

灌溉水盐分及灌水量对土壤水盐分布与春玉米生长的影响

张美桃¹, 杨培岭¹, 任树梅¹, 徐子昂², 魏琛琛¹, 贺新¹

(1.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083;2.武汉市青山区水务和湖泊局,武汉 430080)

摘要:在大田试验的基础上探明灌溉水盐分以及灌水量对土壤水盐分布的影响规律以及对春玉米生长的影响。以河套灌区春玉米为研究对象,设置2种灌溉水含盐量(1.1,5.0 g/L)与3种灌水量(210,255,300 mm)进行大田试验。结果表明,至成熟期,5.0 g/L微咸水灌溉处理0—100 cm土层土壤平均含水量及电导率相比1.1 g/L地下水灌溉处理显著增加;地下水灌溉处理中,随着灌水量的增加,生育期内土壤平均含水量下降趋势减小,土壤盐分淋洗作用更加明显;微咸水灌溉处理中,剖面土壤在灌水量少时出现盐分表聚现象,随着灌水量的增加,表层土壤盐分呈下降趋势,深层土壤由于盐分的积累呈增加趋势;在灌水后表层的土壤含水量变化明显且出现返盐现象,微咸水灌溉处理中土壤水分水平运移及深层土壤盐分累积更明显;在地下水和微咸水灌溉处理中,灌水量的增加能够显著提高玉米产量,但255,300 mm灌水量处理间差异不显著,微咸水灌溉条件下春玉米的产量较地下水灌溉条件下显著降低。综上所述,在地下水和微咸水灌溉条件下,255 mm灌水量既能适合春玉米生长,又能保证产量,可作为较好的灌溉定额选择,能够同时满足保障灌区作物生产和节约淡水资源的要求。

关键词:河套灌区;水盐动态;春玉米;产量

中图分类号:S155.4⁺4;S513

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0290-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.04.036

Effects of Irrigation Water Salinity and Irrigation Amount on Soil Water and Salt Distribution and Spring Maize Growth

ZHANG Meitao¹, YANG Peiling¹, REN Shumei¹, XU Ziang², WEI Chenchen¹, HE Xin¹

(1.Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083;

2.Wuhan Qingshan District Water and Lakes Bureau, Wuhan 430080)

Abstract: Based on the field experiment, the effects of irrigation water salinity and irrigation amount on soil water and salt distribution and spring maize yield were explored. Taking spring maize in Hetao Irrigation District as the research object, two irrigation waters (1.1, 5.0 g/L) and three irrigation amounts (210, 255, 300 mm) were set up for field experiments. The results showed that at maturity, the average water content and soil conductivity of 0—100 cm soil layer under 5 g/L brackish water irrigation were significantly higher than those under groundwater irrigation. In groundwater irrigation, with the increase of irrigation amounts, the decreasing trend of soil average water content in growth period decreased, and the leaching effect of soil salt was more obvious. In brackish water irrigation, when the amount of irrigation was small, the surface accumulation of soil salt appeared. With the increase of irrigation amounts, the salt content of surface soil decreased, and more salt accumulated in the deep soil. After irrigation, the surface soil water content changed obviously and there was a phenomenon of salt return, and the horizontal movement of soil water and the accumulation of deep soil salt were more obvious in brackish water irrigation. In groundwater and brackish water irrigation, the increase of irrigation could significantly improve the yield of maize, but there was no significant difference between 255 mm and 300 mm treatments. Compared with groundwater irrigation, brackish water irrigation significantly reduced the yield of spring maize. In conclusion, under the conditions of groundwater and brackish water irrigation, 255 mm irrigation water could not only be suitable for the growth of spring maize, but also ensure the yield. It could be used as a better irrigation quota and meet the

收稿日期:2021-12-15

资助项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0408703);国家自然科学基金项目(51879263,51679239,51909265);兵团财政科技计划项目(2021DB017)

第一作者:张美桃(1997—),女,硕士研究生,主要从事土壤氮素循环研究。E-mail:2638688158@qq.com

通信作者:杨培岭(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:yangpeiling@126.com

requirements of ensuring crop production and saving fresh water resources in the irrigation area.

Keywords: Hetao Irrigation District; water-salt dynamic; spring maize; yield

随着国民经济和工农业生产的迅速发展,我国用水供需矛盾、水资源短缺及农业用水占用水总量比例大的问题影响着社会经济的可持续发展^[1]。微咸水由于其分布广、储量大^[2],成为重点开发利用的非常规水源,国内外已在咸水、微咸水灌溉方面开展了大量的研究^[3-7],研究证明合理利用微咸水资源可以有效解决我国水资源短缺的问题,保证农业用水的需要。

河套灌区不仅是我国的三大灌区之一,还是我国的粮食主产区^[8]。该地区气象条件表现为高蒸发、低降雨,是典型的温带大陆性气候,其主要灌溉水源是黄河,但是由于指令性节水,引黄水量需要减少至 40 亿 m^3 ^[9]。河套灌区地下微咸水储量丰富,可利用量达到 7.21 亿 m^3 ^[10],利用微咸水代替淡水灌溉是解决当地农业水资源短缺的其中一个有效措施。玉米是河套灌区的主要粮食作物,2012 年玉米的种植面积达 34 万 hm^2 ,总产量 296 万 t,占内蒙古玉米总产量的 21%^[11]。适宜的微咸水灌溉模式能够提供给作物一定的水分,有利于作物生长^[12]。膜下滴灌技术由于其能够减少土壤水分的蒸发,将盐分淋洗至湿润体周围,提高水肥利用效率,能够为作物生长提供一个良好的环境条件,因此被认为是微咸水灌溉的有效灌溉技术^[13]。但是长期的、矿化度高的咸水灌溉会增加土壤表层的盐分,导致土壤的环境发生改变,从而不利于作物的生长^[14-15]。灌溉水量也是影响土壤水盐分布的关键因素,目前在灌溉水量及灌溉水盐分对土壤水盐分布及作物生长的影响已经开展了很多的研究^[16-18]。研究证明利用微咸水进行田间灌溉一方面能够提供作物生长所需的水分,另一方面会增加土壤中的盐分,从而影响土壤渗透性和作物生长发育,而增加灌水量可以对土壤盐分淋失起到一定的作用,但过度灌溉则导致土壤水分流失和养分淋失,从而污染地下水。潘延鑫等^[19]试验研究结果表明,随着灌溉水矿化度的增加,春玉米的生长和产量均逐渐下降;Wei 等^[15,20]、王帅杰等^[21]、杨培岭等^[22]在河套灌区探究了地下水(1.1 g/L)和 3 种矿化度(2.0,3.5,5.0 g/L)微咸水灌溉条件下对土壤性质以及春玉米生长的影响表明,随着微咸水矿化度的增加,土壤含水率和电导率增加,作物产量减少。

本研究以 2019 年河套灌区膜下滴灌春玉米为研究对象,主要分析研究了地下水与微咸水灌溉条件下 3 种不同灌水量对土壤水盐分布的影响,以及对春玉米生长的影响,旨在为河套灌区进一步寻求一种适宜的地下水与微咸水灌溉定额提供理论依据,使得其既能保证作物

的产量,同时还能满足节约水资源的要求。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验于 2019 年 4—9 月在内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区的曙光实验站(40°46'N,107°240'E)进行。该地区降水少、风大、气候干燥,年平均气温 6.9 °C,多年平均降水量 142.1 mm,年平均蒸发量 2 306.5 mm。试验期间试验区累积降水量为 63.68 mm,土壤平均温度为 17.6 °C,地下水埋深为 2~4 m,逐日气象条件及地下水位变化见图 1。试验区 0—60 cm 土壤为粉砂壤土,田间持水率为 19.80%,饱和含水率为 31.43%,容重为 1.50 g/ cm^3 ,60—100 cm 土壤为粉砂黏壤土,田间持水率为 28.40%,饱和含水率为 34.15%,容重为 1.44 g/ cm^3 ,播种前土壤电导率为 292.98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.2 试验设计

试验采取 3×2 全因素设计。对应 2 种不同矿化度灌溉水,即含盐量 1.1 g/L(电导率为 1 830 $\mu\text{S}/\text{cm}$)的当地地下水与 5.0 g/L(电导率为 8 004 $\mu\text{S}/\text{cm}$)的微咸水(分别用 S1、S2 表示),在曙光试验站地下水的基础上加入 1:2 摩尔比的 KCl 和 NaCl 配置成试验中所用的微咸水,以及参考相关文献结合当地灌溉经验,设置低、中、高 3 个灌水量水平,分别为 210,255,300 mm(分别以 L1、L2 和 L3 表示),共计 6 个处理,每个处理重复 3 次,共计 18 个试验区,具体试验方案见表 1。为了防止各处理间灌水、施肥时的相互影响,各个试验区随机分布设置 1 m 的隔离带。春玉米作为此次试验的研究对象,其品种选择当地常用的“西蒙 3358”品种,于 2019 年 4 月 26 日采用人工点播方式播种,9 月 11 日测产收获。试验种植方式为“一膜一带两行”,宽行 70 cm,窄行 40 cm,株距 30 cm。窄行中心铺设覆盖薄膜的滴灌带,铺设的滴灌带壁厚为 0.4 mm,滴头间距 30 cm,灌水器工作流量为 2 L/h。全生育期共灌水 17 次,灌水周期为 6 天。播种前施入底肥磷酸二铵(375 kg/ hm^2)和尿素(75 kg/ hm^2),于玉米拔节、抽穗、灌浆期按 2:2:1 追施尿素,总施氮量为 300 kg/ hm^2 。每次的灌水量由水表控制,施肥按比例泵随滴灌追肥,其灌水与施肥制度见图 1。

1.3 测定指标

在田间利用巍图科技的 Fleb-30c 土壤水盐温通体监测站进行土壤水盐长系列数据的监测,每个小区膜内膜外各随机布置 1 组装置,布置深度为 0—100 cm,对春玉米生育期水盐每日的动态变化进行监测,

并在各主要生长阶段(苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期)以及 7 月 24 日灌水前后取土进行数据验证,取土深度分别为 0—10,10—20,20—40,40—60,60—100 cm,对其进行含水量及电导率的测定。在玉米收获期,

从每个小区随机抽取长势均匀的 6 株玉米,分别测量单株穗长、穗粗、穗行数等指标,对玉米进行脱粒后将籽粒风干称重,测定玉米的产量。利用 Excel 软件进行数据分析,SPSS 进行显著性分析。

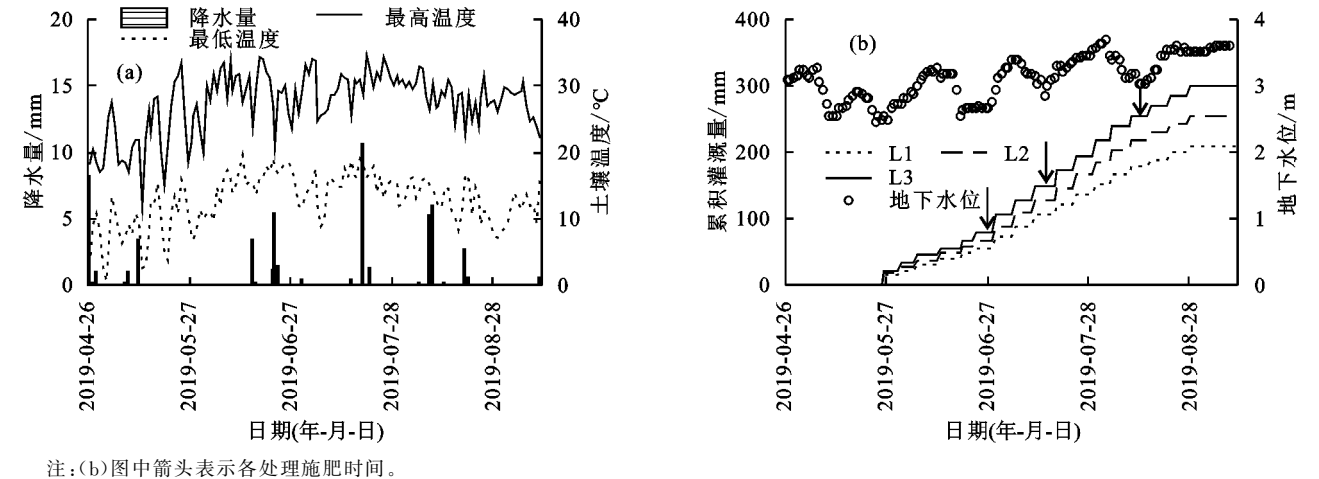


图 1 试验区气象数据、地下水位及灌溉制度

表 1 田间试验处理		
处理	灌溉水矿化度/(g·L ⁻¹)	灌溉定额/mm
S1L1	1.1(地下水)	210(70%亏缺灌溉)
S1L2	1.1(地下水)	255(85%亏缺灌溉)
S1L3	1.1(地下水)	300(充分灌溉)
S2L1	5.0(微咸水)	210(70%亏缺灌溉)
S2L2	5.0(微咸水)	255(85%亏缺灌溉)
S2L3	5.0(微咸水)	300(充分灌溉)

L1 处理 0—10 cm 土层土壤含水量从生育初期至成熟期增加 10.34%,而 10—100 cm 土层土壤含水量降低 1.87%~19.79%,但相对于地下水灌溉处理下降的程度减小,L2 和 L3 处理 0—20 cm 土层土壤含水量变化较为明显,从生育初期至成熟期增加 13.05%~71.98%,20—100 cm 土层土壤含水量受盐分影响较小,增加 0.93%~16.58%。

2 结果与分析

2.1 生育期不同阶段土壤水分变化

图 2 为生育期内各处理 0—100 cm 土层的土壤含水量的变化趋势。在整个生育期内,1.1 g/L 地下水灌溉中 L1、L2、L3 处理平均含水量均呈下降趋势,到成熟期 0—100 cm 土层平均含水量比苗期分别下降 36.61%,37.67%和 15.92%,这是由于灌溉水量的增加,L3 处理生育期内平均含水量的降低幅度较小。5.0 g/L 微咸水灌溉中 L1 处理平均含水量到成熟期 0—100 cm 土层平均含水量比苗期下降 9.14%,L2 和 L3 处理平均含水量到成熟期 0—100cm 土层平均含水量比苗期分别增加 6.24%,23.69%。从图 2 可以看出,整个生育期内从灌浆期开始矿化度对于土壤含水量出现明显影响。至成熟期,5.0 g/L 微咸水灌溉处理 0—100cm 土层平均含水量相比地下水灌溉处理增加 21.88%~77.76%,出现显著性差异($p<0.05$)。

从图 3 可以看出,1.1 g/L 地下水灌溉中 L1 处理 0—40 cm 土层含水量从生育初期至成熟期下降 17.2%~31.9%,40—100 cm 土层相比 0—40 cm 土层含水量下降得更明显,达 63.9%~73.3%;L2、L3 处理剖面含水量下降程度与 L1 处理相反,0—40 cm 土层含水量下降得更明显。5.0 g/L 微咸水灌溉中

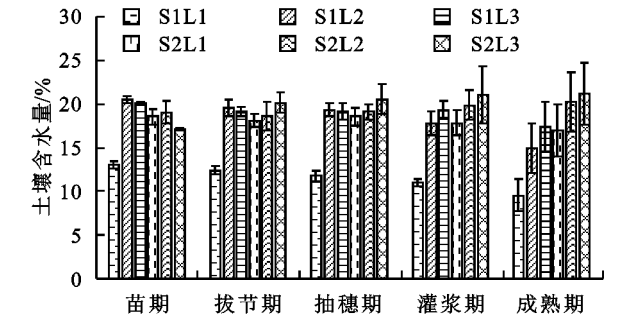


图 2 春玉米生育期不同阶段各处理土壤含水量

2.2 灌水前后土壤水分变化

图 4 为 7 月 24 日灌水前后膜内膜外 0—100 cm 土层剖面含水量的变化趋势。1.1 g/L 地下水灌溉中 L1 处理 0—20 cm 土层膜内土壤含水量在灌水当天呈增加趋势,在灌水后第 1 天增加幅度降低,到灌水后第 2 天呈下降趋势,20—100 cm 土层膜内土壤含水量在灌水前后变化不明显;L2、L3 处理由于灌水量的增加,0—40 cm 土层膜内土壤含水量在灌水当天呈增加趋势;各处理膜外 0—40 cm 土层土壤含水量在灌水后有增加的趋势,说明水分通过水平扩散增加膜外土壤含水量,但对于 40—100 cm 土层土壤含水量影响不明显。5.0 g/L 微咸水灌溉中各土层土壤含水量规律变化同地下水处理相似,但微咸水灌溉能影响水分在水平上的扩散,土壤水分水平运移更明显。

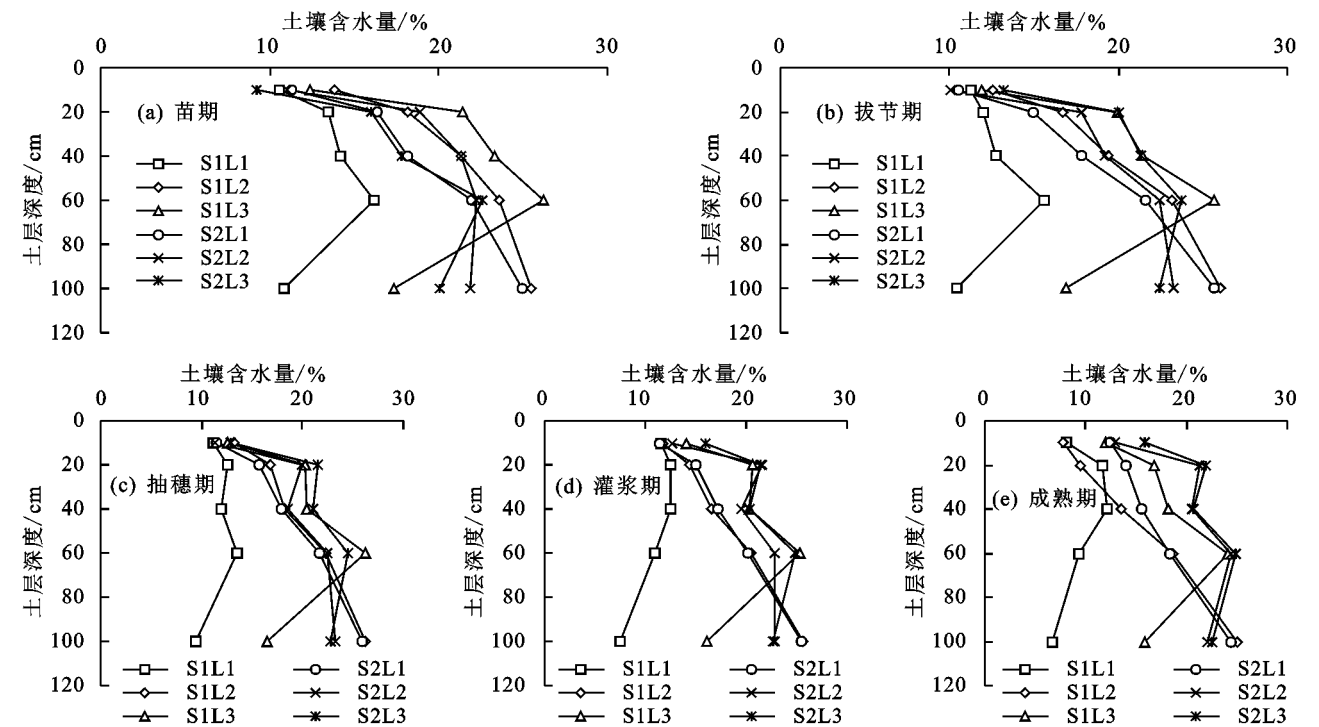


图 3 春玉米生育期各处理土壤剖面含水量

2.3 生育期不同阶段土壤盐分变化

图 5 为玉米生育期内各处理 0—100 cm 土层的土壤电导率的变化趋势。在整个生育期内 1.1 g/L 地下水灌溉中 L1~L3 处理土壤电导率呈降低的趋势,成熟期 0—100 cm 土层电导率比苗期分别下降 7.00%,14.93%和 26.41%,这是由于随着灌溉水量的增加,土壤盐分淋洗效果明显。5.0 g/L 微咸水灌溉中 L1 处理成熟期 0—100 cm 土层平均土壤电导率比苗期下降 15.65%,L2 和 L3 处理成熟期 0—100 cm 土层平均土壤电导率比苗期分别增加 0.67%,2.65%。从图 5 可以看出,整个生育期内从拔节期开始灌溉水矿化度对于土壤电导率出现明显影响,至成熟期,5.0 g/L 微咸水灌溉处理 0—100 cm 土层土壤电导率相比地下水灌溉处理增加 19.50%~52.19%,出现显著性差异($p<0.05$)。

图 6 为玉米生育期内不同阶段土壤剖面电导率的变化趋势。1.1 g/L 地下水灌溉中 L1 处 10—60 cm 土层土壤电导率从生育初期至成熟期减少 13.28%~17.07%,其他土层没有明显变化;L2 处理 0—10 cm 土层土壤电导率从生育初期至成熟期增加 29.04%,10—100 cm 土层土壤电导率从生育初期至成熟期减少 4.87%~103.40%;L3 处理由于灌水量增加,各土层都有一定的盐分淋洗效果。5.0 g/L 微咸水灌溉中,L1 处理由于灌水量较低,盐分主要聚集在 0—10 cm 土层,该土层土壤电导率从生育初期至成熟期增加 45.63%,而 10—100 cm 土层土壤电导率呈减少趋

势,并且减少幅度随着土层深度的增加而降低;L2、L3 处理由于灌水量的增加对表层土壤盐分的淋洗作用较明显,0—10cm 土层土壤电导率从生育初期至成熟期分别降低 11.50%,44.57%,10—100 cm 土层土壤电导率从生育初期至成熟期增加 0.36%~44.94%。

2.4 灌溉前后土壤盐分变化

图 7 为灌水前后土壤膜内膜外土壤电导率的变化,分析时间段与土壤水分变化分析时间段相同。1.1 g/L地下水灌溉中,L1 处理在灌水当天 0—10 cm 土层膜内土壤电导率降低 20.7%,在灌水后第 1 天后呈增加趋势,出现土壤返盐现象,10—100 cm 土层膜内土壤电导率在灌水当天增加之后逐渐减少;L2 处理与 L1 处理相似;L3 处理由于灌水量较大,0—10 cm 土层膜内土壤电导率降低的趋势一直持续到灌水后第 1 天;所有处理 0—10 cm 土层膜外土壤电导率在灌水后呈下降趋势,说明水分通过水平扩散对膜外表层盐分有一定淋洗作用。5.0 g/L 微咸水灌溉中 L1 处理土壤电导率规律变化同地下水处理相似,土壤盐分累积主要在表层;L2、L3 处理深层土的盐分累积现象更加明显。

2.5 春玉米产量

表 2 为不同处理下玉米生长及产量指标。微咸水灌溉及灌水量增加对玉米穗部性状有所影响,随着灌溉水盐分的增加,玉米生长和产量指标均表现出减少的趋势;随着灌水量的增加,玉米生长和产量指标表现出增加的趋势,各产量指标影响着玉米最终的产

量。在地下水灌溉和微咸水灌溉中,L2、L3 处理玉米产量较 L1 处理分别提高了 26.15%~27.07%和 34.29%~39.11%,出现显著性差异($p<0.05$),说明灌水量的增加能够显著提高玉米的产量,但 L2 与 L3 处理之间均未

出现显著性差异($p>0.05$)。在灌水量相同的条件下,微咸水灌溉处理的春玉米产量较地下水灌溉处理减小 30.88%~37.32%,出现显著性差异($p<0.05$),说明灌溉水盐分的增加会导致玉米产量的下降。

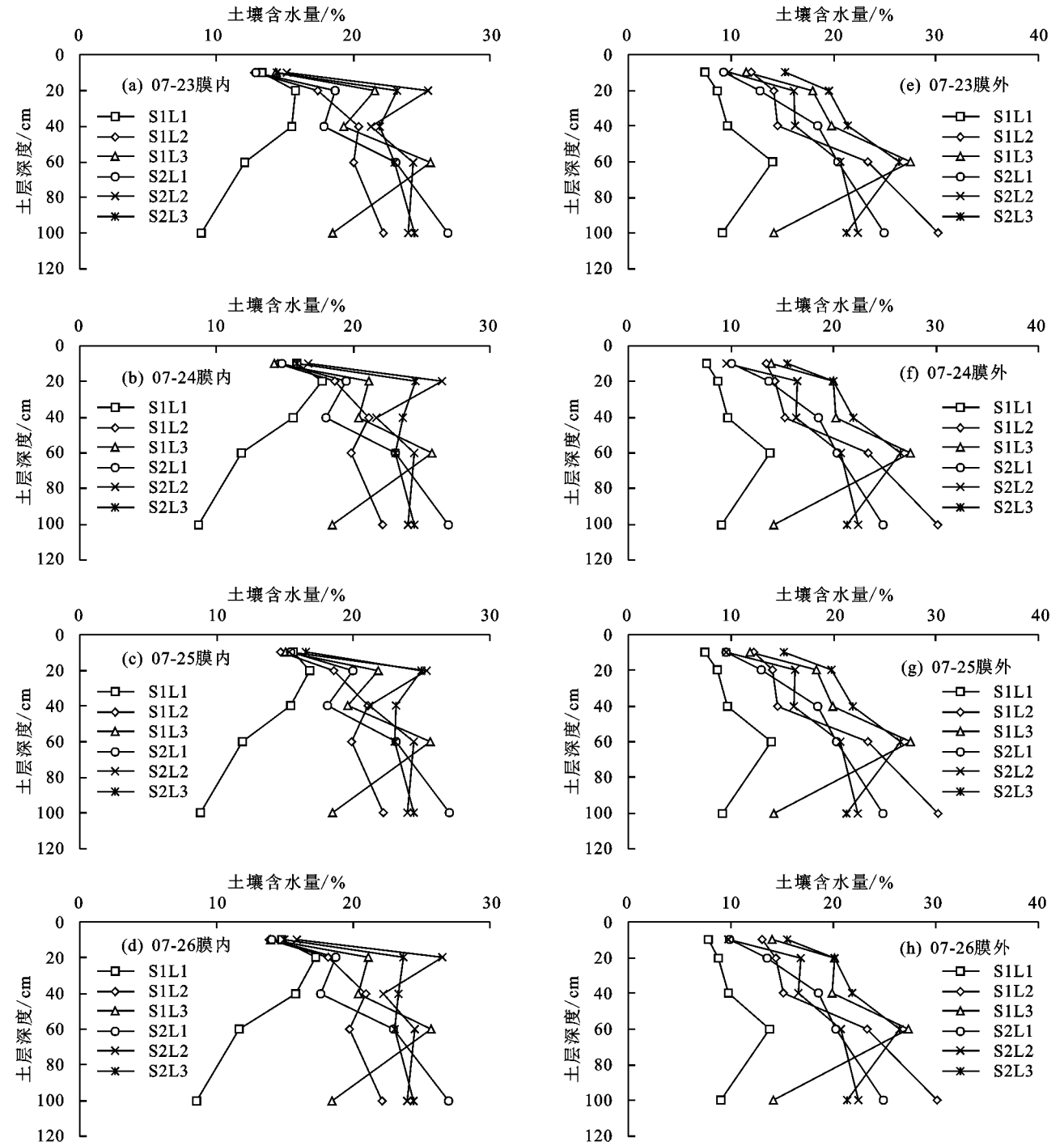


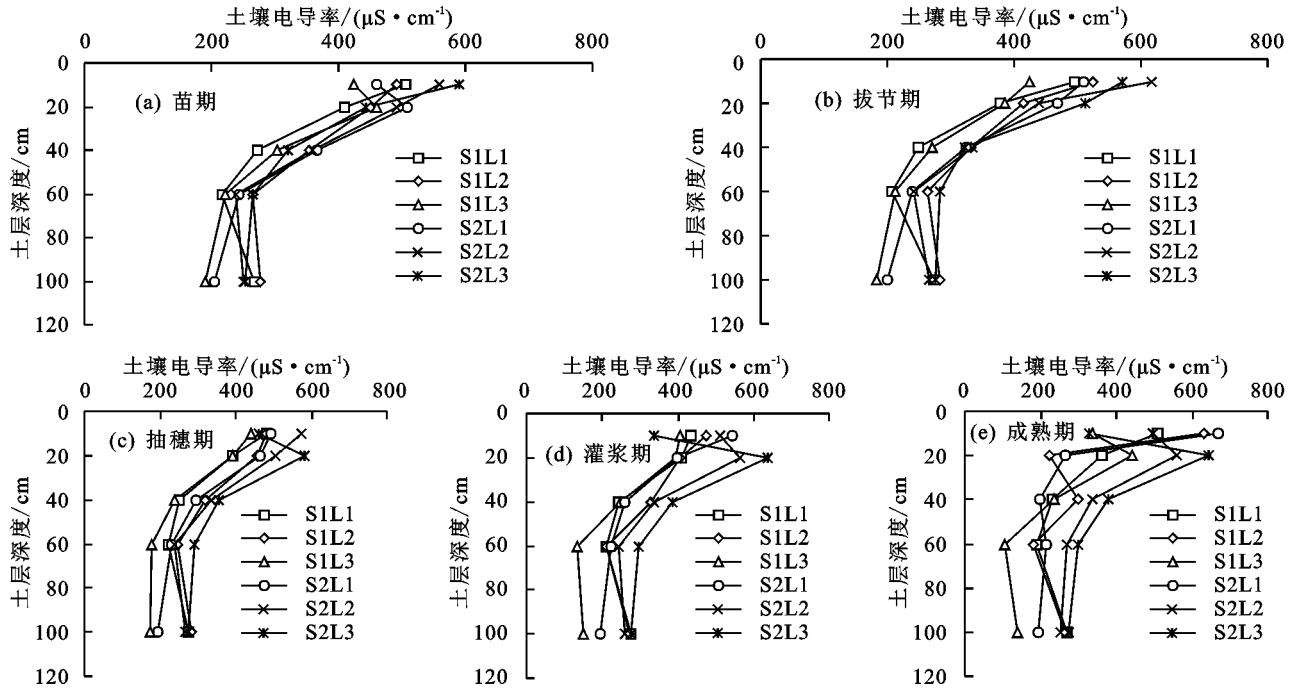
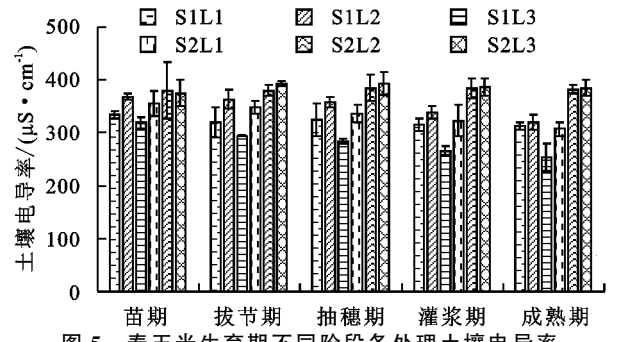
图 4 灌水前后各处理膜内和膜外土壤剖面含水量变化

3 讨论

土壤水分分布主要受土壤性质、灌水量和灌溉水盐分影响,在地下水和微咸水灌溉条件下生育期不同阶段水分变化有所差异。本研究结果表明,在不同灌溉水盐分条件下,由于灌水量的增加能够带给土壤更多的水分,土壤含水量均呈增大趋势。地下水灌溉处理中 0—100 cm 土层平均土壤含水量在玉米生育期

末期显著下降,这可能是由于随着春玉米生育进程的推进,大气温度升高蒸发加强以及玉米根系发育会迅速增加耗水量,使得地表和土层中的含水量减少;各处理剖面土壤含水量变化不同可能是由于粉砂壤土和粉砂黏壤土之间的土质转化造成土壤的渗透能力发生改变^[23]。至成熟期,微咸水灌溉处理 0—100 cm 土层平均含水量相比地下水灌溉处理显著增加,这可

能是由于微咸水带入的盐分造成盐分胁迫,从而抑制根系吸水,使土壤中的水分增加^[19,24]。无论在地下水灌溉还是微咸水灌溉中,灌水前后土壤表层受灌水、降雨和蒸发影响较大^[25],因此表层的土壤含水量变化明显,与吴军虎等^[26]研究结果一致。微咸水还将 Na^+ 带入土壤中,从而分散土壤颗粒,增加水分水平扩散能力^[27],导致微咸水灌水后土壤水分水平运移更明显。



灌水量和灌溉水盐分对于土壤电导率的影响在生育初期不明显,随着生育期的推进,至成熟期地下水灌溉中各处理 0—100 cm 土层平均土壤电导率均呈下降趋势,微咸水灌溉处理相比地下水灌溉处理 0—100 cm 土层土壤电导率显著增加,随着灌水量的增加,增加幅度也相应增大,与之前的研究^[28-29]结果一致,其主要原因是地下水灌溉对土壤盐分有淋洗作用,灌水量越大,淋洗作用越明显,而微咸水灌溉会增强土壤入渗能力,从而使土壤盐分积累增多^[30]。微咸水灌溉下剖面土壤电导率在不同灌水量条件下变化不同,播种前土壤含盐量较高,在 210 mm 灌水量处理下由于灌水量小,水分对盐分的淋洗作用相对较小,以及从生育初期到成熟期地下水位有一定的增加趋势,导致盐分主要积聚在表层^[31-32],深层土壤电导率呈下降趋势,这也是春玉米从苗期至成熟期 0—100 cm 土层平均土壤电导率下降的原因;随着灌水量的增加,255,300 mm 灌水量处理下深层土壤盐分累积,可能是由于表层盐分被淋洗到深层土壤中,也可能是由于滴灌的压盐作用导致盐分逐渐下移,深层土壤盐分不断累积^[33]。无论在地下水灌溉还是微咸水灌溉中,210,255 mm 灌水量处

理中 0—10 cm 土层由于灌水量小,蒸发作用强,在灌水后膜内盐分会一定程度地向上层迁移,出现土壤返盐现象^[34];0—10 cm 土层膜外土壤电导率由于水分通过水平扩散对膜外表层盐分有一定淋洗作用,在灌水后呈下降趋势;微咸水灌溉中 255,300 mm 灌水量处理由于灌水量大,所带入土壤的盐分也相应增加,导致其深层土壤盐分累积更明显。

作物产量与实际生产活动息息相关。本研究结果表明,与地下水灌溉相比,微咸水灌溉下作物的产量显著减小,与之前的研究^[19,28,35]结果一致;同时在与本试验相同的条件下,Wei 等^[20]、王帅杰等^[21]、杨培岭等^[22]、魏琛琛等^[36]的研究结果也证明春玉米产量随着灌溉水盐分的增加而降低。这可能是由于微咸水灌溉中存在盐分胁迫,导致作物的光合速率降低,气孔导度和蒸腾速率减小^[30],且增加的土壤盐分则可能随着灌溉水向下移动到作物根区,作物对水分和养分的吸收作用减小,从而导致作物的产量降低^[24]。无论在地下水灌溉还是微咸水灌溉中,255,300 mm 灌水量处理相对于 210 mm 灌水量处理显著提高春玉米的产量,但 255,300 mm 灌水量处理之

间的春玉米产量差异不显著,说明灌水量的增加能够提高春玉米的产量,但春玉米在 255 mm 处理下能够充分利用灌溉所提供土壤的水分,已经满足作物耗

水的需求。综合考虑既能节省水资源,保证适合春玉米生长,又能保证产量,微咸水灌溉下 255 mm 的灌水量能够作为河套灌区较好的灌溉选择。

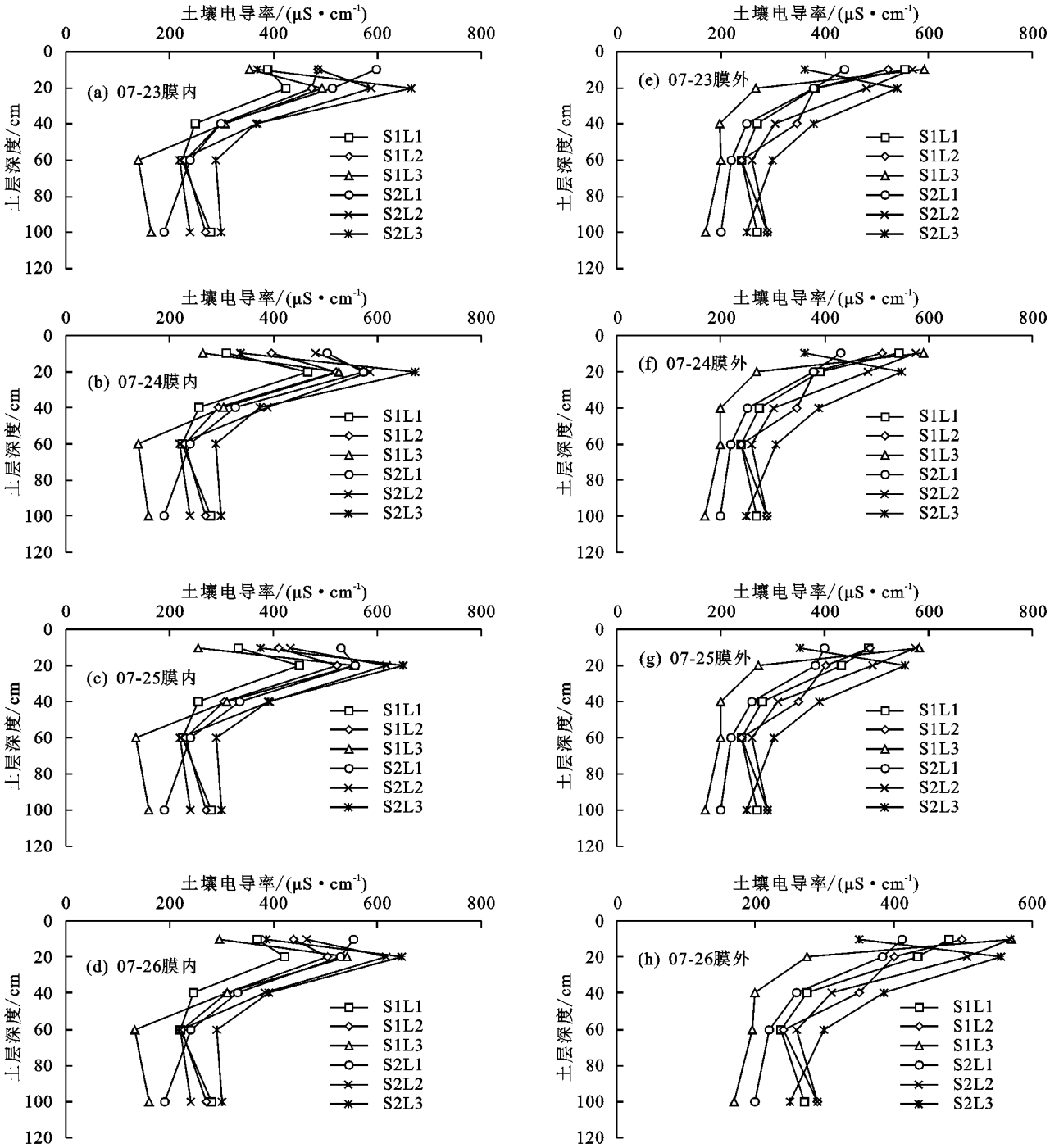


图 7 灌水前后各处理膜内和膜外土壤剖面电导率变化

表 2 不同处理下玉米生长及产量指标

处理	穗长/cm	穗粗/cm	秃尖长/cm	穗行数	行粒数	穗质量/g	百粒重/g	产量/ (kg·hm ⁻²)
S1L1	20.53ab	47.56bc	0.80a	14.76b	44.50a	251.15b	34.82ab	11238.06b
S1L2	21.48a	52.51a	1.81a	15.88b	46.14a	324.18a	38.00a	14280.73a
S1L3	21.44a	52.48a	0.79a	16.96a	45.50a	321.20a	36.33a	14176.82a
S2L1	18.86c	45.88c	1.65a	14.57b	40.92b	188.66c	31.04b	7044.47c
S2L2	20.13b	48.60bc	0.81a	15.66b	45.01a	256.56b	33.81ab	9460.28b
S2L3	20.46ab	49.03b	0.62a	15.47b	45.47a	266.33b	34.21ab	9799.66b

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

4 结 论

(1)土壤水分变化在不同处理之间表现出差异。春玉米苗期至成熟期,微咸水(含盐量 5.0 g/L)灌溉土壤平均含水量相比地下水(含盐量 1.1 g/L)灌溉处理显著增加 21.88%~77.76%;在地下水灌溉中,各处理在生育期内土壤平均含水量呈下降趋势,随着灌水量的增加,下降趋势不断减小,剖面土壤含水量由于土质变化导致各个土层含水量下降程度不同;在微咸水灌溉中,除 210 mm 灌水量处理外,其他灌水量处理土壤平均含水量及土层剖面含水量呈增加趋势;地下水和微咸水灌溉各处理在灌水前后土壤剖面含水量变化规律相似,膜内膜外表层土壤含水量在灌水后均呈增加的趋势,深层土壤含水量变化不明显,在微咸水灌溉中土壤水分水平运移更明显。

(2)土壤盐分变化在不同处理之间表现出差异。春玉米苗期至成熟期,微咸水灌溉平均土壤电导率相比地下水灌溉处理显著增加 19.5%~52.19%;在地下水灌溉中各处理生育期内平均土壤电导率呈下降趋势,随着灌水量的增加,土壤盐分淋洗作用增强;在微咸水灌溉中,随着灌水量增加带入土壤更多的盐分,土壤平均电导率呈增加趋势,剖面土壤在灌水量少时,出现土壤盐分表聚现象,随着灌水量增加表层土壤电导率呈下降趋势,深层土壤电导率由于盐分的累积呈增加趋势;地下水和微咸水灌溉处理下在灌水前后土壤剖面电导率变化规律相似,膜内 255,300 mm 处理表层土壤在灌水第 1 天后出现返盐现象,微咸水灌溉中深层土壤盐分累积得更明显。

(3)春玉米产量受到土壤灌水量和灌溉水盐分的影响,灌水量的增加能够显著提高春玉米的产量,但 255,300 mm 处理间产量未出现显著性差异,微咸水灌溉导致春玉米产量显著降低。该试验区在淡水资源短缺的情况下,综合考虑到对土壤水盐及春玉米产量的影响,在当地地下水与微咸水灌溉条件下,255 mm 灌溉水量可作为灌区适宜采用的灌溉定额。本研究结果可为河套灌区制定春玉米地下水与微咸水膜下滴灌灌溉定额提供理论依据。

参考文献:

[1] 康绍忠,蔡焕杰,冯绍元.现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J].农业工程学报,2004,20(1):1-6.

[2] 吴忠东.微咸水畦灌对土壤水盐分布特征和冬小麦产量影响研究[D].西安:西安理工大学,2008.

[3] 贺新,杨培岭,任树梅,等.基于主成分分析的油葵微咸水调亏灌溉灌水效果评价[J].农业机械学报,2014(增刊 1):162-167.

[4] 万书勤,汪然,康跃虎,等.微咸水滴灌施肥灌溉对马铃薯生长和水肥利用的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(7):1-7.

[5] 郭梦吉,刘宇,任树梅,等.河套灌区微咸淡水交替灌溉对加工番茄根系生长的影响[J].中国农业大学学报,2016,21(2):65-72.

[6] Rameshwaran P, Tepe A, Yazar A, et al. Effects of drip-irrigation regimes with saline water on pepper productivity and soil salinity under greenhouse conditions [J].Scientia Horticulturae,2016,199:114-123.

[7] Yuan C F, Feng S Y, Wang J, et al. Effects of irrigation water salinity on soil salt content distribution, soil physical properties and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China[J].International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018,11(3):137-145.

[8] Zhu Y C, Wang L J, Zhao X Y, et al. Accumulation and potential sources of heavy metals in soils of the Hetaoarea, Inner Mongolia, China[J].Pedosphere,2020(2):244-252.

[9] 史海滨,杨树青,李瑞平,等.内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J].灌溉排水学报,2020,39(8):1-17.

[10] 李金刚,屈忠义,黄永平,等.微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):217-223.

[11] 李文彪,刘荣乐,郑海春,等.内蒙古河套灌区春玉米推荐施肥指标体系研究[J].中国农业科学,2012,45(1):93-101.

[12] Suarez D L. Impact of agricultural practices on ground-water salinity[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,1989,26(3/4):215-227.

[13] 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.

[14] 王全九,徐益敏,王金栋,等.咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J].灌溉排水,2002(4):73-77.

[15] Wei C C, Yang P L, Ren S M, et al. Effects of irrigation methods and salinity on CO₂ emissions from farmland soil during growth and fallow periods[J].Science of the Total Environment,2021,752:e141639.

[16] 马东豪,王全九,来剑斌.膜下滴灌条件下灌水水质和流量对土壤盐分分布影响的田间试验研究[J].农业工程学报,2005,21(3):42-46.

[17] 何雨江,汪丙国,王在敏,等.棉花微咸水膜下滴灌灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2010,26(7):14-20.

[18] 蒋静,冯绍元,王永胜,等.灌溉水量和水质对土壤水盐分布及春玉米耗水的影响[J].中国农业科学,2010,43(11):2270-2279.

[19] 潘延鑫,袁成福.不同灌溉水矿化度对土壤水盐动态及

- 春玉米产量影响研究[J].南昌工程学院学报,2017,36(1):37-41.
- [20] Wei C C, Li F H, Yang P L, et al. Effects of irrigation water salinity on soil properties, N_2O emission and yield of spring maize under mulched drip irrigation [J].Water,2019,11(8):e1548.
- [21] 王帅杰,杨培岭,苏艳平,等.微咸水与淡水轮灌对春玉米土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J].中国农业大学学报,2018,23(10):41-48.
- [22] 杨培岭,王瑜,任树梅,等.咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J].农业机械学报,2020,51(6):273-281.
- [23] 陈丽娟,冯起,王昱,等.微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J].农业工程学报,2012,28(8):44-51.
- [24] 王艳娜,侯振安,龚江,等.咸水滴灌对土壤盐分分布、棉花生长和产量的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2007,25(2):158-162.
- [25] 王诗景,黄冠华,杨建国,等.微咸水灌溉对土壤水盐动态与春小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(5):27-33.
- [26] 吴军虎,陶汪海,赵伟,等.微咸水膜下滴灌不同灌水量对水盐运移和棉花生长的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):272-276,329.
- [27] 商艳玲.不同滴头流量下再生水灌溉对土壤水分运移规律的影响[J].甘肃水利水电技术,2015,51(6):15-18.
- [28] 刘雪艳,丁邦新,白云岗,等.微咸水膜下滴灌对土壤盐分及棉花产量的影响[J].干旱区研究,2020,37(2):410-417.
- [29] 郭安安,王梦琴,王为木,等.微咸水滴灌对土壤水盐运移影响的研究[J].安徽农学通报,2019,25(12):118-121.
- [30] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等.咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J].农业机械学报,2017,48(10):220-228,201.
- [31] 侯振安,王艳娜,龚江,等.干旱区咸水滴灌土壤盐分的分布与积累特征[J].土壤通报,2008,39(1):16-24.
- [32] 贾春青,张瑞坤,陈环宇,等.滨海盐碱地地下水位对土壤盐分动态变化及作物生长的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2018,35(4):283-290.
- [33] 杨文杰,王振华,任作利,等.微咸水膜下滴灌对土壤水盐分布及加工番茄产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(6):117-123,131.
- [34] 王海霞,徐征和,庞桂斌,等.微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):291-297.
- [35] Li J G, Chen J, Jin J X, et al. Effects of irrigation water salinity on maize (*zea may* L.) emergence, growth, yield, quality, and soil salt[J].Water,2019,11(10):e2095.
- [36] 魏琛琛,任树梅,徐子昂,等.灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响[J].农业机械学报,2021,52(7):251-260.
- (上接第 289 页)
- [22] 周艳翔,吕茂奎,谢锦升,等.深层土壤有机碳的来源、特征与稳定性[J].亚热带资源与环境学报,2013,8(1):48-55.
- [23] 万忠梅,郭岳,郭跃东.土地利用对湿地土壤活性有机碳的影响研究进展[J].生态环境,2011,20(3):567-570.
- [24] 肖烨,黄志刚,肖菡曦,等.不同水位时期东洞庭湖湿地土壤微生物生物量碳氮和酶活性变化[J].应用生态学报,2021,32(8):2958-2966.
- [25] 张宏,黄懿梅,安韶山,等.黄土高原森林带植被群落下土壤活性有机碳研究[J].水土保持研究,2013,20(3):65-70.
- [26] 党亚爱,李世清,王国栋,等.黄土高原典型土壤有机碳和微生物碳分布特征的研究[J].自然资源学报,2007,22(6):936-945.
- [27] 廖丹,于东升,赵永存,等.成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究[J].土壤学报,2015,52(3):517-527.
- [28] 高雨,赵洪涛,郭银花,等.山西太岳山不同林龄油松林土壤有机碳稳定性的变化特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(10):46-55.
- [29] 吴旭东.沙漠化对草地植物群落演替及土壤有机碳稳定性的影响[D].银川:宁夏大学,2016.
- [30] 霍莉莉.沼泽湿地垦殖前后土壤有机碳垂直分布及其稳定性特征研究[D].吉林 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2013:67-99.
- [31] Zhang H C, Liu S G, Yuan W P, et al. Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon[J].Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,2016,121(6):1449-1455.