

膜下滴灌对河套平原盐渍农田土壤性质和玉米产量的影响^①

唐冲^{1,2}, 杨劲松^{1,3*}, 李涛^{1,4}, 姚荣江¹, 谢文萍¹, 王相平¹

(1 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052; 4 长江大学农学院, 湖北荆州 434000)

摘要: 河套平原农田面临严峻的盐碱障碍与水资源短缺挑战, 极大地制约了区域农业的可持续发展。为探究膜下滴灌对河套平原盐渍农田宽行(70 cm 行距)和窄行(50 cm 行距)土壤性质和作物产量的影响, 本研究以玉米为供试作物, 设置覆膜(窄行)滴灌和不覆膜滴灌两个处理开展田间小区试验。结果表明: 滴灌诱导土壤盐分呈现明显的表聚现象, 膜下滴灌有利于缓解这一现象, 窄行土壤盐分显著降低 25.29%~56.90%, 且作物生育前期土壤水分保持能力提升 15.78%。膜下滴灌增加了窄行 10~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤全氮和有机碳含量, 促进 0~40 cm 土层有效磷和速效钾累积, 同时驱动硝态氮向深层土壤(10~40 cm)迁移, 减少表层硝态氮残留。此外, 膜下滴灌还增加了窄行 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤转化酶和脲酶活性, 提高了土壤碳氮代谢能力。然而, 膜下滴灌降低了玉米根系总根长、根表面积、分支数和交叉数等参数, 导致了玉米减产。因此, 在河套平原盐渍农田膜下滴灌玉米生长后期, 应适时移除地膜, 促进根系伸展发育, 增强降雨对土壤水分的有效补给, 从而实现作物产能提升和土壤性质改良的协同增效。

关键词: 盐渍农田; 膜下滴灌; 盐碱障碍; 宽窄行; 根系特征

中图分类号: S275.6; S156.4 文献标志码: A

Effects of Mulched Drip Irrigation on Soil Properties and Maize Yield of Saline Farmland in Hetao Plain, China

TANG Chong^{1,2}, YANG Jingsong^{1,3*}, LI Tao^{1,4}, YAO Rongjiang¹, XIE Wenping¹, WANG Xiangping¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 4 College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434000, China)

Abstract: The farmland in the Hetao Plain is facing severe challenges of salinity obstruction and water scarcity, which greatly constrain the sustainable development of agriculture in the region. To investigate the effects of mulched drip irrigation on soil properties in wide (70 cm row spacing) and narrow (50 cm row spacing) rows and crop yields of saline farmland in the Hetao Plain, a field experiment was conducted with maize as the test crop, in which two treatments were set up: drip irrigation (narrow row) with and without plastic film mulching. The results showed that drip irrigation induced significant surface accumulation of soil salinity, whereas mulched drip irrigation mitigated this phenomenon, with a significant reduction of soil salinity in narrow rows ranging from 25.29% to 56.90%, and a 15.78% increase in soil water retention capacity in the early growth stage of maize. Mulched drip irrigation increased total nitrogen and organic carbon contents in the 10~20 cm and 20~40 cm soil layers of narrow rows, and promoted the accumulation of available phosphorus and potassium in the 0~40 cm soil layer, while driving the migration of nitrate to the deeper soil layer (10~40 cm), and reducing the nitrate residues in the surface layer. Mulched drip irrigation increased soil invertase and urease activities in the 0~10 cm and 10~20 cm soil layers of the narrow rows, thereby improving soil carbon and nitrogen metabolism capacity. However, mulched drip irrigation reduced maize root parameters such as total root length, root surface area, number of branches and number of crosses, which resulted in a reduced maize yield. Therefore, this study proposes that in the Hetao Plain region, the plastic film should be removed at an appropriate time during the late stage

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201201, 2021YFD1900602)资助。

* 通信作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 唐冲(1992—), 男, 河南三门峡人, 博士研究生, 主要从事盐渍土改良与水分高效利用研究。E-mail: ctang@issas.ac.cn

of growth of mulched drip-irrigated maize in saline farmland to promote the development of root extension and enhance the effective recharge of soil water by rainfall, thereby achieving a synergistic effect of crop productivity enhancement and soil property improvement.

Key words: Saline farmland; Mulched drip irrigation; Salinity obstruction; Wide and narrow rows; Root characteristics

河套平原是我国西北地区重要的农业种植区,但其生态环境脆弱,地势低平且排水受阻,导致土壤盐碱障碍问题突出^[1]。土壤盐渍化不仅显著降低养分有效性^[2],也严重危害作物生长^[3],威胁农业可持续发展。同时,河套平原气候干旱,农业灌溉高度依赖黄河水源,而黄河正面临日益严峻的水资源短缺问题^[4]。农业生产需要消耗大量水分,而河套平原蒸发强烈,这使得该地区单位面积农田灌溉用水远超全国平均水平^[5]。因此,发展节水灌溉技术并协同消减土壤盐碱障碍,对保障河套平原农业健康发展具有重要意义。

膜下滴灌是一种集成了多重优势的高效灌溉技术,其主要通过地表覆膜以有效抑制土壤水分蒸发及盐分随毛细管作用向上迁移,同时结合滴灌实现水资源的精准供给,并使盐分在水分入渗过程中被持续淋洗,从而显著降低土壤盐分和提高灌溉水利用效率^[6-7]。叶澜涛等^[8]在滨海盐碱地的研究表明,膜下滴灌可改变玉米植株不同部位对盐分离子的吸收,增强其耐盐性,并增加产量。然而,在气候更加干旱的西北甘肃地区,相关研究指出,膜下滴灌虽然能增加土壤储水量并防止盐分在土壤表面累积,但在特定年份降低了作物产量^[9]。由此可见,膜下滴灌对盐渍土壤的改良效果受气候和土壤盐分类型的影响。另外,盐渍农田土壤肥力往往低下。夏皖豫等^[10]研究发现,膜下滴灌可增加土壤速效钾、碱解氮等养分含量,并提高土壤脲酶、碱性磷酸酶、转化酶和纤维素酶活性。然而,滴灌点源供水的特性导致土壤盐分向湿润体边缘迁移,致使盐分在土壤剖面 and 滴灌带不同横向位置重新分布^[11],这可能会进一步改变土壤养分和酶活性在滴灌头不同位置的分布状况。窦超银等^[6]报道了膜下滴灌影响土壤酶活性空间分布的现象,指出土壤碱性磷酸酶、脲酶活性在靠近滴灌头的区域受覆膜影响更为显著。姚荣江等^[12]通过室内土箱模拟

试验研究发现,滴灌条件下硝态氮的分布模式与盐分类似,均在湿润体边缘累积。此外,根系分布对作物水分和养分吸收及土壤有机物质输入具有重要作用^[13]。但膜下滴灌如何影响盐渍农田玉米根系尚不清楚。

基于以上,本研究通过两年田间小区定位试验,深入探究膜下滴灌技术对河套平原盐渍农田土壤盐碱障碍时空分布特征、土壤养分和碳、氮、磷相关酶活性的影响,评估其对玉米根系特征和产量的调控效应,以期阐明膜下滴灌模式下作物生产力形成与土壤理化性质的互作机制,为该地区盐渍农田水盐精准调控与作物产能协同提升提供理论支撑和实践参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区石嘴山市平罗县渠口乡交济村(38°51'20"N, 106°34'47"E)。该地区属温带大陆性气候,四季分明。春季降雨稀少且升温迅速,土壤返盐严重;夏季炎热干旱,但因地处引黄灌区,具备灌溉条件且降雨相对集中,土壤盐碱程度有所缓解;秋季短暂且降温快,冬季寒冷且降雨(雪)稀少,土壤盐分较为稳定。该地区多年平均降水量和蒸发量分别为 170 mm 和 1 755 mm。极高的蒸降比导致该地区土壤盐碱障碍突出,同时水资源短缺也为盐渍土改良带来巨大挑战。

研究区 0~20、20~40 cm 土层土壤质地相似,均为粉砂土,其中黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 6.38%~8.93%、79.08%~81.91% 和 9.16%~14.04%。土壤为氯化物型盐渍土,Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 含量在 0~20 cm 土层中分别为 4.93、0.05、1.14、0.74、4.16、1.42、0.35 cmol/kg,在 20~40 cm 土层中分别为 1.89、0.04、0.42、0.36、2.31、0.62、0.33 cmol/kg。土壤其他基本理化性质见表 1。

表 1 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤基本理化性质
Table 1 Basic soil physicochemical properties in the 0~20 cm and 20~40 cm soil layers

土层(cm)	电导率(dS/m)	pH	有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
0~20 cm	1.56±0.09	8.49±0.08	4.15±0.33	0.58±0.13	0.64±0.01	29.33±0.45	152.00±12.25
20~40 cm	0.73±0.11	8.85±0.06	3.76±0.19	0.47±0.06	0.55±0.11	20.98±1.62	91.33±3.28

1.2 试验设计

田间试验于 2022 年 4 月 25 日—2023 年 9 月 13 日进行。试验共设两个处理:不覆膜(对照, CK)和覆膜(膜下滴灌, F), 覆膜材料为普通聚乙烯白色地膜。采用完全随机区组设计, 每个处理设 3 个重复, 小区面积为 35 m^2 ($5\text{ m} \times 7\text{ m}$)。供试作物为玉米, 品种为太育 9 号。采用玉米穴播机进行宽窄行播种, 宽行行距 70 cm , 窄行行距 40 cm 。滴灌带随穴播机铺设于窄行中间位置。所有磷肥和钾肥以及 60% 的氮肥在播种时作为基肥随穴播机施入土壤, 所用化肥为硫酸钾型复合肥($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$: 12-35-5)。在玉米拔节期和灌浆期, 分别通过滴灌追施 20% 的氮肥, 追施的氮肥为碳酸氢铵。播种完成后, 覆膜处理立即在窄行位置铺设地膜, 并于玉米 3 叶期前人工破膜放苗。整个生育期仅采用滴灌方式灌溉。滴灌用水为黄河水, 其电导率和 pH 分别为 0.68 dS/m 和 8.13。苗期至拔节期, 每 15~20 d 滴灌 1 次; 拔节期至抽雄期, 每 7 d 左右滴灌 1 次; 抽雄期至收获期, 每 14 d 左右滴灌 1 次, 并于收获前 20 d 停止滴灌。玉米全生育期共滴灌 10 次, 每次滴灌用水均为 25 mm , 总灌水量为 250 mm 。除草和病虫害防治等其他农艺措施与当地常规实践保持一致。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集与测定 为研究土壤水盐碱的时空变化规律, 于第二个种植年(2023 年)在玉米不同生育期和滴灌带不同位置采用土钻采集土壤样品。不同生育期取样时间分别为:播种前(IS, 4 月 15 日)、苗期(SS, 5 月 20 日)、拔节期(JS, 6 月 19 日)、抽雄期(TS, 7 月 23 日)、灌浆期(GS, 8 月 20 日)和收获期(HS, 9 月 13 日)。不同取样位置分别为:滴灌带附近(窄行, 记作 N)和宽行中间(记作 W)。每个小区在宽行和窄行位置各选取 3 个子样点采集土壤样品, 充分混合后形成各自的混合样品。各生育期按照 0~20、20~40 cm 分层取样, 测定土壤质量含水量、盐分(电导率)和 pH; 收获期进一步细分为 0~10、10~20、20~40 cm 三层, 测定土壤养分和酶活性。土壤质量含水量、铵态氮、硝态氮和酶活性采用新鲜土样测定, 其他土壤性质则使用过 2 mm 筛的风干土样测定。

其中, 土壤质量含水量用烘干法测定; 土壤电导率和 pH 以 $1:5(m/V)$ 的土水比浸提并分别使用电导率仪和 pH 计测定; 土壤水溶性 HCO_3^- 含量用双指示剂—中和滴定法测定; 土壤水溶性 SO_4^{2-} 含量用乙二胺四乙酸(EDTA)间接络合滴定法测定; 土壤水溶性 Cl^-

含量用硝酸银滴定法测定; 土壤水溶性 K^+ 和 Na^+ 含量用火焰光度计法测定; 土壤水溶性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量用 EDTA 滴定法测定; 土壤铵态氮和硝态氮含量用 1 mol/L 氯化钾溶液以 $1:10(m/V)$ 的土液比浸提, 分别用靛酚蓝比色法和双波长法测定; 土壤有效磷含量用 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液浸提—钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾含量用醋酸铵提取—火焰光度计法测定; 土壤有机碳含量用重铬酸钾高温外加热氧化—滴定法测定; 土壤全磷含量用高氯酸和浓硫酸消解—钼锑抗比色法测定; 碱性磷酸酶(ALP)活性用对硝基苯磷酸盐法测定。以上土壤性质均按照鲁如坤^[14]的方法测定。 β -葡萄糖苷酶(BG)活性用硝基酚比色法测定; 转化酶(IA)活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定; 脲酶(UE)活性用靛酚蓝比色法测定。以上 3 种酶活性的测定方法均参考关松荫^[15]的方法。土壤全氮含量采用间断分析仪, 以浓硫酸消煮和水杨酸钠比色法测定。土壤质地用激光粒度分析仪测定。

1.3.2 植物样品采集与测定 玉米成熟后, 每个小区选取 3 株长势一致的玉米植株进行产量测定。采样后的植株, 分离玉米果穗与秸秆, 置于阳光充足处晾晒, 之后对果穗进行脱粒, 再将籽粒和秸秆(包含穗轴)置于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重后称量。

玉米收获的同时, 在各小区挖取玉米根系。仔细将根系黏附的大块土壤抖落后, 将其转移至实验室, 用纯净水清洗去除剩余细小土粒。待根系自然阴干后, 使用根系扫描仪测定玉米根系形态特征。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2021 进行数据整理和初步分析, 使用 SPSS 24 进行统计分析, 并采用 Origin 2021 绘图。不同处理间土壤理化性质及玉米产量的差异显著性采用单因素方差分析结合邓肯多重检验进行评估, 显著性水平设为 $P<0.05$ 。采用多因素方差分析检验不同处理、取样深度及其交互作用对土壤酶活性的影响。采用皮尔逊相关性分析确定土壤性质与玉米产量及根系特征的关系。

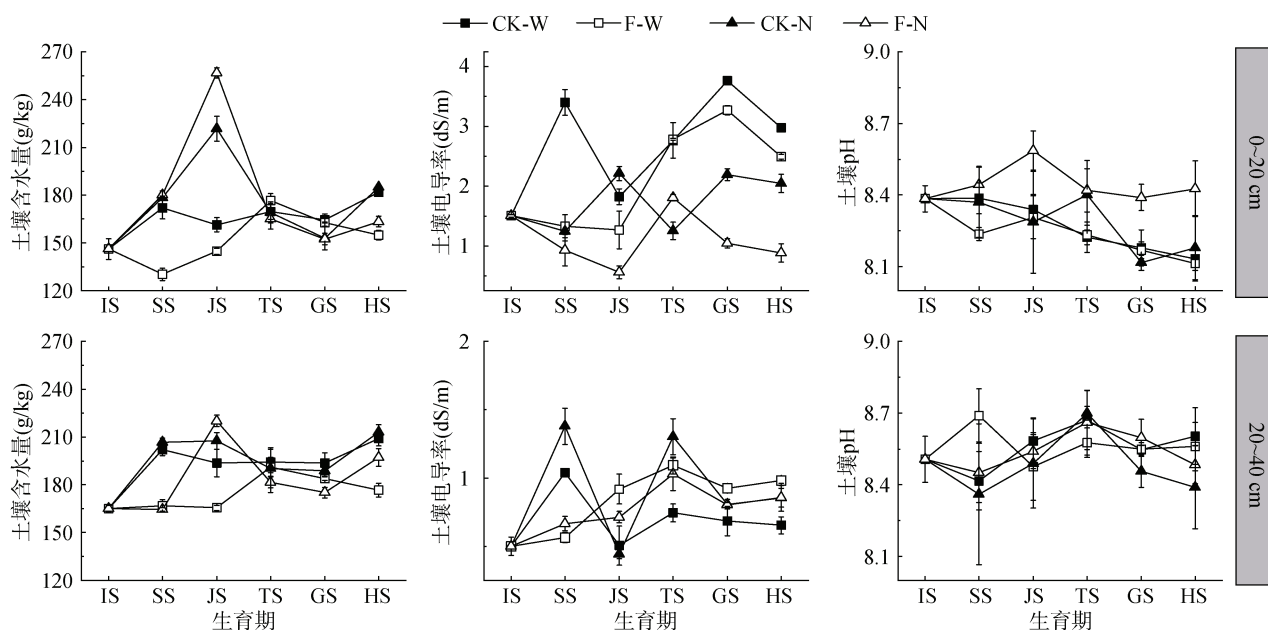
2 结果与分析

2.1 膜下滴灌对盐渍农田土壤水盐碱动态变化的影响

由图 1 可知, 土壤含水量和盐分在玉米各生育期内呈明显的波动变化。在生长前期(苗期和拔节期), 膜下滴灌处理对窄行 0~20 cm 土层的土壤含水量具有积极的提升作用, 特别是拔节期时该层土壤含水量

较不覆膜的对照增加了 15.78%。然而,从抽雄期至灌浆期,膜下滴灌处理土壤含水量与对照较为接近且略有降低;至收获期,土壤含水量则较对照显著降低。

膜下滴灌处理仅在拔节期显著提升窄行 20~40 cm 土层土壤含水量,而在抽雄期至收获期,其影响与 0~20 cm 土层一致,即表现为土壤含水量降低。



(CK-W: 对照宽行; F-W: 覆膜宽行; CK-N: 对照窄行; F-N: 覆膜窄行。下同)

图1 膜下滴灌对盐渍农田宽行和窄行土壤含水量、盐分和 pH 动态变化的影响

Fig. 1 Effects of mulched drip irrigation on dynamics of soil water contents, salinity, and pH values in wide and narrow rows of saline farmland

滴灌条件下,无论有无覆膜,均存在明显的侧向排盐现象,即土壤盐分在 0~20 cm 土层由滴灌带所在的窄行向宽行迁移。整体来看,0~20 cm 土层土壤盐分显著高于 20~40 cm 土层,表明滴灌条件下盐分淋洗效率低下,土壤盐分呈现明显的表层聚集特征。与对照相比,无论宽行还是窄行,膜下滴灌处理均有利于 0~20 cm 土层土壤脱盐,且对窄行土壤盐分的降低效果更为显著。除抽雄期外,膜下滴灌处理使窄行 0~20 cm 土层盐分在苗期、拔节期、灌浆期、收获期分别降低 25.29%、74.73%、52.22%、56.90%。然而,膜下滴灌处理对窄行 20~40 cm 土层盐分的影响有限,仅在苗期和抽雄期分别使盐分分别降低 51.68% 和 21.02%。

与土壤含水量和盐分不同,土壤 pH 在玉米各生育期的变化较为平缓,且膜下滴灌处理对宽行和窄行土壤 pH 均无显著影响。

2.2 膜下滴灌对盐渍农田土壤养分的影响

不同处理、取样位置和采样深度的土壤养分含量如表 2 所示。膜下滴灌处理对宽行和窄行 0~10 cm 土层土壤全氮含量的影响相反。与对照相比,膜下滴灌处理使该层宽行土壤全氮含量增加 21.74%,窄行全氮含量降低 26.87%;在更深土层,膜下滴灌处理仅

显著提升了窄行土壤全氮含量,10~20、20~40 cm 土层分别提升 41.82%、28.00%。膜下滴灌处理不利于提升宽行土壤全磷含量,与对照相比,0~10、10~20 cm 土层土壤全磷含量分别降低 15.79%、7.04%;相反,膜下滴灌处理显著增加窄行深层(20~40 cm)土壤全磷含量,增幅达 17.74%。膜下滴灌处理对 0~10 cm 土层土壤有机碳无显著影响,但在更深土层,使 10~20、20~40 cm 土层土壤有机碳含量较对照分别增加 8.68%~8.80%、46.58%~50.25%,且对宽行的提升幅度大于窄行。此外,膜下滴灌处理显著改变了土壤有机碳含量随深度变化的规律,土壤有机碳含量随土壤深度增加而增加,而对照则表现出相反的变化规律。

土壤铵态氮含量整体处于极低水平,且覆膜影响微弱。在整个 0~40 cm 土层,膜下滴灌处理均显著增加了宽行土壤硝态氮含量,且增幅随土壤深度增加而增加。然而,膜下滴灌处理使窄行 0~10 cm 土层土壤硝态氮含量显著降低 61.37%;但在窄行深层(10~40 cm),膜下滴灌处理增加了土壤硝态氮含量,特别是 20~40 cm 土层,土壤硝态氮含量显著增加 72.98%。此外,除膜下滴灌处理的窄行外,土壤硝态氮含量在 0~10 cm 土层大量积累,并随土壤深度增加而逐渐降

低。这些现象可能表明膜下滴灌可促进硝态氮侧向迁移和深层渗漏。对于整个 0~40 cm 土层,膜下滴灌处理均有利于提高土壤有效磷和速效钾含量。无论是宽行还是窄行,膜下滴灌处理对土壤有效磷含量的提升效果随土壤深度增加而增强,增幅从 0~10 cm 土层的 8.18%~15.26% 提高至 20~40 cm 土层的 26.73%~50.37%。与有效磷相比,膜下滴灌处理对速效钾含量

的提高更加显著,在整个 0~40 cm 土层其增幅均超过 40%,特别是 20~40 cm 土层增幅高达 67.22%~104.17%。另外,在宽行位置,土壤有效磷含量呈现明显的随深度增加而增加的趋势,但速效钾含量则呈现相反的深度变化规律;在窄行位置,膜下滴灌处理的土壤有效磷和速效钾含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层之间较为接近,但在 20~40 cm 土层显著增加。

表 2 膜下滴灌对盐渍农田宽行和窄行土壤养分的影响
Table 2 Effects of mulched drip irrigation on soil nutrients in wide and narrow rows of saline farmland

土壤深度 (cm)	处理	全量养分(g/kg)			速效养分(mg/kg)			
		全氮	全磷	有机碳	铵态氮	硝态氮	有效磷	速效钾
0~10	CK-W	0.46±0.03b	0.76±0.01a	5.81±0.17a	0.31±0.01a	225.13±14.74b	14.61±0.51b	122.00±17.56b
	F-W	0.56±0.02a	0.64±0.01b	5.75±0.05a	0.17±0.01b	334.46±4.45a	16.84±0.30a	206.67±13.04a
	CK-N	0.67±0.02a	0.64±0.04a	6.05±0.27a	0.16±0.01a	202.46±3.06a	28.61±0.58b	98.00±8.08b
	F-N	0.49±0.02b	0.67±0.05a	5.88±0.08a	0.15±0.01b	78.22±5.22b	30.95±0.34a	142.33±8.25a
10~20	CK-W	0.40±0.07a	0.71±0.02a	5.68±0.12b	0.17±0.02a	81.61±1.09b	28.16±1.55b	115.67±15.3b
	F-W	0.37±0.08a	0.66±0.01b	6.18±0.02a	0.15±0.01a	124.93±3.07a	33.86±0.74a	196.00±5.69a
	CK-N	0.55±0.06b	0.66±0.02a	5.53±0.12b	0.18±0.01b	53.46±1.32a	29.84±2.67a	99.00±10.02b
	F-N	0.78±0.05a	0.63±0.01a	6.01±0.04a	0.20±0.01a	66.04±12.76a	30.73±2.22a	138.33±5.04a
20~40	CK-W	0.57±0.14a	0.68±0.07a	3.96±0.09b	0.14±0.02a	8.97±0.92b	24.69±1.30b	95.67±18.48b
	F-W	0.63±0.18a	0.66±0.02a	5.96±0.38a	0.16±0.01a	21.30±2.41a	31.29±1.31a	195.33±12.77a
	CK-N	0.50±0.01b	0.62±0.01b	4.38±0.29b	0.16±0.02a	38.97±2.07b	25.79±2.28b	99.67±15.92b
	F-N	0.64±0.04a	0.73±0.01a	6.42±0.42a	0.18±0.01a	67.41±3.57a	38.78±3.03a	166.67±12.88a

注:表中同列数据后不同小写字母表示宽行或窄行土壤养分在两处理之间差异显著($P<0.05$)。

2.3 膜下滴灌对盐渍农田土壤酶活性的影响

膜下滴灌显著影响转化酶(IA)、脲酶(UE)和碱性磷酸酶活性(ALP),而土壤深度显著影响 β -葡萄糖苷酶(BG)、脲酶和碱性磷酸酶活性(图 2)。在窄行位置,与对照相比,膜下滴灌处理使 0~10 cm 土层的 β -葡萄糖苷酶活性降低 25.81%,但使 20~40 cm 土层该酶活性增加 49.42%(图 2A)。宽行和窄行的 β -葡萄糖苷酶活性峰值均出现在 10~20 cm 土层。

膜下滴灌处理有利于增强转化酶活性,与对照相比,分别使窄行 0~10 cm 和 10~20 cm 土层该酶活性增加 50.31% 和 40.06%(图 2B)。在宽行位置,膜下滴灌处理对 20~40 cm 土层转化酶活性的提升最为显著,增幅达到 135.14%。膜下滴灌处理的转化酶活性随土壤深度变化相对平缓;而对照的转化酶活性在宽行存在明显的随土壤深度增加而降低的趋势,在窄行的变化趋势则相反。

与对照相比,在 0~10、10~20 cm 土层,膜下滴灌处理分别使宽行和窄行脲酶活性增加 19.78%、13.85% 和 12.53%、8.81%(图 2C)。然而,在 20~40 cm 土层,膜下滴灌处理仅使窄行脲酶活性增加 38.38%。宽行脲酶活性峰值出现在 10~20 cm 土层,而窄行脲

酶活性则随土壤深度增加而降低。

此外,膜下滴灌处理对深层土壤(20~40 cm)碱性磷酸酶活性提升最为显著,宽行和窄行该酶活性分别增加 62.04% 和 45.45%(图 2D)。无论是宽行还是窄行,碱性磷酸酶活性在土壤剖面中均呈现明显的“V”形分布特征,即在 10~20 cm 土层活性最高。

2.4 膜下滴灌对盐渍农田玉米产量和根系特征的影响

膜下滴灌处理对盐渍农田玉米产量有抑制作用(表 3),与对照相比,使籽粒和秸秆产量分别降低 12.60% 和 26.52%。通过对根系特征的分析发现,膜下滴灌处理使玉米根系总根长、根表面积、分支数和交叉数分别显著降低 33.18%、45.55%、54.17% 和 39.24%。进一步对根长、根表面积和根尖数在不同直径根系范围内的组成情况进行分析,结果发现,膜下滴灌处理使直径 0~0.5 mm 的细根根长比例增加 2.87%,同时使直径 0.5~4.5 mm 的根系表面积比例增加 5.36%(图 3)。膜下滴灌处理降低了玉米根系总根长,但是增加了细根长比例,这可能表明膜下滴灌促使玉米根系分布范围缩小,并在受限的空间内加剧根系对水分和养分的吸收竞争。

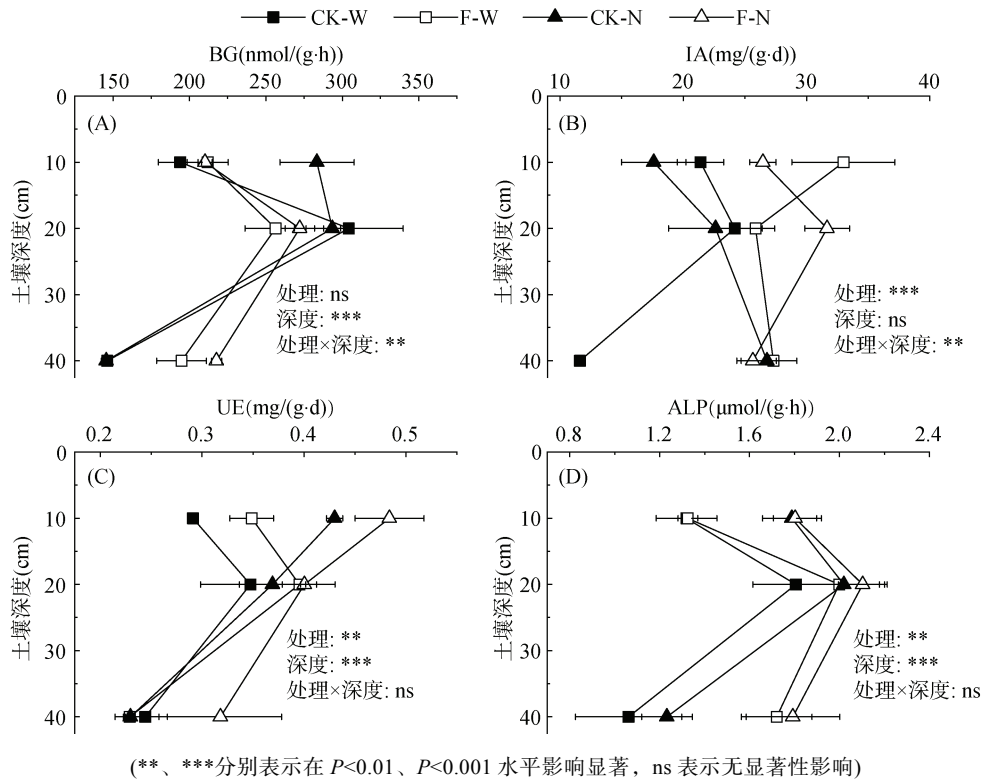


图 2 膜下滴灌对盐渍农田宽行和窄行土壤酶活性的影响
Fig. 2 Effects of mulched drip irrigation on enzyme activities in wide and narrow rows of saline farmland

表 3 膜下滴灌对盐渍农田玉米产量和根系特征的影响
Table 3 Effects of mulched drip irrigation on maize yield and root characteristics in saline farmland

处理	籽粒(t/hm ²)	秸秆(t/hm ²)	总根长(cm)	根表面积(cm ²)	平均根系直径(mm)	根尖数(个)	分支数(个)	交叉数(个)
CK	8.65±0.56a	28.58±0.58a	3 587.05±18.19a	1 464.19±7.66a	1.13±0.07a	7 873±500a	27 725±435a	1 202±30a
F	7.56±0.51a	21.00±1.52b	2 396.85±48.63b	797.23±17.41b	0.99±0.09a	7 411±438a	12 708±5b	730±34b

注：表中同列数据后不同小写字母表示各指标在两处理之间差异显著($P<0.05$)。

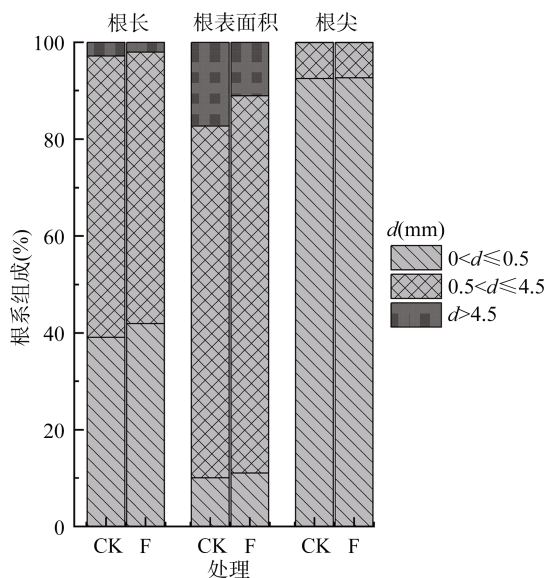


图 3 不同直径范围内根长、根表面积和根尖数的占比
Fig. 3 Percentages of root lengths, surface areas, and root tips in different diameter ranges

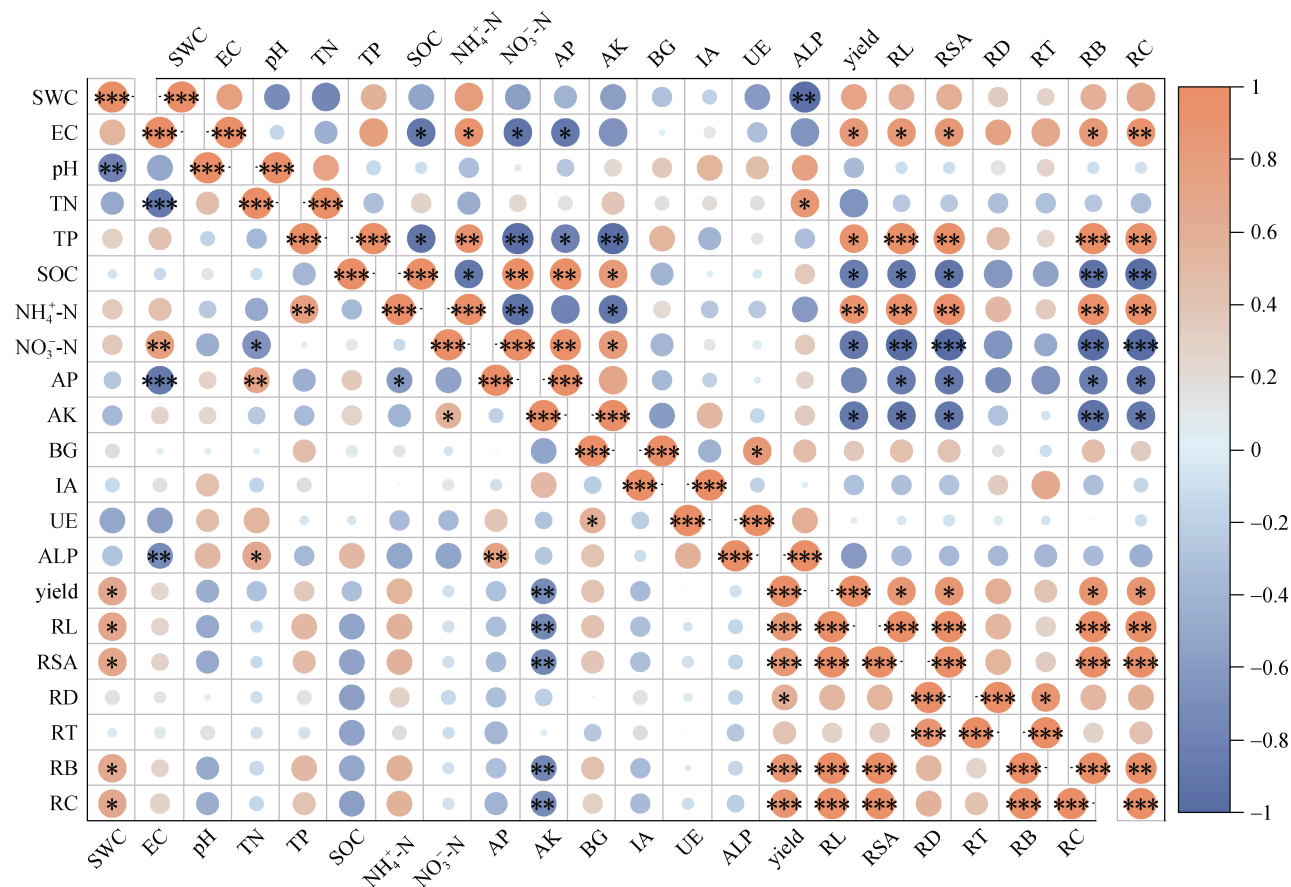
2.5 玉米产量和根系特征与土壤性质的相关性

皮尔逊相关性分析表明,玉米产量与各根系参数以及窄行土壤含水量呈显著的正相关关系($P<0.05$,图 4)。此外,玉米产量、总根长、根表面积与宽行硝态氮、速效钾含量呈显著的负相关关系,这些负相关关系在窄行也存在,但相关性未达显著水平。这表明玉米产量的增加与土壤速效养分消耗有关。值得注意的是,玉米产量与宽行土壤盐分呈显著的正相关,结合膜下滴灌对玉米产量和根系生长的抑制作用,说明在滴灌条件下,盐分对产量的抑制作用可能弱于覆膜对根系生长的限制效应。

3 讨论

3.1 膜下滴灌对盐渍农田土壤盐碱障碍的影响

本研究表明,滴灌条件下土壤盐分呈现水平迁移与垂直入渗的双重再分布特征。水平方向上,滴灌带



(SWC: 土壤含水量; EC: 电导率; TN: 全氮; TP: 全磷; SOC: 土壤有机碳; AP: 有效磷; AK: 速效钾; BG: β -葡萄糖苷酶; IA: 转化酶; UE: 脲酶; ALP: 碱性磷酸酶; yield: 玉米产量; RL: 总根长; RSA: 根表面积; RD: 平均根系直径; RT: 根尖数; RB: 根分支数; RC: 根交叉数。*、**、***分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ 水平显著相关)

图 4 宽行(右上)和窄行(左下)土壤性质与玉米产量和根系特征的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between soil properties in wide (upper right) and narrow (lower left) rows and yield/root characteristics

所在的窄行土壤盐分显著低于宽行,这主要与滴灌独特的点源灌溉方式有关。滴灌驱动盐分向湿润锋边缘聚集,导致滴灌区脱盐,而远离滴灌头的位置积盐^[11,16]。垂直方向上,表层土壤(0~20 cm)盐分显著高于亚表层(20~40 cm)。滴灌条件下水分入渗缓慢且灌水量有限,土壤盐分难以向下渗漏而在表层积累。此外,在蒸发扩散驱动下,入渗阶段淋洗的盐分在滴灌结束后将随毛管水上升而重新返回上层土壤^[12]。进一步分析发现,膜下滴灌使宽行和窄行 0~20 cm 土层土壤盐分分别平均降低 22.13% 和 35.62%。先前研究表明,长期地膜覆盖持续且显著抑制盐分表聚,土壤抑盐率达到 23.91%~70.28%^[17]。李文昊等^[18]通过长期膜下滴灌试验,发现多年种植后土壤由盐土向轻度盐渍土转变。覆膜降低土壤盐分的主要机制是通过降低蒸发来抑制盐分随毛细管作用上升,从而显著减少盐分在土壤表层的积累^[19]。此外,本研究也发现,作物生长中期土壤盐分有所回升,这可能与蒸腾作用增强促

使盐分上行有关。膜下滴灌对土壤 pH 的影响较为微弱,这与张少民等^[20]的长期试验结果不同。这种差异可能是由于种植作物种类、土壤类型与气候等的不同,导致土壤盐分离子组成及其比例发生改变的结果。

本研究中,膜下滴灌对土壤含水量的影响呈现明显的生育期差异。这与白雪等^[21]在非盐渍土上的研究结果不同,他们指出普通地膜覆盖可在玉米整个生育期内减少蒸发,增强土壤蓄水能力。在苗期和拔节期,膜下滴灌增加了窄行土壤含水量。地膜覆盖通过在地表形成物理屏障,影响水分和热量在土壤与大气之间的交换,因此能有效抑制土壤蒸发,增强土壤保水能力^[22]。在作物生长前期,蒸发是土壤水分损失的主要途径,因此覆膜能有效提高此阶段的土壤保水能力。然而,膜下滴灌对土壤保水能力的提升作用在作物生长中后期减弱,甚至在收获期导致土壤含水量降低。玉米是一种对盐分胁迫较为敏感的作物,苗期

高盐分会显著抑制种子萌发^[23]。本研究发现,苗期对照宽行和窄行土壤电导率分别为 3.40 dS/m 和 1.24 dS/m,均显著高于膜下滴灌处理,这导致对照玉米的生长发育在前期、中期滞后于膜下滴灌处理。随着膜下滴灌处理玉米的优先生长,其蒸腾耗水需求不断增加,并逐渐成为土壤水分损失的主导因素^[24]。因此,该阶段膜下滴灌处理玉米蒸腾速率的增加抵消了覆膜对土壤水分的保蓄效果。收获期膜下滴灌处理的土壤含水量降低,这可能归因于此时作物水分需求降低导致滴灌停止,加之覆膜阻碍降雨对土壤水分的人渗补给,导致土壤水分在作物蒸腾耗水作用下不断被消耗。

3.2 膜下滴灌对盐渍农田土壤养分和酶活性的影响

本研究表明,膜下滴灌降低了窄行 0~10 cm 土层土壤全氮含量,这与 Zhang 等^[25]的研究结果一致。土壤含水量增加可促进底物扩散和提高底物有效性,进而提高氮矿化速率^[26]。在作物生长前期,膜下滴灌显著增加表层土壤含水量,这可能导致氮矿化速率增加。先前的研究表明,覆膜通过提高土壤微生物生物量碳和酶活性,促进土壤有机碳矿化^[25]。本研究也发现,膜下滴灌略微降低了 0~10 cm 土层的土壤有机碳含量,这可能与种植年限较短有关。值得注意的是,膜下滴灌显著增加了深层土壤(20~40 cm)的全氮、全磷和有机碳含量,与王钰皓等^[27]的研究结果部分一致,这可能与当地玉米作为青贮收获有关。玉米青贮收获导致较多凋落物残留在土壤表面,在深松作业下,这些凋落物被埋入较深土层,并在撂荒的秋冬季和翌年早春矿化后,补充土壤养分库容。随后,覆膜导致土壤通气性下降,深层土壤矿化被抑制,从而使全氮、全磷和有机碳得以积累。

旱地土壤硝化作用较强,收获期土壤无机氮的主要形态为硝态氮。本研究发现,硝态氮大量积累在 0~10 cm 土层,特别是在宽行。膜下滴灌显著降低了窄行 0~10 cm 土层硝态氮含量,这与刘凯等^[16]的研究结果一致。前人研究表明,覆膜能为作物生长创造良好的水热条件,促进作物对氮素的吸收,从而降低土壤中硝态氮残留^[28]。这一论述不能有力支持本研究的结果,因为膜下滴灌降低了玉米产量。对硝态氮在土壤剖面 and 宽窄行分布的分析表明,膜下滴灌不仅提高了窄行 10~20、20~40 cm 土层硝态氮含量,还增加了宽行整个 0~40 cm 土层的硝态氮积累量。这揭示了硝态氮随水分入渗的纵向迁移和随湿润锋扩散的横向迁移,是导致膜下滴灌处理窄行 0~10 cm 土层硝态氮显著降低的驱动力。膜下滴灌增加了土壤速效钾

和有效磷含量,这与刘凯等^[29]的研究结果一致。这可能是由于膜下滴灌抑制了玉米根系生长,进而减少了其对土壤速效养分的吸收。此外,覆膜减少了作物地上部凋落物与土壤的接触,导致有机底物矿化对养分的需求降低。本研究还表明,土壤有效磷在 10~20、20~40 cm 土层的含量更高,这种反常现象可能与上述深松和凋落物矿化有关。

土壤酶催化土壤中各种底物降解,对维持土壤肥力和作物养分供应至关重要。本研究表明,膜下滴灌增加了转化酶、脲酶和碱性磷酸酶活性,这与窦超银等^[6]的研究结果一致。在盐渍农田,土壤微生物遭受严重的盐分胁迫,这不仅迫使微生物增加渗透调节物质合成而减少蛋白质(包括酶)生产,也促使土壤团粒结构分散,增加酶被降解的风险;同时,盐分也会直接破坏蛋白质结构^[30]。因此,高盐分通常降低土壤酶活性。膜下滴灌显著降低窄行土壤盐分,为酶的分泌创造了有利条件,从而增加了这些酶的活性。然而,膜下滴灌抑制了窄行 0~10、10~20 cm 土层 β -葡萄糖苷酶的活性,这可能与酶的环境耐受性有关。在收获期,膜下滴灌处理下较低的土壤含水量和较差的通气状况可能抑制了 β -葡萄糖苷酶的活性。

3.3 膜下滴灌对盐渍农田玉米产量的影响

盐渍农田覆膜已被报道可通过降低土壤盐碱障碍和优化水热状况而促进作物生长^[17]。在非盐渍农田,膜下滴灌也已被证实可通过提高土壤保水能力和增加光合作用来实现玉米增产^[31]。然而,本研究表明,膜下滴灌未增加盐渍农田玉米产量,反而造成减产,与杨宏伟等^[9]的研究结果一致。根系扫描分析表明,膜下滴灌显著降低了玉米总根长、根表面积和根系平均直径等参数,但增加了细根(直径 0~0.5 mm)比例。细根比例增加可能与作物在生长受限条件下将更多光合产物分配给根系有关^[32]。在灌浆期至收获期,膜下滴灌处理窄行与宽行 0~20 cm 土层间的土壤盐分差异(1.61~2.22 dS/m)远大于对照(0.94~1.58 dS/m)。因此,本研究推测,在玉米产量形成的这些关键时期,覆膜处理下 0~20 cm 土层宽行(膜外)和窄行(膜内)土壤间巨大的盐分梯度,阻碍了根系向膜外延伸,使其主要局限于膜内的低盐环境中,从而限制了玉米对养分的吸收和产量形成。这一推论与覆膜处理下细根比例和 0.5~4.5 mm 根表面积比例增加的现象相符,即在根系横向扩展受限时,作物可能倾向于向深层土壤发育以获取资源。此外,收获期膜下滴灌降低了窄行土壤含水量,这可能是限制作物生长的另一不利因素。综上,本研究建议在盐渍农田应用

膜下滴灌技术时,在作物生长中后期应适时揭膜,以促进根系伸展和增加降雨入渗补给。

4 结论

在河套平原,膜下滴灌显著降低窄行土壤盐分,并在玉米生长前期有效提升土壤保水能力。膜下滴灌降低了窄行 0~10 cm 土层土壤全氮含量,且对该层全磷和有机碳含量无显著影响,但是有利于增加深层(10~40 cm)土壤全氮、全磷及有机碳含量。膜下滴灌降低窄行 0~10 cm 土层土壤硝态氮含量,但促进了硝态氮向深层土壤的纵向入渗及向宽行位置的横向迁移。无论是宽行还是窄行,膜下滴灌均增加了土壤有效磷和速效钾含量。此外,膜下滴灌提高了 0~10、10~20 cm 土层转化酶和脲酶活性,同时增强了 20~40 cm 土层 β -葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶活性。在玉米产量形成关键期(灌浆期至收获期),膜下滴灌处理加剧了宽行与窄行间的土壤盐分梯度,进而抑制了根系生长。因此,尽管膜下滴灌显著降低土壤盐分并提高土壤速效养分含量,但由于根系扩展受限,最终未能提高玉米产量。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.河套平原盐碱地生态治理和生态产业发展模式[J].生态学报,2016,36(22): 7059-7063.
- [2] 李小林,高乾程,刘雨星,等.盐分梯度对土壤中不同磷素形态转化的影响[J].土壤,2024,56(6): 1222-1230.
- [3] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
- [4] 霍宏鑫,杨劲松,姚荣江,等.复合隔层对河套灌区盐碱土水盐运移的影响[J].土壤,2024,56(1): 90-96.
- [5] Xiang W L, Tan M H, Yang X, et al. The impact of cropland spatial shift on irrigation water use in China[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 97: 106904.
- [6] 窦超银,康跃虎,万书勤,等.覆膜滴灌对地下水浅埋区重度盐碱地土壤酶活性的影响[J].农业工程学报,2010,26(3): 44-51.
- [7] 霍伟歌,彭懿,张少民,等.滴灌条件下盐碱地垦殖对土壤盐度和肥力影响的长期观测[J].土壤学报,2025,62(1): 69-80.
- [8] 叶澜涛,周青云,李松敏,等.滨海盐碱地覆膜和灌溉对玉米盐分离子分布及生物量的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(4): 74-83.
- [9] 杨宏伟,杨正华,张富仓,等.膜下滴灌对土壤水盐分布和春玉米产量的影响[J].节水灌溉,2017(7): 20-27.
- [10] 夏皖豫,陈彦云,柴忠良,等.宁南山区膜下滴灌对马铃薯土壤酶活性、土壤养分及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(1): 57-64.
- [11] 苏媛,田长彦,买文选,等.滴灌条件下西北干旱区农田生物排盐研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(4): 925-938.
- [12] 姚荣江,李红强,杨劲松,等.滴灌下生物质改良材料对盐渍土水盐氮运移的调控效应[J].农业机械学报,2020,51(11): 282-291.
- [13] Dannowski M, Block A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities[J]. Plant and Soil, 2005, 272(1): 61-76.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [15] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1983.
- [16] 刘凯,王则玉,刘小利,等.膜下滴灌对春灌盐碱地水盐运移及硝态氮淋洗损失的影响[J].农业资源与环境学报,2024,41(6): 1387-1395.
- [17] 张建兵,杨劲松,姚荣江,等.有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J].农业工程学报,2013,29(15): 116-125.
- [18] 李文昊,王振华,郑旭荣,等.长期膜下滴灌棉田土壤盐分变化特征[J].农业工程学报,2016,32(10): 67-74.
- [19] Song Y, Sun J N, Cai M J, et al. Effects of management of plastic and straw mulching management on crop yield and soil salinity in saline-alkaline soils of China: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2025, 308(C): 109309.
- [20] 张少民,白灯莎,刘盛林,等.覆膜滴灌条件下土地开垦年限对土壤盐分、养分和硝态氮分布特征的影响[J].新疆农业科学,2018,55(11): 2060-2068.
- [21] 白雪,周怀平,解文艳,等.不同类型地膜覆盖对玉米农田水热状况及产量的影响[J].土壤,2018,50(2): 414-420.
- [22] Zhu W, Yang J S, Yao R J, et al. Soil water-salt control and yield improvement under the effect of compound control in saline soil of the Yellow River Delta, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 263(C): 107455.
- [23] Song J, Fan H, Zhao Y Y, et al. Effect of salinity on germination, seedling emergence, seedling growth and ion accumulation of a euhalophyte *Suaeda salsa* in an intertidal zone and on saline inland[J]. Aquatic Botany, 2008, 88(4): 331-337.
- [24] Wang N, Zhang T H, Cong A Q, et al. Integrated application of fertilization and reduced irrigation improved maize (*Zea mays* L.) yield, crop water productivity and nitrogen use efficiency in a semi-arid region[J]. Agricultural Water Management, 2023, 289(C): 108566.
- [25] Zhang F F, Wei Y N, Bo Q F, et al. Long-term film mulching with manure amendment increases crop yield and water productivity but decreases the soil carbon and nitrogen sequestration potential in semiarid farmland[J]. Agricultural Water Management, 2022, 273: 107909.
- [26] Wang H, Yan Z F, Chen Z M, et al. Microbial ammonium immobilization promoted soil nitrogen retention under high moisture conditions in intensively managed fluvo-aquic soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2025, 61(3): 641-651.

- [27] 王钰皓, 庞津雯, 杨佳霖, 等. 不同覆盖方式对旱作农田土壤碳氮含量及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 20–29, 41.
- [28] Zhang G X, Zhang Y, Liu S J, et al. Optimizing nitrogen fertilizer application to improve nitrogen use efficiency and grain yield of rainfed spring maize under ridge-furrow plastic film mulching planting[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 229: 105680.
- [29] 刘凯, 谢英荷, 李廷亮, 等. 减氮覆膜对黄土旱塬小麦产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2595–2607.
- [30] Rath K M, Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81: 108–123.
- [31] 刘梦洁, 梁飞, 李全胜, 等. 膜下滴灌与细流沟灌对玉米生长及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(8): 1515–1530.
- [32] Wang C Y, Wang Z K, Lou H X, et al. Optimized straw incorporation depth can improve the nitrogen uptake and yield of rapeseed by promoting fine root development[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 250: 106504.

(责任编辑：于 飞)