doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.061

不同覆膜灌溉方式下春玉米田土壤水盐氮动态变化规律

董勤各[1,2]　刘卿玥[3]　牛雨婷[1,2]　周宇茗[1,2]　周俊伟[1,2]　冯　浩[1,2]

(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土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为阐明不同覆膜与灌溉方式组合对河套灌区春玉米田面临水资源不足、盐分易于表聚且早春温度偏低影响春玉米生长等多因素耦合胁迫问题的调控效果,设置畦灌 + 不覆膜(CK)、覆膜畦灌 + 透明膜(QB)、垄膜沟灌 + 透明膜(GB)和垄膜沟灌 + 黑色膜(GH)4 个田间试验处理,以探究不同覆膜灌溉方式对土壤水盐氮运移、春玉米生长、产量构成及水氮利用效率的影响。结果表明:不同处理下,土壤含水率、硝态氮含量从大到小均依次为 GB、GH、QB、CK,且 CK 处理下表层土壤会发生明显积盐现象,而 GB 处理可以明显降低垄体表层土壤含盐量和氮元素淋失量,抑制盐分往地表运动,增加土壤硝态氮含量,增加土壤水有效性。不同处理下,春玉米株高和干物质量由大到小均依次为 GB、GH、QB、CK,GB、GH、QB 处理叶面积指数显著高于 CK 处理,但 GB、GH、QB 三者间差异不显著,叶面积指数主要取决于是否覆膜处理。GB 处理下春玉米产量较 QB 显著提升 13.64%,较 CK 显著提升 32.04%,虽高于 GH 但差异不显著($P>0.05$);不同处理下,春玉米水氮利用效率由大到小依次为 GH、GB、QB、CK,但 GB 与 GH 处理差异不显著。综上,GB 处理综合效果最优,建议在内蒙古河套灌区推行沟灌 + 透明地膜垄体覆盖技术,以提高春玉米产量和资源利用效率。

关键词: 垄膜沟灌; 春玉米产量; 河套灌区; 水肥盐运移

中图分类号: S513; S365　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)10-0671-13　　**OSID**:

Effects of Different Mulch Irrigation Methods on Soil Water-salt-nitrogen Dynamics in Spring Maize Fields

DONG Qin'ge[1,2]　LIU Qingyue[3]　NIU Yuting[1,2]　ZHOU Yuming[1,2]　ZHOU Junwei[1,2]　FENG Hao[1,2]

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

Abstract: Aiming to elucidate the regulatory effects of different combinations of mulching and irrigation methods on mitigating the multi-factor coupled stresses in spring maize fields of the Hetao Irrigation District, including water scarcity, surface salt accumulation, and low early spring temperatures hindering maize growth, a field experiment was conducted with four treatments: border irrigation without mulching (CK), transparent film mulching with border irrigation (QB), transparent film mulching with furrow irrigation on ridges (GB), and black film mulching with furrow irrigation on ridges (GH), to investigate their impacts on soil water-salt-nitrogen transport, spring maize growth, yield components, and water-nitrogen use efficiency. The results demonstrated that soil water content and nitrate nitrogen content were decreased in the order of GB, GH, QB, CK; significant salt accumulation was occurred in the surface soil under CK, whereas GB effectively reduced surface soil salinity and nitrogen leaching on the ridges, inhibited upward salt movement, increased soil nitrate nitrogen content, and enhanced soil water availability. Plant height and dry matter accumulation ranked from the highest to the lowest was as follows: GB, GH, QB and CK; the leaf area index (LAI) was significantly higher under GB, GH, and QB compared with that under CK, but it showed no significant differences among these three mulched

收稿日期: 2024-07-16　修回日期: 2024-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1900300)和大学生创新创业训练计划项目(X202410712036)

作者简介: 董勤各(1982—),男,副研究员,博士,主要从事土壤水盐调控与模拟研究,E-mail: qgdong2011@163.com

treatments, indicating LAI was primarily determined by mulching presence. Regarding yield, GB resulted in a significant increase of 13.64% over QB and 32.04% over CK, and although higher than GH, the difference was not statistically significant ($P > 0.05$). Water use efficiency (WUE) and nitrogen use efficiency (NUE) were the highest under GH, followed by GB, QB, and then CK, but differences between GB and GH were not significant. In conclusion, the GB treatment demonstrated the most favorable overall performance; therefore, adopting the ridge-furrow system with transparent plastic film mulching in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia was recommended to enhance spring maize yield and resource use efficiency.

Key words: ridge film furrow irrigation; spring maize yield; Hetao Irrigation District; water-fertilizer-salt transport

0 引言

内蒙古河套灌区是我国设计灌溉面积最大的一首制自流灌区,是我国重要的商品粮基地,同时也是内蒙古自治区重要的粮食生产基地[1]。然而河套灌区地处干旱半干旱气候的季节性多年冻土带,年降水量少,蒸发量增加,加之灌溉引水量过大,造成深渗漏和地下水升高[2],属于盐渍化区域[3],昼夜温差大,春季温度偏低影响春玉米生长。灌区内农田灌溉方式长期以地面灌为主,水分利用效率低下,地下水位埋深较浅,土壤次生盐渍化日益严重,势必需要更多的灌溉水进行盐分淋洗。当地种植户主要通过引黄河水以畦灌或漫灌方式满足作物生长及淋洗盐分需求,该灌溉方式尽管能有效减轻土壤盐碱化问题,但灌水量较大,农田水分利用效率较低,水资源浪费严重[4]。且近年来,引黄灌溉量指令性降低,致使该区水资源短缺问题日益凸显。地表水资源紧缺和土壤盐渍化严重限制河套灌区农业生产的可持续发展[1],极易造成作物减产,在这种情况下,节水控盐已成为该地区农业可持续发展的重点[5-6]。同时,春玉米早期易遭遇低温冻害,导致籽粒产量降低。

改良河套灌区盐渍化土壤,有助于营造适宜作物生长的水肥盐环境,节水地面灌溉技术在河套灌区的适用性较为明显[7]。张婷等[8]发现河套灌区垄沟灌溉种植促进玉米生育进程,具有节水增产效应。王自奎等[9]发现垄沟灌溉由于其特殊的结构能有效减少水氮流失,从而提高水分和养分利用效率,达到资源的高效利用。同时,为解决河套灌区干旱、寒冷及土壤盐碱等自然条件约束,当地大面积应用地膜覆盖农艺措施,已有学者对地膜在实际生产中的应用等方面进行了研究[10]。WANG 等[11]研究表明塑料覆盖物能增加玉米根系生物量,特别是透明塑料薄膜覆盖物显著提高了春玉米吐丝期和灌浆期土壤的水分储量[12]。LAI 等[13]发现薄膜覆盖减少了土壤硝态氮残留物,且垄沟种植黑膜覆盖显著提高了氮素利用效率。而玉米为典型的喜温性作物[14],垄作覆膜可以抑蒸保墒,改善作物水分状况[15],增温效应可改善籽粒灌浆过程,也是促进玉米高产的基础条件之一[16]。SUI 等[17]提出薄膜覆盖可促进作物初期发育,延长了从抽穗期到生理成熟期的持续时间,从而提高作物产量。王青松等[18]提出透明地膜覆盖条件下产量和水分利用效率最高,相比于黑色地膜和不覆膜处理分别增加 11.36%、21.83% 和 8.89%、30.79%。垄膜沟灌不仅降低土壤水分消耗,还有效促进土壤水分入渗[19-20],并更好地改善土壤微生态系统[21]。在作物生长季节,较为活跃的土面蒸发、植株蒸腾和根系吸水作用会导致土壤含盐量变幅较大[22],盐分胁迫较高会严重抑制作物对土壤水分的吸收利用[23]。李成等[24]研究表明,垄膜沟灌种植模式可降低垄体表层土壤含盐量和氮磷元素淋失量,增加土壤水分有效性。QUAN 等[25]研究后提出河套灌区畦灌覆透明膜和黑色膜可以显著提升玉米水分利用效率,且透明膜水分利用效率较黑色膜平均提高 7.0%。

目前鲜见河套灌区不同覆膜灌溉方式下有关土壤水盐氮变化特征及春玉米产量差异的定量研究,不同处理对土壤水盐氮运移影响的机制尚不明确,同时植株生长的响应机理也需进一步探索。基于此问题,本研究选取河套灌区春玉米田为研究对象,定量分析不同覆膜灌溉方式下土壤水盐氮运移动态情况、春玉米生理指标、产量构成和水氮利用效率的变化规律,探究适宜河套灌区的覆膜灌溉管理模式,为改善作物所需的土壤环境、保障河套灌区粮食安全和农业可持续发展提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市水利科学研究所曙光试验站(40°46″N, 107°24″E, 海拔 1 039 m),属干旱半干旱气候区,全年日照充足,年日照时数 3 200 h 左右,降水集中,平均降水量约 142.1 mm,蒸发强烈,

蒸发量超过 2 000 mm，空气干燥，日温差较大，多年平均气温 6.9℃，农作物一年一熟。该试验区土壤质地主要为沙壤土，耕层平均土壤容重 1.43 g/cm^3，有机质含量 7.26 g/kg，全氮含量 105.36 mg/kg，速效磷含量 55.82 mg/kg，速效钾含量 120.49 mg/kg，土壤含盐量 1.19 g/kg。地下水埋深 2 m 左右，0 ~ 100 cm 土壤田间持水率 26.96%。播前 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 土层含盐量分别为 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。

2021 年玉米全生育期内降水量为 78.8 mm（图 1a），降水量最大值出现在播后第 44 天，降水量为 20.4 mm。降水主要集中在播后 44 ~ 95 d，占整个生育期降水量的 56.09%。2021 年玉米生长期平均气温为 20.5℃，最低气温出现在播后 4 d，为 11.9℃，最高气温出现在播后 74 d，为 28.5℃。随着生育期推进，平均气温先上升后下降。2022 年玉米全生育期内降水量为 102.1 mm（图 1b），降水量最大值出现在播后第 100 天，降水量为 18.8 mm。降水主要集中在播后 41 ~ 100 d，占整个生育期降水量的 80.71%。2022 年玉米生长期平均气温为 20.9℃，最低气温出现在播后 136 d，为 8.1℃，最高气温出现在播后 38 d，为 27.5℃。随着生育期推进，平均气温先上升后下降。

1.2　试验设计

田间试验设 4 个覆膜灌溉方式：畦灌 + 不覆膜（CK）、覆膜畦灌 + 透明膜（QB）、垄膜沟灌 + 透明膜（GB）和垄膜沟灌 + 黑色膜（GH）。每个处理重复 3 次，共 12 个小区，采用随机区组设计布置。根据播前土壤测样结果，试验地钾含量较高，因此主要施用氮肥和磷肥。氮肥选择尿素，施氮量为 300 kg/hm^2，磷肥选择（NH_4）$_2HPO_4$，施磷量为 150 kg/hm^2。每个处理施磷量按照计划量于播种前全部施入；每个处理施氮量按照 50% 的计划量于播种前沟施覆土，其余 50% 氮肥在玉米抽雄期随灌水施入。春玉米生育期内灌溉定额为 360 mm，根据灌区来水分 4 次于 6 月 1 日、7 月 1 日、7 月 31 日和 8 月 15 日进行灌溉，灌水定额 90 mm。试验处理如表 1 所示，供试春玉米品种为当地常用品种金苹 628。

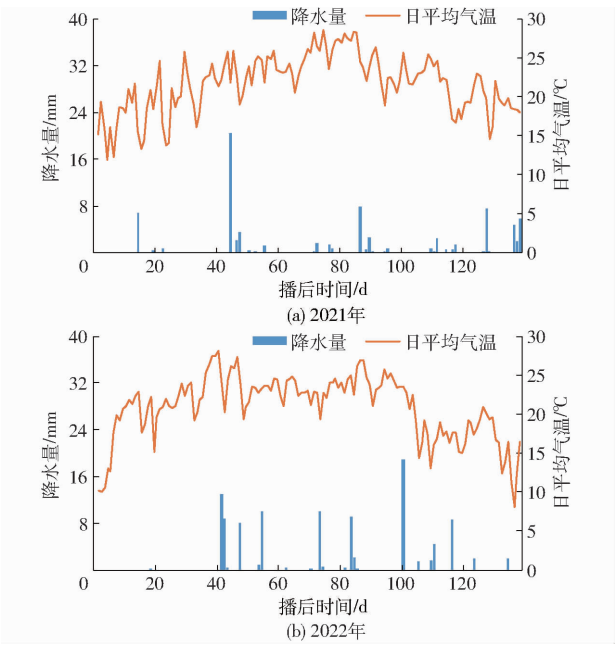


图 1　玉米生育期日平均气温与降水量

Fig. 1　Average daily temperature and rainfall of maize growth period

表 1　试验处理

Tab. 1　Experimental treatment

处理	灌溉方式	覆膜方式	灌水量/mm	施氮量/（kg·hm^{-2}）	施磷量/（kg·hm^{-2}）
CK	平作畦灌	无覆膜	360	300	150
QB	平作畦灌	白色膜	360	300	150
GB	起垄沟灌	白色膜	360	300	150
GH	起垄沟灌	黑色膜	360	300	150

垄膜沟灌规格（图 2）如下：垄沟间距 120 cm，垄高 20 cm，垄背宽 50 cm，垄底宽 70 cm，每垄栽双行作物，行距 40 cm，株距 30 cm。地膜宽 110 cm，覆垄压实。畦灌与垄膜沟灌小区规格保持一致，地膜宽度 70 cm，春玉米种植采用常规宽窄行方式：宽行 80 cm，窄行 40 cm，株距 30 cm。覆膜后点播，播种深度 5 cm，播种密度 5.5 × 10^4 株/hm^2。试验小区尺寸均为 5 m × 6 m = 30 m^2，每个小区外侧均设宽 0.6 m 的缓冲带，整个试验区外围保护带宽度为 2.0 m[26]。

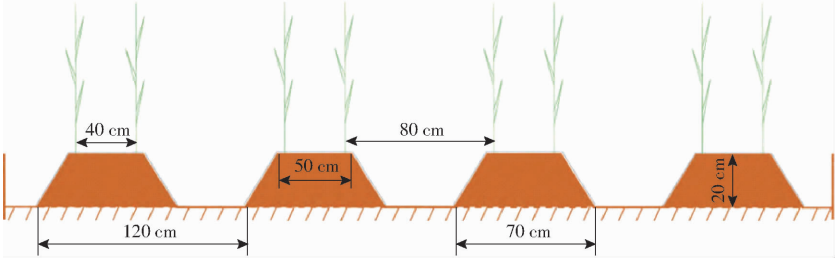


图 2　春玉米垄沟覆膜种植间距示意图

Fig. 2　Schematic of spring maize furrow mulching planting

1.3 观测指标及测定方法

1.3.1 土壤含水率

在玉米播后 30、61、78、107、133 d 用土钻取垄沟 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm、100 ~ 120 cm 土样,取畦田膜上与膜间 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm、100 ~ 120 cm 土样。采用干燥法在干燥箱 105℃干燥至恒定质量后测量土壤质量含水率,并换算为体积含水率。土壤储水量计算公式为

$$H = 0.1 \sum_{i=1}^{n_1} Q_i \gamma_i h_i \tag{1}$$

式中 H——土壤储水量,mm

Q_i——第 i 层土壤质量含水率,%

γ_i——第 i 层土壤容重,g/cm^3

h_i——第 i 层土壤厚度,cm

n_1——测土壤质量含水率时的层数

采用水量平衡法计算玉米耗水量(Evapotranspiration, ET,mm),计算式为

$$ET = \Delta W + P_1 + I + G - R - F \tag{2}$$

式中 ΔW——播前和收获后土壤储水量之差,mm

P_1——生育期有效降水量,mm

I——生育期总灌水量,mm

G——生育期地下水补给量,mm

R——生育期地表径流量,mm,试验区地势平坦,无地表径流产生

F——生育期深层渗漏量,mm

渗漏量和地下水补给量总和记为 Q,Q 计算公式为[27]

$$Q = -K(\theta)\left(\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}z} + 1\right) = -K(\theta)\left(\frac{\phi_{110} - \phi_{90}}{z_{110} - z_{90}} + 1\right) \tag{3}$$

其中

$$K(\theta) = K_s \theta_e^l \left[1 - \left(1 - \theta_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \tag{4}$$

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \tag{5}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (n > 1) \tag{6}$$

式中 $K(\theta)$——非饱和土壤导水率,cm/d

ϕ_{110}、ϕ_{90}——110 cm 和 90 cm 的土壤基质势,kPa

θ——土壤含水率,cm^3/cm^3

θ_e——实测土壤相对饱和度

θ_r、θ_s——残余土壤含水率、饱和土壤含水率,cm^3/cm^3

z_{110}、z_{90}——110 cm 和 90 cm 的土壤含水率,cm^3/cm^3

K_s——土壤饱和导水率,cm/d

h——土壤水势,cm

n、m、α——经验参数

l——孔隙关联度参数

1.3.2 土壤含盐量

在玉米关键生育期采集土样,采集土样自然风干、磨碎后过 2 mm 筛备用,将处理后土样制备质量比1∶5土水浸提液混合后震荡、过滤,用电导率仪(DDS-11A 型,上海济成分析仪器有限公司)测定浸提液电导率(Electrical conductivity,EC)。

土壤电导率(dS/m)转换为土壤全盐量 S_t(g/kg)计算公式为

$$S_t = 3.7657 EC_{1:5} - 0.2405 \tag{7}$$

土壤储盐量 S_a(t/hm^2)计算公式为

$$S_a = \sum (S_{ti} \gamma_i h_i / 10) \tag{8}$$

1.3.3 土壤、植株氮含量

在取土测含水率的同时收集土样用于土壤养分含量测定。采集土样经自然风干、磨碎后过 1 mm 筛备用,测量时称取 5 g 土样,用 50 mL 氯化钾溶液(2 mol/L)浸提,震荡 1 h 后过滤,使用 AA3 型流动分析仪测定土壤硝态氮贮量。植株全氮含量用凯氏定氮法测定。硝态氮贮量 N(kg/hm^2)计算式为

$$N = \sum (N_0 \gamma_i h_i / 10) \tag{9}$$

式中 N_0——硝态氮含量,mg/kg

1.3.4 作物生长指标与产量

株高:采用钢尺测量,在各生育期内随机选择 5 株玉米进行标定,测定不同生育阶段玉米株高动态。

叶面积:随机选取能代表整体长势的 5 株玉米进行标定,测定不同生育阶段每片玉米叶的长和最大宽度,通过 $0.75 l_1 B$(l_1 为叶长,B 为叶宽)表示叶面积。

干物质量:在玉米各生育期内,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,分别记录茎干、叶片和果穗鲜质量,然后在 105℃杀青 30 min,在 75℃恒温条件下干燥至质量恒定后称量,记录玉米干物质量。

产量:玉米成熟后,在每个小区随机取 10 株测定穗粒数、百粒质量、穗行数、穗长、穗粗等性状,人工脱粒和干燥后测干质量,计算产量。

1.3.5 水氮利用效率

水分利用效率(WUE)计算公式为

$$WUE = Y / ET \tag{10}$$

式中 Y——单位面积产量,kg/hm^2

氮素利用效率和收获指数计算公式为

$$NUE = GY / TN_{uptake} \tag{11}$$

$$NHI = GN_{uptake}/TN_{uptake} \times 100\% \quad (12)$$

其中

$$TN_{uptake} = GN_{uptake} + SN_{uptake} \quad (13)$$

$$GN_{uptake} = G_{DM}G_{NC} \quad (14)$$

$$SN_{uptake} = S_{DM}S_{NC} \quad (15)$$

式中　NUE——氮素利用效率，kg/kg

GY——单位面积籽粒产量，kg/hm^2

TN_{uptake}——玉米吸氮总量，kg/hm^2

NHI——氮转移效率（氮素收获指数），%

GN_{uptake}——籽粒吸氮量，kg/hm^2

SN_{uptake}——秸秆吸氮量，kg/hm^2

G_{DM}——籽粒干燥质量，kg/hm^2

G_{NC}——籽粒氮含量，g/kg

S_{DM}——秸秆干燥质量，kg/hm^2

S_{NC}——秸秆氮含量，g/kg

1.4　数据处理与统计分析方法

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件进行处理和分析，采用最小显著差异法（LSD 法）进行差异显著性检验（$\alpha = 0.05$），同时采用 Microsoft Excel 2019 软件作图。

2　结果与分析

2.1　不同覆膜灌溉方式下土壤水盐氮运移特征

2.1.1　不同覆膜灌溉方式对土壤水分运移的影响

两年土壤体积含水率对覆膜灌溉方式的响应特征如图 3、4 所示。不同覆膜灌溉方式下土壤含水率均随土层深度增加而增大，120 cm 土层处达到最大值。玉米播后 30 d，2021 年 GH、GB、QB 处理 0 ~ 20 cm 土壤体积含水率分别为 0.207 1、0.194 3、0.193 6 cm^3/cm^3，显著高于 CK 处理的 0.159 4 cm^3/cm^3（$P < 0.05$）；GH、GB、QB 分别较 CK 显著提升 29.92%、21.89%、21.46%，但 3 个不同覆膜处理间无显著差异。2022 年 GH、GB、QB 处理 0 ~ 20 cm 土壤体积含水率分别为 0.178 0、0.176 2、0.161 9 cm^3/cm^3，显著高于 CK 处理的 0.102 8 cm^3/cm^3；GH、GB、QB 分别较 CK 显著提升 73.12%、71.33%、57.46%，GH、GB、QB 间差异不显著，与 2021 年规律相同。40 cm 以下深度各处理间土壤含水率差异减小。玉米播后 61 d，0 ~ 60 cm 土层，CK 土壤含水率最低，GB 大于 GH 大于 QB，但 60 ~ 80 cm 土层，CK 处理下土壤含水率相比上层土层含水率急剧上升，高于其他 3 种处理。玉米播后 78 d，覆膜处理下 0 ~ 60 cm 土层土壤含水率显著高于 CK，GH 和 GB 间无显著差异，80 ~ 120 cm 土层 4 个处理间土壤含水率无显著差异。玉米播后 107 d，不同处理下的 60 ~ 100 cm 土层土壤含水率差别最大。玉米播后 133 d，4 个处理表层土壤含水率无显著性差异，40 ~ 80 cm 土层 GH 处理土壤含水率显著高于 QB 和 CK，略高于 GB。

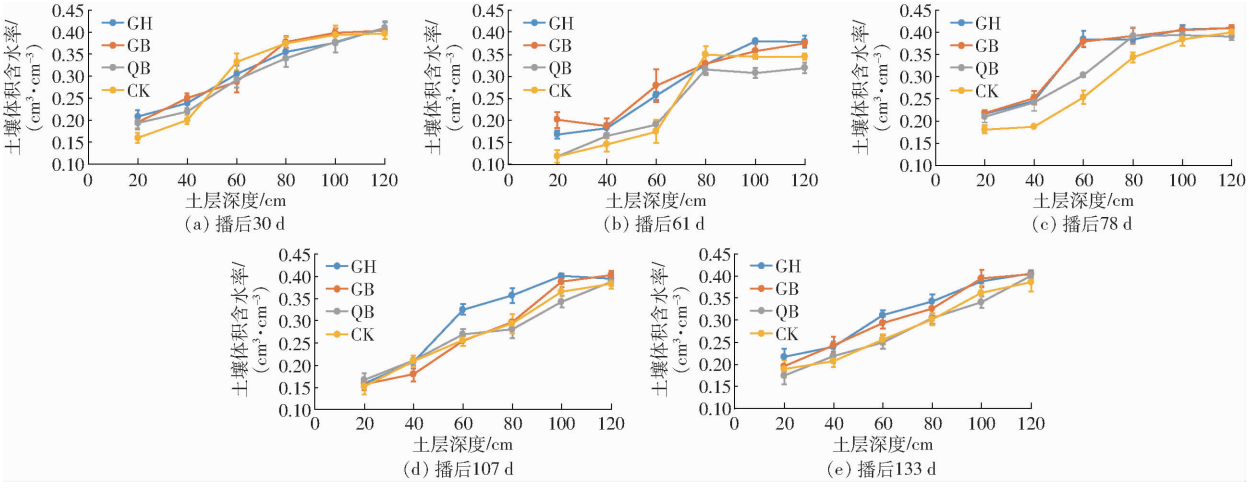


图 3　2021 年玉米不同生长阶段土壤体积含水率变化曲线

Fig. 3　Soil volume moisture content at different growth stages of maize in 2021

春玉米不同生育阶段 0 ~ 60 cm 土层储水量变化如图 5 所示。受春玉米生长以及灌溉降水的影响，各处理之间土壤根系层储水量从玉米苗期至成熟均呈下降、上升、下降、上升的“W”形变化趋势。玉米播后 30 d，土壤储水量由大到小依次为 GH、GB、QB、CK，GH、GB、QB 间无显著差异。播后 61 d，土壤储水量由大到小依次为 GB、GH、QB、CK，垄膜沟灌下土壤储水量显著高于畦灌处理，2021 年 GB 较 QB、CK 提高 38.83、45.71 mm，GH 较 QB、CK 提高 26.73、33.62 mm；2022 年 GB 较 QB、CK 提高 20.44、38.96 mm，GH 较 QB、CK 提高 14.26、32.78 mm。两年起垄覆透明膜处理下的土壤储水量显著高于起垄覆黑色膜处理，分别增加 10.01% 和 5.42%，透明膜处理高于无膜。播后 78 d，GB 处理

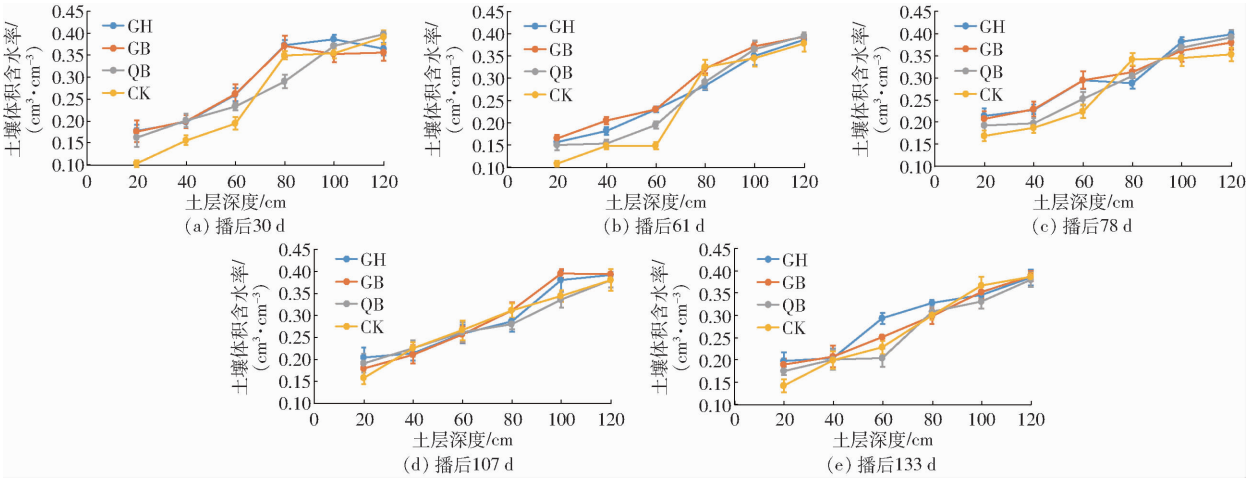


图 4 2022 年玉米不同生长阶段土壤体积含水率变化曲线

Fig. 4 Soil volume moisture content at different growth stages of maize in 2022

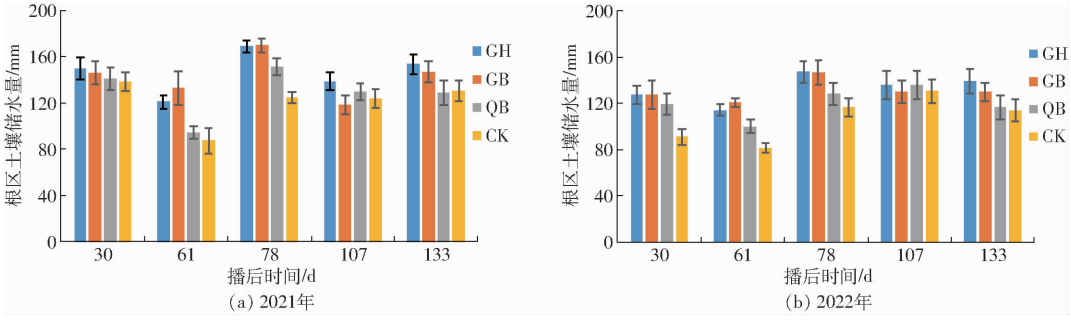


图 5 玉米根区土壤储水量

Fig. 5 Soil water storage in root zone of maize

和 GH 处理无显著差异,2021 年 GB、GH、QB 处理土壤储水量分别较 CK 增加 45.50、44.75、26.56 mm;2022 年 GB、GH、QB 处理土壤储水量分别较 CK 增加 30.38、30.96、12.02 mm。垄膜沟灌显著高于覆膜畦灌,2021 年和 2022 年 GB 较 QB 增加 12.56% 和 14.32%。玉米播种后 107 d,各处理土壤储水量由小到大依次为 GH、QB、CK、GB,但差异不显著。玉米播后 133 d,GH 处理土壤储水量高于 GB 处理,GB 处理高于 QB 处理,其中 2021 年 GH 高于 GB 4.41%、GB 高于 QB 13.98%,2022 年 GH 高于 GB 7.29%、GB 高于 QB 11.60%,QB 和 CK 差异不显著。

2.1.2 不同覆膜灌溉方式对土壤盐分运移的影响

不同覆膜灌溉方式对土壤电导率的影响如图 6、7 所示。土壤电导率随着土层深度增加逐渐减小,0 ~ 60 cm 土层土壤电导率显著高于深层,尤其是 0 ~ 40 cm。不同处理土壤电导率差异也在土层浅层最大,可见,覆膜灌溉方式主要影响浅层电导率分布。玉米播后 30 d,2021 年各处理下 0 ~ 20 cm 土壤电导率由大到小依次为 GH、QB、CK、GB, 40 cm 以下深度各处理间土壤电导率差异减小,直至深度 100 ~ 120 cm 处 GB 电导率最大。2022 年与 2021 年变化规律无显著差异。玉米播后 61 d,0 ~ 20 cm 土层,QB 土壤电导率最低,GH、GB、CK 差距不大,QB 处理土壤电导率仅为三者的 42.39% ~ 47.57%。更大深度土层土壤电导率差异逐渐减小,GB 处理在土层深度 80 cm 以下土壤电导率增加,120 cm 土层电导率达 4.9 dS/m。2022 年与 2021 年变化规律无明显差异。玉米播后 78、107、133 d 变化规律一致,两年 0 ~ 20 cm 土层 CK 处理下电导率均显著高于其他 3 种处理,但其随着土层加深持续降低,变化也最大,GH、GB、QB 处理虽随土层深度增加电导率有变化,但变化不大,可见覆膜处理可有助于抑制盐分随水分蒸发往地表运动。除 2021 年玉米播后 133 d,CK 处理土层深度 120 cm 处土壤电导率略高于 GB 以外,土层深度 120 cm 处 GB 处理土壤电导率均高于其他 3 种处理,此时 GH、QB、CK 处理土壤电导率相差不大,可见 GB 处理可以更好地降低垄体表层土壤含盐量。

春玉米不同生育阶段 120 cm 土层土壤储盐量变化如图 8 所示。播后 30 d 时,土壤储盐量由大到小依次为 GB、GH、CK、QB,但随着播后时间增加,CK 处理土壤储盐量有明显提升,而其他处理土壤储盐量随时间的变化不显著,最终播后 133 d 时,CK

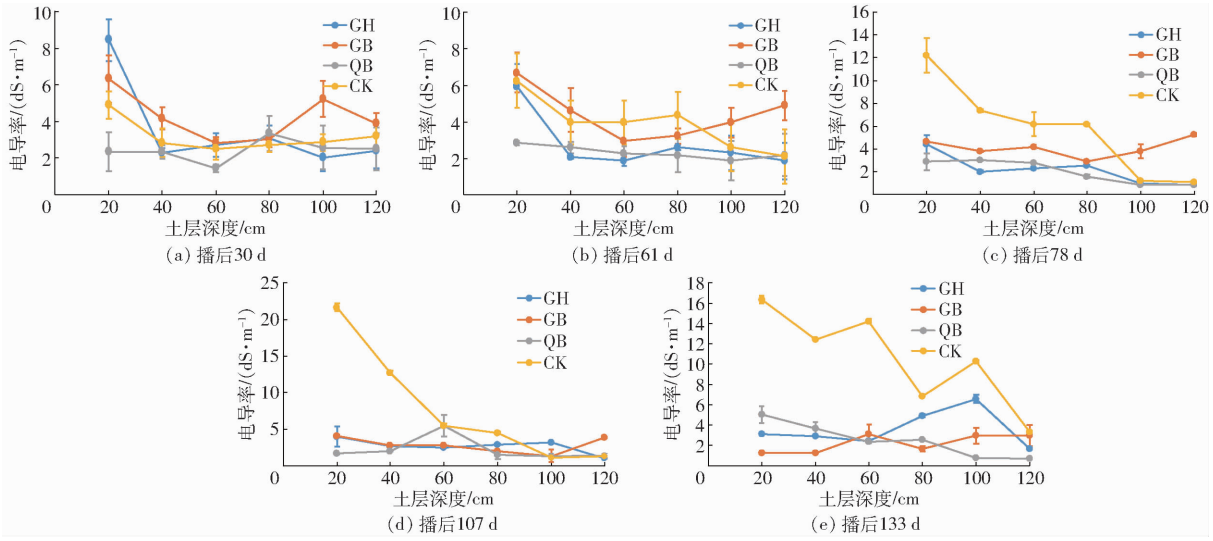


图 6　2021 年玉米不同生长阶段土壤电导率变化曲线

Fig. 6　Soil conductivity at different growth stages of maize in 2021

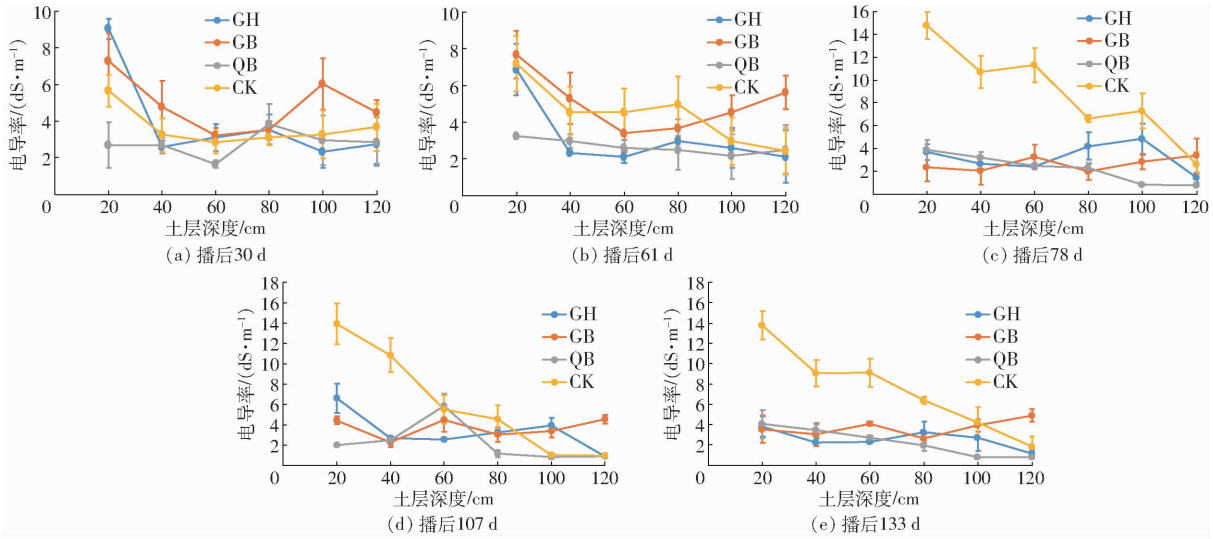


图 7　2022 年玉米不同生长阶段土壤电导率变化曲线

Fig. 7　Soil conductivity at different growth stages of maize in 2022

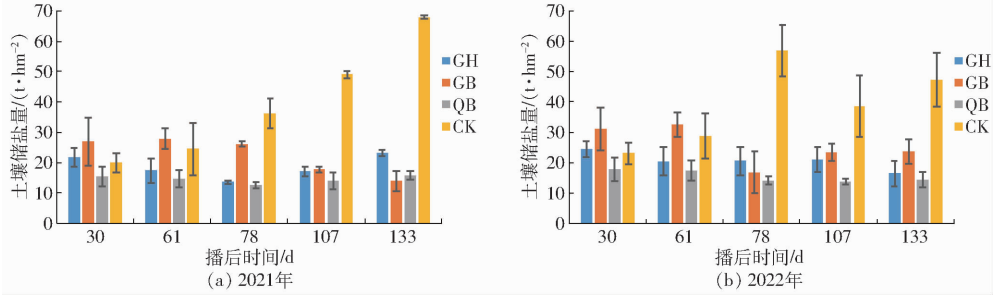


图 8　不同处理下土壤储盐量

Fig. 8　Soil salt storage under different treatments

处理土壤储盐量远大于 GB、GH、QB 处理，表层土壤会发生明显积盐现象。GB、GH、QB 处理土壤储盐量无较大差异。

2.1.3　不同覆膜灌溉方式对土壤硝态氮运移的影响

不同覆膜灌溉方式下不同土层土壤硝态氮含量随时间变化曲线如图 9、10 所示，玉米生育期内，0 ~ 20 cm 平均土壤硝态氮含量大于 20 ~ 60 cm，且含量变化波动也更明显，可能是因为肥料随着水分运移到土壤表层。整个生育期 0 ~ 20 cm 处 CK 处理土壤硝态氮含量最低，QB 次之，GH 处理和 GB 处理无显著差异。2021 年整个生育期不同处理平均硝态氮含量 GB 较 QB 提升 32.11%，QB 较 CK 提升

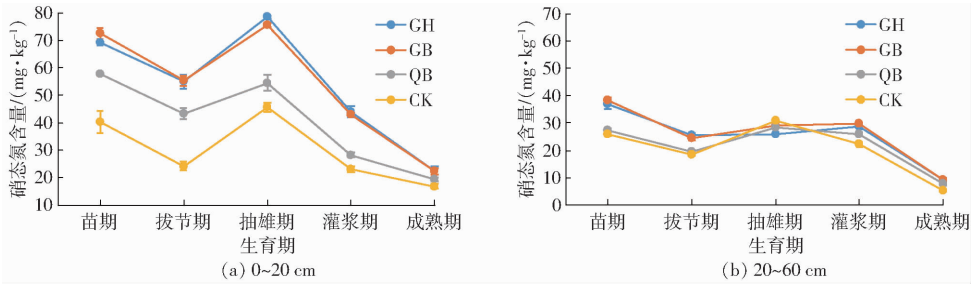


图 9 2021 年玉米不同土层土壤硝态氮含量变化曲线

Fig. 9 Soil nitrate nitrogen content in different soil layers of maize in 2021

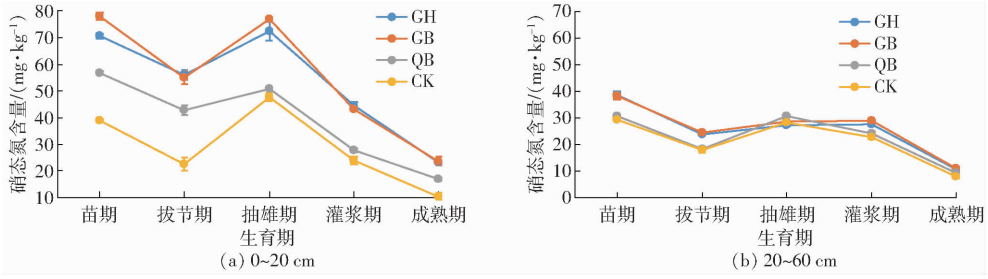


图 10 2022 年玉米不同土层土壤硝态氮含量变化曲线

Fig. 10 Soil nitrate nitrogen content in different soil layers maize in 2022

35.91%;2022 年 GB 较 QB 提升 42.40%,QB 较 CK 提升 43.66%。播后 30 d,2021 年 GB 较 QB 提升 25.78%,QB 较 CK 提升 43.53%;2022 年 GB 较 QB 提升 37.24%,QB 较 CK 提升 45.80%。播后 30 ~ 61 d,2021 年 4 种处理土壤硝态氮含量平均减小 27.37%,2022 年减小 29.11%;61 ~ 78 d,2021 年土壤硝态氮含量平均增大 48.59%,2022 年增大 49.65%,QB 处理土壤硝态氮含量增加幅度相对较小。播后 78 d 后,处理间差异逐渐减小,至玉米播后 133 d,4 个处理间无显著差异。20 ~ 60 cm 土层,在玉米播后 30 d,2021 年 GB 较 QB 提升 40.07%,2022 年 GB 较 QB 提升 23.95%。由两年数据可知,播后 133 d 时,4 种处理土壤硝态氮含量差异不大。整个生育期 GH 和 GB 无显著差异,QB 和 CK 无显著差异,说明灌溉方式对 20 ~ 60 cm 土层土壤硝态氮含量起主导作用。

春玉米不同生育阶段 0 ~ 60 cm 土层硝态氮贮量变化如图 11 所示。从玉米苗期至成熟均呈下降、上升、下降变化趋势,播后 78 d,即抽雄期为明显的上升点。在每个时期,土壤硝态氮贮量由大到小都近乎为 GB、GH、QB、CK,相较之下,GH 处理与 GB 处理间差异不大,GB 处理土壤硝态氮贮量大于 QB 处理,差异显著,且 QB 处理土壤硝态氮贮量大于 CK 处理,差异也较大。可见 GH 和 GB 处理可以降

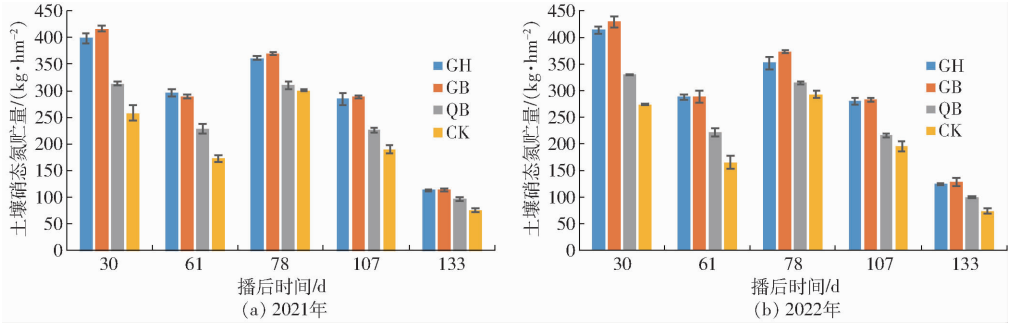


图 11 玉米根区土壤硝态氮贮量

Fig. 11 Soil nitrate nitrogen storage in root zone of maize

低氮淋失量,增加土壤硝态氮含量。

2.2 不同覆膜灌溉方式对春玉米生长的影响

图 12 为两年春玉米生长指标随时间变化曲线。由图 12a、12b 可知,不同覆膜灌溉方式株高呈先增大后变化不大的趋势,在抽穗期达到一定高度,后几乎不变。畦灌处理下,2021 年 QB 较 CK 株高提升 9.21%,2022 年 QB 较 CK 株高提升 2.40%;覆透明膜处理下,2021 年 GB 较 QB 株高提升 6.46%,2022 年 GB 较 QB 株高提升 9.01%;垄膜沟灌下,2021 年 GB 较 GH 株高提升 3.95%,2022 年 GB 较 GH 株高提升 1.19%。在拔节期,GH、GB、QB 处理株高较 CK 显著增加,2021 年分别增加 28.30%、34.97%、

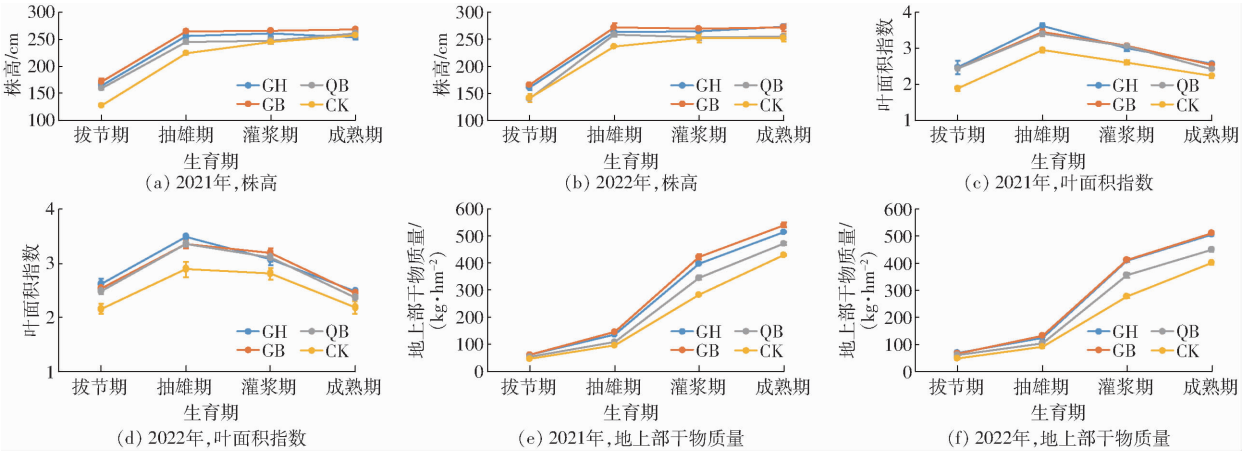


图 12　不同处理下春玉米生长指标随时间变化曲线

Fig. 12　Growth indicators of spring maize under different treatments

25.14%，2022 年分别增加 13.66%、17.08%、1.04%。自抽穗期起，株高差距逐渐减小，至成熟期，2021 年 GH、GB、QB 处理株高较 CK 提升 -1.42%、4.27%、1.44%，2022 年 GH、GB、QB 处理株高较 CK 提升 7.78%、7.40%、0.72%；2021 年 GB 株高较 QH 提升 5.77%，2022 年 GB 株高较 GH 提升 0.35%；2021 年 GB 株高较 QB 提升 2.79%，2022 年 GB 株高较 QB 提升 6.63%。由此可见，不同覆膜灌溉方式对株高的影响主要是在作物生长发育前期，后期影响不明显。

图 12c、12d 为两年叶面积指数随时间变化曲线。不同覆膜灌溉方式叶面积指数呈先增大后减小趋势，在抽雄期前后达到最大，与株高达到最大的时间相近，后期减小的主要原因是叶片衰老。畦灌处理下，2021 年 QB 较 CK 叶面积指数提升 17.39%，2022 年 QB 较 CK 叶面积指数提升 12.60%；覆透明膜处理下，2021 年 GB 较 QB 叶面积指数提升 1.63%，2022 年 GB 较 QB 叶面积指数提升 2.11%，差异不显著；垄膜沟灌下，2021 年 GB 较 GH 叶面积指数提升 1.49%，2022 年 GB 较 GH 叶面积指数提升 1.17%，差异不显著。由此可见，覆膜处理对植株叶面积指数起主导作用，而不同灌溉方式及不同地膜特性处理间相差较小。

干物质量可以表征春玉米同化产物积累。不同覆膜灌溉方式玉米地上部干物质量随时间变化如图 12e、12f 所示，2021、2022 年不同覆膜灌溉方式玉米地上部干物质量随时间的变化规律大体一致，均随时间逐渐增长。前期不同处理间相差较小，后期相差逐渐增大。畦灌处理下，2021 年 QB 较 CK 玉米地上部干物质量提高 14.30%，2022 年 QB 较 CK 玉米地上部干物质量提高 18.53%，差异显著；覆透明膜处理下，2021 年 GB 较 QB 玉米地上部干物质量提高 22.65%，2022 年 GB 较 QB 玉米地上部干物质量提高 16.66%，差异显著；垄膜沟灌下，2021 年 GB 较 GH 玉米地上部干物质量提高 4.85%，2022 年 GB 较 GH 玉米地上部干物质量提升 1.15%，差异不显著。由此可见，覆膜处理和灌溉方式对玉米地上部干物质量起主导作用，而不同地膜特性处理间相差较小。

2.3　不同覆膜灌溉方式对春玉米产量构成及水氮利用效率的影响

由表 2 可知，采取不同覆膜灌溉方式对玉米产量构成有非常显著的影响。QB 处理穗长较 CK 显著增加 4.03%；GB 穗长较 QB 提升 3.98%，较 CK 提升 8.14%，GB 与 GH 间无显著差异。4 个处理间穗行数间无显著差异，由大到小依次为 QB、CK、GB、GH；行粒数呈现覆膜处理显著高于不覆膜处理，透明膜处理高于黑膜，垄膜沟灌下玉米穗行粒数与覆膜畦灌间无显著差异。GH、GB 和 QB 百粒质量显著高于 CK，且 GH 和 GB 处理百粒质量显著高于 QB 处理。春玉米产量呈现与百粒质量结果相同的显著性差异，其中 QB 较 CK 显著提升 16.19%，GB 较 QB 显著提升 13.64%，较 CK 显著提升 32.04%，GB 产量高于 GH，但无显著差异。

表 2　2021 年不同处理下玉米产量构成

Tab. 2　Composition of maize yield under different treatments in 2021

处理	穗长/cm	穗行数	行粒数	百粒质量/g	产量/(kg·hm^{-2})
GH	22.71^{ab}	16.53^{a}	44.13^{a}	33.67^{a}	14 026.67^{a}
GB	23.33^{a}	16.53^{a}	45.97^{a}	34.47^{a}	14 355.00^{a}
QB	22.44^{b}	17.07^{a}	43.30^{a}	30.85^{b}	12 631.67^{b}
CK	21.57^{c}	16.73^{a}	40.00^{b}	26.21^{c}	10 871.67^{c}

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$），下同。

从以上不同处理下春玉米产量构成要素及产量的分析中可以得出，穗行数受影响不显著，穗长、行粒数、百粒质量、产量等指标受地膜和灌溉方式的影

响。畦灌处理下,QB 较 CK 产量有显著提升;覆透明膜处理下,GB 较 QB 产量也有显著提升;垄膜沟灌下,GB 与 GH 产量无显著差异。

2021 年整个生育期,CK 处理水分渗漏量与补给量总和最高(表 3),显著高于 GH 处理和 GB 处理,较 GH 高 19.06 mm、较 GB 高 20.60 mm,与 QB 处理无显著差异;2022 年,QB 处理水分渗漏量与补给量总和最高,较 GH 高 19.43 mm,较 GB 高 17.40 mm,较CK 高 5.79 mm,后者差异小于前两者。两年垄膜沟灌玉米生育期耗水量均显著低于畦灌处理,其中 QB 处理玉米生育期耗水量最高,2021 年为 456.93 mm,2022 年为 466.09 mm,显著高于 GB 与 GH 处理。在资源利用方面,GB 水分利用效率(WUE)和氮素利用效率(NUE)较 QB 和 CK 均有提升,2021 年较 QB 提升 25.16% 和 11.34%,较 CK 显著提升 37.64% 和 26.49%,2022 年较 QB 提升 15.36% 和 11.77%,较 CK 显著提升 41.02% 和 27.62%,可见 QB 较 CK 的提高更显著;2021 年 QB 的 WUE 和 NUE 较 CK 显著增加 9.97% 和 13.61%,2022 年 QB 的 WUE 和 NUE 较 CK 显著增加 22.25% 和 14.18%;GH 与 GB 间无显著差异。畦灌处理下,QB 较 CK 水氮利用效率均有显著提升;覆透明膜处理下,GB 较 QB 水氮利用效率也有显著提升,且 GB 较 CK 处理提升效果更明显;垄膜沟灌下,GB 水氮利用效率与 GH 处理无显著差异。

综上,建议在内蒙古河套灌区推行沟灌 + 地膜垄体覆盖技术,其中透明地膜更佳,以提高春玉米产量和水氮利用效率。

表 3 不同处理下春玉米水氮利用效率

Tab.3 Utilization efficiency of spring maize resources under different treatments

年份	处理	ΔW/mm	P_1/mm	Q/mm	ET/mm	WUE/(kg·hm^{-2}·mm^{-1})	NUE/(kg·kg^{-1})
2021	GH	9.10^{b}	31.68	7.41^{b}	408.19^{b}	34.77^{a}	54.41^{a}
	GB	15.25^{b}	31.68	5.87^{b}	412.80^{b}	34.23^{a}	50.66^{b}
	QB	39.56^{a}	31.68	25.69^{a}	456.93^{a}	27.35^{b}	45.50^{c}
	CK	37.33^{a}	31.68	26.47^{a}	455.48^{a}	24.87^{c}	40.05^{d}
2022	GH	12.45^{b}	41.05	11.13^{b}	424.63^{b}	34.16^{a}	55.55^{a}
	GB	21.94^{ab}	41.05	13.16^{b}	436.15^{b}	33.28^{a}	54.90^{a}
	QB	34.48^{a}	41.05	30.56^{a}	466.09^{a}	28.85^{b}	49.12^{b}
	CK	30.35^{ab}	41.05	24.77^{ab}	456.16^{ab}	23.60^{c}	43.02^{c}

3 讨论

垄膜沟灌可以提高灌溉水氮利用效率与作物产量[28-29],不仅能降低土壤水分消耗,还能有效促进土壤水分入渗[30],降低垄体表层土壤含盐量和氮磷元素淋失量[31]。淋洗盐和盐分往上积累是在整个生理期的不同时段,而对于盐分和氮肥来说(主要考虑硝态氮),灌水量大,灌溉时盐分和氮肥基本上都会被淋洗。若灌水量过多会使盐分和氮肥向土层深处移动,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[32];但若灌水量过少,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。灌溉将盐分往土壤下层淋洗是一个短期行为,因为河套灌区整体干旱,在灌溉后,地表蒸发和作物蒸腾作用使深层次土壤水分向表层移动,毛管上升作用又能将盐分往上带,而覆膜有助于抑制盐分往地表运动。表层土壤含盐量显著高于深层土壤,出现盐分表聚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[31],且地表蒸发和作物蒸腾作用会使深层土壤水分携带盐分向表层移动,在水分运移下盐分向上移动,造成 0 ~ 40 cm 土层电导率增大,尤其是 0 ~ 20 cm 土层电导率最大。另外,覆膜可提高表层土壤含水率,这是由于地表与空气间隔地膜,限制接触,阻碍土壤水分纵向运移,迫使水分横向运移[33],降低了灌后土壤的水分蒸发及溶质上溯[34],同理土壤表层含盐量也随之减小。与不覆膜相比,覆膜可以有效提高春玉米生育期内土壤的蓄水保墒能力,提高土壤温度[35],抑制蒸发,改善土壤耗水结构,从而提高旱区的作物水分利用效率[36]。另外,沟灌处理下通过收集田埂的雨水能更好地利用降雨,从而改善作物水分利用率,提高作物产量[37]。马淑萍等[38]也提出,根据当地每年气候状况,及时作业,抢时起垄覆膜,会利于保墒增产。

在本研究中,起垄后 GB 较 QB 处理作物水分利用效率和土壤温度提升更显著,说明垄沟覆膜可更好地改善土壤微生态系统[21],促进玉米生长发育,也可能是垄膜沟灌起垄后改变地形,结合覆膜后较畦灌有更高的集水效率和更低的土壤蒸发量,这可能是 GB 产量高于 QB 的原因。研究发现,覆膜处理对植株叶面积指数起主导作用,而不同灌溉方式处

理间相差较小，2021 年 QB 较 CK 叶面积指数提升 17.39%，2022 年 QB 较 CK 叶面积指数提升 12.60%，覆膜处理使玉米叶面积指数发生了变化，增强了作物对光辐射的捕获能力，地膜反射到植物冠层的光照促进了春玉米叶片的光合作用，增加了物质积累量，使玉米产量增加[39]。究其根本原因，可能是采用覆膜沟灌改善了作物行间的风、日照和温度环境，可以提高春玉米生产力[40]。除叶面积指数外，覆膜处理和灌溉方式两者同时对玉米其他生理指标、产量构成、水氮利用效率起主导作用。就整个生育期来看，透明地膜与黑色地膜覆盖条件下的土壤含水率、硝态氮含量、作物生理指标和水氮利用效率差异不显著（$P>0.05$），但均显著高于不覆膜处理（$P<0.05$），说明透明地膜和黑色地膜均可促进玉米生育的生长进程，起垄后灌溉方式对于春玉米产量的影响效果高于覆膜颜色变化。

4　结论

（1）沟灌 + 透明地膜垄体覆盖可增大土壤含水率，降低垄体表层土壤含盐量和氮磷元素淋失量，抑制盐分随水往地表运移，增加土壤硝态氮含量，增加土壤水分有效性。

（2）沟灌 + 透明地膜垄体覆盖玉米产量较 QB 处理显著提升 13.64%，较 CK 处理显著提升 32.04%，高于 GH 处理但不显著。同时改善玉米作物的水氮利用效率，提高产量，保证粮食安全。

（3）覆膜处理对植株叶面积指数起主导作用，而不同灌溉方式处理间相差较小，2021 年 QB 较 CK 叶面积指数提升 17.39%，2022 年 QB 较 CK 叶面积指数提升 12.60%；此外，覆膜处理和耕作灌溉方式两者皆起主导作用，沟灌优于畦灌，覆膜优于不覆膜。

（4）就整个生育期来看，透明地膜与黑色地膜覆盖条件下土壤含水率、硝态氮含量、作物生理指标和水氮利用效率差异性不显著（$P>0.05$），但均显著高于不覆膜处理（$P<0.05$），说明透明地膜和黑色地膜均可促进玉米生育的生长进程。

（5）综上，建议在内蒙古河套灌区推行沟灌 + 地膜垄体覆盖技术，其中透明地膜更佳，以提高春玉米产量和资源利用效率。

参　考　文　献

[1] 邹宇锋，蔡焕杰，张体彬，等. 河套灌区不同灌溉方式春玉米耗水特性与经济效益分析[J]. 农业机械学报，2020，51(9)：237－248.
ZOU Yufeng，CAI Huanjie，ZHANG Tibin，et al. Water use characteristics and profit analysis of spring maize production with different irrigation methods in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(9)：237－248.（in Chinese）

[2] FU C，XUE J，CHEN J，et al. Evaluating spatial and temporal variations of soil water，heat，and salt under autumn irrigation in the Hetao Irrigation District based on distributed SHAW model[J]. Agricultural Water Management，2024，293：108707.

[3] 程煜，乔若楠，丁运韬，等. 化肥减量和有机替代对重度盐渍土水盐特性及向日葵水氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2021，27(11)：1981－1992.
CHENG Yu，QIAO Ruonan，DING Yuntao，et al. Effects of chemical fertilizer reduction and organic substitution on water and salt characteristics of high salinity soil and water and nitrogen use efficiency of sunflower[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2021，27(11)：1981－1992.（in Chinese）

[4] 贾咏霖，屈忠义，丁艳宏，等. 不同灌溉方式下施用生物炭对土壤水盐运移规律及玉米水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报，2020，39(8)：44－51.
JIA Yonglin，QU Zhongyi，DING Yanhong，et al. The effects of soil amendment with straw biochar on water and salt dynamics as well as water use efficiency of corn under different irrigations[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2020，39(8)：44－51.（in Chinese）

[5] FENG Z，MIAO Q，SHI H，et al. Irrigation scheduling in sand-layered farmland：evaluation of water and salinity dynamics in the soil by SALTMED－1D model under mulched maize production in Hetao Irrigation District，China[J]. European Journal of Agronomy，2024，157：127177.

[6] CAO Z，ZHU T，CAI X. Hydro-agro-economic optimization for irrigated farming in an arid region：the Hetao Irrigation District，Inner Mongolia[J]. Agricultural Water Management，2023，277：108095.

[7] 秦美荣. 浅谈节水地面灌溉技术在河套灌区适用性[J]. 农业与技术，2019，39(15)：66－67.

[8] 张婷，吴普特，赵西宁，等. 垄沟种植模式对玉米生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究，2013，31(1)：27－40.
ZHANG Ting，WU Pute，ZHAO Xining，et al. Effects of ridge and furrow planting system on growth and yield of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2013，31(1)：27－40.（in Chinese）

[9] 王自奎，吴普特，赵西宁，等. 小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟[J]. 农业工程学报，2013，29(21)：72－81.
WANG Zikui，WU Pute，ZHAO Xining，et al. Mathematical simulation of soil evaporation from wheat/maize intercropping field[J]. Transactions of the CSAE，2013，29(21)：72－81.（in Chinese）

[10] 梁晓阳，沈欣，王传娟，等. 覆膜类型对春玉米农田盐热变化及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报，2023，41(11)：1179－1188.

LIANG Xiaoyang, SHEN Xin, WANG Chuanjuan, et al. Effects of different films mulching on salt and heat changes and yield of spring maize farmland[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023,41(11):1179 - 1188. (in Chinese)

[11] WANG Y P, LI X G, FU T, et al. Multi-site assessment of the effects of plastic-film mulch on the soil organic carbon balance in semiarid areas of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016,228 - 229:42 - 51.

[12] LI C, LUO X, LI Y, et al. Ridge planting with transparent plastic mulching improves maize productivity by regulating the distribution and utilization of soil water, heat, and canopy radiation in arid irrigation area[J]. Agricultural Water Management, 2023,280: 108230.

[13] LAI Z, ZHANG H, DING X, et al. Ridge-furrow film mulch with nitrogen fertilization improves grain yield of dryland maize by promoting root growth, plant nitrogen uptake and remobilization[J]. Soil & Tillage Research, 2024,241:106118.

[14] 胡敏, 苗庆丰, 史海滨, 等. 不同地膜覆盖对春玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2):173 - 177.
HU Min, MIAO Qingfeng, SHI Haibin, et al. Effects of different film mulching on growth traits and water use efficiency for spring maize[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017,31(2):173 - 177. (in Chinese)

[15] 霍轶珍, 郭彦芬, 韩翠莲, 等. 不同覆膜处理对土壤水热效应及春玉米产量的影响[J]. 水土保持研究, 2016,23(5): 124 - 128.
HUO Yizhen, GUO Yanfen, HAN Cuilian, et al. Effects of different film mulching treatments on soil moisture, heat and spring maize yield[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(5):124 - 128. (in Chinese)

[16] 王锐, 郭怡婷, 王乃江, 等. 地膜覆盖对夏玉米籽粒灌浆过程及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2021(9):71 - 76.
WANG Rui, GUO Yiting, WANG Naijiang, et al. Effect of plastic film mulching on grain filling process and yield of summer maize[J]. Water Saving Irrigation, 2021(9):71 - 76. (in Chinese)

[17] SUI J, WANG J, GONG S, et al. Assessment of maize yield-increasing potential and optimum N level under mulched drip irrigation in the Northeast of China[J]. Field Crops Research, 2018,215: 132 - 139.

[18] 王青松, 冯浩, 董勤各, 等. 地膜覆盖对河套灌区春玉米耗水结构及水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8):10 - 18.
WANG Qingsong, FENG Hao, DONG Qin'ge, et al. The effectiveness of mulching in improving water use efficiency of spring maize in Hetao Irrigation District varied with types of plastic films[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 10 - 18. (in Chinese)

[19] 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.
QI Zhijuan, FENG Hao, ZHANG Tibin, et al. Effects of mulch and tillage methods on soil water and temperature as well as corn yield in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 108 - 113. (in Chinese)

[20] 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.
WANG Jie, FENG Hao, WANG Naijiang, et al. Effects of ridge-furrow planting with plastic film mulching on summer maize growth and soil water dynamics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):110 - 119. (in Chinese)

[21] 孟宣辰, 马鹏程, 马杰, 等. 黄土高原半干旱区紫花苜蓿覆膜垄沟和施肥效应研究[J]. 草地学报, 2021,29(9): 2098 - 2106.
MENG Xuanchen, MA Pengcheng, MA Jie, et al. Study on the effect of mulching furrow and fertilization of alfalfa in semi-arid areas of Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021,29(9):2098 - 2106. (in Chinese)

[22] 王增丽, 温广贵. 干旱区垄膜沟灌条件下土壤水盐空间分布特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2017,36(5):47 - 51.
WANG Zengli, WEN Guanggui, Distributions of soil moisture and salinity under ridge-tillage and furrow irrigation with film mulch in an arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017,36(5):47 - 51. (in Chinese)

[23] 罗帅, 冯浩, 李成, 等. 旱区垄膜沟灌不同灌水量对土壤水盐及春玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021,35(4): 259 - 266.
LUO Shuai, FENG Hao, LI Cheng, et al. Effect of different irrigation amounts on soil water and salt and yield of spring maize under ridge with film mulching and furrow irrigation in arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4): 259 - 266. (in Chinese)

[24] 李成, 冯浩, 罗帅, 等. 垄膜沟灌对旱区农田土壤盐分及硝态氮运移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2019,33(3): 268 - 275.
LI Cheng, FENG Hao, LUO Shuai, et al. Effect of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salt and nitrate nitrogen transport characteristics in arid areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):268 - 275. (in Chinese)

[25] QUAN H, WU L, DING D, et al. Interaction between soil water and fertilizer utilization on maize under plastic mulching in an arid irrigation region of China[J]. Agricultural Water Management, 2022,265: 107494.

[26] 吴旭斌, 冯浩, 董勤各, 等. 河套灌区垄膜沟灌模式对春玉米田水热运移及籽粒产量的影响[J]. 节水灌溉, 2023(6):100 - 109, 116.
WU Xubin, FENG Hao, DONG Qin'ge, et al. Effects of ridge mulched with plastic film-furrow irrigation mode on water heat transport and grain yield in spring maize field in Hetao Irrigation District[J]. Water Saving Irrigation,2023(6):100 - 109, 116. (in Chinese)

[27] 王宁, 刘玉春, 姜长松, 等. 不同灌水方式和施肥量对青贮玉米生长和产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2020

(5):4 - 9.
WANG Ning, LIU Yuchun, JIANG Changsong, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization amount on growth and yield of silage corn[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(5):4 - 9. (in Chinese)
[28] 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.
FENG Hao, LIU Xia, YU Kun, et al. Effects of different mulching patterns on soil moisture, soil temperature and summer maize growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(12):192 - 202. (in Chinese)
[29] LIAO Z, ZENG H, FAN J, et al. Effects of plant density, nitrogen rate and supplemental irrigation on photosynthesis, root growth, seed yield and water-nitrogen use efficiency of soybean under ridge-furrow plastic mulching[J]. Agricultural Water Management, 2022,268: 107688.
[30] 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J]. 水土保持学报, 2017,31(2):301 - 308.
QI Zhijuan, FENG Hao, ZHANG Tibin, et al. A study on soil salinity movement of drip irrigation under different film mulching treatment in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(2):301 - 308. (in Chinese)
[31] 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.
LIU Xiaogang, ZHANG Fucang, TIAN Yufeng, et al. Effects of irrigation and fertilization treatments on transfer and utilization of water and nitrogen in maize root zone soil[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(11):19 - 24. (in Chinese)
[32] LI C, WANG Q, LUO S, et al. Reducing water and nitrogen inputs combined with plastic mulched ridge-furrow irrigation improves soil water and salt status in arid saline areas, China[J]. Journal of Arid Land, 2021,13(8):761 - 776.
[33] 刘凯, 刘冰, 谢英荷, 等. 减氮覆膜对黄土旱塬小麦产量构成及水肥利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):198 - 206.
LIU Kai, LIU Bing, XIE Yinghe, et al. Effects of nitrogen reduction and film mulching on wheat yield composition and utilization efficiency of water and fertilizer in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):198 - 206. (in Chinese)
[34] 陆培榕, 邢玮麟, 杨玉杰, 等. 棚内微咸水覆膜滴灌下带间土壤水盐分布特征模拟[J]. 农业机械学报, 2023,54(7): 360 - 371.
LU Peirong, XING Weilin, YANG Yujie, et al. Simulation of soil water and salt distribution characteristics within area between drip tapes under mulched brackish water drip irrigation in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(7):360 - 371. (in Chinese)
[35] 张立勤, 杨思存, 崔云玲, 等. 不同水氮条件下垄膜沟灌玉米的产量及水分利用效应[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(11):34 - 40.
ZHANG Liqin, YANG Sicun, CUI Yunling, et al. Yield and water utilization effects of corn cultivated by raised bed plastic film mulching and furrow irrigation under different water and nitrogen conditions[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2021,52(11):34 - 40. (in Chinese)
[36] 任新茂, 孙东宝, 王庆锁. 覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响[J]. 农业机械学报, 2017,48(1): 206 - 211.
REN Xinmao, SUN Dongbao, WANG Qingsuo. Effects of plastic film mulching and plant density on yield and evapotranspiration of rainfed spring maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(1): 206 - 211. (in Chinese)
[37] LI C, WEN X, WAN X, et al. Towards the highly effective use of precipitation by ridge-furrow with plastic film mulching instead of relying on irrigation resources in a dry semi-humid area[J]. Field Crops Research, 2016,188:62 - 73.
[38] 马淑萍, 陈翠贤, 余有霞. 垄膜沟灌不同覆膜时期对玉米产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2013(10):76 - 78.
[39] 张冉, 张照娜, 陆禹阔, 等. 覆膜灌溉对河北省春玉米生长生理及产量的影响[J]. 南方农机, 2021,52(23):9 - 12.
ZHANG Ran, ZHANG Zhaona, LU Yukuo, et al. Effect of film mulching irrigation on growth physiology and yield of spring corn in Hebei Province[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021,52(23):9 - 12. (in Chinese)
[40] DONG Q G, YANG Y, ZHANG T, et al. Impacts of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salinity, spring maize yield and water use efficiency in an arid saline area[J]. Agricultural Water Management, 2018,201:268 - 277.