

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.020

朱伟, 杨劲松, 姚荣江, 等. 黄河三角洲中重度盐渍土棉田水盐运移规律研究. 土壤, 2021, 53(4): 817–825.

黄河三角洲中重度盐渍土棉田水盐运移规律研究^①

朱伟^{1,2}, 杨劲松^{1*}, 姚荣江¹, 王相平¹, 谢文萍¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为充分利用黄河三角洲中重度盐渍土资源, 通过前期微咸水压盐(2 g/L), 选取中度(3.10 ~ 3.90 g/kg)和重度(4.60 ~ 5.70 g/kg)盐渍土, 研究了不同程度盐渍化土壤棉花种植下土壤剖面水盐运移规律。研究表明: 微咸水压盐后可以使剖面盐分处于相对均匀分布状况; 覆盖促进了棉花对膜下水分的吸收利用, 中度盐渍土棉花在苗期和蕾期主要耗水层为 0 ~ 40 cm 土壤表层, 重度盐渍土棉花主要耗水层为 0 ~ 30 cm 土壤表层, 后期由于作物生长引起深层水分(60 ~ 100 cm)消耗, 且中度盐渍土深层水分吸收要高于重度盐渍土; 生育期内中度盐渍土盐分上下土层波动范围为 0.80 ~ 2.00 g/kg, 重度盐渍土为 2.00 ~ 5.60 g/kg, 膜下土壤含盐量均要低于膜外土壤含盐量, 至收获期中度、重度盐渍土剖面平均脱盐率分别为 62.40% 和 55.83%, 棉花产量分别为 2 129.76 kg/hm² 和 823.66 kg/hm²。

关键词: 黄河三角洲; 中度盐渍土; 重度盐渍土; 水盐

中图分类号: S156.4+2 **文献标志码:** A

Soil Water and Salt Transport in Medium and Heavy Saline Soils of Yellow River Delta

ZHU Wei^{1,2}, YANG Jingsong^{1*}, YAO Rongjiang¹, WANG Xiangping¹, XIE Wenping¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The medium and heavy saline soils in the Yellow River Delta are important reserved cultivable resources in China, exploring the laws of soil water and salt transportation is significant to use these resources effectively, but the relative study is still less, especially the heavy saline soil. In this paper, cotton was planted in medium saline soil (3.10–3.90 g/kg) and heavy saline soil (4.60–5.70 g/kg) and irrigated with leached brackish water (salt concentration is 2 g/L). It was found that leached brackish water made the distribution of soil salt more uniformly in soil profile. Mulch film improved the absorption and utilization of soil water under the film, the main water-consuming layer was 0–40 cm in medium saline soil in cotton seedling and bud stages, while was 0–30 cm in heavy saline soil, water in deep layers (60–100 cm) was consumed due to crop growth in the later stage, and water absorption in deep layer was larger in medium saline soil than in heavy saline soil. Salt fluctuated within 0.80–2.00 g/kg and 2.00–5.60 g/kg in medium and heavy saline soil profiles, respectively. Soil salt content was lower inside mulch film than outside mulch film. The average desalination rate was 62.40% for medium saline soil and 55.83% for heavy saline soil in the harvest period. Cotton yield was 2 129.76 kg/hm² for medium saline soil and 823.66 kg/hm² for heavy saline soil. In conclusion, mulch film changes soil water and salt transportation in saline soils, mulch film can reduce water consumption, and medium saline soil showed better than heavy saline soil.

Key words: Yellow River Delta; Medium saline soil; Heavy saline soil; Soil water and salt

黄河三角洲是我国最大的三角洲, 其丰富的自然资源及广阔的地域面积是我国重要的后备土地资源^[1-2], 但大量研究表明盐渍化是制约该地区农业发展的主要因素之一^[1-4]。遥感数据显示, 黄河三角洲

近 50% 的土地为不同程度的盐渍化土壤, 其中轻度盐土面积约为 2 150.0 km², 占土壤总面积的 27.7%, 中度盐土面积约为 867.0 km², 占土壤总面积的 11.2%, 重度盐土面积约为 520.9 km², 占土壤总面积

①基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东联合基金重点支持项目(U1806215)、国家自然科学基金项目(41977015)和国家重点研发计划项目(2016YFD0200303)资助。

* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 朱伟(1992—), 男, 安徽滁州人, 博士研究生, 主要从事盐碱地治理与改良相关研究。Email: wzhu@issas.ac.cn

的 6.7%^[5]。

为充分利用该地区不同类型盐渍土,科学家们提出因地制宜、合理开发和利用是实现区域土地资源可持续利用的重要前提^[1]。而土壤盐渍化根本问题在于土壤蒸发强烈、淡水资源缺乏、地下水位高以及地下水矿化度高^[6]。蒸发过程导致盐分在土壤中不断积聚,尤其是土壤耕作层的盐分积聚是制约作物生长的重要因素,因此减少土壤蒸发、控制地下水位是解决土壤盐渍化的关键^[7]。已有研究表明,通过地表覆盖以及铺设暗管可以分别减少土壤蒸发^[8-10]及控制地下水位^[11-13]。同时,耐盐作物的种植也是适宜该地区土地资源利用的手段之一,而棉花以其耐盐碱性成为黄河三角洲地区主要栽培的经济作物之一^[2]。虽然近几十年来该区域棉花种植面积不断减少,至 2018 年该区域棉花种植面积约为 50 253.33 hm²^[14],但在中重度盐渍土改良和利用上,棉花种植以其自身的耐盐碱性和成熟的种植技术在该区域仍具有较强优势,在充分利用该区域土地资源具有较大潜力。

目前,关于黄河三角洲土壤盐渍化相关问题已有大量研究。在黄河三角洲土壤盐渍化的影响因素方面,范晓梅等^[7]认为原生盐渍土含盐量主要影响因子是地下水位、矿化度和植被覆盖度,排灌渠远近、地下水矿化度和埋深是影响该区域土壤次生盐渍化主要因子;在黄河三角洲土壤盐分空间差异性方面,姚荣江等^[15]通过经典统计学和地统计学发现在研究区 0 ~ 140 cm 土层内各土层属中等变异强度和中等空间差异性;在盐渍化土壤改良应用和田间水盐规律研究方面,卢星辰等^[16]利用盆栽试验探索了黄河三角洲轻中度滨海盐渍土合适的改良物料及配施参数,吴从稳等^[4]利用相关分析和主成分分析法得出 Na⁺、Cl⁻及 SO₄²⁻是影响其试验区棉田盐渍化的主要特征因子;此外,还有针对该区域地下水位的相关分析^[17],针对盐碱地性质、范围、地理分布和盐渍程度的遥感研究^[5],针对盐碱地利用方式的研究^[18]等。但目前针对中重度盐渍土利用下棉花种植的研究鲜有报道,尤其是棉花种植生育期内土壤水盐运移规律的研究及不同土层下土壤水分变化和盐分差异的研究。因此,

本研究结合前人工作内容和发现,选取黄河三角洲中重度盐渍土作为试验区,采用目前成熟的棉花覆膜种植技术,研究并分析了黄河三角洲中重度盐渍土改良下的水盐运移规律,以期黄河三角洲中重度盐渍土开发利用提供参考,促进该地区土地资源有效利用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于山东省垦利县中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站(118° 59' 24"E, 37° 45' 50"N),海拔 3 ~ 4 m。该区域属于暖温带半湿润大陆性季风季候,雨热同期,年均降雨量 560 mm,其中 7—9 月降雨量占全年 70%,平均蒸发量为 1 885.0 mm,年蒸降比约为 3.37,年均温 12.6 °C^[19];该地区地下水位埋深平均 1.14 m,最深不超过 2.3 m,受潮汐和径流影响,地下水矿化度平均 27.55 g/L^[20]。试验区成土母质为河流冲积物和海积物(盐渍淤泥),土壤盐分组成以氯化物为主,土壤类型为砂壤土,碱解氮含量 23.5 mg/kg,有效磷含量 3.46 mg/kg,有机质含量 2.53 g/kg。

1.2 试验设计

选择土壤盐分均匀的地块作为试验地,在种植前进行微咸水(2 g/L,取自当地农田的排水沟)灌溉,7 d 后排去表层积水,晾晒一段时间后进行翻耕种植棉花(品种:澳金精品种子),小区面积为 4 m × 5 m。种植前中度盐渍土剖面含盐量为 3.10 ~ 3.90 g/kg,重度盐渍土剖面含盐量为 4.60 ~ 5.70 g/kg(表 1)。土壤水分含量除 30 ~ 40 cm 土层外,中度盐渍土在其他土层土壤含水量均低于重度盐渍土,重度盐渍土盐分含量则明显高于中度盐渍土盐分含量。播种前采用薄膜覆盖,宽窄行设计(60 cm + 40 cm),膜上两侧 15 cm 播种(图 1)。土壤含水量测定点从上至下为距离表层 15、30、40、60、80 和 100 cm,土壤含盐量测定为 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm 土层。分别在膜下和膜外侧利用土钻采样,同时选取附近未种植作物的裸地作为对照,采样点布设与种植区一致。

表 1 播种时土壤水盐剖面分布

Table 1 Initial soil water and salt contents in different depths at sowing time

指标	区域	0 ~ 15 cm	15 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm
土壤含水量(cm ³ /cm ³)	中度盐渍土	0.19 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.24 ± 0.02
	重度盐渍土	0.21 ± 0.04	0.19 ± 0.02	0.17 ± 0.01	0.21 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.27 ± 0.03
土壤含盐量(g/kg)	中度盐渍土	3.47 ± 0.25	3.38 ± 0.20	3.91 ± 0.01	3.11 ± 0.11	3.63 ± 0.34	3.59 ± 0.26
	重度盐渍土	5.61 ± 0.05	4.99 ± 0.25	5.38 ± 0.19	5.75 ± 0.01	4.61 ± 0.15	5.31 ± 0.19

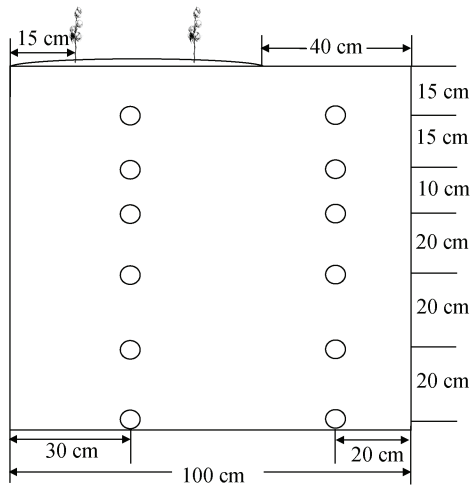


图 1 种植和采样点示意图
Fig.1 Design of sowing and sampling

1.3 测定方法与数据分析

土壤含水量采用烘干法测定土壤质量含水量,再根据土壤容重换算成体积含水量;各土层土壤含盐量采用残渣烘干质量法测定;叶面积指数采用叶面积指数仪(ACCUPAR LP-80 ceptometer, METER Group, Pullman, WA, USA)测定;株高以棉花主茎量到生长点(顶部)为准;产量采用称重法测定。采用 Excel2016

和 Oringin 9.0 对试验数据进行处理、分析和作图。

2 结果与分析

2.1 棉花生育期土壤水分变化特征

2.1.1 膜下和裸地土壤水分分布特征 图 2 是棉花不同生育期膜下和裸地土壤剖面水分分布特征。由图 2 可知,苗期中度盐渍土和重度盐渍土膜下 0~30 cm 土层土壤含水量低于裸地,表明苗期作物耗水主要来自土壤表层,且中度盐渍土作物耗水量高于重度盐渍土,同时由于薄膜覆盖提高膜下土壤温度,导致表层水分蒸发后部分水分凝结在薄膜下;在 40~60 cm 土层膜下和裸地土壤含水量无明显差异,在 60~100 cm 土层裸地土壤含水量明显高于中度盐渍土和重度盐渍土膜下,这是由于裸地上层土壤蒸发导致深层水分向上运移的结果。蕾期作物耗水量较大,且 40~80 cm 土层土壤含水量表现为中度盐渍土膜下<重度盐渍土膜下<裸地,表明该时期存在深层水分消耗,深层水分通过毛细管作用运移至耕作层,而表层土壤由于植株叶面与薄膜覆盖,使得表层 0~15 cm 土层水分高于裸地,同时期土壤蒸发强烈是导致裸地土壤表层土壤含水量低于有薄膜覆盖区域的原因之一。花铃期 0~60 cm 土层土壤含水量与蕾期变化趋势基本一致;

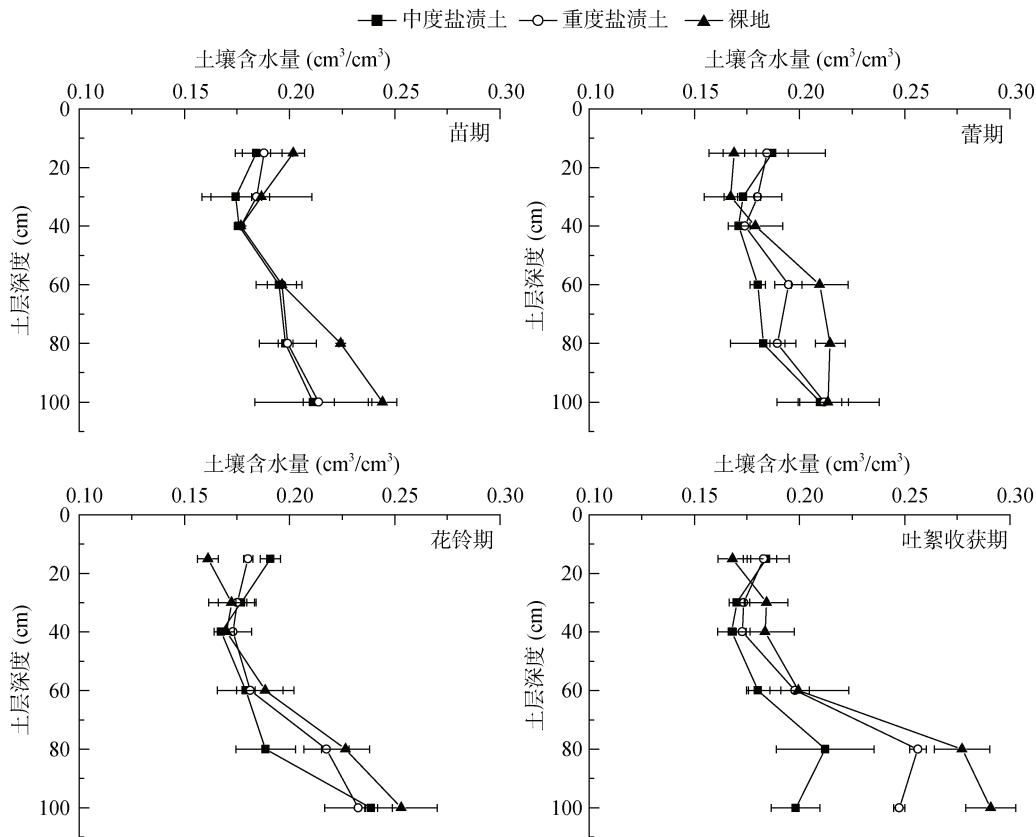


图 2 中、重度盐渍土膜下和裸地土壤水分剖面分布特征
Fig.2 Soil water vertical distributions in medium and heavy saline soils under mulch film and bare soil

膜下以及裸地深层 80~100 cm 土层土壤含水量较蕾期高,表明该时期地下水位抬升,引起 80~100 cm 土层土壤含水量有一定程度的增长;40~100 cm 土层土壤含水量表现为中度盐渍土膜下<重度盐渍土膜下<裸地,造成该差异的原因与蕾期一致。进入吐絮收获期,中度盐渍土由于作物生长状况较好,其膜下 30~100 cm 土层土壤含水量明显低于重度盐渍土膜下和裸地,表明该时期作物耗水主要来源于 30~100 cm 土层,而重度盐渍土作物长势相对中度盐渍土较弱,作物耗水相对较少,导致其膜下 30~100 cm 土层土壤含水量较中度盐渍土膜下高;而裸地由于无作物耗水,主要受土壤蒸发、地下水位和降雨影响,土壤剖面 0~100 cm 土层土壤含水量高于中、重度盐渍土膜下。

2.1.2 膜下和膜外土壤水分差异 图 3 是中、重度

盐渍土 0~40 cm 土层膜下与膜外土壤含水量在不同时期的差异比较。由图 3 可知,土壤表层 0~15 cm 由于薄膜覆盖,膜下土壤水分蒸发散失减少,膜下土壤含水量高于膜外土壤。由于苗期作物根系相对较浅,作物耗水主要来自土壤表层,其中中度盐渍土作物耗水体现在 0~30 cm 土层,重度盐渍土主要体现在 0~15 cm 土层;在蕾期、花铃期和吐絮收获期,作物耗水在 15~40 cm 土层得到体现,同时作物耗水引起膜下、膜外土壤含水量差,且中度盐渍土在该生长期膜下和膜外土壤含水量差值相对重度盐渍土较大,中度盐渍土在 30~40 cm 土层膜下土壤水分明显低于膜外,重度盐渍土棉花由于盐分胁迫,作物根系发育受胁迫,在 30~40 cm 土层水分消耗相对中度盐渍土较少,因此膜下、膜外土壤含水量差值相对中度盐渍土较小。

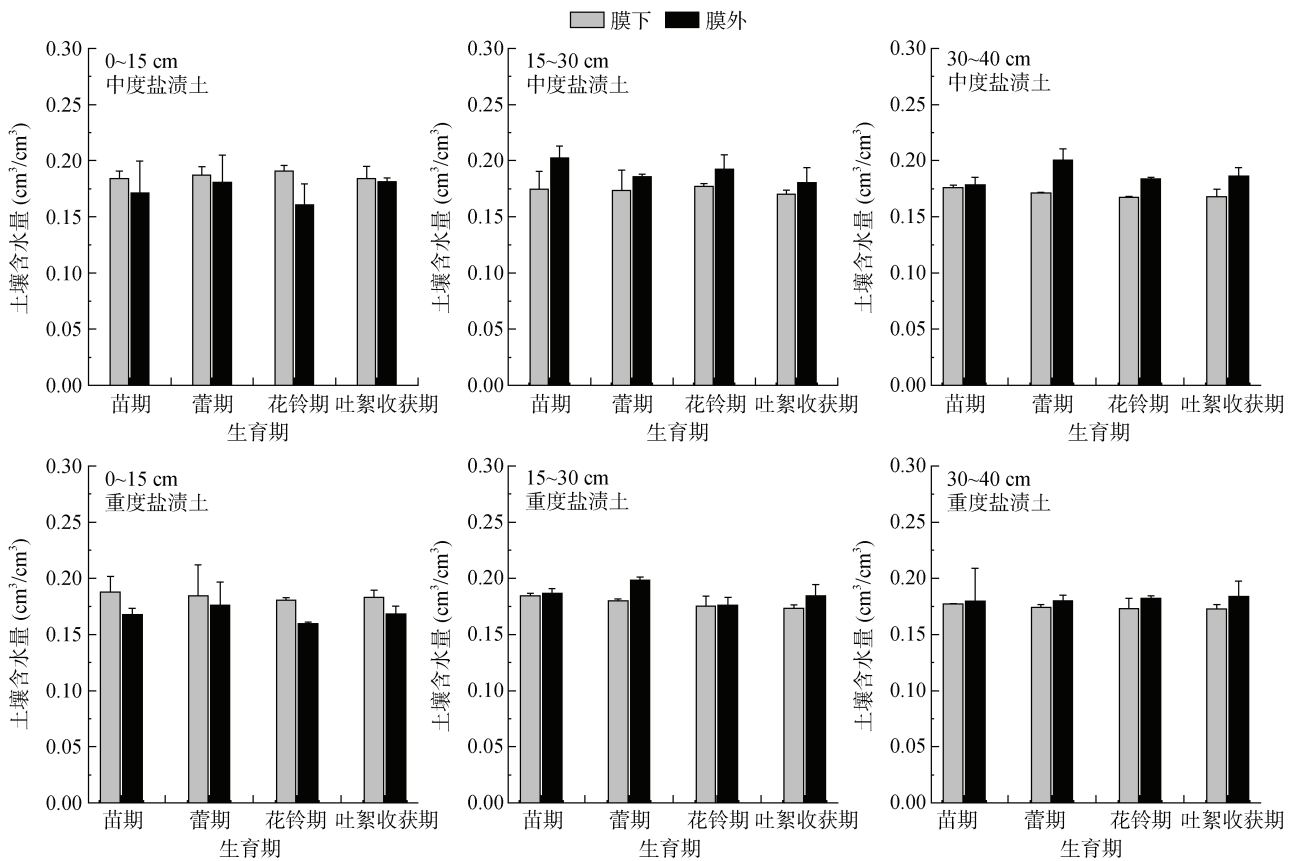


图 3 膜下和膜外土壤水分分布特征

Fig. 3 Soil water contents in different depths inside and outside of mulch film

2.2 棉花生育期土壤盐分变化特征

2.2.1 膜下和裸地土壤盐分分布特征 图 4 是 0~100 cm 各土层土壤盐分在棉花不同生长期的动态变化特征。从图 4 可以看出,在 0~15 cm 土层,从苗期至吐絮收获期,中度盐渍土和重度盐渍土膜下土壤含盐量呈现一定的下降趋势,中度盐渍土膜下土壤含

盐量低于 2.00 g/kg,重度盐渍土膜下土壤含盐量从 3.70 g/kg 降低至 1.85 g/kg,这是由于薄膜覆盖和作物叶面积指数的增长使得土壤表层蒸发减弱,从而减少了盐分在土壤表层的积聚。而裸地由于无覆盖,表层 0~15 cm 土壤含盐量的变化主要受土壤蒸发、降雨和地下水位变化影响,盐分表面积聚作用明显,土

壤含盐量处于较高水平，在生育期内，土壤含盐量最低为蕾期的 7.16 g/kg，最高为苗期的 12.92 g/kg，其土壤含盐量均显著高于中度盐渍土和重度盐渍土 ($P<0.05$)。

中度盐渍土和重度盐渍土膜下 15 ~ 30 cm 土层土壤含盐量变化趋势基本一致，且中度盐渍土膜下土壤含盐量表现为苗期>蕾期>花铃期>吐絮收获期，土壤含盐量分别为 1.89、1.48、1.27、1.20 g/kg，土壤脱盐率为 36.50%；重度盐渍土以苗期膜下土壤含盐量 2.55 g/kg 最高，至吐絮收获期为 1.54 g/kg，土壤脱盐率为 39.61%；裸地在 0 ~ 15 cm 土层土壤含盐量变化区间较小，土壤含盐量变化范围为 4.11 ~ 4.93 g/kg。各生长期该层土壤含盐量与 0 ~ 15 cm 土层对比可见，苗期、蕾期、花铃期、吐絮收获期土壤含盐量分别降低了 8.81、2.23、7.02、5.29 g/kg，同时在该层裸地土壤含盐量与中度盐渍土和重度盐渍土膜下土壤含盐量差值相对 0 ~ 15 cm 土层减弱。

30 ~ 40 cm 土层中度盐渍土膜下土壤含盐量变化趋势很小，且土壤含盐量低于 1.00 g/kg；重度盐渍土膜下仍表现出随着生育期下降趋势，但该趋势在花

铃期和吐絮收获期减弱，土壤含盐量在花铃期和吐絮收获期基本维持稳定为 1.70 g/kg，从苗期至吐絮收获期土壤脱盐率为 38.85%；裸地土壤含盐量维持在 3.00 ~ 5.00 g/kg。

中度盐渍土膜下 40 ~ 60 cm 和 60 ~ 80 cm 土层土壤含盐量变化趋势相似，从苗期至吐絮收获期有较小的增长，基本维持在 1.00 g/kg 左右；重度盐渍土膜下不同土层土壤含盐量在生育期内变化趋势基本一致，且 60 ~ 80 cm 土层土壤含盐量均高于 40 ~ 60 cm 土层；裸地土壤含盐量变化趋势与重度盐渍土膜下土层含盐量变化趋势相似。

80 ~ 100 cm 土层，中度盐渍土膜下土壤含盐量在整个生育期内基本无变化，变化区间为 1.59 ~ 1.82 g/kg，土壤含盐量相对于同时期 30 ~ 80 cm 土层土壤含盐量较高；重度盐渍土在苗期膜下土壤含盐量与裸地相同，至吐絮收获期含盐量下降至 3.13 g/kg；该层裸地土壤含盐量与 30 ~ 80 cm 土层土壤含盐量的变化趋势一致，同时该层重度盐渍土膜下和裸地土壤含盐量与 60 ~ 80 cm 土层同时期对应含盐量差值较小。

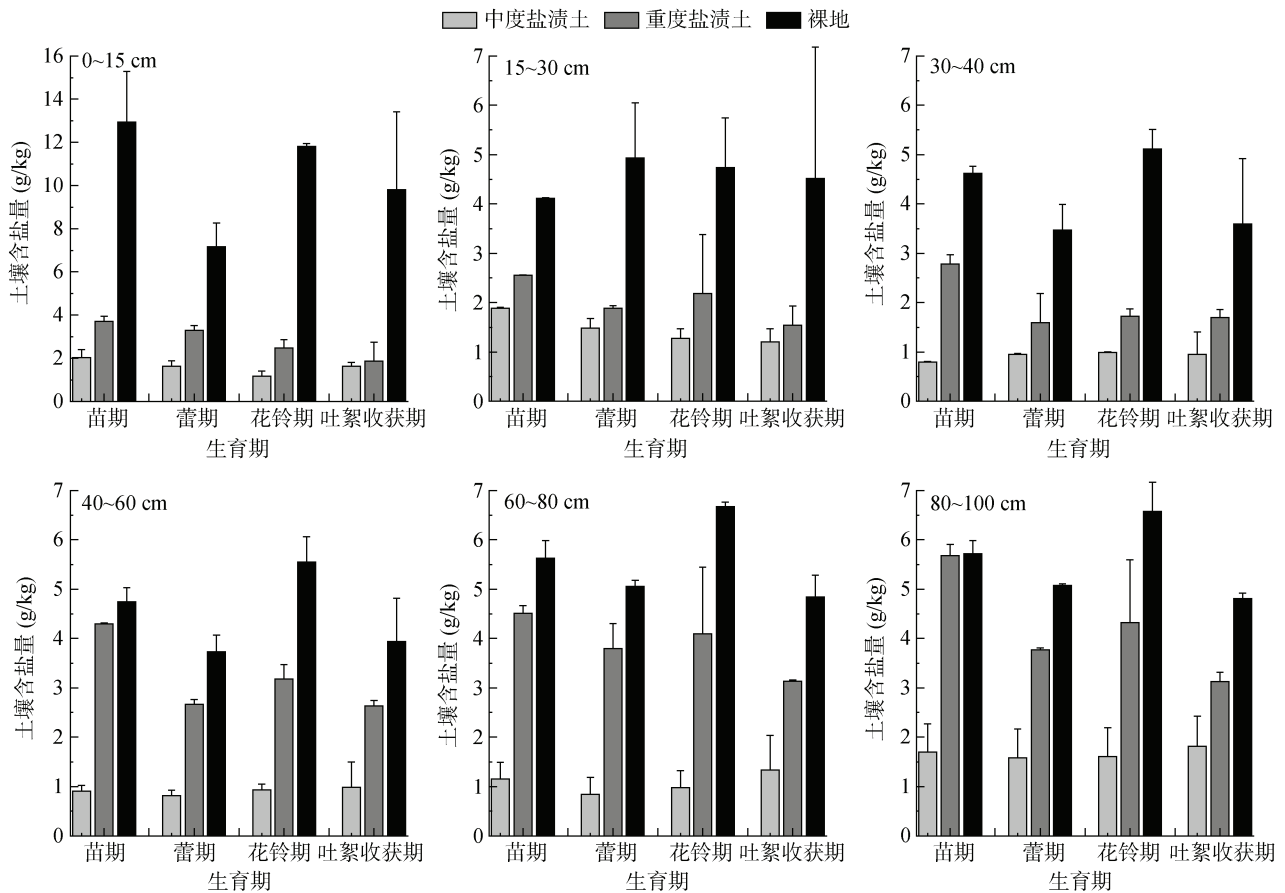


图 4 不同生育期土壤盐分特征

Fig. 4 Soil salt contents in different depths during different growing periods

总体而言,在不同生育期不同土层(除去苗期在重度盐渍土膜下和裸地的 80 ~ 100 cm 土层的含盐量),裸地含盐量与中、重度盐渍土膜下含盐量表现为裸地>重度盐渍土>中度盐渍土,且差异性显著($P<0.05$),中度、重度盐渍土膜下和裸地的不同土层含盐量随着生育期推进均呈现一定的脱盐趋势,至收获期中、重度盐渍土膜下剖面平均脱盐率分别为 62.40%和 55.83%。

2.2.2 膜下和膜外土壤盐分差异 图 5 为棉花不同生育期中、重度盐渍土膜下和膜外土壤含盐量对比,可见,膜下土壤含盐量均低于膜外土壤含盐量,且膜下和膜外含盐量在不同土层的变化趋势基本一致,即膜下含盐量与膜外含盐量相互影响,但含量差异一直存在。苗期,中度盐渍土以表层 0 ~ 15 cm 膜下和膜外土壤含盐量差值较大,膜外由于无覆盖,蒸发影响下仍出现一定程度的盐分表聚现象;其他土层土壤含盐量差值较小,呈现至上而下先降低后增加趋势,且该趋势在 40 ~ 100 cm 土层变缓;膜下土壤含盐量表现为 30 ~ 40 cm<40 ~ 60 cm< 60 ~ 80 cm<80 ~ 100 cm<15 ~ 30 cm<0 ~ 15 cm,膜外土壤含盐量表现与膜下相同。同时期中重度盐渍土与中度盐渍土膜下和膜外土壤含盐量剖面分布特征不同,不同土层土壤含

盐量相对中度波动趋势较大,且重度盐渍土膜下与膜外土壤含盐量差值在 30 ~ 40 cm 土层最小;膜下土壤含盐量表现为 15 ~ 30 cm<30 ~ 40 cm<0 ~ 15 cm<40 ~ 60 cm< 60 ~ 80 cm<80 ~ 100 cm,膜外土壤含盐量表现为 30 ~ 40 cm<15 ~ 30 cm<0 ~ 15 cm<40 ~ 60 cm< 60 ~ 80 cm<80 ~ 100 cm。

蕾期,中度盐渍土在 0 ~ 15 cm 和 80 ~ 100 cm 土层膜下和膜外土壤含盐量差值相对其他土层较大,以 30 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层土壤含盐量差值最小,剖面土壤含盐量呈现表层和底层高、中间土层低的现象,膜下土壤含盐量表现为 30 ~ 40 cm<15 ~ 30 cm<40 ~ 60 cm<0 ~ 15 cm<80 ~ 100 cm<60 ~ 80 cm,膜外土壤含盐量表现为 30 ~ 40 cm<15 ~ 30 cm<40 ~ 60 cm<0 ~ 15 cm<60 ~ 80 cm<80 ~ 100 cm;重度盐渍土土壤剖面膜下和膜外盐分出现明显差异($P<0.05$),且剖面含盐量变化趋势与中度盐渍土相似,膜下土壤含盐量表现为 30 ~ 40 cm<15 ~ 30 cm<40 ~ 60 cm<0 ~ 15 cm<80 ~ 100 cm<60 ~ 80 cm,膜外土壤含盐量表现为 30 ~ 40 cm<15 ~ 30 cm<40 ~ 60 cm<0 ~ 15 cm<60 ~ 80 cm<80 ~ 100 cm。

花铃期,中度盐渍土膜下和膜外相同土层土壤含盐量差异显著($P<0.05$),30 ~ 80 cm 土层膜下土壤含

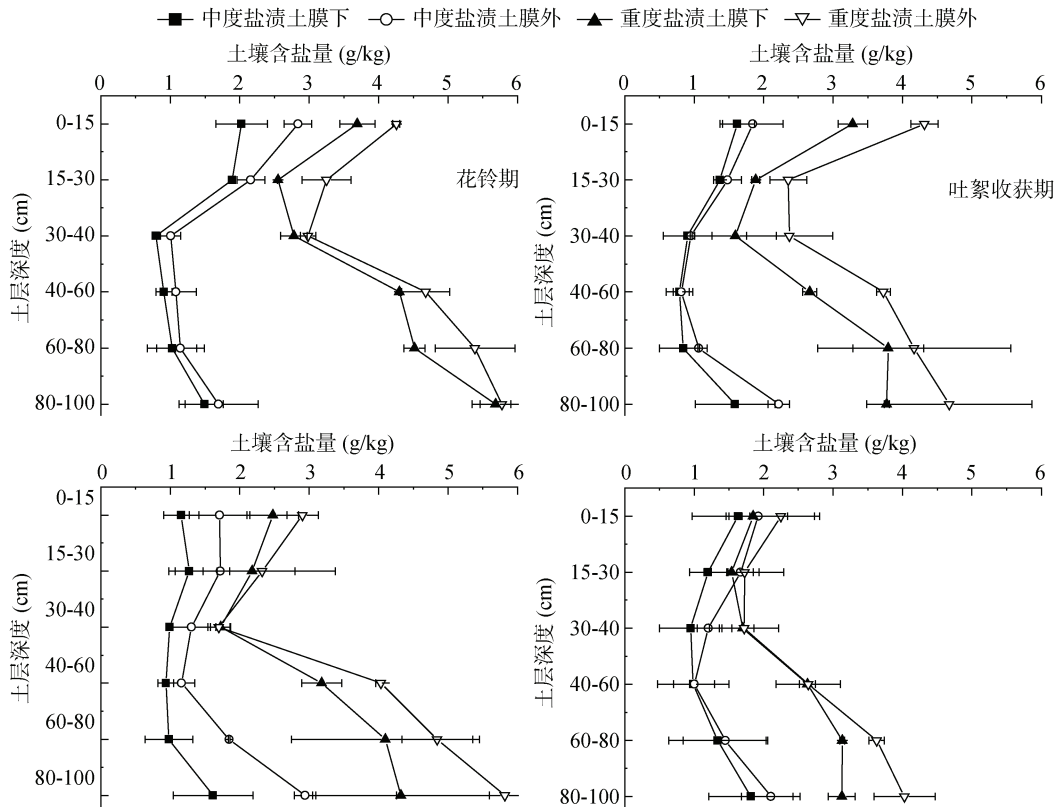


图 5 膜下膜外土壤剖面含盐量分布特征
Fig. 5 Vertical distributions of soil salt contents inside and outside of mulch film

盐量不同土层土壤含盐量基本一致,且其含盐量低于0~30 cm和80~100 cm土层,膜外土壤盐分整体趋势与膜下相似,但剖面含盐量分布相对不均匀,土壤含盐量表现为40~60 cm<30~40 cm<0~15 cm<15~30 cm<60~80 cm<80~100 cm;重度盐渍土在30~40 cm土层膜下和膜外土壤含盐量无明显差异,以80~100 cm土层膜下和膜外土壤含盐量差异性明显,膜下和膜外土壤含盐量表现为30~40 cm<15~30 cm<0~15 cm<40~60 cm<60~80 cm<80~100 cm。

吐絮收获期,中度盐渍土在40~60 cm土层膜下和膜外土壤含盐量无差异,0~40 cm土层土壤含盐量膜下与膜外存在显著差异,60~100 cm土层土壤含盐量仍表现为膜下低于膜外,膜下土壤含盐量表现为30~40 cm<40~60 cm<15~30 cm<60~80 cm<0~15 cm<80~100 cm,膜外土壤含盐量表现为40~60 cm<30~40 cm<60~80 cm<15~30 cm<0~15 cm<80~100 cm;该时期重度盐渍土表层含盐量相对于前期明显降低,0~30 cm土层土壤含盐量与中度盐渍土差值变小,同时膜下土壤含盐量低于中度盐渍土膜外土壤含盐量,剖面土壤含盐量变化区间变小,分布较前期均匀,膜下和膜外土壤含盐量在30~60 cm土层趋于相同,在表层0~30 cm和60~100 cm膜下和膜外仍表现出显著差异($P<0.05$)。

总体而言,整个生育期中度盐渍土土壤含盐量的剖面分布较重度盐渍土更均匀,土壤含盐量上下波动范

围较小,中度盐渍土和重度盐渍土膜下土壤含盐量均低于膜外土壤含盐量;从土壤含盐量大小分布来看,中度盐渍土30~60 cm土层土壤含盐量低于其他土层,重度盐渍土15~40 cm土层土壤含盐量低于其他土层。

2.3 棉花生物性状

图6为和重度盐渍土和重度盐渍土棉花在不同生育期叶面积指数和株高变化,以及作物产量对比。由图6可知,在中度盐渍土上棉花叶面积指数随着生育期推进呈现快速增长,至花铃期叶面积指数达到最大值3.79,后期作物成熟,叶片萎缩凋谢,叶面积指数降低;而同时期在重度盐渍土上,由于作物受到盐胁迫作用较大,植株叶面积指数整个生育期内较小,进入蕾期、花铃期与吐絮收获期无明显变化(1.26~1.40),且与中度盐渍土棉花叶面积指数差异性显著($P<0.05$)。

株高是作物生长期另一重要生理特征,中度盐渍土棉花生育期内花铃期作物株高为最大值81.67 cm,与叶面积指数增长趋势保持统一趋势;重度盐渍土棉花株高增长趋势相对中度盐渍土较弱,且最大株高为49.33 cm,在同一生长期与中度盐渍土棉花株高差异性显著($P<0.05$)。产量数据表明,中度盐渍土与重度盐渍土产量差值为1306.10 kg/hm²,中度盐渍土棉花产量远高于重度盐渍土棉花产量,且略高于2018年全国和山东省平均棉花产量^[21]。

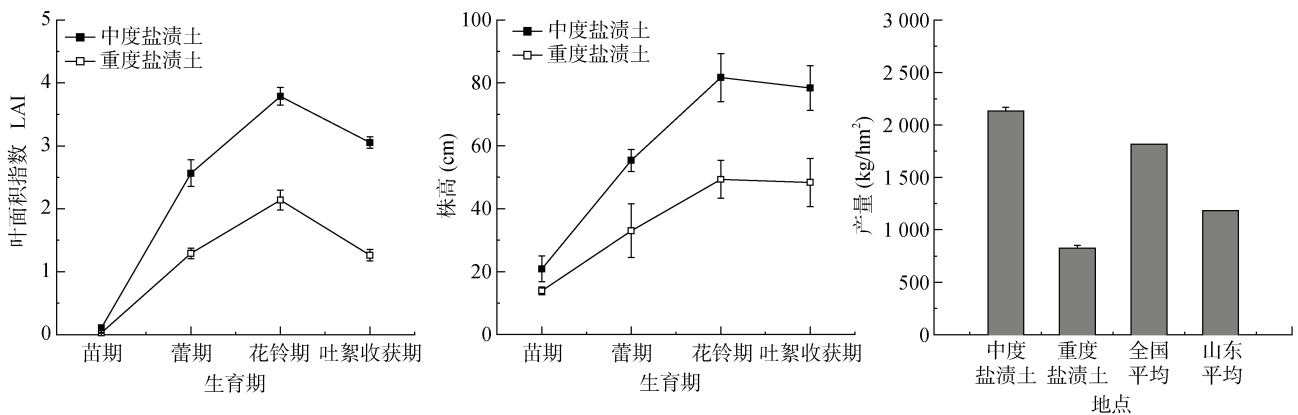


图6 作物叶面积指数、株高与产量

Fig. 6 Leaf area index (LAI), plant height and cotton yield

3 讨论

3.1 覆膜条件下土壤水分运移规律

土壤水盐运移过程和运移机理研究是盐渍土研究的核心问题^[22]。盐渍土水盐调控是盐碱地改良的重要途径。根据“盐随水来,盐随水去”的原理,对

盐渍土水盐运移研究首先关注土壤水分变化。

本研究在薄膜覆盖的方式下对黄河三角洲中、重度盐渍土棉田土壤水盐规律进行分析。已有干旱区和半干旱区土壤表层覆盖研究表明,覆盖通过减少土壤蒸发可以提高膜下表层土壤含水量^[23-26],关于盐碱地的覆盖研究也证实,盐碱地表层覆盖是调控水盐运移

的重要措施之一, 表层覆盖可明显降低土壤水分蒸发, 控制土壤水分无效蒸发散失, 减少高矿化度地下水在毛细管作用下向上迁移, 抑制表层盐分积聚, 具有显著的蓄水抑盐效果^[27-28]。本研究进一步证实, 在生育期内通过覆盖可以有效地提高膜下 0~15 cm 土层土壤含水量, 由于苗期膜下表层 0~30 cm 土壤含水量相对膜外较高, 可以保证苗期作物的水分吸收, 对作物生长有促进作用; 在生长后期, 由于薄膜表层覆盖和作物叶面积增长(图 6), 土壤蒸发降低, 覆盖表层蓄水作用更加明显, 膜下表层土壤含水量高于裸地(图 2); 在蕾期、花铃期和吐絮收获期, 研究表明, 通过覆盖促进作物生长、减少土壤蒸发, 促进深层水分(60~100 cm)消耗, 尤其是促进中度盐渍土土壤深层水分吸收(图 2), 而裸地由于表层土壤水分蒸发, 高矿化度地下水在毛细管作用下, 水分向上运移^[29-30], 除表层水分在强烈的土壤蒸发下土壤含水量低于中、重度盐渍土膜下, 其他土层土壤含水量均要高于中、重度盐渍土膜下。本研究发现, 中、重度盐渍土 15~40 cm 土层膜下土壤水分均要低于膜外土壤水分, 这是由于土壤表层覆盖可以减少土壤无效水分蒸发^[31], 促进表层 0~15 cm 膜下土壤含水量的保持; 同时覆盖提高作物对膜下水分的吸收利用, 而膜外由于缺少薄膜、作物叶面覆盖和作物根系的直接吸收利用, 从而使得膜下土壤水分低于膜外土壤水分, 且中度盐渍土膜下的作用表现在 15~40 cm, 重度盐渍土膜下表现在 15~30 cm(图 3), 造成该现象的原因是中度盐渍土和重度盐渍土作物长势的差异, 中度盐渍土作物长势较好(图 6), 水分吸收利用效率高于重度盐渍土。

3.2 棉花生育期土壤盐分变化规律

盐碱障碍是影响土壤质量和造成土地生产力水平低下的重要原因^[23], 因此对于盐分的剖面分布是盐渍土改良效果评价的重要依据。

本研究通过前期微咸水压盐可以有效控制土壤剖面水盐分布, 其作用机理是通过土层上下水势差使得水分向深层运移, 从而达到耕作层土壤含盐量降低, 当整个土壤剖面(0~100 cm)水势差减小时, 土层中盐分也形成稳定分布(表 1)。通过分析棉花生育期内土壤盐分的剖面分布发现, 与水分变化不同在于含水量较低的区域, 土壤含盐量一般低于含水量高的区域(图 4、图 5), 且已有研究证实盐分的动态变化规律与其水分变化规律基本相反, 即水分含量高盐分含量低, 水分含量低盐分含量高^[9]。本研究中具体结果表现为在不同生育期不同土层, 裸地土壤含盐量

与中、重度盐渍土膜下土壤含盐量表现为裸地>重度盐渍土>中度盐渍土(图 4), 这是由于表层土壤水分蒸发, 高矿化度地下水在毛细管作用下, 水分向上运移^[30], 当水分无效蒸发后, 盐分得到积聚, 裸地由于完全无覆盖, 因此土壤剖面盐分含量较高, 其次是重度盐渍土与中度盐渍土。而造成中度盐渍土和重度盐渍土膜下土壤盐分含量差异的主要原因为: 一是土壤剖面含盐量本底值不同, 播种时重度盐渍土土壤含盐量即高于中度盐渍土; 二是随着作物生长, 受盐分胁迫作用小的中度盐渍土叶面覆盖与作物长势优于重度盐渍土(图 6), 中度盐渍土形成良好的减蒸和抑盐效果^[30]。

同时本研究分析对比了膜下和膜外土壤盐分的分布特征, 结果表明, 膜下和膜外土壤盐分变化趋势基本一致, 膜下土壤含盐量基本低于膜外土壤含盐量, 这是由于膜下土壤在薄膜覆盖下土壤水分蒸发减少, 减少高矿化度地下水向上迁移, 膜外土壤由于缺少表层覆盖, 水分无效蒸发仍存在, 从而引起膜下、膜外盐分的差异分布, 且中度盐渍土土壤剖面盐分波动范围较小(图 5), 这是由于中度盐渍土无效蒸发和盐分积聚效应较重度盐渍土小。本研究发现中度盐渍土 30~60 cm 土层土壤盐分含量低于其他土层, 重度盐渍土 15~40 cm 土层土壤含盐量低于其他土层, 且该现象在生长前期和后期表现最明显, 花铃期得到缓解, 本研究中生长前期出现该现象的原因可能是由于前期覆盖面积较小, 缺少作物叶面积覆盖作用, 土壤蒸发引起的盐分表面积聚仍有轻微发生, 重度盐渍土则更为明显; 试验后期出现此现象的原因可能是由于田间试验受耕作和环境气候因素影响较大, 后期覆盖物破损以及作物叶片脱落, 表层覆盖效果减弱, 导致土壤蒸发增强, 盐分开始表聚^[9]; 而花铃期作物叶面积覆盖以及薄膜覆盖较好, 相对生长前期和后期具有更好的覆盖减蒸效果和盐分表聚抑制作用。

结合整个生育期土壤水分迁移变化规律和盐分障碍消减过程分析, 由于中度盐渍土整体剖面盐分胁迫对棉花影响较小以及充分的水分供给, 从而其作物产量高于重度盐渍土(图 6)。

4 结论

1) 棉花苗期由于作物生长耗水主要来源于土壤表层 0~15 cm, 从而导致苗期膜下土壤水分明显低于裸地, 而生长后期, 由于薄膜表层覆盖和作物叶面积增长降低了土壤无效水分蒸发, 起到表层蓄水作用, 使得膜下表层土壤水分高于裸地; 同时由于薄膜

覆盖促进了作物生长且减少表层土壤蒸发,在作物生长后期引起深层水分(60~100 cm)消耗,且中度盐渍土土壤深层水分吸收要高于重度盐渍土。

2)覆盖可以减少表层0~15 cm土壤水分的无效蒸发,促进膜下土壤表层水分的保持,为苗期作物生长耗水提供保障。覆盖提高了作物对膜下水分的吸收利用,引起中度盐渍土和重度盐渍土15~40 cm土层膜下土壤含水量均要低于膜外土壤含水量,其中中度盐渍土膜下和膜外土壤水分差异主要体现在15~40 cm土层,而重度盐渍土主要体现在15~30 cm土层。

3)中、重度盐渍土和裸地剖面盐分差异是由于上层土壤水分蒸发,引起高矿化度地下水在毛细管作用下向上运移,当水分无效蒸发后,盐分积聚引起的;中、重度盐渍土膜下和膜外土壤含盐量变化趋势基本一致,且膜下土壤含盐量要低于膜外,中度盐渍土30~60 cm土层土壤含盐量低于其他土层,重度盐渍土15~40 cm土层土壤含盐量低于其他土层,且该现象在生长前期和后期表现最明显,花铃期得到缓解。

参考文献:

- [1] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 106-112.
- [2] 孙运朋, 陈小兵, 张振华, 等. 滨海棉田土壤盐分时空分布特征研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 891-899.
- [3] 杨劲松, 姚荣江. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 348-353.
- [4] 吴从稳, 陈小兵, 王松涛, 等. 黄河三角洲滨海棉田土壤盐分特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 149-153.
- [5] 关元秀, 刘高焕, 刘庆生, 等. 黄河三角洲盐碱地遥感调查研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(1): 46-52, 86.
- [6] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲土地利用/土地覆盖变化研究现状与展望[J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 110-118.
- [7] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 139-144.
- [8] 纪永福. 地面覆盖对盐渍土盐分和水分影响的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2000.
- [9] 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.
- [10] 余桂红, 朱孔志, 张鹏, 等. 醋渣覆盖对盐渍土麦田土壤和小麦幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 87-90.
- [11] 李法虎, Keren R, Benhur M. 暗管排水条件下土壤特性和作物产量的空间变异性分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 64-69.
- [12] 张金龙, 张清, 王振宇, 等. 排水暗管间距对滨海盐土淋洗脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 85-89.
- [13] 刘文龙, 罗纨, 贾忠华, 等. 黄河三角洲暗管排水的综合效果评价[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 122-126.
- [14] 王桂峰, 王安琪, 秦都林, 等. 山东省棉花产业发展情况调研报告[J]. 棉花科学, 2019, 41(4): 3-15.
- [15] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 89-94.
- [16] 卢星辰, 张济世, 苗琪, 等. 不同改良物料及其配施组合对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效果[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 326-332.
- [17] 马海丽. 黄河三角洲典型区地下水动态及其与土壤盐渍化的关系[D]. 济南: 济南大学, 2015.
- [18] 李庆梅, 侯龙鱼, 刘艳, 等. 黄河三角洲盐碱地不同利用方式土壤理化性质[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1132-1136.
- [19] Han G X, Sun B Y, Chu X J, et al. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256/257: 292-303.
- [20] 蒋名亮, 李菲, 陈小兵, 等. 滨海盐渍土土壤水分特征曲线测定及拟合模型比较[J]. 中国农村水利水电, 2016(7): 38-42.
- [21] 国家统计局. 国家统计局关于 2018 年棉花产量的公告[OL]. 2018 年 12 月 29 号. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html.
- [22] 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.
- [23] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 31(4): 241-249.
- [24] 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 覆膜耕作方式对河套灌区土壤水热效应及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 108-113.
- [25] 朱伟, 黎晓, 李会杰, 等. 黄土旱塬垄作覆膜栽培土壤水分及温度变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 32-40.
- [26] 王杰, 冯浩, 王乃江, 等. 垄作覆膜种植对夏玉米生长和土壤水分动态的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 110-119.
- [27] 孙博, 解建仓, 汪妮, 等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐影响的试验研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 48-51.
- [28] 张建兵, 杨劲松, 李芙蓉, 等. 有机肥与覆盖对苏北滩涂重度盐渍土壤水盐调控效应分析[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 184-188.
- [29] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 23-26.
- [30] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 等. 秸秆深层覆盖对土壤水盐运移及小麦生长的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 885-889.
- [31] Agele S O, Olaore J B, Akinbode F A. Effect of some mulch materials on soil physical properties, growth and yield of sunflower (*Helianthus Annuus*, L)[J]. Advances in Environmental Biology, 2010, 4(3): 368-375.