中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

地下滴灌量与滴灌带间距对夏玉米生长发育的影响

要家威，齐永青，李怀辉，沈彦俊

Effects of the irrigation quota and drip irrigation pipes spacing on growth and development of summer maize with subsurface drip irrigation

YAO Jiawei, QI Yongqing, LI Huaihui, and SHEN Yanjun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210058

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微润灌对作物产量及水分利用效率的影响

Effect of moistube-irrigation on crop yield and water use efficiency

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(11): 1671-1683

地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展

Water saving potential and mechanisms of subsurface drip irrigation: A review

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(6): 1076-1084

滴灌水肥一体化条件下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响

Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization in summer maize and soil NO_3^--N content under drip fertigation

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(5): 668-676

滴灌灌水均匀系数与灌水量对土壤水分分布及温室番茄产量的影响

Effects of drip irrigation uniformity and amount on soil moisture and tomato yield in solar greenhouse

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 286-295

黄土塬区夏玉米物质生产及水分利用对品种间作竞争的响应

Responses of dry matter distribution and water use of summer maize (*Zea mays* L.) to intercropped cultivars competition on the Loess Plateau of China

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(3): 377-387

局部湿润模型模拟南疆滴灌枣园蒸散量及蒸腾量适用性研究

Applicability of Partial Root-zone Irrigation model to simulate evapotranspiration and transpiration in drip irrigation jujube orchards in southern Xinjiang

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 726-737

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1502−1511

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210058

要家威, 齐永青, 李怀辉, 沈彦俊. 地下滴灌量与滴灌带间距对夏玉米生长发育的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1502−1511

YAO J W, QI Y Q, LI H H, SHEN Y J. Effects of the irrigation quota and drip irrigation pipes spacing on growth and development of summer maize with subsurface drip irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1502−1511

地下滴灌量与滴灌带间距对夏玉米生长发育的影响*

要家威[1,2], 齐永青[1], 李怀辉[3], 沈彦俊[1**]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 甘肃农业大学水利水电工程学院 兰州 730070)

摘 要: 为探究地下滴灌条件下不同灌溉量与滴灌带间距对夏玉米生长发育与耗水特征的影响, 查明地下滴灌对田间尺度水平衡的影响特征, 基于 2 种灌溉定额 (62 mm 和 35 mm) 与 3 种滴灌带间距 (60 cm、80 cm 和 100 cm) 的田间试验, 并以华北典型农田地面灌溉方式为对照, 分析不同处理对夏玉米生长发育、土壤剖面水分分布、蒸散量及土壤蒸发的影响。结果表明: 地下滴灌处理灌溉水主要停留于 20~60 cm 土层, 灌溉量越高, 湿润范围越大; 相对地面灌溉处理, 地下滴灌处理地表 0~20 cm 与 60~100 cm 土壤含水量相对较低。玉米株高、叶面积指数与干物质积累量随地下滴灌灌溉量的增加而增加, 地面灌溉处理可促进株高与干物质积累, 地下滴灌低灌溉量导致玉米生育进程延迟。与地面灌溉处理相比, 地下滴灌处理可在减少 22% 的灌溉量的条件下保证作物产量无显著下降, 土壤蒸发相对降低 30%, 蒸散量相对降低 8%, *E*/ET 值由 0.34 降低至 0.27, 灌溉水利用效率提高 20%, 收获指数增加 10%。不同滴灌带间距处理对玉米生长发育及耗水特征无显著影响。综合夏玉米生长、产量、灌溉水利用效率和滴灌设备投资成本, 本试验条件下最优设计方案为灌溉量为 62 mm, 滴灌带间距为 100 cm。

关键词: 夏玉米; 地下滴灌; 土壤蒸发; 土壤水分; 水分利用效率

中图分类号: S275.6 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of the irrigation quota and drip irrigation pipes spacing on growth and development of summer maize with subsurface drip irrigation*

YAO Jiawei[1,2], QI Yongqing[1], LI Huaihui[3], SHEN Yanjun[1**]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Water and soil resources in the North China Plain are mismatched. Traditional flood irrigation methods in this area have low water resource utilization and lead to serious water loss, which has caused a rapid decrease in groundwater levels. This study aims to improve the efficiency of irrigation water use in this area, determine the influence of subsurface drip irrigation on the field-scale

* 河北省重点研发计划国际科技合作专项 (18397002D)、中国科学院国际伙伴计划 (153E13KYSB20170010)、国家重点研发计划课题 (2016YFC0401403) 和国家自然科学基金面上项目 (41877169) 资助

** 通信作者: 沈彦俊, 主要研究方向为农业水文与水资源、节水农业。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
要家威, 主要研究方向为节水农业与灌溉技术。E-mail: yjwzh13@163.com

收稿日期: 2021-01-28 接受日期: 2021-03-26

* This study was supported by the Program of Key Research and Development Plan and International Science and Technology Cooperation in Hebei Province (18397002D), the International Partners Program of Chinese Academy of Sciences (153E13KYSB20170010), the National Key Research and Development Project of China (2016YFC0401403), and the National Natural Science Foundation of China (41877169).

** Corresponding author, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

Received Jan. 28, 2021; accepted Mar. 26, 2021

water balance, and explore the effects of different irrigation amounts and drip irrigation zone spacing on the growth and water consumption of summer maize under subsurface drip irrigation conditions. Field experiments with two irrigation quotas (62 and 35 mm) and three drip irrigation pipes spacings (60, 80, and 100 cm) were conducted with the conventional flood irrigation as the control in farmlands in the North China Plain to analyze their effects on the growth and development, yield and irrigation water use efficiency of summer maize, and the soil profile moisture distribution, evapotranspiration, evaporation. Soil evaporation under subsurface drip irrigation was measured and compared using a microlysimeter. The results showed that irrigation water from subsurface drip irrigation mainly stayed in the 20–60 cm soil layer, and the wetted body presented a “small up and large down” form. The higher the irrigation amount, the larger the wetted body range, and the larger the soil volumetric water content. Compared to flood irrigation, the soil moisture contents of the 0–20 cm and 60–100 cm soil layers from subsurface drip irrigation were relatively low, and a dry soil layer formed at about 0–10 cm layer, which reduced soil evaporation. Maize plant height, leaf area index, and dry matter accumulation increased with increasing amounts of subsurface drip irrigation. Under flood irrigation, the maize plant height increased faster, and the accumulation rate of the maximum dry matter was higher compared to subsurface drip irrigation. Low amounts of subsurface drip irrigation delayed maize growth. When the irrigation amount was reduced by 22%, maize yield under subsurface drip irrigation did not differ from maize yield under traditional flood irrigation. Compared to flood irrigation, subsurface drip irrigation reduced soil evaporation by 30%, evapotranspiration by 8%, the *E*/ET value from 0.34 to 0.27; and increased the irrigation water use efficiency by 20%, the harvest index by 10%. The different drip irrigation zone spacing treatments had no effect on the growth and water consumption of maize. For high maize growth and yield, efficient irrigation water use, and cost-effective investments in drip irrigation equipment, the optimal irrigation quota was 62 mm with a drip irrigation zone spacing of 100 cm.

Keywords: Summer maize; Subsurface drip irrigation; Soil evaporation; Soil moisture; Water use efficiency

作为我国重要的粮食主产区之一, 华北平原水土资源高度不匹配, 耕地数量占全国的 16.96%, 水资源量仅占全国的 2.25%, 灌溉用水量占全国的 10.74%[1]。冬小麦 (*Triticum aestivum*)-夏玉米 (*Zea mays*) 一年两熟制是本区域主要种植制度, 其年均耗水量高, 作物耗水需通过农业灌溉进行补给, 但该区域常规灌溉方式为地面灌溉, 水资源利用效率低下, 致使地下水位快速下降, 水资源紧缺状况日益严峻[2-3]。华北平原玉米季降水集中, 但仅通过不稳定降水供给玉米生长易导致减产, 仍需对玉米进行灌溉, 而地面灌溉补给方式易与降水补给重叠, 导致水分无效利用, 因此少量多次的灌溉方式更适用于玉米种植。在此背景下使用高效灌溉技术替代地面灌溉方式, 提高灌溉水利用效率, 已成为确保我国粮食、水资源安全和社会稳定的必然要求[4]。

地下滴灌技术是现阶段节水效率最高的灌溉方式之一, 在国内外得到了广泛应用[5]。相关研究表明, 地面灌溉、喷灌、地表滴灌和地下滴灌等多种灌溉方式[6-9] 对作物生长发育及耗水特征的影响显著, 地下滴灌技术可有效降低灌溉量, 提高作物产量与水分利用效率, 其用水效率比传统农业灌溉方式提高了近 30%。地下滴灌技术灌水完成后地表土壤含水量较低, 可以有效减少土壤蒸发量与深层渗漏量[10], 将灌溉水留存于植物根区[11]。Valentin 等[12] 指出玉米地下滴灌的蒸散量相对地表滴灌降低 39%, 灌溉水生产力提高 25%, 土壤蒸发量在整个生育期内减少约 40 mm。近年来, 诸多学者对不同作物的合理灌溉制度[13-14]、滴灌带布设方式[15-17] 等关键技术参数进行了大量研究讨论。研究表明合理的灌溉制度在可以实现维持作物高产的同时达到节水目的[18], 适宜的滴灌带布设方式可以减少地下滴灌的成本[19-20]。廉喜旺[15] 认为滴灌带间距 80 cm、埋深 30 cm、灌溉定额 375 mm 的设计方案苜蓿 (*Medicago sativa*) 产量和水分利用效率最高, 同时指出滴灌带埋深对产量的影响大于布设间距。

目前, 地下滴灌技术可在作物产量不显著降低的前提下, 有效减少灌溉量, 该结论仍需通过田间试验对华北典型农田区进行验证。且地下滴灌节水研究大多仅停留在蒸散量层面, 对土壤蒸发进行定量监测及分析的研究鲜有报道。基于此, 本研究采用不同灌溉定额和滴灌带间距的田间组合试验, 研究了地下滴灌对华北典型农田夏玉米生长发育、蒸散量、土壤蒸发以及土壤水分变化的影响, 旨在查明地下滴灌对田间尺度水平衡的影响特征, 并为地下滴灌技术在华北平原的生产应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于 2020 年 6 月至 10 月在中国科学院栾城农业生态系统试验站 (37°50′N, 114°40′E) 进行。该地属暖温带半湿润半干旱季风气候, 多年平均降水量约 470 mm, 玉米季多年平均降水量约为 340 mm。土壤质地以壤土为主, 全氮含量 0.7~0.8 g·kg^{-1}, 碱解氮 60~80 mg·kg^{-1}, 速效磷 15~20 mg·kg^{-1}, 速效钾 150~170 mg·kg^{-1}。土壤平均容重 1.45 g·cm^{-3}, 饱和体

积含水量为 44%, 田间体积持水量为 34%, 凋萎体积含水量为 12%。

试验期内降雨量、水面蒸发量、日均温度与日均相对湿度均呈波动状态 (图 1)。其中, 日降水大于 5 mm 的有效降水量共 298.5 mm, 8 月 5—6 日降雨量共计 85.8 mm。试验期当年降雨量接近多年平均降雨量。玉米播种后临近几日内日均温较高, 相对湿度较低, 日水面蒸发量大于 10 mm。

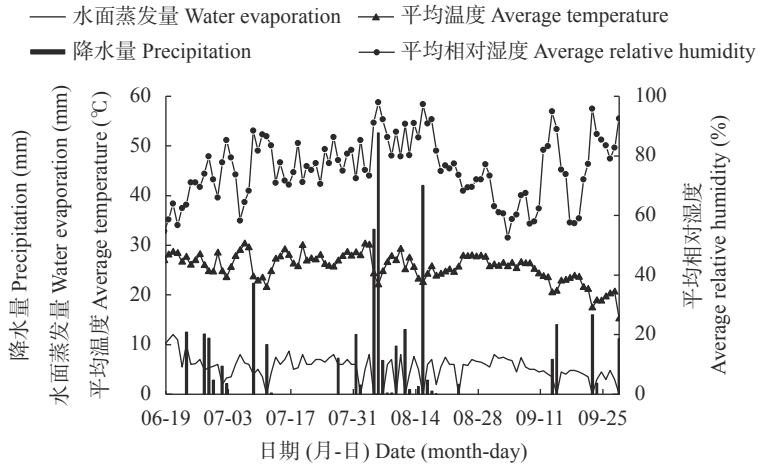

图 1 试验地试验期内降雨量、水面蒸发量、平均温度与平均相对湿度

Fig. 1 Rainfall, water evaporation, average temperature and average relative humidity during the test period in the experiment site

1.2 试验设计

试验设计地下滴灌 (SSDI) 灌溉量与滴灌带间距 2 个变量。灌溉量 2 个处理, 分别为 62 mm (W_1) 和 35 mm (W_2); 滴灌带间距 3 个处理, 分别为 60 cm (D_1)、80 cm (D_2) 与 100 cm (D_3); 同时设置灌溉量为 80 mm 的地面灌溉 (FI) 作为对照。试验采用随机区组设计, 每个处理 3 组重复, 试验方案如表 1 所示。试验小区长 15 m, 宽 10 m, 小区间设 80 cm 保护行, 各小区配备独立管道及水表, 以确保各小区单独灌水和施肥。采用以色列 Metzerplas 公司生产的压力补偿式滴灌管, 滴头间距 40 cm, 统一埋深 25 cm, 滴头流速 2 $L·h^{-1}$。地下滴灌处理播种后使用自走式喷灌机于 6 月 22 日进行出苗水灌溉, 灌溉量为 15 mm。当 W_1 处理 0~100 cm 土层的土壤体积含水量降低至田间持水量的 60% 时进行灌溉, 所有处理同时灌溉, 以保证灌溉频率相同。单次灌水定额通过湿润比、计划湿润深度等因素确定, 其中拔节期计划湿润深度为 40 cm, 抽雄期为 60 cm, 灌浆期为 80 cm。该试验地前一季种植作物为冬小麦, 灌溉制度和试验设计与本试验完全相同。

表 1 试验处理设计方案

Table 1 Design scheme of test treatments

处理 Treatment	滴灌带间距 Pipes spacing (cm)	不同日期(月-日)的灌溉定额 Irrigation quotas in different dates (month-day) (mm)			灌溉总量 Total irrigation (mm)	灌溉方式 Irrigation methods
		06-22	07-07	07-27		
W_1D_1	60	15	17	30	62	地下滴灌 Subsurface drip irrigation
W_1D_2	80	15	17	30	62	地下滴灌 Subsurface drip irrigation
W_1D_3	100	15	17	30	62	地下滴灌 Subsurface drip irrigation
W_2D_1	60	15	10	10	35	地下滴灌 Subsurface drip irrigation
W_2D_2	80	15	10	10	35	地下滴灌 Subsurface drip irrigation
W_2D_3	100	15	10	10	35	地下滴灌 Subsurface drip irrigation
FI		80			80	地面灌溉 Flooding irrigation

玉米供试品种为‘郑单 958’, 2020 年 6 月 20 日贴茬播种, 行间距 60 cm, 株间距 25 cm。2020 年 9 月 29 日收获。玉米底肥随播种施入, 底肥施 N 量为 156 $kg·hm^{-2}$, 施 P 量为 29 $kg·hm^{-2}$, 施 K 量为 58 $kg·hm^{-2}$; 于 7 月 27 日随水追肥, 施 N 量共为 40 $kg·hm^{-2}$。地面灌溉处理的施肥量与地下滴灌处理的施肥量相同。田间管理水平保持一致。

1.3 测定项目与方法

气象数据来自中国科学院栾城农业生态系统试验站自动气象站, 包括试验期内日降雨量、日均温、相对空气湿度等。

土壤含水量采用便携式土壤水分廓线仪 (Di-

viner 2000) 观测, 在 6 月 20 日玉米播种前开始, 每间隔 7 d 观测 1 次 0~100 cm 土层的土壤体积含水量, 灌水前后 1 d 及降雨后各加测土壤含水量 1 次。每个小区随机设定 3 个样点。

棵间土壤蒸发采用微型蒸渗仪 (Micro-lysimeter) 观测, 桶体高度 15 cm, 内径 10 cm, 壁厚 5 mm, PVC 材质, 桶外使用内径为 12 cm 的 PVC 管固定。每日傍晚 18:00 开始称重, 两天之间重量差值为当日土壤蒸发量, 每次降雨后更换土壤。每个小区随机设定 3 个样点。作物蒸腾量为蒸散量与土壤蒸发的差值。

农田耗水 (ET) 根据水量平衡公式计算:

$$\mathrm{ET} = E + T = P + I - R - D + \Delta S \quad (1)$$

式中: ET 为作物实际耗水量 (mm), E 为土壤蒸发量 (mm), T 为作物蒸腾量 (mm), P 为降雨量 (mm), I 为灌水量 (mm), R 为地表径流量 (mm), D 为深层渗漏量 (mm), ΔS 为生育期内土壤水分消耗量 (mm)。试验期内无地表径流产生, R 忽略不计; 本试验深层渗漏量通过降雨入渗系数计算[21]。

夏玉米各生育期的株高、叶面积指数 (LAI) 通过在各小区内选择长势、大小相同的 3 株进行定株观测, 株高、完全展开叶片的绿叶长度与最大宽度使用精度为 1 mm 的直尺测量, 叶面积指数使用单株叶面积 (叶面积=叶长×叶宽×0.75) 与群体密度计算。玉米各生育期地上干物质量测定采用小区随机取样, 每次 3 株, 切割分开后, 在鼓风干燥箱内 110 ℃ 杀青 30 min, 然后 75 ℃ 烘干至恒重。穗数、穗粒数、百粒重等产量要素指标通过常规考株、考种获得, 产量为各小区实收结果。采用 Logistic 方程模拟夏玉米干物质积累量变化[22]:

$$y = K/[1 + \exp(a - bT)] \quad (2)$$

式中: y 为夏玉米干物质积累量 (g), T 为夏玉米播种后天数 (d), K 为理论最大干物质积累量 (g), a, b 为待定系数。夏玉米干物质积累量特征值分别为干物质最大相对生长速率 (V_m=−bk/4)、最快生长阶段开始时间 [T_1=(a−1.317)/b]、最快生长阶段结束时间 [T_2=(a+1.317)/b]、最大相对生长速率出现时间 (T_m=−a/b)。

水分利用效率 (WUE)、灌溉水利用效率 (IWUE) 与收获指数[23](HI) 计算公式:

$$\mathrm{WUE} = Y/\mathrm{ET} \quad (3)$$

$$\mathrm{IWEU} = Y/I \quad (4)$$

$$\mathrm{HI} = Y/\text{地上部分生物量} \quad (5)$$

式中: Y 为经济产量 (kg·hm^{-2}), ET 为蒸散量 (mm), I 为灌水量 (mm)。

1.4　数据处理与分析方法

基于 Excel 2013 处理数据并绘制图表, 采用 SPSS 软件进行数据统计分析。

2　结果与分析

2.1　不同处理的土壤含水量变化过程

图 2 所示为玉米整个生育期内 0~100 cm 土层土壤体积含水量随时间变化过程, 不同处理的 0~20 cm 土层土壤体积含水量主要受降雨、灌溉与土壤蒸发影响, 随时间呈波动变化。地下滴灌处理波动明显, W_2 各处理表层 20 cm 以上土层土壤体积含水量变化较大, 而 W_1 各处理含水量波动变化的位置仅位于土壤表层 15 cm 以上, 相对于 W_2 处理较浅。20~60 cm 土层是地下滴灌处理灌溉水主要存留位置, 该层土壤含水量主要受灌溉及作物根系吸水影响, 土壤含水量波动与灌溉周期同步。W_1 处理的灌溉水主要停留于根区 20~60 cm 土层, W_2 各处理灌溉水主要停留在 20~40 cm 土层。W_2 各处理 40~60 cm 土壤含水量增加量相对 W_1 处理较小。W_2 各处理灌溉量较低, 因此根区土壤含水量也较低, 在 8 月 5 日强降雨补给后仍未达到田间持水量, 在生育后期 3 组处理土壤含水量均下降至 20% 以下。地下滴灌各处理 60~100 cm 土层土壤含水量在无大雨影响下, 仅被作物根系吸收消耗。W_1D_3 处理滴灌带间距较大, 在整个剖面的平均体积含水量相对 W_1D_1 与 W_1D_2 处理较小, 但 3 种处理之间土壤含水量变化趋势基本相同, 而 W_2 各处理因灌溉量较小, 各间距处理之间无明显差异。FI 处理经灌溉后, 整个剖面的土壤含水量增至田间持水量, 生育前期表层土壤含水量在降雨影响下长时间处于 20% 以上, 生育后期无降雨补给, 土壤含水量下降较快。

2.2　不同处理对蒸散量及土壤蒸发量的影响

图 3 所示为生育期内不同处理的日土壤蒸发量与日蒸散量变化。夏玉米进入拔节期 (7 月 9 日) 之前 FI 处理最高日土壤蒸发量为 5.38 mm, 蒸发总量为 44 mm, 显著高于地下滴灌所有处理 17 mm 的平均蒸发总量。玉米拔节期后, 所有处理的日土壤蒸发量与日蒸散量变化趋势基本相同, 随夏玉米生长发育至完全覆盖地表, 日棵间蒸发量逐渐减小, 日蒸散量在生育后期保持相对稳定。降雨后日土壤蒸发与日蒸散均有明显上升, 两者与土壤含水量有密切关系。W_1 与 W_2 各处理出苗水灌溉量相同, 生育前期表层土壤含水量基本一致, 因而各处理间土壤蒸

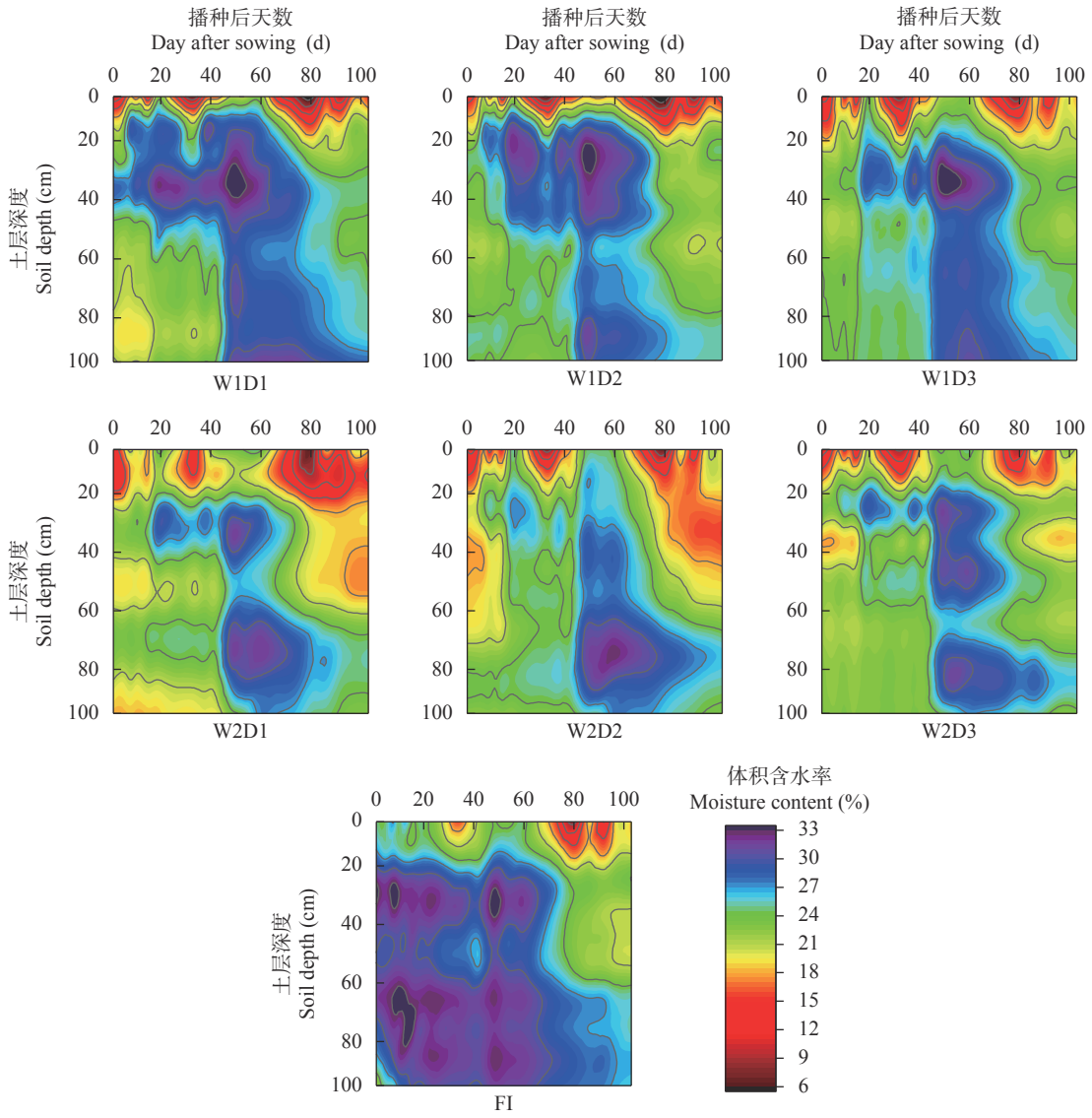

图 2 玉米生育期内不同处理 0~100 cm 土壤体积含水量随时间变化过程

Fig. 2 Variation process of 0–100 cm soil volumetric water contents with different treatments during the growth period of maize

W_1 为 62 mm 的灌溉量处理, W_2 为 35 mm 的灌溉量处理, D_1 为 60 cm 的滴灌带间距处理, D_2 为 80 cm 的滴灌带间距处理, D_3 为 100 cm 的滴灌带间距处理, FI 为地面灌溉 80 mm 处理。W_1 and W_2 indicate irrigation volumes of 62 mm and 35 mm, respectively; D_1, D_2 and D_3 indicate drip tapes spacing of 60 cm, 80 cm and 100 cm, respectively. FI indicates flood irrigation with 80 mm volume.

发量差异不明显。W_1 与 W_2 各处理灌溉定额不同, 导致后者生育前中期日蒸散量低于前者。

表 2 所示为不同处理下夏玉米蒸散量、土壤蒸发、作物蒸腾与土壤蒸发占蒸散量比值 (E/ET)。W_1、W_2 与 FI 处理之间蒸散量差异达显著水平 (P<0.05), FI 处理 ET 值最大, 为 324.22 mm。W_1 与 W_2 处理较 FI 处理分别降低 8.1% 与 15.9%。FI 处理与地下滴灌处理之间棵间蒸发量的差异同样达显著水平 (P<0.05); 与 FI 处理相比, 地下滴灌处理的土壤蒸发量降低 30%。相对于 W_2 处理, W_1 处理土壤蒸发略有增加, 但差异并不显著。地下滴灌处理可显著降低 E/ET 值, 由 FI 处理的 0.34 降低至 0.27。

2.3 不同处理对玉米生物量的影响

夏玉米株高总体变化趋势相同, 拔节期与大喇叭口期生长最迅速, 直至吐丝期株高基本定型 (图 4)。抽雄期以前地下滴灌各处理间差异不显著 (表 3), 与地下滴灌处理相比, FI 处理生长较快, 拔节期增加了约 30 cm, 大喇叭口期增加了约 50 cm。吐丝期 W_1 各处理与 FI 处理达到相同植株高度, 比 W_2 各处理显著提高了 10 cm (P<0.05)。

夏玉米叶面积指数总体变化趋势相同, 拔节期开始快速增长, 至抽雄期达最大, 随后缓慢下降, 到成熟期降到最低 (图 4)。不同生育时期内各处理差异较大, 苗期、拔节期及大喇叭口期地下滴灌各处

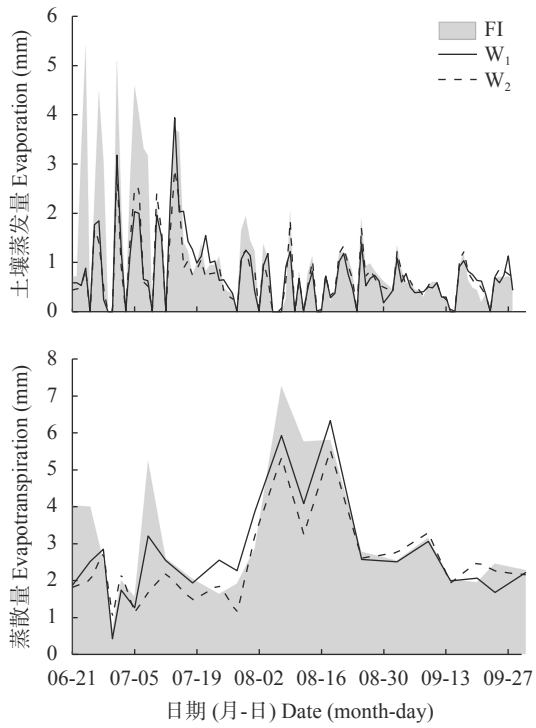

图 3　不同处理下夏玉米生育期内日土壤蒸发量和日蒸散量

Fig. 3　Daily evaporation and evapotranspiration during the growth period of summer corn under different treatments

W_1 为 62 mm 的灌溉量处理, W_2 为 35 mm 的灌溉量处理, FI 为地面灌溉 80 mm 处理。W_1 and W_2 indicate irrigation volumes of 62 mm and 35 mm, respectively. FI indicates flood irrigation with 80 mm volume.

理间 LAI 差异不显著, 大喇叭口期 FI 处理相对于地下滴灌处理显著提高 33% (P<0.05)。在生育中后期, W_1 处理与 W_2 处理出现显著差异 (P<0.05), 叶面积指数随灌溉量的增加而增大, 表现为 FI>W_1>W_2。吐丝期各处理间 LAI 差异最为显著, W_1 处理比 W_2 处理提高 7%, FI 处理的 LAI 比最小值 W_2 处理提高 16.3% (P<0.05)。

玉米地上干物质量随生长时间增加而增加 (图 4), 抽雄期、吐丝期及灌浆期的各处理之间差异显著 (P<0.05)。灌浆期 W_1 各处理平均干物质量比 W_2 处理提高 21%, FI 处理比 W_2 处理提高 40%。成熟期干物质量依次为 FI>W_1>W_2。基于 Logistic 方程拟合分析夏玉米单株干物质积累量的特征值, 地下滴灌各处理的最大相对生长速率基本相同, FI 处理比地下滴灌处理均值提高 14% (表 4)。W_1 各处理与 FI 处理的最快生长阶段基本相同, W_2 各处理最快生长开始时间延后 7~8 d, 最大生长速率出现时间延后 10 d, 结束时间延后 15 d 左右。W_2 各处理生长发育时期延后主要原因为灌溉量较低, 产生了水分胁迫, 对夏玉米生育进程造成影响, 而两次大雨补给使夏玉米后期恢复了正常生长。

2.4　不同处理对玉米产量及水分利用效率的影响

不同处理的玉米产量、水分利用效率及产量构成要素如表 5 所示。各处理间穗行数无显著差异。灌溉量对玉米行粒数影响显著 (P<0.05), W_1D_1 处理行粒数最高, W_1 处理显著大于 W_2 处理 (提高 8.2%)。地下滴灌处理与 FI 处理百粒重差异显著 (P<0.05), FI 处理百粒重最高, 相对 W_1 和 W_2 处理显著提高 16.6% 和 20.8%, 地下滴灌各处理间无显著性差异。产量随灌溉量的降低而降低, FI 处理产量最高, 大小关系表

表 2　不同处理下夏玉米蒸散量、土壤蒸发量与作物蒸腾量

Table 2　Summer corn evapotranspiration, evaporation and transpiration under different treatments

处理 Treatment		土壤储水量 Soil water storage (ΔS, mm)	蒸散量 Evapotranspiration (ET, mm)	棵间蒸发 Evaporation (E, mm)	作物蒸腾 Transpiration (T, mm)	E/ET
W_1	D_1	28.89±4.27a	293.90±4.27a	75.62±2.66b	218.28±4.07a	0.26±0.01b
	D_2	23.11±4.96a	299.68±4.96a	82.46±1.33a	217.22±5.96a	0.28±0.01a
	D_3	22.92±15.96a	299.87±15.96a	76.53±2.46b	223.34±13.62a	0.26±0.01b
W_2	D_1	20.83±14.14a	274.96±14.14a	75.997.35a	198.97±15.59a	0.28±0.03a
	D_2	22.85±12.29a	272.94±12.29a	74.43±5.30a	198.51±17.34a	0.27±0.03a
	D_3	25.94±9.26a	269.85±9.26a	73.69±10.04a	196.16±11.38a	0.27±0.04a
W_1		24.97±9.11A	297.81±9.11B	78.20±3.75B	219.61±8.21A	0.26±0.01B
W_2		23.21±10.68A	272.58±10.68C	74.70±6.84B	197.87±13.04B	0.27±0.03B
FI		8.57±5.67B	324.22±5.67A	109.34±4.65A	214.87±1.02A	0.34±0.01A
W		NS	**	NS	**	NS
D		NS	NS	NS	NS	NS
W×D		NS	NS	NS	NS	NS

W_1为62 mm的灌溉量处理, W_2为35 mm的灌溉量处理, D_1为60 cm的滴灌带间距处理, D_2为80 cm的滴灌带间距处理, D_3为100 cm的滴灌带间距处理, W代表不同灌溉量处理, D代表不同滴灌带间距处理, FI代表地面灌溉(灌溉量为80 mm)。同列同一灌溉量水平下不同小写字母表示不同滴灌带间距间差异显著(P<0.05), 同列不同大写字母表示地下滴灌不同灌水量及地面灌溉间差异显著(P<0.05)。NS表示无显著影响, *和**分别表示在P<0.05和P<0.01水平影响显著。W_1 and W_2 indicate irrigation volumes of 62 mm and 35 mm, respectively; D_1, D_2 and D_3 indicate drip tapes spacing of 60 cm, 80 cm and 100 cm, respectively. FI indicates flood irrigation with 80 mm volume. Different lowercase letters in the same column for the same irrigation level mean significant differences at P<0.05 level among different drip taps spacing treatments. Different capital letters mean significant differences at P<0.05 level among subsurface drip irrigation quotas and flood irrigation. NS means no significant effect, * and ** indicate significant effect at P<0.05 and P<0.01, respectively.

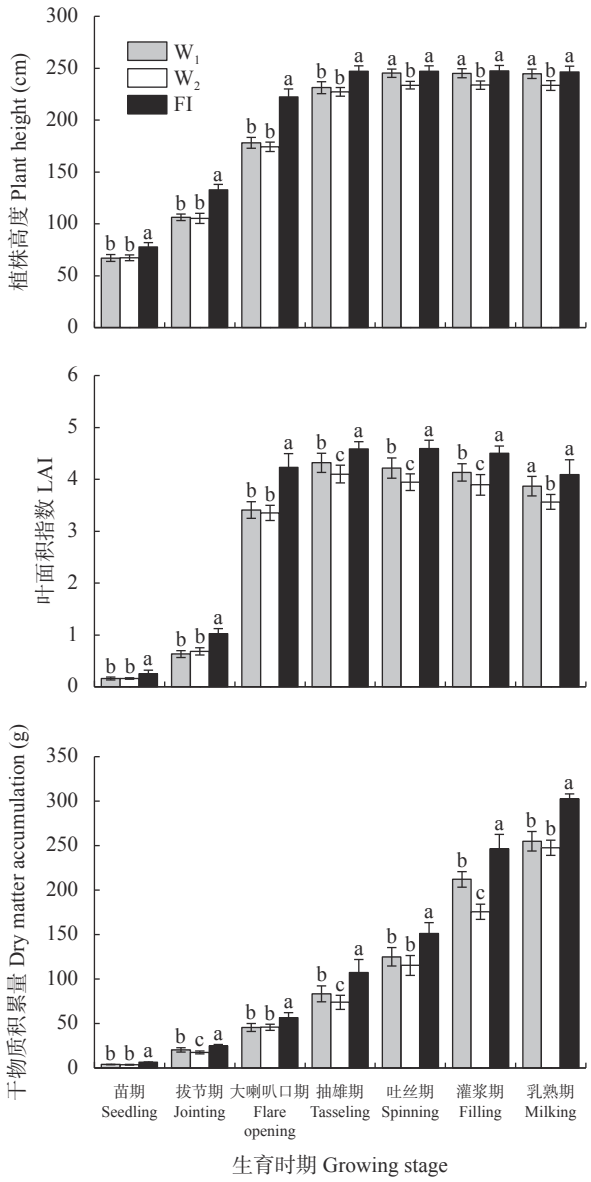

图 4 不同处理下夏玉米不同生育期株高、叶面积指数和干物质量

Fig. 4 Plant height, leaf area index and dry matter quality of summer corn at different growth stages under different treatments

W_1 为 62 mm 的灌溉量处理, W_2 为 35 mm 的灌溉量处理, FI 代表地面灌溉 80 mm 处理。不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著 (P<0.05)。W_1 and W_2 indicate irrigation volumes of 62 mm and 35 mm, respectively. FI indicates flood irrigation with 80 mm volume. Different lowercase letters mean significant differences at P<0.05 level among different treatments at the same growing stage.

现为 FI>W_1>W_2; 与 FI 处理相比, W_1 各处理产量无显著下降, W_2 各处理平均产量显著降低 15% (P<0.05)。各滴灌带间距处理间产量无显著差异。各处理间水分利用效率差异未达显著水平, W_2D_3 处理的水分利用效率最高, 为 3.08 kg·m^{-3}, FI 处理最低, 为 2.97 kg·m^{-3}。显著性分析表明灌溉量对灌溉水利用效率影响显著 (P<0.05), 减少灌溉量可显著提高灌溉水利用效率, W_2D_3 处理的灌溉水利用效率最高, 为 23.77 kg·m^{-3}, FI 处理最低, 为 12.05 kg·m^{-3}, W_1 和 W_2 各处理平均分别比 FI 处理显著提高 20% 和 93%。地下滴灌处理可有效提高夏玉米收获指数, 大小关系依次为 W_1>W_2>FI, W_1D_1 处理的收获指数最大, 为 0.531, W_1 处理比 FI 处理提高 10.7%, 差异具有统计学意义。

3 讨论

研究地下滴灌技术中灌溉量、滴灌带间距布设与夏玉米生长发育及耗水特征的响应关系, 对缓解华北典型农田区地下水超采问题具有重要的科学意义。本试验中地下滴灌出水口埋设在地下 25 cm 处, 能够将灌溉水直接输送至作物根区。W_1 各处理的土壤湿润体主要位于地下 20~60 cm, 土壤水分再分布过程中受重力势影响, 向下运移距离远大于向上运移距离, 湿润体呈现“上小下大”的形态, 与康银红等[24] 研究结果一致。滴头流速相同的情况下, 灌溉量越大、灌溉时间越长、湿润锋运移距离越大, 相较于 W_2 处理, W_1 处理相对湿润体大小增加 20 cm, 土壤体积含水量增加量相应提高[25-26]。试验中特殊的水分分布特征表明, 地下滴灌有效降低了土壤表层的土壤含水量, 形成 10 cm 左右的干土层, 为减少土壤蒸发量提供了必要条件, 这是地下滴灌技术在节水农业中的一大优势[27]。

目前地下滴灌研究中, 土壤蒸发及作物蒸腾量多通过软件计算所得[28], 而本研究通过微型蒸渗仪的手段对土壤蒸发进行了定量实测, 发现地下滴灌处理棵间土壤蒸发量显著低于 FI 处理, 降低了 30%, 可能是由于玉米生育前期土壤处于无叶片覆盖的裸露状态, 田间蒸散以棵间蒸发为主, 且 FI 处理的灌溉量较大, 地表土壤含水量较高, 相对地下滴灌处理可供土壤蒸发使用的水分更多, 从而导致了非生产性耗水增加[29]。本研究表明灌溉量对蒸散量的影响达显著水平, 而地下滴灌不同定额灌溉量下土壤蒸发量差异不显著, 蒸散量间差异主要由作物蒸腾量的不同导致, 低灌溉量使玉米产量出现显著降低, 同时作物生长发育指标均有不同程度的衰减, 结果与目前大多数研究相同[30]。

FI 处理苗期灌溉量相对地下滴灌处理高, 致使株高与叶面积指数在生育前期增加更快, 有利于提高作物产量。玉米各生育期内株高、叶面积指数与干物质积累量随灌溉量的增加而增加[31], 苗期不同的土壤含水量和全生育期内不同的灌溉总量导致了各处理间生长发育指标的差异。相对于地面灌溉方式,

表 3　不同处理下夏玉米不同生育期株高、叶面积指数和干物质量显著性分析表

Table 3　Significance analysis of plant height, leaf area index and dry matter quality of summer maize at different growth stages under different treatments

处理 Treatment		苗期 Seedling	拔节期 Jointing	大喇叭口期 Flare opening	抽雄期 Tasseling	吐丝期 Spinning	灌浆期 Filling	乳熟期 Milking
株高 Plant height	W	NS	NS	NS	NS	**	**	**
	D	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	W×D	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
叶面积指数 Leaf area index	W	NS	NS	NS	**	**	**	**
	D	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	W×D	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
干物质积累量 Dry matter accumulation	W	NS	**	NS	NS	NS	**	NS
	D	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	W×D	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

W为灌溉量处理, D为滴灌带间距处理, NS表示处理间无显著影响, *和**分别表示在$P<0.05$和$P<0.01$水平影响显著。W indicates irrigation treatments; D indicates drip tapes spacing treatments. NS means no significant effect; * and ** indicate significant effect at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 4　不同处理下夏玉米干物质积累的 Logistic 模拟特征值

Table 4　Logistic simulation eigenvalues value of dry matter accumulation of summer maize under different treatments

处理 Treatment	方程 Equation	V_m (g·d^{-1})	T_m (d)	T_1 (d)	T_2 (d)	ΔT (d)	R^2
W_1D_1	y=336.24/[1+exp(5.50−0.075T)]	6.3	73.7	56.0	91.3	35.3	0.995
W_1D_2	y=322.52/[1+exp(5.84−0.081T)]	6.5	72.5	56.1	88.8	32.7	0.997
W_1D_3	y=332.48/[1+exp(5.74−0.079T)]	6.6	72.3	55.7	88.9	33.2	0.997
W_2D_1	y=440.83/[1+exp(5.16−0.060T)]	6.6	85.5	63.7	107.4	43.7	0.997
W_2D_2	y=403.55/[1+exp(5.27−0.064T)]	6.5	82.1	61.6	102.6	41.0	0.998
W_2D_3	y=456.40/[1+exp(5.26−0.061T)]	7.0	86.1	64.5	107.7	43.2	0.998
FI	y=401.83/[1+exp(5.36−0.073T)]	7.3	73.5	55.4	91.5	36.1	0.997

W_1为62 mm的灌溉量处理, W_2为35 mm的灌溉量处理, D_1为60 cm的滴灌带间距处理, D_2为80 cm的滴灌带间距处理, D_3为100 cm的滴灌带间距处理, FI为地面灌溉80 mm处理。y表示夏玉米干物质积累量; T表示夏玉米播种后天数; V_m表示干物质最大相对生长速率; T_m表示干物质最大速率出现的时间; T_1和T_2分别为Logistic曲线的2个拐点; ΔT表示干物质快速积累持续天数。W_1 and W_2 indicate irrigation volumes of 62 mm and 35 mm, respectively; D_1, D_2 and D_3 indicate drip tapes spacing of 60 cm, 80 cm and 100 cm, respectively. FI indicates flood irrigation with 80 mm volume. y is dry matter accumulation; T is days after sowing; V_m is the maximum growth rate of dry matter, T_m is the time to the maximum rate of dry matter; T_1 and T_2 are the two inflection points of Logistic function; ΔT is the days of period of rapid accumulation of dry matter.

表 5　不同处理下夏玉米产量及水分利用效率

Table 5　Summer maize yield and water use efficiency under different treatments

处理 Treatment		穗数 Spike number (10^4·hm^{-2})	穗行数 Number of spike rows	行粒数 Spikes number	百粒重 100-seed weight (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})	水分利用效率 Water use efficiency (kg·m^{-3})	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency (kg·m^{-3})	收获指数 Harvest index
W_1	D_1	6	14.2±0.8a	39.47±1.08a	26.93±2.73a	8930±342a	3.04±0.08a	14.40±0.55a	0.531±0.020a
	D_2	6	13.5±0.8a	36.67±4.16a	29.03±1.91a	8885±79a	2.97±0.05a	14.33±0.13a	0.528±0.007a
	D_3	6	13.8±1.0a	38.34±1.46a	28.12±2.91a	9112±490a	3.05±0.32a	14.70±0.79a	0.526±0.038a
W_2	D_1	6	14.4±0.8a	35.80±0.17a	28.33±2.82a	8024±544a	2.93±0.34a	22.93±1.55a	0.491±0.051a
	D_2	6	13.7±1.4a	34.76±0.40a	26.56±3.72a	8170±329a	3.00±0.02a	23.34±0.94a	0.497±0.029a
	D_3	6	14.4±1.7a	35.20±1.68a	27.13±1.12a	8320±461a	3.08±0.07a	23.77±1.32a	0.499±0.006a
W_1		6	13.9±0.8A	38.15±2.57A	28.03±2.39B	8976±318A	3.02±0.17A	14.47±0.51B	0.529±0.022A
W_2		6	14.2±1.2A	35.26±1.03B	27.05±2.43B	8171±413B	3.00±0.19A	23.35±1.18A	0.496±0.030B
FI		6	13.7±0.4A	39.00±1.76A	32.69±2.16A	9642±266A	2.97±0.09A	12.05±0.33C	0.478±0.005B
W			NS	**	NS	**	NS	**	**
D			NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
W×D			NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

W_1为62 mm的灌溉量处理, W_2为35 mm的灌溉量处理, D_1为60 cm的滴灌带间距处理, D_2为80 cm的滴灌带间距处理, D_3为100 cm的滴灌带间距处理, FI为地面灌溉80 mm处理。W_1 and W_2 indicate irrigation volumes of 62 mm and 35 mm, respectively; D_1, D_2 and D_3 indicate drip tapes spacing of 60 cm, 80 cm and 100 cm, respectively. FI indicates flood irrigation with 80 mm volume.

地下滴灌可在作物产量相同的前提下减少灌溉量, 从而提高灌溉水利用效率[8-9]。现阶段研究多以提高生物产量[32]或作物品种遗传潜力[33]的方式提高作物收获指数, 而本研究发现地下滴灌处理收获指数相较于 FI 处理显著提高 10%, 表明地下滴灌技术同样可以有效促进生物产量向经济产量转化。

同一灌溉定额下, 60 cm、80 cm 和 100 cm 的滴灌带间距处理的蒸散量、生长发育指标与产量均无显著差异。这可能因为农田水分输入项主要由降雨和灌溉两部分构成, 而华北平原季节性降雨集中, 本研究中玉米关键生育期受强降雨影响, 掩盖了不同间距下的灌溉处理引起的水分分布空间差异, 使各处理的土壤水分分布更为均匀, 各项数据无显著差异。现阶段多数研究结果也表明, 相对于滴灌带布设间距, 灌溉量与气候条件对作物生长发育与产量的影响更大[34]。滴灌带布设参数对地下滴灌技术的应用成本及工程量影响较大, 滴灌带间距的增加可以减少成本与施工量[19-20,35]。本研究中, 在考虑布设成本与施工量的前提下, 100 cm 间距处理优于 60 cm 和 80 cm 处理。而在该区域滴灌带间距布设方案研究中, 应针对冬小麦-夏玉米轮作制度进行考量, 通过更多的田间试验探究宽间距对密植作物冬小麦的产量及生长发育指标是否有显著影响。

4 结论

1) 地下滴灌水分直接灌入作物根区, 主要停留在 20~60 cm 土层, 灌溉量越高, 湿润范围越大, 土壤含水量也越大。相对地面灌溉处理, 地下滴灌有效降低地表 0~20 cm 和 60~100 cm 的土壤含水量。

2) 玉米株高、叶面积指数与干物质积累量随灌溉量的增加而增加。地面灌溉处理玉米株高增长速率较快, 作物最大干物质量积累速率提高。地下低灌溉量滴灌 (35 mm) 对玉米造成水分胁迫, 其生育期相对地表灌溉滞后。

3) 与地面灌溉方式相比, 地下滴灌能显著降低蒸散量与土壤蒸发量, 土壤蒸发降低 30%, *E*/ET 值从 0.34 降低到 0.27。地下滴灌可在减少 22% 灌溉量的条件下保证作物产量无明显下降, 其中, 蒸散量降低 8%, 灌溉水利用效率提高 20%, 收获指数提高 10%。

4) 60 cm、80 cm 及 100 cm 3 种滴灌带间距对玉米生长发育及耗水特征无显著影响, 同一灌溉量下土壤含水量变化趋势差异不明显, 但较大的滴灌带间距可减少地下滴灌系统成本。

参考文献 References

[1] 黄峰, 杜太生, 王素芬, 等. 华北地区农业水资源现状和未来保障研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 28−37
HUANG F, DU T S, WANG S F, et al. Current situation and future security of agricultural water resources in North China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5): 28−37

[2] 刘美英, 闵雷雷, 沈彦俊. 河北平原浅层地下水位动态变化分析[J]. 中国农村水利水电, 2017, (8): 80−85
LIU M Y, MIN L L, SHEN Y J. An analysis of the dynamic variations of shallow groundwater level in the Hebei Plains[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (8): 80−85

[3] 张永强, 刘昌明, 沈彦俊. 太行山山前平原浅层地下水位动态分析——以河北省栾城县为例[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(2): 42−44
ZHANG Y Q, LIU C M, SHEN Y J. Analysis of the groundwater level change in Taihang Piedmont — A case study from Luancheng County[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001, 9(2): 42−44

[4] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880−885
KANG S Z. Towards water and food security in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 880−885

[5] 程先军, 许迪, 张昊. 地下滴灌技术发展及应用现状综述[J]. 节水灌溉, 1999, (4): 13−15, 42
CHENG X J, XU D, ZHANG H. A summary of development and application situations for subsurface drip irrigation technique[J]. Water Saving Irrigation, 1999, (4): 13−15, 42

[6] MESHKAT M, WARNER R C, WORKMAN S R. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(1): 79−86

[7] BORDOVSKY J, LYLE W M, SEGARRA E. Economic evaluation of texas high plains cotton irrigated by lepa and subsurface drip[J]. Texas Journal of Agricultural and Natural Resources, 2000, 13: 67−73

[8] MARTÍNEZ-GIMENO M A, BONET L, PROVENZANO G, et al. Assessment of yield and water productivity of clementine trees under surface and subsurface drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 206: 209−216

[9] MUHAMMAD U, TABASSUM H, JIANG H B, et al. Water-saving potential of subsurface drip irrigation for winter wheat[J]. Sustainability, 2019, 11(10): 2978

[10] AYARS J E, FULTON A, TAYLOR B. Subsurface drip irrigation in California — Here to stay?[J]. Agricultural Water Management, 2015, 157: 39−47

[11] 张和喜, 袁友波, 舒贤坤, 等. 地下滴灌条件下土壤水分运动研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(8): 3277−3279
ZHANG H X, YUAN Y B, SHU X K, et al. Experimental study on soil-water movement under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(8): 3277−3279

[12] VALENTÍN F, NORTES P A, DOMÍNGUEZ A, et al. Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler, superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment[J]. Irrigation Science, 2020, 38(1): 105−115

[13] 孙章浩, 黄令淼, 杨培岭, 等. 地下滴灌灌水下限与灌水器流量对冬小麦生长发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(11): 41−50
SUN Z H, HUANG L M, YANG P L, et al. Effect of lower irrigation limit and emitter flow on winter wheat growth under subsurface drip irrigation[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(11): 41−50

[14] CALDWELL D S, SPURGEON W E, MANGES H L. Frequency of irrigation for subsurface drip-irrigated corn[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(4): 1099−1103

[15] 廉喜旺. 阿勒泰地区地下滴灌条件下苜蓿滴灌带布设方式及

高效用水研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014
LIAN X W. Study on water efficiency and the laying of drip tape under the condition of underground drip irrigation of alfalfa in the areas of Altay[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014
[16] SIDHU H S, JAT M L, SINGH Y, et al. Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: a breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2019, 216: 273−283
[17] ENCISO J, JIFON J, WIEDENFELD B. Subsurface drip irrigation of Onions: Effects of drip tape emitter spacing on yield and quality[J]. Agricultural Water Management, 2007, 92(3): 126−130
[18] 李兴强, 孙兆军, 曾玉霞, 等. 地下渗灌不同埋深对大田茄子产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2020, (5): 27−31
LI X Q, SUN Z J, ZENG Y X, et al. Effects of different buried depths on yield and water use efficiency of eggplant under underground infiltration irrigation condition[J]. Water Saving Irrigation, 2020, (5): 27−31
[19] GRABOW G L, HUFFMAN R L, EVANS R O, et al. Water distribution from a subsurface drip irrigation system and dripline spacing effect on cotton yield and water use efficiency in a coastal plain soil[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6): 1823−1835
[20] CAMP C R, BAUER P J, HUNT P G. Subsurface drip irrigation lateral spacing and management for cotton in the southeastern coastal plain[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(4): 993−999
[21] SUN H Y, LIU C M, ZHANG X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 211−218
[22] 雷钧杰, 张永强, 赛力汗·赛, 等. 施氮量对滴灌冬小麦干物质积累、分配与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1078−1086
LEI J J, ZHANG Y Q, S·SAI, et al. Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, distribution and translocation of winter wheat under drip irrigation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(8): 1078−1086
[23] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1−8
XIE G H, HAN D Q, WANG X Y, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 1−8
[24] 康银红, 马孝义, 李娟, 等. 地下滴渗灌灌水技术研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6): 34−40
KANG Y H, MA X Y, LI J, et al. Research and development on subsurface drip irrigation technique[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(6): 34−40
[25] 王炳尧, 韦伟, 刘立超, 等. 直插式地下滴灌土壤湿润体特征值变化规律及灌溉效果分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 1−10
WANG B Y, WEI W, LIU L C, et al. Water movement and its potential for uptake by roots under plug-in subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 1−10
[26] 王荣莲, 张智超, 嘉晓辉, 等. 地下滴灌水分运移规律及滴灌带适用性初步研究[J]. 节水灌溉, 2017, (10): 31−34
WANG R L, ZHANG Z C, JIA X H, et al. A preliminary research on water movement rule under subsurface drip irrigation and applicability of drip irrigation belt[J]. Water Saving Irrigation, 2017, (10): 31−34
[27] 杨明达, 关小康, 白田田, 等. 不同滴灌模式对土壤水分空间变异及夏玉米生长的影响[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(1): 1−7
YANG M D, GUAN X K, BAI T T, et al. Effect of different drip irrigation modes on spatial distribution variance of soil water and summer maize growth[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016, 50(1): 1−7
[28] PHOGAT V, SKEWES M A, MCCARTHY M G, et al. Evaluation of crop coefficients, water productivity, and water balance components for wine grapes irrigated at different deficit levels by a sub-surface drip[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180: 22−34
[29] 孙宏勇, 刘昌明, 张喜英, 等. 华北平原冬小麦田间蒸散与棵间蒸发的变化规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 62−64
SUN H Y, LIU C M, ZHANG X Y, et al. The changing laws of the diurnal evapotranspiration and soil evaporation between plants in the winter wheat field of the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(3): 62−64
[30] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454−1464
ZHANG X Y. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1454−1464
[31] 霍轶珍, 王文达, 韩翠莲, 等. 河套灌区灌溉定额对膜下滴灌玉米生产性状及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 182−187
HUO Y Z, WANG W D, HAN C L, et al. Effects of irrigation quota on maize yield traits and water use efficiency under mulched drip irrigation in Hetao Irrigation District[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 182−187
[32] 王志敏, 方保停. 论作物生产系统产量分析的理论模式及其发展[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(1): 1−7
WANG Z M, FANG B T. A review on theoretical models and development of yield analysis in crop production system[J]. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(1): 1−7
[33] 刘兆丽, 王建林. 施肥对小麦产量结构的影响[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2008, 25(3): 189−192
LIU Z L, WANG J L. Effect of fertilization on the yield structure of winter wheat[J]. Journal of Qingdao Agricultural University: Natural Science, 2008, 25(3): 189−192
[34] MURLEY C B, SHARMA S, WARREN J G, et al. Yield response of corn and grain *Sorghum* to row offsets on subsurface drip laterals[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 357−362
[35] SEIDEL S J, SCHÜTZE N, FAHLE M, et al. Optimal irrigation scheduling, irrigation control and drip line layout to increase water productivity and profit in subsurface drip-irrigated agriculture[J]. Irrigation and Drainage, 2015, 64(4): 501−518