31.6%,田间地表覆盖措施可降低旱季农田 盐渍化风险。

www.aer.org.cn

农业环境科学学报 第41卷第5期

表 5	玉米田杂草覆盖各微区采样点土壤表层含盐量及描述性统计特征	
	土小百水干夜——日候6小1/小工级你公日—主众间起任兆月内正	

11 ~	G 11 C 11 1.	1 1 1 1 1 1 1 1 1	1				C 11
hlo 5	Soil curtage calinit	u and decomptive statistical	abaraataristias of wood-coveres	mioroc	lomain :	in maiza	hlart
DIC 7	Son Sunace Samme	v and descriptive statistical	Undiducensities of week covered	i miterot	iumann		neiu

Т	able 5 Soil	surface sa	linity and descr	iptive statistical cl	haracteristics	of weed-cove	ered micro	domain in n	naize field	
微区编号 Microdomain number	覆盖状况 Coverage condition	点位编号 Point number	土壤表层盐分 Soil surface salinity/ (g·kg ⁻¹)	典型部位平均值 Mean value of typical position/ (g·kg ⁻¹)	微区平均值 Mean/ (g•kg ⁻¹)	微区中位数 Median/ (g·kg ⁻¹)	标准差 SD/ (g·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	最小值 Minimum/ (g·kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (g•kg ⁻¹)
16	裸地	1	1.34	1.32	1.21	1.25	0.12	9.6	1.03	1.38
	Bare land	6	1.38							
		$\overline{\mathcal{O}}$	1.25							
	杂草稀疏	3	1.12	1.22						
	Sparse	4	1.29							
	weeu	9	1.25							
	杂草茂盛	2	1.03	1.10						
	Dense	5	1.14							
	weeu	8	1.12							
17	裸地	1	1.84	1.74	1.42	1.34	0.26	18.5	1.14	1.84
Bare la	Bare land	6	1.69							
		$\overline{\mathcal{O}}$	1.70							
	杂草稀疏	3	1.40	1.33						
	Sparse	4	1.34							
	weeu	9	1.25							
	杂草茂盛	2	1.14	1.18						
	Dense weed	5	1.20							
	weeu	8	1.18							
18	裸地	1	1.35	1.31	1.17	1.13	0.12	10.3	1.01	1.35
	Bare land	6	1.25							
		$\overline{\mathcal{O}}$	1.33							
	杂草稀疏	3	1.15	1.13						
	Sparse	4	1.10							
	weed	9	1.13							
	杂草茂盛	2	1.13	1.06						
	Dense	5	1.01							
	weeu	8	1.04							

参考文献:

- [1] LIU G M, ZHANG X C, WANG X P, et al. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 237:274-279.
- [2] 杜学军, 闫彬伟, 许可, 等. 盐碱地水盐运移理论及模型研究进展 [J]. 土壤通报, 2021, 52(3):713-721. DU X J, YAN B W, XU K, et al. Research progress on water-salt transport theories and models in saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3):713-721.
- [3] 李因帅, 张颖, 赵庚星, 等. 鲁中南山丘区耕地地力的遥感反演模型 与应用[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 269-278. LIYS, ZHANG Y, ZHAO G X, et al. Remote sensing inversion and application for soil fertility of cultivated land in the hilly areas of central-south Shandong of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(23):269-278.

- [4] LÜ Z Z, YANG J S, LIU G M, et al. Relationship between soil salinization and groundwater characteristics in the Yellow River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6):1377-1385.
- [5] FU Z Y, WANG P, SUN J K, et al. Composition, seasonal variation, and salinization characteristics of soil salinity in the Chenier Island of the Yellow River Delta[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 24: e01318.
- [6] 奚雪, 赵庚星, 高鹏, 等. 基于 Sentinel 卫星及无人机多光谱的滨海 冬小麦种植区土壤盐分反演研究——以黄三角垦利区为例[J]. 中 国农业科学, 2020, 53(24): 5005-5016. XIX, ZHAOGX, GAOP, et al. Inversion of soil salinity in coastal winter wheat growing area based on Sentinel satellite and unmanned aerial vehicle multi-spectrum: A case study in Kenli district of the Yellow River Delta[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(24):5005-5016.
- [7] 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 基于多源数据的中原黄泛区土壤盐分 空间变异分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):115-120. WUYK,

表6 玉米田地膜覆盖各微区采样点土壤表层含盐量及描述性统计特征

Table 6 Soil surface salinity and descriptive statistical characteristics of plastic film mulched microdomain in corn field

微区编号 Microdomain number	地膜覆盖部位 Mulch cover site	点位编号 Point number	土壤表层盐分 Soil surface salinity/ (g·kg ⁻¹)	典型部位平均值 Mean value of typical position/ (g·kg ⁻¹)	微区平均值 Mean/ (g·kg ⁻¹)	微区中位数 Median/ (g·kg ⁻¹)	标准差 SD/ (g•kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	最小值 Minimum/ (g·kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (g•kg ⁻¹)
19	膜外	1	1.81	1.87	1.58	1.58	0.33	21.0	1.23	1.98
	Outside mulch	4	1.83							
		5	1.98							
膜内	2	1.26	1.28							
	Inside mulch	3	1.23							
	6	1.36								
20	膜外	1	1.93	1.91	1.62	1.62	0.32	19.9	1.28	1.95
	Outside mulch	4	1.85							
		5	1.95							
	膜内	2	1.39	1.33						
	Inside mulch	3	1.32							
		6	1.28							
21	膜外	1	1.90	1.83	1.55	1.53	0.31	20.3	1.20	1.90
	Outside mulch	4	1.73							
		5	1.86							
	膜内	2	1.20	1.27						
	展刊 Inside mulch	3	1.26							
		6	1.34							

表7 棉田地膜覆盖各微区采样点土壤表层含盐量及描述性统计特征

Table 7 Soil surface salinity and descriptive statistical characteristics of plastic film mulching sampling points in cotton field

微区编号 Microdomain number	地膜覆盖部位 Mulch cover site	点位编号 Point number	土壤表层盐分 Soil surface salinity/ (g·kg ⁻¹)	典型部位平均值 Mean value of typical position/ (g·kg ⁻¹)	微区平均值 Mean/ (g•kg ⁻¹)	微区中位数 Median/ (g·kg ⁻¹)	标准差 SD/ (g•kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	最小值 Minimum/ (g•kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (g•kg ⁻¹)
22	膜外垄沟	1	1.42	1.52	1.32	1.32	0.23	17.3	1.06	1.61
	Mulch outside	4	1.53							
	utten	5	1.61							
膜内垄面 Mulch inside ridge	2	1.24	1.13							
	Mulch inside	3	1.10							
	6	1.21								
23 膜外垄浴	膜外垄沟	1	1.54	1.57	1.41	1.40	0.19	13.6	1.19	1.68
	Mulch outside	4	1.68							
	utten	5	1.48							
	膜内垄面	2	1.24	1.25						
	Mulch inside	3	1.19							
	riage	6	1.31							
24	膜外垄沟	1	1.70	1.62	1.42	1.45	0.24	16.7	1.13	1.70
	Mulch outside	4	1.60							
	utten	5	1.57							
膜I Mulc	膜内垄面	2	1.34	1.22						
	Mulch inside	3	1.13							
	riage	6	1.18							

1020

农业环境科学学报 第41卷第5期

LIU G M, YANG J S, et al. Spatial variability of soil salinity based on multi-source data for typical zone of flood area of the Yellow River in central China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5):115–120.

- [8] 窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 等. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析 及地下水埋深对盐分的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):246-253. DOU X, SHI H B, MIAO Q F, et al. Temporal and spatial variability analysis of soil water and salt and the influence of groundwater depth on salt in saline irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3):246-253.
- [9] WANG Y G, DENG C Y, LIU Y, et al. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621:177–185.
- [10] 赵庆庆, 白军红, 高永超, 等, 黄河三角洲湿地土壤盐离子沿水盐 梯度的变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3):641-649.
 ZHAO Q Q, BAI J H, GAO Y C, et al, Variations in soil salt ions along a water and salinity gradient in the Yellow River Delta, China
 [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(3):641-649.
- [11] 杨策,陈环宇,李劲松,等.盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土 效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10):1578-1586. YANG C, CHEN H Y, LI J S, et al. Soil improving effect of Suaeda salsa on heavy coastal saline - alkaline land[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(10):1578-1586.
- [12] 张华艳, 牛灵安, 郝晋珉, 等. 黑龙港流域微地貌与地下水埋深对 土壤潜在盐渍化的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5):83-90. ZHANG H Y, NIU L A, HAO J M, et al. Effect of micro-topography and groundwater depth on soil potential salinization in Heilonggang basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5):83-90.
- [13] KHATIBI R, SOLTANI S, KHODAGHOLI M. Effects of climatic factors and soil salinity on the distribution of vegetation types containing *Anabasis aphylla* in Iran: A multivariate factor analysis[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(2):36.
- [14] MARZIEH M, MAHDI N, SAEED N, et al. Relationship between landform and soil salinity in the surface and subsurface soils (case study: Southeast of Fars Province, Iran) [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2016, 2(1):16.
- [15] TAHA G, AYSEGUL T, ELIF S. Soil salinity prediction, monitoring and mapping using modern technologies[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 15:507–512.
- [16] HAN M Z, GAO M X, YANG J H. Three dimensional evaluation on soil improvement effect of saline alkali soil in Yellow River Delta[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 734 (1):e012036.
- [17] SEIFI M, AHMADI A, NEYSHABOURI M R, et al. Remote and Vis-NIR spectra sensing potential for soil salinization estimation in the eastern coast of Urmia hyper saline lake, Iran[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2020, 20:100398.
- [18] 刘洪波, 丁邦新, 白云岗, 等. 典型干旱区绿洲春季土壤盐分空间 分布特征分析[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 279-285. LIU H B, DING B X, BAI Y G, et al. Spatial distribution characteristics of soil salinity in an oasis of typical arid regions in spring[J]. Chinese Journal

of Soil Science, 2021, 52(2):279-285.

- [19] 杨小虎, 罗艳琴, 杨海昌, 等. 玛纳斯河流域绿洲农田土壤盐分反 演及空间分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2):156-161. YANG X H, LUO Y Q, YANG H C, et al. Soil salinity retrieval and spatial distribution of oasis farmland in Manasi River basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(2):156-161.
- [20] 康满萍, 赵成章, 白雪. 苏干湖湿地土壤全盐含量空间异质性及影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(6):2282-2291. KANG M P, ZHAO C Z, BAI X. Spatial heterogeneity and influencing factors of total soil salinity in Sugan Lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6):2282-2291.
- [21] WANG Y G, DENG C Y, LIU Y, et al. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621:177-185.
- [22] GEBREMESKEL G, GEBREMICAEL T G, KIFLE M, et al. Salinization pattern and its spatial distribution in the irrigated agriculture of northern Ethiopia: An integrated approach of quantitative and spatial analysis[J]. Agricultural Water Management, 2018, 206:147–157.
- [23] REN D Y, WEI B Y, XU X, et al. Analyzing spatiotemporal characteristics of soil salinity in arid irrigated agro-ecosystems using integrated approaches[J]. *Geoderma*, 2019, 356:113935.
- [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. WANG Z R, ZHAO G X, GAO M X, et al. Spatial variation of soil water and salt and microscopic variation of soil salinity in summer in typical area of the Yellow River Delta in Kenli County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4):1040-1049.
- [25] 张国明, 史培军, 王静爱, 等. 滨海盐碱地不同盐生植物群落与土 壤微域特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49 (4):417-420. ZHANG G M, SHI P J, WANG J A, et al. Characteristics of soil micro-domain and salt plant community on coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(4):417-420.
- [26] 张谦, 冯国艺, 雷晓鹏, 等. 滨海盐碱地预覆膜起垄的生态效应及 对棉花苗期的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4):74-79. ZHANG Q, FENG G Y, LEI X P, et al. Ecological effects of early plastic mulching and ridging and its effect on seedling stage of cotton in coastal saline soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36 (4):74-79.
- [27] 崔昆, 赵庚星, 王卓然, 等. 黄河三角洲夏季典型田块土壤盐分的 多尺度空间变异[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5):1451-1458. CUI K, ZHAO G X, WANG Z R, et al. Multi-scale spatial variability of soil salinity in typical fields of the Yellow River Delta in summer [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5):1451-1458.
- [28] 杨帆, 王志春, 王云贺, 等. 松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群 落分布的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(19):6202-6208. YANG F, WANG Z C, WANG Y H, et al. The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19):6202-6208.
- [29] 罗金明, 王永洁, 邓伟, 等. 松嫩平原盐渍化区土壤的微域特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8):1912-1917. LUO J M, WANG Y J,

DENG W, et al. Micro-scale soil characteristics in salinization area of Songnen Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1912–1917.

- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S
 D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [31] 杨晓娟, 李春俭. 机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响[J]. 中国农业科学, 2008(7):2008-2015. YANG X J, LI C J. Impacts of mechanical compaction on soil properties, growth of crops, soil-borne organisms and environment[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008(7):2008-2015.
- [32] 赵名彦,丁国栋,郑洪彬,等.覆盖对滨海盐碱土水盐运动及对刺 槐生长影响的研究[J].土壤通报,2009,40(4):751-755. ZHAO M Y, DING G D, ZHENG H B, et al. A study on effects of different ground covers on water and salt movement and *Robinia pseudoacacia* growth in marine saline-alkaline soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4):751-755.
- [33] 王晨, 谭玲玲, 倪细炉, 等. 芦苇对人工盐碱湿地中 Na⁺的吸收与转

运特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9):1970-1976. WANG C, TAN L L, NI X L, et al. Characteristics of Na⁺ absorption and transport of *Phragmites communis* in artificial saline wetlands[J]. *Journal* of Agro-Environment Science, 2018, 37(9):1970-1976.

- [34] 王启尧, 赵庚星, 李涛, 等. 滨海盐渍麦田施用微生物菌肥的降盐 效果及冬小麦长势响应[J]. 中国农学通报, 2021, 37(24):60-66. WANG Q Y, ZHAO G X, LI T, et al. Microbial fertilizers application in coastal saline wheat field: The salt-reducing effect and the growth response of winter wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(24):60-66.
- [35] 刘海曼, 郭凯, 李晓光, 等. 地膜覆盖对春季咸水灌溉条件下滨海 盐渍土水盐动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1761-1769. LIU H M, GUO K, LI X G, et al. Effect of plastic film mulch on soil moisture and salt dynamics under saline water irrigation in coastal[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1761-1769.

(责任编辑:宋潇)