

# 垄膜沟灌对旱区农田土壤盐分及硝态氮运移特征的影响

李成<sup>1,2</sup>, 冯浩<sup>1,2,3</sup>, 罗帅<sup>1,2</sup>, 王乃江<sup>1,2</sup>, 罗晓琦<sup>1,2</sup>, 董勤各<sup>1,2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 引黄水量的执行性削减加剧了河套灌区农业水资源的紧缺程度及土壤次生盐渍化问题。采取合理的节水灌溉模式对缓解河套灌区农业用水紧张、改良盐渍化土壤、营造适宜作物生长的土壤环境具有重要意义。为明晰垄膜沟灌对河套灌区土壤盐分及硝态氮运移特征的影响及调控效果,通过 4 次田间沟灌试验,对比研究了高水、中水、低水及高肥、低肥 6 个组合处理条件下土壤盐分以及土壤硝态氮的变化特征。结果表明:垄膜沟灌条件下灌水量对土壤全盐量的影响高于施肥量,中水处理土壤全盐量始终维持在一个适宜且稳定的水平。灌水量和施肥量对土壤硝态氮含量均有不同程度的影响,中、低水处理后期硝态氮的淋溶显著低于高水处理。垄膜沟灌种植模式下中水低肥处理增加了土壤水分的有效性,抑制了土壤反盐,减少了垄上硝态氮的淋溶,在节水节肥的基础上为作物的生长发育提供了一个适宜的土壤环境,利于生物量的累积及最终产量的形成,在一定程度上解决了河套灌区引黄灌溉配额减少与漫灌洗盐方式严重浪费水资源之间的矛盾,为当地垄膜沟灌技术的推广提供了一定的理论依据与技术支撑。

**关键词:** 垄膜沟灌; 土壤; 盐分运移; 硝态氮运移

中图分类号: S152.7; S513 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)03-0268-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.040

## Effects of Ridge with Plastic Mulch-Furrow Irrigation on Soil Salt and Nitrate Nitrogen Transport Characteristics in Arid Areas

LI Cheng<sup>1,2</sup>, FENG Hao<sup>1,2,3</sup>, LUO Shuai<sup>1,2</sup>,

WANG Naijiang<sup>1,2</sup>, LUO Xiaoqi<sup>1,2</sup>, DONG Qinge<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** The reducing of yellow water quota and increasing of irrigation area aggravated the shortage of agriculture water resources and soil salinization in the Hetao Irrigation District. It is of great significance to alleviate the stress of agricultural water, improve saline soil by adopting reasonable irrigation methods, and establish a good soil environment which is suitable for crop growth in the irrigation district. In order to investigate the transport characteristics of soil salt and nitrate nitrogen under ridge with plastic mulch-furrow irrigation in the Hetao Irrigation District, four times field irrigation experiments were conducted to determine the effect of high water and high fertilizer (I1F1), high water and low fertilizer (I1F2), middle water and high fertilizer (I2F1), middle water and low fertilizer (I2F2), low water and high fertilizer (I3F1), low water and low fertilizer (I3F2) on soil salinity and soil nitrate nitrogen. The results showed that the irrigation amounts shows higher influence on soil salinity than fertilizer amounts under ridge with plastic mulch-furrow irrigation. The soil salt content of middle water treatment always maintained a suitable and stable level. The amount of irrigation and fertilizer had different effects on soil nitrate nitrogen content. The nitrate leaching in the later stage of middle and low water treatments was significantly lower than that of high water treatment. The treatment of middle water and low fertilizer under ridge with plastic mulch-furrow irrigation increased

收稿日期: 2018-11-29

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400205); 国家自然科学基金项目(51609237, 51879224); 中科院“西部之光”项目(XAB2015B04); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452016104)

第一作者: 李成(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: lcxinong@163.com

通信作者: 董勤各(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事畦灌节水技术、土壤水盐运移模拟研究。E-mail: qgdong2011@163.com

soil moisture availability, inhibited soil salinity, and reduced the leaching of nitrate nitrogen on the ridge, had a good desalination effect on the basis of saving water and fertilizer which provide a suitable soil environment for the growth and development of crops and conducive to the accumulation of biomass. In a certain extent, the contradiction between the reduction of yellow water quota and the severe waste of water resources in leaching salt through flooding irrigation was solved. It provided theoretical basis and technical support for the promotion of ridge with plastic mulch-furrow irrigation technology in the Hetao Irrigation District.

**Keywords:** ridge with plastic mulch-furrow irrigation; soil; salt transport; nitrate nitrogen transport

河套灌区是我国三大灌区之一,引黄灌溉对保障灌区作物正常生长发育具有重要作用<sup>[1]</sup>。然而,灌区干旱少雨,蒸发强烈,气温变化幅度大,且土壤次生盐渍化和营养元素淋失严重,极易造成作物减产<sup>[2-3]</sup>。目前,化学改良剂、地表覆盖、耕作、水利等调控措施已经在河套灌区试验性开展或利用,土壤盐渍化状况有所缓解<sup>[4]</sup>。但这些改良措施大都依托于高频多量的漫灌洗盐,易造成灌区水资源严重浪费、土壤过快反盐以及土壤氮磷大量淋失等问题<sup>[5-7]</sup>,这不但可能降低灌区土地质量,还直接导致地下水水质恶化。同时,灌区引黄配额指令性减少20%左右<sup>[8]</sup>,导致传统水利工程的治盐方法以及漫灌洗盐方式不可持续,部分土地因重度盐碱化而被迫荒弃<sup>[2]</sup>,严重制约着灌区农业经济的可持续性发展。因此,探索怎样缓解河套灌区农业用水紧张、土壤盐渍化以及氮磷淋失严重的局面,寻找适宜河套灌区作物生长良好的土壤盐分及肥料环境成为一项重要的研究课题。

在我国甘肃、宁夏等地区发挥重要作用的垄膜沟灌方式,主要利用旱地垄膜覆盖增温保墒的作用及沟灌相对节水的特点,达到作物高效用水目的<sup>[9-10]</sup>。地膜覆盖能够降低土壤水分的无效蒸发和热量散失,抑制盐分向土表运移,提高作物稳产高产潜力<sup>[11-13]</sup>。与传统地面灌溉方式相比,垄膜沟灌可有效缓解强烈蒸发、漫灌渗漏对作物生长环境的影响,提高灌溉水利用效率与作物产量<sup>[14-15]</sup>,降低垄体表层土壤盐分浓度<sup>[16-17]</sup>和氮磷元素的淋失量<sup>[18-19]</sup>。与微喷灌等技术相比,垄膜沟灌具有应用成本低、易于实施等特点,这为河套灌区上述问题的解决提供了可能性。然而,目前垄膜沟灌技术关注农业中的保水、增温效应较多,对其在盐渍土中的脱盐抑盐效果及肥料运移等方面研究较少。并且,河套灌区与上述地区在气候条件、地下水盐环境及土壤类型等方面均存在明显差异,垄膜沟灌模式下土壤盐分及硝态氮运移规律将会发生如何变化,这在以往研究中相对薄弱,限制了其在河套灌区的推广应用。

因此,为明晰垄膜沟灌种植模式下河套灌区土壤盐分及硝态氮运移规律,本研究通过设置不同灌水及施肥水平组合,分析垄膜沟灌对旱区农田土壤盐分及硝态氮运移特征的影响及调控,旨在寻找一种最优的应对水资源紧缺和土壤盐渍化的灌水施肥方案,以缓

解河套灌区引黄灌溉配额减少与漫灌洗盐方式严重浪费水资源之间的矛盾,为垄膜沟灌技术在河套灌区的推广应用提供一定的理论依据与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古巴彦淖尔市水科所曙光试验站(40°46' N, 107°24' E, 海拔 1 039 m),属于干旱半干旱气候区,全年日照充足,降水量集中,蒸发强烈,空气干燥,昼夜温差较大。试验区多年平均气温 6.9 °C,降水量 142.1 mm,蒸发量 2 306.5 mm。无霜期 160 d,年日照时间 3 189 h。该试验区土壤属于黄河灌淤土,质地主要为沙壤土,耕层平均土壤容重 1.43 g/cm<sup>3</sup>,含有机质 7.26 g/kg,全氮 105.36 mg/kg,速效磷 55.82 mg/kg,速效钾 120.49 mg/kg,土壤盐分 1.19 g/kg。地下水埋深 2.5 m 左右,0—100 cm 土壤田间持水量 26.96%。播前 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层盐分含量分别为 3.94, 4.24, 3.11, 3.05, 2.75 g/kg。地下水矿化度为 1.1 g/L,试验区采用地下水进行灌溉。2017 年生育期内降雨量为 37.3 mm,逐日降雨量、平均气温见图 1。

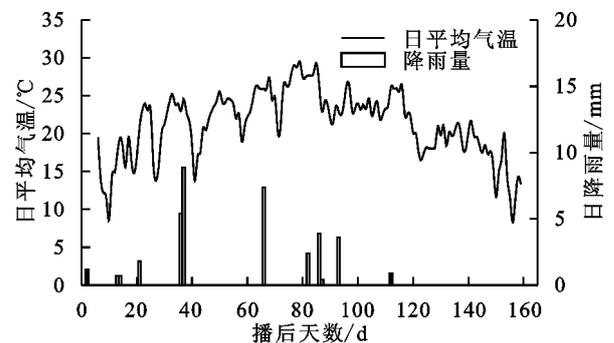


图1 生育期内逐日降雨量、平均气温

### 1.2 试验设计

试验时间为 2017 年 4—9 月,供试作物为春玉米。垄沟规格:垄顶宽 50 cm、垄底宽 70 cm、垄高 20 cm,沟底宽 50 cm,垄长 13 m。设置 3 个灌水水平(400, 300, 200 mm)和 2 个施肥水平(高肥、低肥),高肥为 600 kg/hm<sup>2</sup> 二铵, 300 kg/hm<sup>2</sup> 尿素,低肥为 50%的高肥量。6 个处理分别为高水高肥(I1F1)、高水低肥(I1F2)、中水高肥(I2F1)、中水低肥(I2F2)、低水高肥(I3F1)、低水低肥(I3F2)。每个处理重复 3

次,共 18 个小区,每个小区 3 条垄沟。每列重复间留 2 m 宽小路,方便灌水与操作。

供试春玉米品种为“西蒙 6 号”,覆盖地膜为高压聚乙烯膜,厚度 8 μm。2017 年 4 月 25 日播种,播前起垄、施肥(高肥为 600 kg/hm<sup>2</sup> 二铵,150 kg/hm<sup>2</sup> 尿素,低肥为 50%的高肥量)、覆膜,每垄种植 2 行春玉米,行距 40 cm,株距 30 cm,人工穴播深度 5 cm。灌浆期追肥,高肥追尿素 150 kg/hm<sup>2</sup>,低肥施肥量减半。生育期内灌水 4 次,灌水时间及灌水定额见表 1。

表 1 不同处理灌水时间及灌水定额

处理	灌溉量				灌溉总量
	5月31日	7月02日	7月29日	8月17日	
I1	100	100	100	100	400
I2	80	75	75	70	300
I3	60	50	50	40	200

1.3 测定指标及方法

18 个小区收获时、灌溉前后采集垄沟 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土样,采集的土壤经自然风干、磨碎后过 1 mm 筛备用。将处理后土样制备 1:5 土水浸提液混合后振荡、过滤,用电导率仪(DDS-11A,上海济成分析仪器有限公司)测定提取液电导率(EC)。对风干土样采用 1 mol/L KCl 浸提,AA3 型连续流动分析仪测定土壤硝态氮含量。

在春玉米生育期内,从每个小区选取生长状况良好、具有代表性的 5 株玉米,从茎基部砍断,获得完整的地上部。在 105 °C 恒温条件下杀青 30 min,在 75 °C 恒温条件下烘干至质量恒定后称重,记录玉米的干

物质重量。收获时每个小区随机取 10 个果穗,测定其产量、百粒重、穗粒数、穗长、直径、秃头长、鲜重等。

1.4 土壤水盐含量分析

土壤电导率转化为土壤全盐量,计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$S_t = EC_{1:5} \times 3.7657 - 0.2405 \quad (1)$$

式中: S<sub>t</sub> 为土壤全盐量(g/kg); EC<sub>1:5</sub> 为土壤电导率(dS/m)。

土壤储盐量计算公式为:

$$S_a = \sum(S_{ti} \times D_i \times L_i / 10) \quad (2)$$

式中: S<sub>a</sub> 为土壤储盐量(t/hm<sup>2</sup>); D<sub>i</sub> 为某层次土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); L<sub>i</sub> 为土壤层次深度(cm)。

1.5 统计分析方法

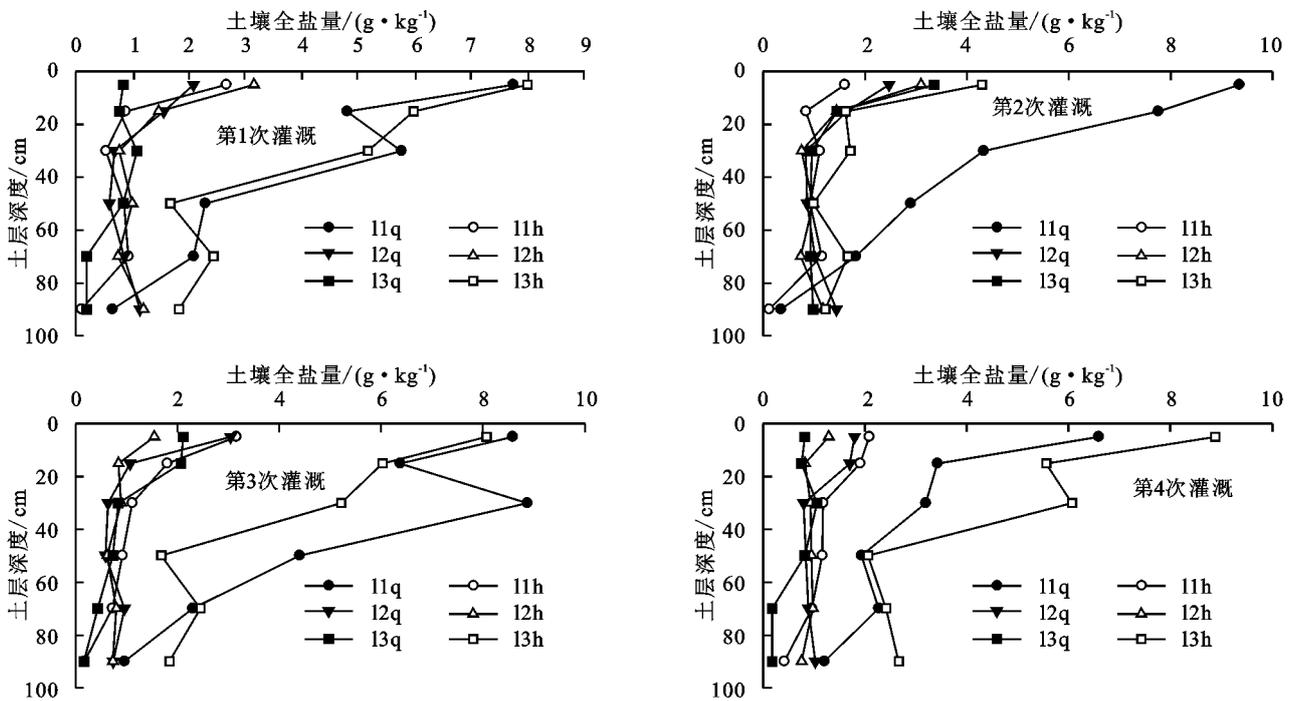
试验数据采用 Excel 2016 软件进行数据整理,采用 Sigmaplot 12.0 软件绘制图形,并用 SPSS 软件对数据进行单因素方差分析,采用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 垄膜沟灌和施肥对土壤盐分运移的影响

2.1.1 不同灌水量对垄体土壤盐分运移特征的影响

由图 2 不同灌水处理 4 次灌溉前后垄上土壤全盐量的变化可知,不同处理土壤全盐量随土层深度的变化规律基本一致。土壤全盐量随着土层深度的增加逐渐减小,0—60 cm 土层土壤全盐量显著高于深层,尤其是 0—40 cm。灌溉前 I1 处理土壤全盐量显著高于其他处理,I2、I3 处理间无显著差异。灌溉后 I3 处理土壤全盐量显著高于其他处理,I1、I2 处理间无显著差异,灌溉对土壤盐分的分布影响很大。

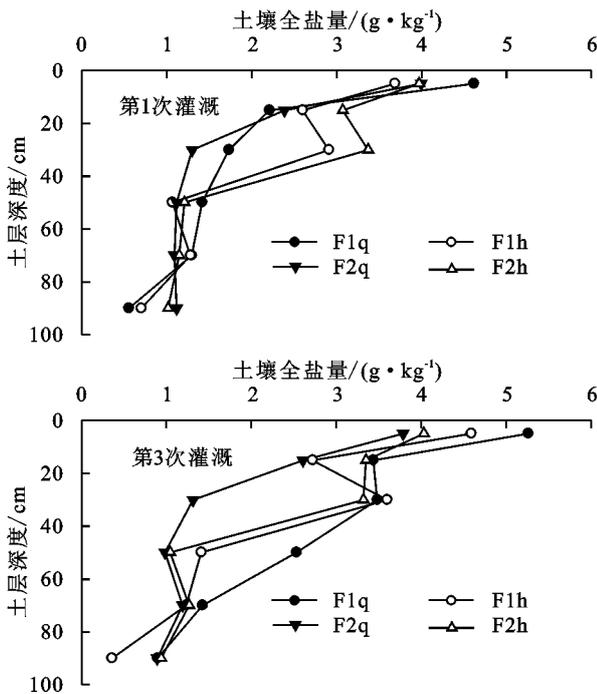


注: I1q、I1h 分别表示高水处理灌溉前后,以此类推。下同。

图 2 不同灌水处理灌溉前后土壤全盐量动态变化

0—20 cm 土层第 1 次灌溉前中、低水处理土壤全盐量相差不大,分别为高水处理的 28.2%,29.0%,第 1 次灌溉后高、中水处理土壤全盐量分别为低水处理的 33.0%,11.5%。第 3 次灌溉前中、低水处理土壤全盐量相差不大,分别为高水处理的 33.1%,27.5%,第 3 次灌溉后高、中水处理土壤全盐量分别为低水处理的 17.0%,29.7%。而第 2 次灌后高、中水处理土壤全盐量分别为低水处理的 76.8%,81.3%,并没有其他几次灌溉后差异大,主要是由于此阶段气温较高蒸发最强烈表层积累较多的盐分,而深层土壤全盐量与其他几次灌溉后规律一致。每次灌溉前后土壤全盐量的变化规律一致,其他土层均呈相同规律,且随着土层深度的增加,各处理间土壤盐分的差异逐渐变小。

2.1.2 不同施肥量对垄体土壤盐分运移特征的影响



响 不同施肥处理 4 次灌溉前后垄上土壤全盐量的变化规律见图 3,土壤全盐量随土层深度的变化规律基本一致,且都随土层深度的增加逐渐减小,与上述不同灌水处理变化规律一致。除第 4 次灌溉低肥处理表层外,每次灌溉后土壤全盐量均小于灌溉前。除第 1 次灌溉前外,每次灌溉前高肥处理土壤全盐量均高于低肥处理,而每次灌溉后低肥处理土壤全盐量均高于高肥处理,尤其是 20—60 cm 土层。第 1 次灌溉前低肥处理土壤全盐量高的原因主要是此时没有灌溉,肥料没有被充分溶解,还可能与取土点肥料不均衡有关。以上分析说明在干旱条件下低肥处理土壤盐分低,而湿润条件下高肥处理盐分低,与土壤中氮含量以及对土壤中水分的利用有关。由于河套灌区干旱少雨,因此低肥处理有利于保持土壤中较低的盐分含量。

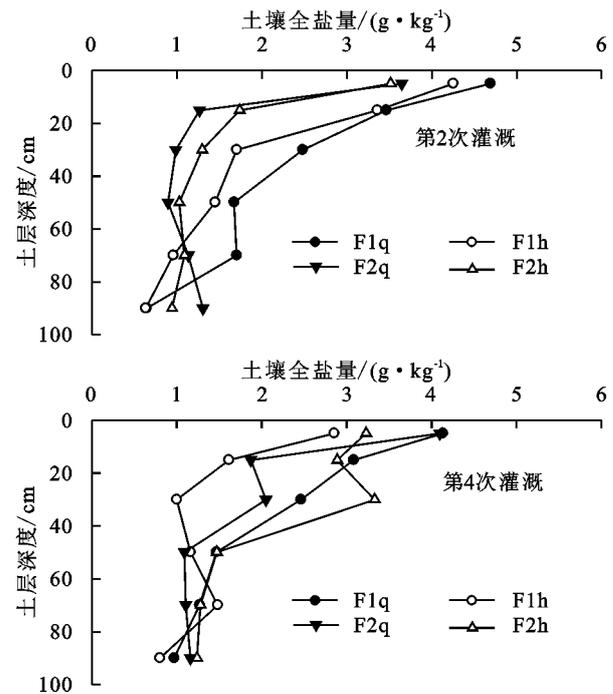


图 3 不同施肥处理灌溉前后土壤全盐量动态变化

2.1.3 不同深度土壤储盐量对垄膜沟灌的响应 图 4 为高、中、低水不同处理 4 次灌溉前后 0—20,20—60,60—100 cm 土层土壤储盐量的变化,由图 4 可知每次灌溉前高水处理土壤储盐量均显著高于其他处理,每次灌溉后低水处理储盐量显著高于其他处理,与上述每次灌溉前后土壤全盐量的分布规律一致。高水、低水处理灌溉前后各土层土壤储盐量差异性显著,而中水处理灌溉前后无显著性差异。中水处理土壤盐分一直保持稳定且较低水平,利于作物的生长发育。每次灌溉前后土壤储盐量的分布特征在一定程度上解释了每次灌溉前后垄上土壤全盐量的变化规律。

整个生育期灌溉结束后,高、中、低水不同处理 1 m 土层土壤储盐量较灌前分别脱盐 40.2,43.6,-7.2 t/hm<sup>2</sup>。1 m 土层总体盐分不平衡,主要是灌溉使盐分

向深层淋洗所致,而 I3 灌水处理积盐的主要原因是灌溉量较少洗盐效果差以及灌溉后严重的反盐。

2.2 垄膜沟灌和施肥对土壤硝态氮运移的影响

2.2.1 不同灌水量对土壤硝态氮运移特征的影响

4 次灌溉前后不同灌水处理土壤硝态氮含量的变化表明(图 5),不同灌水处理土壤硝态氮含量的变化规律大致相同,0—20 cm 土层硝态氮含量远高于其他土层。不同灌水处理间硝态氮含量相差不大,每次灌溉后较灌前均有所减小,除第 1,2 次灌溉后外高水处理土壤硝态氮含量均小于其他处理,尤其是第 4 次灌溉前后,说明高水处理对硝态氮产生了淋溶。

2.2.2 不同施氮量对土壤硝态氮运移特征的影响

不同施肥处理间土壤硝态氮含量的变化具有相同的趋势(图 6),高肥处理硝态氮含量均高于低肥处理,尤其是 0—60 cm 土层,随着灌溉次数的增加,高、低

肥之间的差异逐渐减小。结合每次灌溉前后不同施肥处理土壤全盐量的变化可知,在土壤湿润条件下,土壤中硝态氮含量越高越利于作物的吸收利用,导致土壤全盐量降低,而干旱条件下,作物对水分利用较

多,土壤中硝态氮含量越高土壤全盐量越高。说明土壤水分含量、土壤盐分、土壤硝态氮交互影响,在适宜的土壤水分条件下,土壤盐分低,作物对氮的利用效率高,利于作物的生长发育及最终产量的形成。

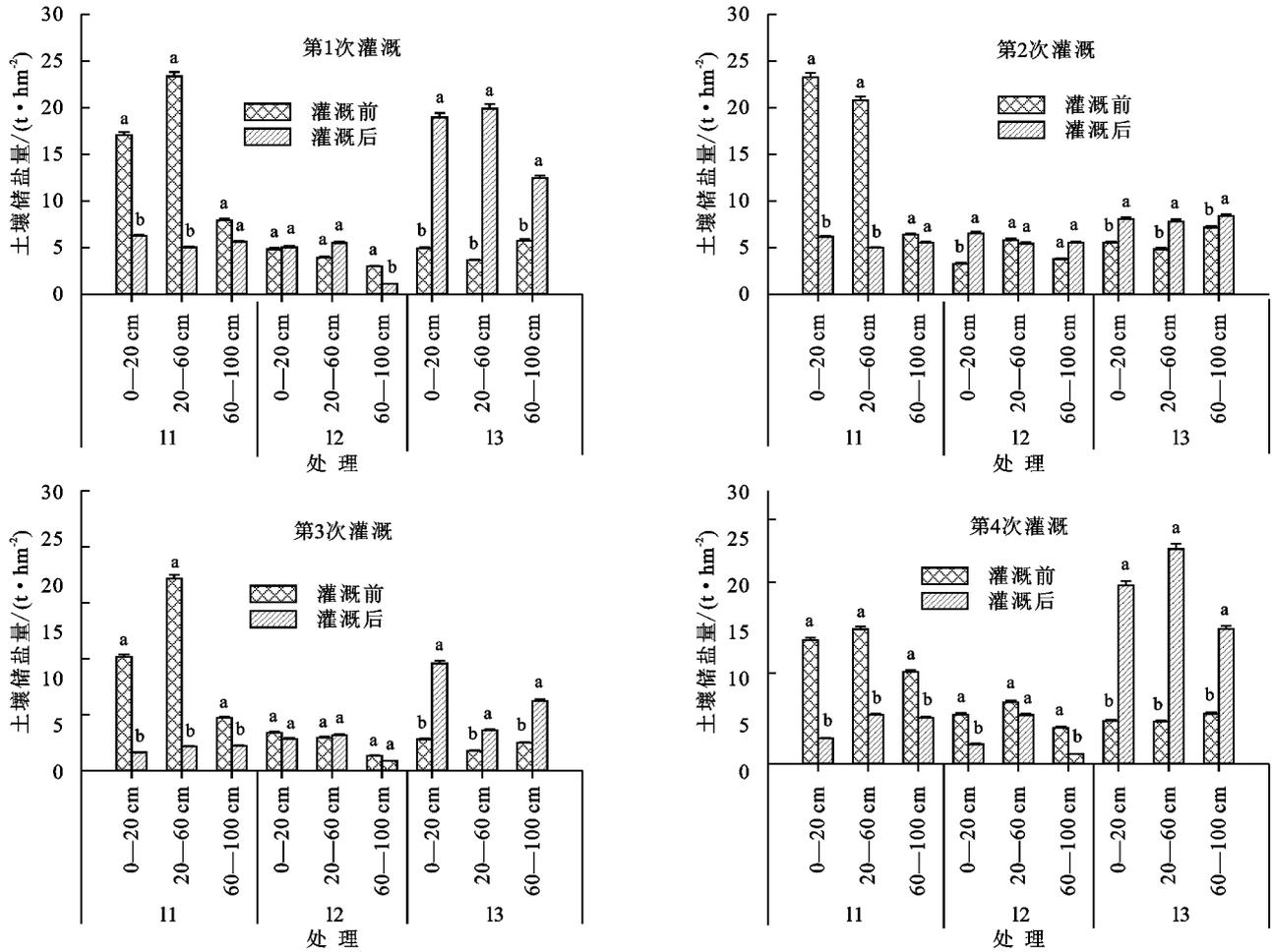


图 4 不同灌水处理灌溉前后土壤储盐量的变化

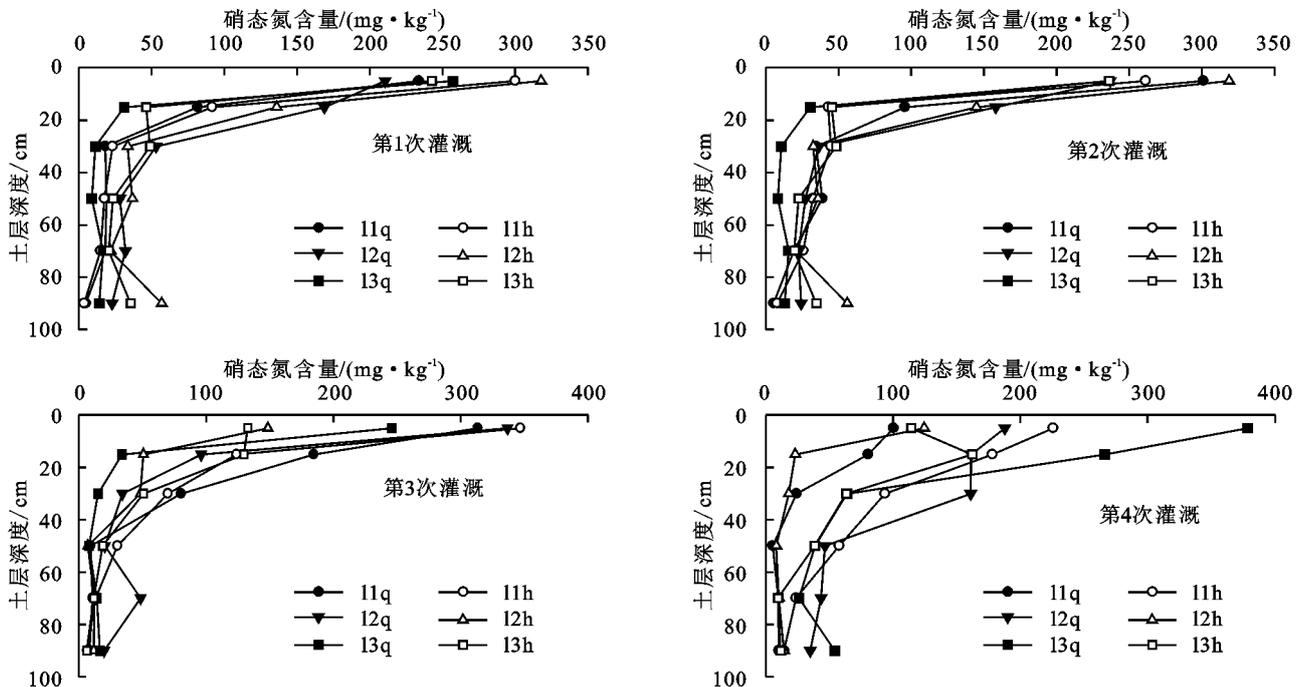


图 5 不同灌水处理灌溉前后土壤硝态氮动态变化

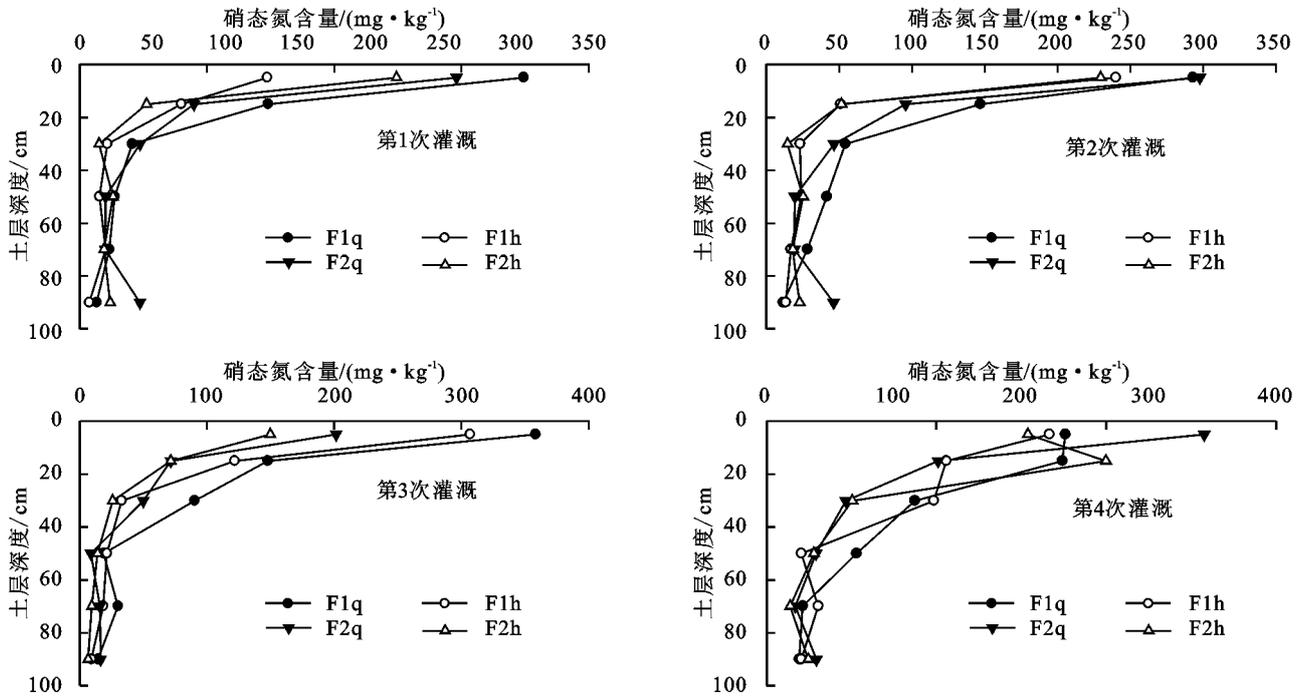


图 6 不同施肥处理灌溉前后土壤硝态氮动态变化

2.2.3 土壤硝态氮浓度对垄膜沟灌的响应 由图 7 可知,不同灌水处理每次灌溉前后 0—20 cm 土层土壤硝态氮含量均存在显著性差异,除第 1,2 次灌溉高水处理 0—20 cm 土层外,每次灌溉后土壤硝态氮含量均显著低于灌溉前,且 0—20 cm 土层土壤硝态氮的含量显著高于其他土层,主要是由于垄上覆膜沟内灌水对垄上 0—20 cm 土层淋洗较少。而第 1,2 次灌溉后高水处理硝态氮含量较高的原因主要是高水处理作物前期生长旺盛需水量大,肥料随着水分运移到表层,且高水处理土壤中溶解了较多的肥料。随着灌溉次数的增加,高水处理土壤硝态氮含量逐渐降低,尤其是第 4 次灌溉前后显著低于中、低水处理,说明高水处理对肥料产生了较大的淋溶量。低水处理土壤硝态氮含量与中水处理相差不大,主要是由于土壤水分含量较低,不利于作物的吸收利用。中水处理土壤硝态氮含量一直处于较高水平,后期显著高于其他处理,利于作物对肥料的吸收利用。

### 2.3 春玉米产量及其构成要素分析

由表 2 可知,不同处理间春玉米穗行数 I2F1 处理最高,各处理间无显著差异。I1 灌水处理行粒数显著高于其他处理,I2F1 处理行粒数显著高于 I2F2、I3F1、I3F2 处理。千粒重 I1 处理最高,I1F1 处理较 I2F1、I3F1 分别高 13.66%,21%,不同灌水处理间差异显著,同一灌水量下不同施肥处理间无显著性差异。I1 处理产量最高,与 I2 处理无显著性差异,均显著高于 I3 处理,I1、I2 灌水处理间不同施肥处理无显著性差异,而 I3F1 处理产量则显著高于 I3F2 处理,其中 I1F2、I2F2 处理较 I3F2 处理分别增产 56.9%,33.8%,各处理间地上部

生物量的变化规律与产量一致。

## 3 讨论

垄膜沟灌可以提高灌溉水利用效率与作物产量<sup>[14-15]</sup>,降低垄体表层土壤盐分浓度<sup>[16-17]</sup>和氮磷元素的淋失量<sup>[18-19]</sup>,但水肥用量的不同会对土壤中水分、盐分和肥料的运移产生不同的效果<sup>[21]</sup>。灌水量过多会使肥料和盐分向土层深处移动,起到淋洗盐分的作用,但也会造成氮磷元素的大量淋失、环境污染、地下水污染等问题且后期反盐严重。灌水量过少不仅不能满足作物的正常需求而且没有起到淋洗盐分的效果,不利于作物的生长发育。而施肥量会通过影响离子的浓度进一步影响作物对水分的吸收。因此,合适的灌水量和施肥量对作物的生长发育至关重要。

表层土壤全盐量显著高于深层,出现盐分表聚的现象是因为淋洗主要发生在沟内,对垄上尤其是表层淋洗效果差<sup>[17-22]</sup>,再加上地表蒸发和作物蒸腾作用使深层次土壤水分向表层移动,盐随水走,在水分运移下盐分向上移动,造成 0—40 cm 土层盐分增大,尤其是 0—20 cm 土层<sup>[23]</sup>。由于高水处理灌水量大,对盐分的淋洗效果显著,每次灌溉后都携带大量盐分向深层运移,因此每次灌溉后高水处理土壤全盐量都显著降低。灌溉时间间隔较长,强烈的蒸发携带盐分向上运移。高水处理存留在土体中的水分多,蒸发作用最为强烈,经过一段时间的强烈蒸发,携带向上运移的盐分最多,到下一次灌溉前高水处理积累了较多的盐分,因此高水处理每次灌溉前土壤全盐量都显著高于其他处理。高水处理由于灌水量较大除了垂直入渗外很大一部分水分侧渗到垄上,淋洗了大量的盐分,

尤其是 0—40 cm 土层,但灌溉后反盐严重。中水处理淋洗作用虽然不显著,但后期经过强烈的蒸发并没有出现剧烈的反盐现象,并且土壤盐分始终保持在一个适宜的水平,有利于作物的生长发育,中水处理垄上盐分维持较低且稳定的主要原因是后期盐分聚集到沟内。低水处理由于灌水量较小,每次灌溉后主要为垂直入渗,不仅没起到淋洗作用还通过沟内侧渗携带了一部分盐分到垄上,导致每次灌溉后垄上土壤全盐量都显著增加,此规律与前人<sup>[17-24]</sup>研究结果类似。而经过一段时间后低水处理土壤全盐量又显著降低,可能是由于土水势的差异,灌溉后沟内水分逐渐移动到垄上,再加上蒸发

带上的水分所致。由于没有实时动态监测灌溉后垄沟内水盐的运移过程,原因有待进一步研究讨论。每次灌溉前高肥处理土壤全盐量高于低肥处理的主要原因是充足的土壤养分促使作物快速增长的同时增加了作物对土壤深层有效水分的过度消耗,再加上后期强烈的蒸发,促使深层土壤中盐分随水分向上迁移,此结论与田德龙<sup>[25]</sup>的研究结果类似。由于河套灌区干旱少雨,因此低肥处理有利于保持土壤中较低的盐分含量。灌后低肥处理 20—60 cm 土壤全盐量高于高肥处理,但无显著性差异,可能与土壤的湿润情况以及作物对水分的消耗有关,原因有待进一步讨论。

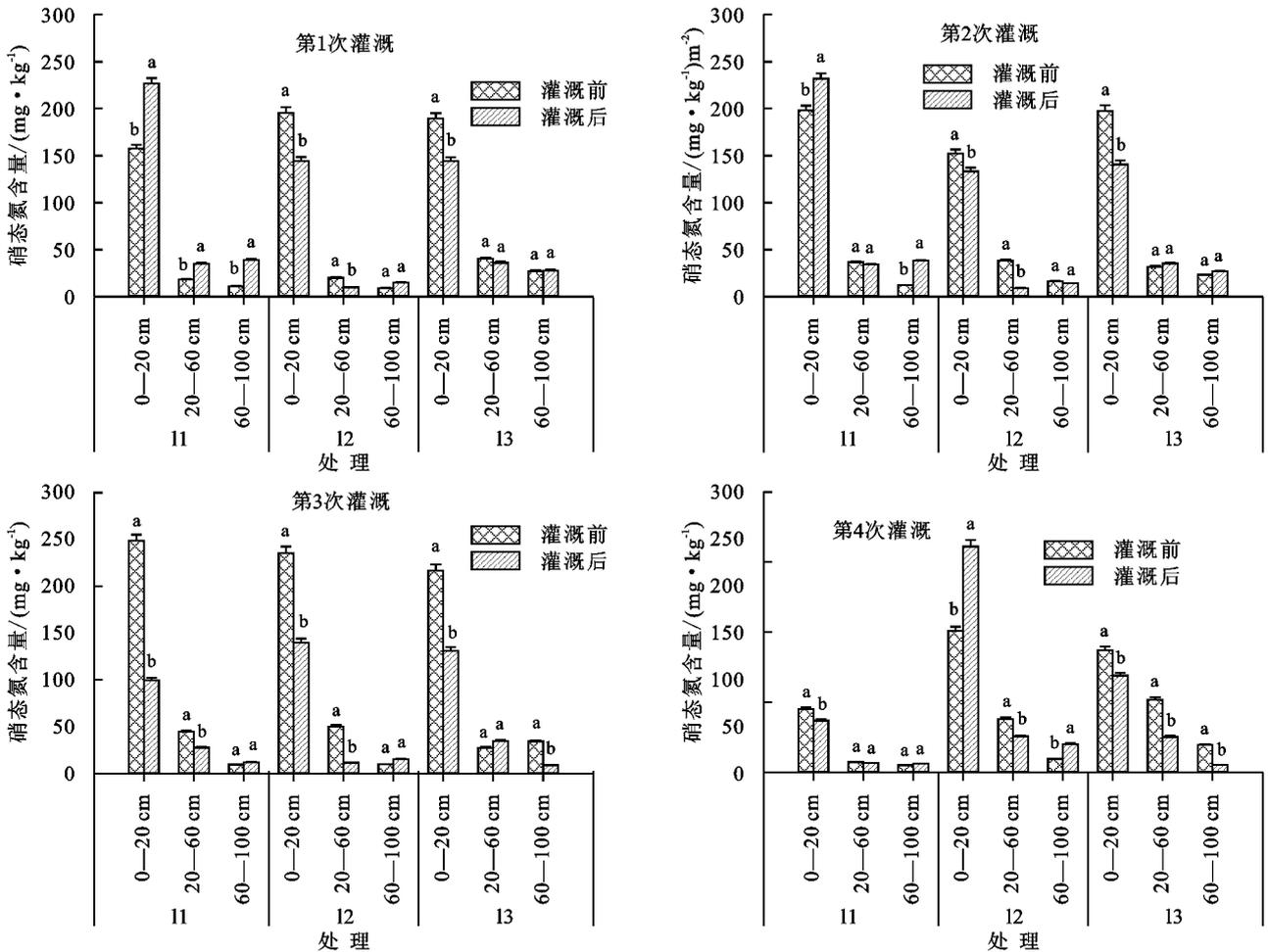


图 7 不同灌水处理灌溉前后土壤硝态氮的变化

表 2 不同处理对春玉米产量性状及地上部生物量的影响

处理	穗行数/ 行	行粒数/ 粒	千粒重/ g	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	生物量/ (g·株 <sup>-1</sup> )
I1F1	17a	44a	374.5a	14678a	360.9a
I1F2	18a	43a	383.1a	14689a	356.0a
I2F1	19a	41b	329.5b	12718a	377.3a
I2F2	17a	39c	333.3b	12526a	378.8a
I3F1	17a	39c	309.5b	10275b	256.1b
I3F2	18a	38c	274.4c	9361c	268.6b

注:同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

灌溉前后中、低水处理土壤硝态氮的含量均高于高水处理,主要是因为高水处理产生了较大的淋溶

量。而第 1,2 次灌溉后高水处理 0—20 cm 土壤硝态氮含量高于其他处理,主要是因为高水处理作物前期生长旺盛需水量大,肥料随着水分运移到表层,且灌水在沟内,所以垄上高水处理硝态氮含量较高,后期随着作物对水分需求量的变化,高水处理的淋溶效果更显著。高肥处理前期 0—20 cm 土层土壤硝态氮含量高于低肥处理,随着灌水次数的增加高低肥之间差异逐渐减小,说明高肥处理随着灌水次数的增加淋洗量也随之增加,肥料利用效率远低于低肥处理。

本文探究了春玉米生育期内 1 m 土层深度土壤盐分及硝态氮的运移规律以及对垄膜沟灌的响应,旨

在寻找一种最利于作物生长发育的灌水施肥方案, 由于监测深度较浅, 对土壤盐分及硝态氮向深层淋洗的情况有待进一步研究。

#### 4 结论

垄膜沟灌种植模式可以降低垄体表层土壤盐分浓度和氮磷元素的淋失量, 增加土壤水分的有效性。灌水量对土壤、盐分含量的影响起主导作用, 每次灌溉前后高、低水处理土壤盐分起伏较大, 中水处理土壤盐分一直处于平稳且较低水平。灌水量和施肥量对土壤硝态氮含量均有不同程度的影响, 中、低水处理后期硝态氮的淋溶显著低于高水处理。综合各处理土壤盐分及硝态氮的变化, 中水低肥处理土壤盐分始终维持在一个适宜且稳定的水平, 对硝态氮的淋溶较小, 有利于作物的生长发育及最终产量的形成。

综上所述, 垄膜沟灌种植模式下中水低肥处理在节水节肥的基础上起到了很好的脱盐效果, 为作物的生长发育提供了一个适宜的环境, 有利于最终产量的形成, 为解决河套灌区引黄灌溉配额减少与漫灌洗盐方式严重浪费水资源之间的矛盾提供了一种可行的方案, 为当地垄膜沟灌技术的推广提供了一定的理论依据与技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 郝远远, 徐旭, 任东阳, 等. 河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 110-116.
- [2] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 26-31.
- [3] Ren D Y, Xu X, Hao Y Y, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River basin; Application to maize, sunflower and watermelon [J]. Journal of Hydrology, 2016, 532: 122-139.
- [4] 赵永敢. “上膜下秸”调控河套灌区盐渍土水盐运移过程与机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [5] 张璇, 郝芳华, 王晓, 等. 河套灌区不同耕作方式下土壤磷素的流失评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 59-65.
- [6] Qadir M, Noble A D, Qureshi A S, et al. Salt-induced land and water degradation in the Aral Sea basin; A challenge to sustainable agriculture in Central Asia [J]. Natural Resources Forum, 2009, 33(2): 134-149.
- [7] Zhao Y G, Pang H C, Wang J, et al. Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield [J]. Field Crops Research, 2014, 161: 16-25.
- [8] 孟春红, 杨金忠. 河套灌区秋浇定额合理优选的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2002(5): 23-25.
- [9] 张立勤, 马志明, 王胜哲. 垄膜沟灌栽培对制种玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2007, 16(4): 83-86.
- [10] 韩顺斌, 索东让, 孙宁科. 垄膜沟灌模式下制种玉米施肥效率研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1188-1194.
- [11] Liu X E, Li X G, Hai L, et al. How efficient is film fully-mulched ridge-furrow cropping to conserve rainfall in soil at a rainfed site? [J]. Field Crops Research, 2014, 169: 107-115.
- [12] Wang H, Wang C B, Zhao X M, et al. Mulching increases water-use efficiency of peach production on the rainfed semiarid Loess Plateau of China [J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 20-28.
- [13] 王有宁, 王荣堂, 董秀荣. 地膜覆盖作物农田光温效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 134-136.
- [14] 李波, 屈忠义, 王昊. 河套灌区覆膜沟灌对加工番茄生长效应与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 43-47.
- [15] 冯浩, 刘匣, 余坤, 等. 不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 192-202.
- [16] Bezborodov G A, Shadmanov D K, Mirhashimov R T, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 138(1): 95-102.
- [17] Chen L J, Feng Q, Li F R, et al. Simulation of soil water and salt transfer under mulched furrow irrigation with saline water [J]. Geoderma, 2015, 241/242: 87-96.
- [18] Robbins C W, Carter D L. Nitrate-nitrogen leached below the root zone during and following alfalfa [J]. Journal of Environmental Quality, 1980, 9(3): 447-450.
- [19] 刘小刚, 张富仓, 田育丰, 等. 水氮处理对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 19-24.
- [20] 童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [21] 马少帅. 不同水肥处理对盐碱地土壤水氮盐分布及玉米生长的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [22] Rajak D, Manjunatha M V, Rajkumar G R, et al. Comparative effects of drip and furrow irrigation on the yield and water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in a saline and waterlogged vertisol [J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(1): 30-36.
- [23] Liu H J, Wang X M, Zhang X, et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao irrigation District of China [J]. Agricultural Water Management, 2017, 179(1): 144-157.
- [24] Chen L J, Qi F. Soil water and salt distribution under furrow irrigation of saline water with plastic mulch on ridge [J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(1): 60-70.
- [25] 田德龙. 河套灌区盐分胁迫下水肥耦合效应响应机理及模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.