

浅埋滴灌土壤水分变化特征及作物耗水规律

张洁¹, 马鹏飞², 吴素利², 李生众³, 李敏³, 朱永华¹, 邢英英¹

(1.延安大学生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2.通辽市水利技术服务中心,
内蒙古 通辽 028000; 3.通辽市科尔沁区河湖灌区管护中心, 内蒙古 通辽 028000)

摘要:为探明玉米节水增粮的浅埋滴灌灌溉模式,于 2021 年在内蒙古通辽市开展田间种植试验。按作物各生育期设置低水(W1=125.4 mm)、中水(W2=153.6 mm)、高水(W3=166.8 mm)不同定额灌水水平,以滴灌 100%水量为对照(CK=179.8 mm),分析不同处理下土壤水分变化特征及对作物耗水量、水分利用率及植株生长的影响。结果表明:0—60 cm 耕作土层土壤含水率随灌水量增加而变化明显;随着生育期的推进,在拔节期至灌浆期,土壤含水量均呈下降趋势。玉米作物耗水量整体存在差异,表现为 CK>W3>W2>W1。玉米生长特征变化趋势差异较大,W2 处理的株高、茎粗和叶面积指数最高;各生育期玉米耗水量总体变化呈波动变化趋势,在拔节期—抽雄期达到峰值。玉米产量不随灌水量增大而增加,处理 W2 玉米产量最高,较 CK 处理增产 5.65%,且水分利用率最大,为 3.48 kg/m³。在进一步优化节水技术之前,浅埋滴灌 W2 处理为灌水最佳方案。研究结果可为我国半干旱地区玉米节水灌溉提供参考。

关键词:浅埋滴灌;土壤含水量;水分利用系数;生长特征;产量

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0111-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.015

Study on Characteristics of Soil Water Change and Law of Crop Water Consumption Under Shallow Buried Drip Irrigation

ZHANG Jie¹, MA Pengfei², WU Suli², LI Shengzhong³, LI Min³, ZHU Yonghua¹, XING Yingying¹

(1.College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000;

2.Water Conservancy Technology Extension Station, Tongliao, Inner Mongolia 028000;

3.Management and Maintenance Center of Hehu Irrigation District, Tongliao, Inner Mongolia 028000)

Abstract: In order to find out the shallow buried drip irrigation mode of saving water and increasing grain yield of maize, field planting experiments were carried out in Tongliao City, Inner Mongolia in 2021. Based on different irrigation levels of low water (W1=125.4 mm), medium water (W2=153.6 mm) and high water (W3=166.8 mm), as well as 100% water volume of drip irrigation as control (CK=179.8 mm), the characteristics of soil water change under different treatments and their effects on crop water consumption, water use efficiency and plant growth were analyzed. The results showed that the water content of 0—60 cm cultivated soil changed significantly with the increase of irrigation water; With the development of the growth period, the soil water content decreased from jointing stage to filling stage; The water consumption of corn crops is different as a whole, as CK > W3 > W2 > W1; The variation trend of maize growth characteristics was quite different, and W2 treatment had the highest plant height, stem diameter and leaf area index; The overall change of water consumption of maize in each growth period showed a fluctuating trend, reaching the peak in JT growth period; The yield of maize did not increase with the increase of irrigation amount. The yield of maize in W2 treatment was the highest, 5.65% higher than that in CK treatment, and the water use efficiency was the highest, 3.48 kg/m³. Before further optimizing water-saving technology and membrane pollution, W2 treatment of shallow buried drip irrigation may be the appropriate method for farmers. The research results can provide reference for water-saving irrigation of corn in semi-arid areas of China.

收稿日期: 2023-04-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(42107379); 陕西省科学技术厅项目(2023JCYB449); 通辽市科技计划项目(TLYF2021004)

第一作者: 张洁(1984—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zj@yau.edu.cn

通信作者: 邢英英(1985—), 女, 陕西延安人, 博士, 副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xingyingying610624@163.com

Keywords: shallow buried drip irrigation; soil moisture content; water use coefficient; growth characteristics; yield

环境变化下水资源改变对人类赖以生存的条件与人类发展的生产要素起着至关重要的作用^[1]。党的十八大以来,生态环境保护受到前所未有的重视,特别是“绿水青山就是金山银山”生态理念的贯彻与执行。水作为生态系统的重要因子,是社会经济发展中重要的战略资源,在促进农业现代化发展中更是必不可少的环境资源。随着全球环境变化对水文过程的变化,水资源供需之间的矛盾日益突出。我国的农业灌溉用水量占比达 50% 以上,而农田灌溉水有效利用系数仅为 0.554,高效节水灌溉率低至 25% 左右,远低于国际先进水平^[2]。

20 世纪 60 年代,研制滴灌技术是提高水分利用效率和产量的方法之一,全世界都在普遍推广应用中^[3-4]。同样,作为我国农业广泛采用的节水技术,滴灌技术由点及面,从 20 世纪 70 年代发展至今,已成为滴灌技术推广发展较成熟的国家之一^[5-7]。滴灌有多种形式,其中膜下滴灌是最常用的方法,并已证明其具有较高的节水功能,诸如,覆盖可以减少土壤蒸发,减缓施肥初期硝态氮向下迁移速度^[8],并增加作物产量和肥料利用效率^[9]。虽然,地膜覆盖有利于半干旱地区农业生产,但长期使用地膜会产生大量地膜残留物,污染土壤和环境。浅埋滴灌系统是另一种滴灌方法,近年来,浅埋滴灌已逐渐取代膜下滴灌,成为我国北方半干旱地区一种常见的灌溉方式。通过系统性试验研究^[10-11]表明,浅埋滴灌技术适宜中国北方春玉米节水灌溉模式,明确此模式下双作物系数模型参数对作物蒸散发耗水结构及水分传输过程的影响^[12]。在西辽河平原浅埋滴灌条件下,不同肥料对农作物生长及肥料利用率存在显著影响作用^[13-14]。尽管学者们对浅埋滴灌模式的适用性进行讨论,但由于区域水热条件差异,诸如降水、气温、土壤水含量等,导致作物生长特征和水肥耦合结构存在差异^[15-17]。因此,不同水热条件下作物用水机理研究势在必行,也是未来进行科学种植,特别是技术推广的基础。目前,浅埋滴灌技术作为新兴节水技术,相关研究基础薄弱、研究方向较单一、缺乏系统深入研究。

通辽地处中国北方农牧交错带,部分地区地表水使用过量,季节性断流,地下水超采严重,形成降落漏斗,水资源短缺严重威胁着区域粮食安全^[18]。浅埋滴灌方式是解决区域农业水问题有效途径之一。因此,采用田间试验方法,设置不同供水水平对浅埋滴灌玉米各阶段生长特征进行研究,对比不同供水处理

下玉米生育指标及产量差异。结果旨在为相似地区玉米浅埋滴灌研究提供数据支撑,为浅埋滴灌技术发展推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2021 年在通辽市科尔沁区(43°22′—43°58′N, 121°42′—123°02′E)试验站开展,位于松辽平原西部边缘。区域年降水量为 200~400 mm,年内分配差异性显著,春季降水量仅占全年的 13%,而夏季降水量占全年的 69%。年平均风速为 3~4 m/s,冬、春季节为大风多发季节,年平均气温 5~6℃。区域地表水资源匮乏,灌溉用水以地下水为主。

试验区耕作层 0—30 cm 为壤土,30—85 cm 为黏土,85—100 cm 为黏土含砂层;耕作层容重 1.28 g/cm³,孔隙度 49.9%,田间持水量(体积含水率)35.8%。耕作层土壤有机质含量为 24.5 g/kg,全氮、总磷及全钾含量分别为 0.116%,0.057% 和 2.36%,有效磷及速效钾含量分别为 15.0,162 mg/kg,pH 为 7.8。

1.2 试验方案

依据水利部发布的《灌溉试验规范(SL 13—2015)》^[19],确定旱作物灌溉制度试验方法,并以土壤含水率占田间最大持水量的百分比作为灌溉下限控制指标,依据公式(1)计算出不同处理各生育期灌水定额。

$$M=0.1p\gamma H(\theta_{\max}-\theta_{\min}) \quad (1)$$

式中: M 为灌水定额(mm); p 为滴灌计划土壤湿润比(%),为 60%; H 为计划湿润层深度,计划湿润层根据根系深度设置为播种—出苗 20 cm,出苗—拔节 40 cm,拔节—成熟 70 cm; γ 为计划湿润层干容重(g/cm³); $\theta_{\max}$ 为土壤质量含水率上限(%); $\theta_{\min}$ 为灌水前实测土壤质量含水率(%)。土壤含水率接近下限时灌水,灌水上下限为土壤含水率占田间持水量百分比。

试验基于灌水定额,设置 3 个灌水水平:低水($W_1=125.4$ mm)、中水($W_2=153.6$ mm)、高水($W_3=166.8$ mm),以滴灌 100% 水量为对照($CK=179.8$ mm),共 4 个处理,每个处理 3 个重复,共 12 个小区,每个小区净面积为 8 m×80 m=640 m²,即为 0.064 hm²,总面积 0.77 hm²。作物分别于 2021 年 5 月播种,9 月底收获。播种前对试验区灌水约 40 mm,播种—苗期(SS)周期为 10 天,苗期—拔节(SJ)期周期为 24 天,拔节—抽雄(JT)期周期为 35 天,抽雄—灌浆(TF)周期为 25 天,灌浆—成熟期(FG)周期为 35 天,共计 119 天。

2021 年度各处理灌水上下限设计见表 1。

表 1 试验处理设计

单位: %

处理	$\theta/\theta_{\text{田间持水量}}$				
	播种—出苗(SS)	出苗—拔节(SJ)	拔节—抽雄(JT)	抽雄—灌浆(TF)	灌浆—成熟(FG)
低水(W1)	25~30	80~65	85~70	85~70	80~65
中水(W2)	25~30	85~65	90~70	90~70	85~65
高水(W3)	25~30	90~65	95~70	95~70	90~65
对照(CK)	35	100~65	100~70	100~70	100~70

灌溉试验采用田间小区对比试验,试验作物为玉米“京科 968 号”。依据《露地玉米浅埋滴灌技术规程(DB15/T 1382—2018)》^[20]要求,采用玉米浅埋滴灌铺带播种一体机,1 次完成施肥、铺带、播种、镇压作业。滴灌带埋于地下 3 cm 处,浅埋滴灌滴头间距 30 cm,滴头流量 1.38 L/h。种植模式应采用大小垄种植,垄距为 80+40 cm,株距为 25.0 cm,种植密度为 67 000 株/hm²左右。施肥水平参考当地农民施肥平均水平,浅埋滴灌底肥为配方肥 374.8 kg/hm²,一体化农机播种时施入。拔节、抽雄、灌浆前各追施 1 次尿素(TN≥46%),总计 374.8 kg/hm²,溶于水肥一体化施肥罐随水滴施。农机农艺配套措施、病虫害害均按照当地农户实施方式进行田间管理,试验年灌溉水量见表 2。

表 2 不同处理玉米全生育期各阶段灌水量

单位: mm

生育阶段	播种—苗期(SS)	苗期—拔节(SJ)	拔节—抽雄(JT)	抽雄—灌浆(TF)	灌浆—成熟(FG)	合计
日期(月-日)	05-07—05-17	05-18—06-15	06-16—07-20	07-21—08-14	08-15—09-30	05-07—09-30
低水(W1)	54.0	0	39.5	16.9	15.0	125.4
中水(W2)	53.0	0	50.0	35.6	15.0	153.6
高水(W3)	52.5	0	53.3	48.0	13.0	166.8
对照(CK)	55.5	0	57.8	51.6	15.0	179.8

1.3 测定指标与方法

1.3.1 气象指标 气象资料采用当地气象站 2021 年 5—9 月日尺度数据见表 3。

年内试验区玉米生长季各月降水分布见图 1a。2021 年,玉米生育期内有效降雨量为 280.2 mm,播种—苗期、苗期—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期与灌浆—成熟期降水量分别为 19.8,71.0,103.2,66.3 和 19.9 mm。

表 3 试验区 2021 年玉米生长季各月气象指标值

月份	月平均最高气温/℃	月平均最低气温/℃	月平均气温/℃	月降水量/mm	月平均风速/(m·s ⁻¹)	月平均日照时间/h
5	24.1	11.0	17.3	53.6	2.8	7.4
6	29.0	17.4	23.1	79.3	2.6	9.1
7	31.0	20.6	23.4	71.8	2.1	8.2
8	28.3	18.5	17.1	79.6	2.2	6.8
9	22.4	12.9	23.3	0	2.5	5.3

由气象数据计算 ET_0 方法用 FAO 的 Penman-Monteith 方法^[21]估算。Penman-Monteith 公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散发速率(mm/d); R_n 为净辐射[MJ/(m²·d)],通常不易得到,可从日辐射强度计观测的短波辐射或从日照计观测的(平均)日实际阳光照射时间(每天小时)数据计算得到; G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)]; T 为空气温度(℃); U_2 为高度 2 m 处风速(m/s); Δ 为蒸气压曲线斜率(kPa/℃); γ 为湿度常数(kPa/℃); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。

根据实测数据计算 2021 年 5—9 月逐日 ET_0 ,见图 1b,可知试验区玉米生育期内 ET_0 变化范围为 1.38~8.68 mm/d。

由于地表覆盖、冠层特性、作物空气动力阻力与参照作物完全不同,所以作物腾发量(ET)与参照腾发量(ET_0)明显不同。区分大田作物和参照作物各种特性影响腾发的差异已被整合到(K_c)中,公式为:

$$ET = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中: ET 为作物腾发量(mm/d); ET_0 为参照腾发量(mm/d); K_c 为作物系数(无量纲),播种—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期、灌浆—成熟期取值分别为 0.59,1.03,1.6,0.41^[22]。

经计算本试验充足供水条件下 ET 值为 568.10

mm, 其生长期内趋势变化见图 1b。

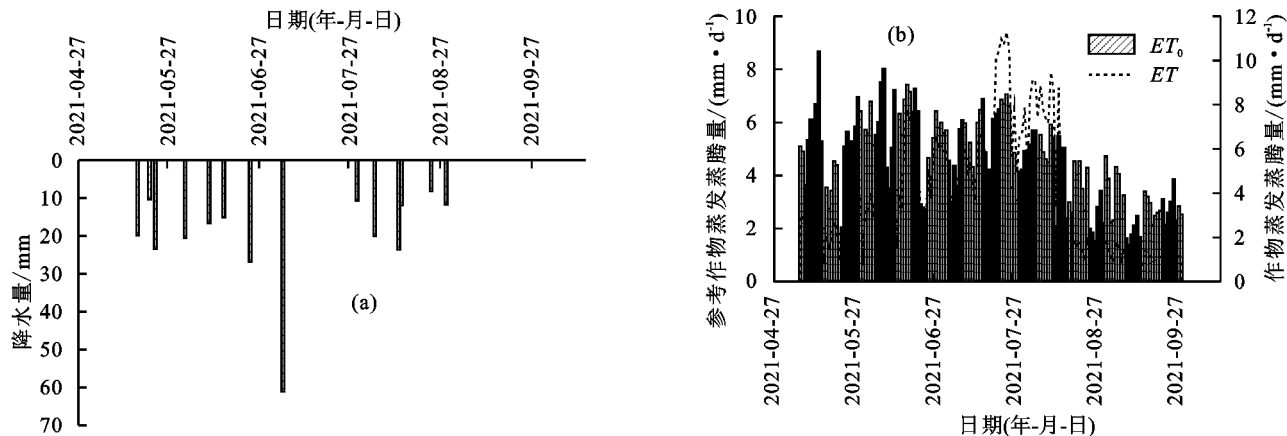


图 1 试验区作物生长季降水、参考作物蒸腾蒸发量及作物蒸腾蒸发量

1.3.2 土壤指标 土壤含水量采用烘干法和自动监测仪相结合测定, 监测不同处理各生育期试验地土壤含水率(%)。即试验区内各供水处理区安装土壤一体化墒情监测仪 1 套, 0—100 cm 土层每 10 cm 为 1 层, 共 10 层; 并利用自制旋柄式土钻取土, 0—100 cm 土层每 20 cm 1 层, 共 5 层。试验区各处理 3 次重复, 每次分别取各处理 3 个重复小区, 每个小区取 2 个点, 取平均值。每 7 天取土 1 次, 灌水前后、降雨前后及生育期始末加密观测。

1.3.3 作物指标 从播种开始记录播种时间、出苗时间、出苗情况和各生育阶段起止时间、最终收获时间。依据水利部发布的《灌溉试验规范(SL 13—2015)》^[19], 测定作物株高、茎粗、叶面积指数及产量等指标。株高为植株根部到所有器官最长点; 茎粗为茎基部周长; 产量为每个处理 3 个重复各取 1 个样点, 每个样点取 10 m 单行, 去除空杆和缺苗, 记录株数, 横向测 10 m 宽度, 测平均行距, 计算理论和实际亩株数。在样点内连续取 10 个正常植株果穗, 剔除其中小弱病株、杂株及病虫危害植株, 在茎内顺延取正常植株果穗补足至 10 穗, 称鲜重。

大田作物水分利用效率 WUE , 其公式为:

$$WUE = Y_d / ET \quad (4)$$

式中: WUE 为水分利用效率(%); Y_d 为玉米产量(kg/hm^2); ET 为耗水量(mm)。

1.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析, 利用 Excel 2010 和 Origin 86 软件进行数据处理及绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理各生育阶段土壤水分变化特征分析

西辽河流域的通辽平原区农业土壤含水量受多种因素影响, 其中降水量和灌水量是最主要因素。由图 2 可知, 不同处理下作物全生育期土壤含水率变化不同。随着土层深度增加, 土壤质量含水率变化幅度具有明显

差异性, 40 cm 以上浅层变化最明显, 范围为 10%~40%, 其次为 40—100 cm 以下深层, 范围为 30%~45%。

从玉米各生育阶段以及不同土层深度来看, 在播种—拔节期, 0—60 cm 土层各处理含水量整体差异不显著, 表现为 $W2 > W1 > W3 > CK$, 其中 0—20 cm 土层处波动幅度较大, 各处理 60—100 cm 土层土壤含水量值差异较大, 但整体趋势变化平稳, $W1$ 最大, 而 $W3$ 最小, 说明试验区作物在该阶段主要吸水层为浅层(0—20 cm), 且浅层(0—60 cm)土壤水受降水与灌溉水的影响明显。在拔节—灌浆期, 各处理土壤含水量整体呈减少趋势, 各处理 0—60 cm 土层土壤含水量整体差异不显著, 表现为 $W1$ 、 $W2$ 和 $W3$ 变化范围与趋势相近, 略高于 CK ; 而 60—80 cm 土层各处理波动幅度减少, 差异性增加, $W1$ 较低, $W3$ 较高, $W2$ 减少趋势明显; 80—100 cm 土层处各处理波动幅度小, 趋势与上一生长期相似。该结果说明试验区玉米在该生育阶段各生长特征达到最大, 作物需水量较大, 其次有较大的降水和灌溉, 是土壤含水量下降且波动的主要原因, 且 40—60 cm 土层是作物的根系稳定吸水层, 60—80 cm 土层为过渡层。在灌浆—成熟期, 试验区作物以趋于成熟, 发育减缓, 试验区降水与灌水量减少, 所以各处理土壤含水量整体表现为递减趋势, 但变化趋势不明显, 差异性较小。

随着生育期的推进, 自拔节期至灌浆期, 各处理条件下不同土层土壤含水量均呈下降趋势, 较其他生育期变化趋势更加明显。由不同处理下灌水和降水后土壤含水率变化情况可以发现, 灌水前后和降水前后土壤含水率均有明显的降低或增加过程, 反映出不同时间点的灌水量与降水的变化情况, 中层土壤含水量变化趋势逐渐趋于平缓。原因为上层土壤对气候因子变化敏感; 下层土壤受扰动较少, 通气透水性不良, 影响物质与能量交换, 且其与降水和灌水量的关系不明显。结果表明, 研究区作物的用水范围主要围

绕中层附近,水分胁迫时,上层土壤含水量受影响较大,与区域降水关系更为复杂。

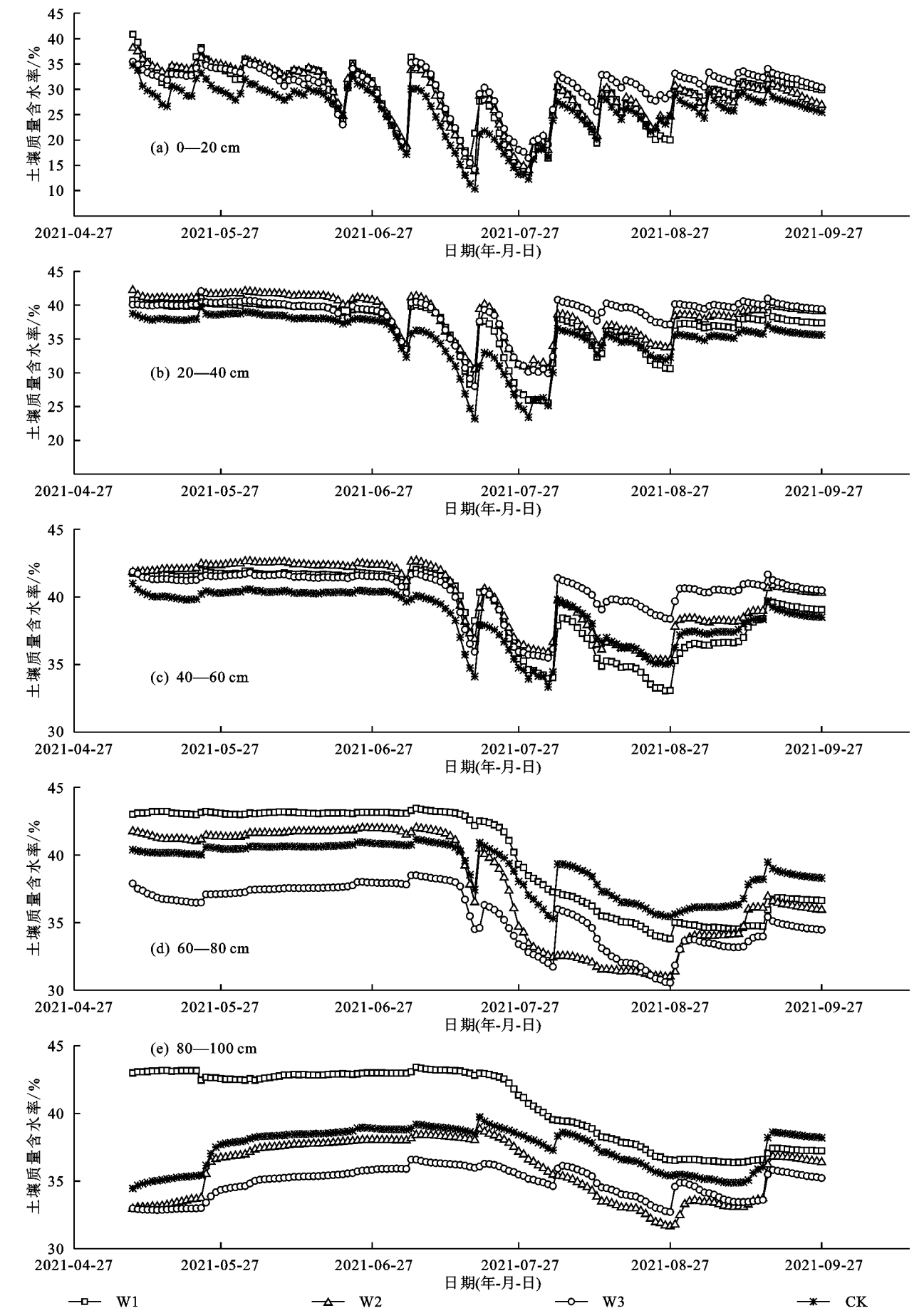


图 2 不同处理下供水水平与土壤含水率

2.2 不同处理各生育阶段作物生长指标变化分析

浅埋滴灌的不同供水水平将影响作物对水分的利用策略,导致土壤水含量、肥料及微生物群落等因子产生变化,进而影响作物的生长。在这种综合作用的交互影响下,不同供水水平的浅埋滴灌使玉米生长产生差异,不同处理下玉米作物生长特征变化见图 3。

由图 3a 可知,不同处理条件下作物株高与茎粗变化。不同处理下玉米株高和茎粗差异性较小,仅 W1 条件下茎粗与其他处理下茎粗差异显著。然而,通过对照分析可知,W1、W2、W3 的玉米生育期平均株高和茎粗分别比 CK 变化为-1.0%、2.6%、1.8%和-7.8%、1.5%、-1.1%,表现为适中供水水平(W2)对玉米生长存在促进作用,过高(W3)或过低(W1)供

水水平下玉米株高和茎粗值反而略有下降。

由图 3b 可知,生育期内不同供水水平对玉米叶面积指数(LAI)的影响。随着玉米植株生长,不同处理条件下玉米生育期内 LAI 指数值均呈“正弦函数”形式增加。SS~SJ 期间,作物增长速度较快;SJ~JT 时期,玉米由营养生长进入生殖生长,叶片增长速度降低;JT~TF 时期,叶片达到最大,各处理叶面积指数为 4.97~5.17;TF~FG 时期叶片开始变黄萎缩,叶面积指数降低。不同供水水平对玉米 LAI 指数影响较大,W1、W2、W3 的玉米生育期最高 LAI 指数值分别比 CK 增加 2.2%、0.9%、4.1%,表现为高水平供水量处理(W3 和 CK)促进作物蒸发蒸腾,更益于植被进行光合作用。

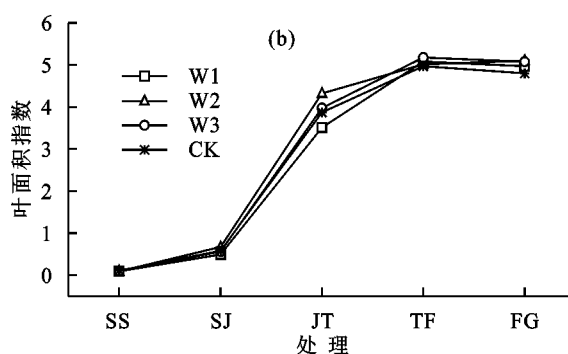
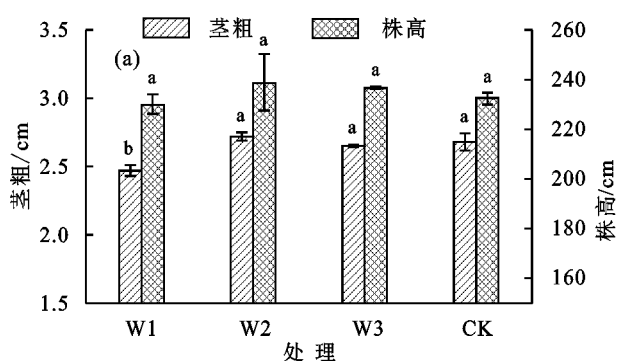


图 3 不同处理下作物生长特征

2.3 不同处理作物产量及各生育阶段耗水规律分析

不同处理条件下玉米产量变化见图 4a,通过与 CK 处理相比较,W2 增产 5.65%,W1 和 W3 分别减产 20.2%、2.8%,表现为过高(W3)或过低(W1)供水水平下玉米产量值反而下降。与此同时,对研究区内浅埋滴灌各处理产量进行单因素方差分析可知,各处理间存在一定差异性,主要体现在 W2、W3 和 CK 三者差异不显著,但与 W1 相比,在 5% 水平上均存在着差异显著性。该结果说明水分缺失对产量影响明显,而灌水量的增加不会使产量持续增加,甚至会出现小幅的产量下降。研究表明 W2 更适宜作物增产。

研究期内,不同处理下作物各生育阶段耗水量

见图 4b。不同处理下玉米耗水量分别为 404.6 mm (W1),433.8 mm (W2),449.5 mm (W3),460.0 mm (CK)。不同处理下作物耗水量变化为 404.6~460.0 mm,变幅差为 0~55.4 mm,表现为 CK>W3>W2>W1。从生育期角度出发,耗水量不同处理下播种—苗期(SS)、苗期—拔节期(SJ)和灌浆—成熟期(FG)耗水量差异性较小,而拔节—抽雄期(JT)和抽雄—灌浆期(TF)差异性明显,说明水分条件是作物在该阶段生长的关键性因子。各生育期耗水量总体变化呈波动变化趋势,在 JT 阶段达到峰值,表现为 JT>TF>SS>SJ>FG。表明 W2 处理下作物耗水量偏低。

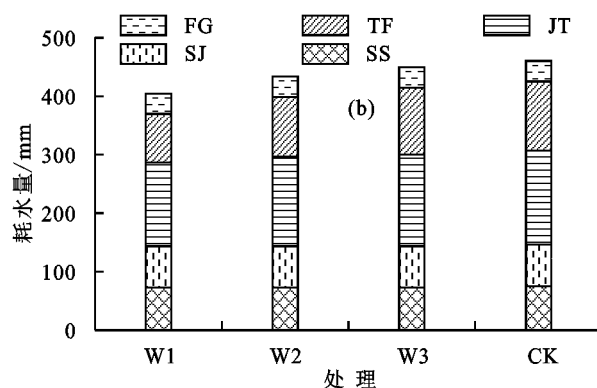
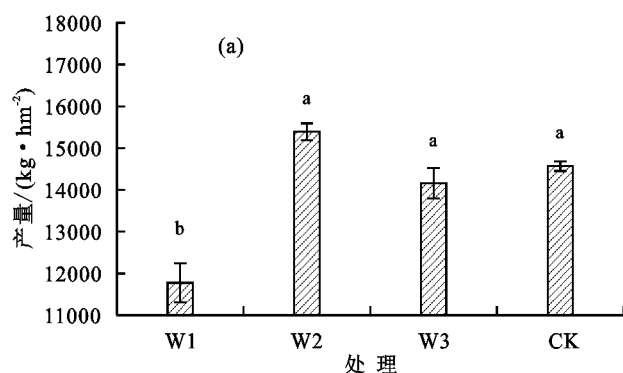


图 4 不同处理下作物产量及耗水量

2.4 不同处理下作物水分利用率分析

由表 4 可知,浅埋滴灌下各处理水分生产率(WUE)特征。W2 处理下 WUE 值最高,为 3.55 kg/m³,W1 处理最低,W3 和 CK 较 W2 偏低,但相差的变化范围相对较小。说明在一定范围内,增加灌水量可提高水分生产率,即当水分生产率已达到最大值时,产量仍随需水量增加而增大,但增大到一定程度后导致减产,使水分生产率呈现下降趋势。

表 4 浅埋滴灌下作物水分生产率

处理	需水量/ mm	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分生产率/ (kg·m ⁻³)
W1	404.60	785.19	2.91
W2	433.80	1026.16	3.55
W3	449.50	943.77	3.15
CK	460.00	971.30	3.17

3 讨论

3.1 供水量对土壤含水量的影响

土壤含水量变化特征与作物对水分与养分的吸收利用有关,浅埋滴灌灌水量及降水量对土壤含水量变化有较大影响。本研究表明,随着供水量增加,0—40 cm 浅层土壤含水量随之变化明显。其中单次供水量较大时,土壤各层含水量迅速增加(如 2021 年 7 月 4 日强降水,7 月 17 日高水平灌溉量),供水强度大使其迅速入渗到土壤深层,补给 10—60 cm 土层土壤含水层。而单次供水量较小时,降水仅对 0—40 cm 浅层土壤水有影响,且试验区 25—80 cm 土层为黏土,该土壤具有质地黏重、孔隙小、通透性差等特性。因此,小强度供水并不能很快补给至深层土壤,而仅对浅层土壤含水量有影响(2021 年 6 月 15 日、8 月 14 日的降水,8 月 3 日、8 月 27 日的低水平灌溉),与孙耀民等^[23]在引黄畦灌冬小麦研究结果相似,即耕作浅层土壤土质疏松,土壤渗透率好,而深层土壤相对通气透水性不良,进而影响土壤物质与能量的交换。从生育期角度出发,7 月初至 8 月底,试验站玉米处于拔节期至灌浆期,各水分处理下土壤含水量均呈下降趋势,且供水量越充足,土壤含水量随玉米生长而降低愈加明显。该结果可能与作物相关的蒸散发等因素存在关系^[24],但从水分利用系数分析结果可知,W2 处理 WUE 值最高,证明供水水平与土壤含水量间关系更为复杂,应从作物生理指标,如叶面积、气孔发育指数和根系分布^[25]等方面进行研究分析。

3.2 不同供水水平对玉米生长和产量的影响

关于供水水平对作物生长和产量的影响,众多学者^[26-27]做了大量研究,且大多表明合理的供水水平能

够满足作物生长及增产要求。本研究表明,作物生长与产量增加具有一定差异性,表现为生长特征值和耗水量与产量不成正比,说明促使玉米生长的水分对产量的影响有限,从不同处理产量间变化不显著结果也可得到证实。该结果与谢小清等^[28]、黄悦等^[29]和吴宣毅等^[30]研究结果相近。本研究发现,随着供水水平提升,玉米生长特征值随之提高,说明充足或过量供水对作物生长起到促进作用,但作物耗水量也依次增加,加剧用水矛盾。若不考虑生长特征变化,水分亏缺或过量均不利于玉米产量增加和水分利用率提升,仅浅埋滴灌条件下 W2 处理更益于作物用水策略及增产要求,其产量与水分利用率变化值较 CK 处理下提升达 5.65%,12.0%,均高于其他各处理。原因是播种—苗期(SS)、苗期—拔节期(SJ)时玉米生长特征不明显,地表裸露面积大,在研究区独特的水文过程中具有较大的蒸发量,此时各处理耗水量差异性较小,变化范围为 143.8~146.3 mm,说明在相同条件下,增大灌水量可以增加湿润层深度,供给根系吸水。玉米作物生长关键的拔节—抽雄期(JT)和抽雄—灌浆期(TF)时,玉米由营养生长转为生殖生长,LAI 指数升至最大值,进而减少地表裸露促使土壤蒸发量减少,却同时大大增加作物蒸腾量,促使耗水量差异性明显,变化范围达 225.9~278.9 mm。而灌浆—成熟期(FG)时,各处理耗水量差异性再次减小,变化范围仅为 34.9~34.9 mm,表现为果实对水分需求相对减少。因此,在玉米作物拔节—抽雄期(JT)和抽雄—灌浆期(TF)可进行供水水平调控,本研究得出,W2 处理最适合提升作物产量与水分利用率。

4 结论

(1)不同深层土层土壤含水量变化幅度具有明显差异性,灌水量与降水量是主要影响因素。供水水平对土壤含水量影响表现为强度较小的供水仅对浅层土壤含水量有影响,因此,浅层土壤含水量对供水水平变化最为敏感。

(2)玉米作物耗水量整体存在差异,表现为 CK>W3>W2>W1;各生育期玉米耗水量总体呈波动变化趋势,JT 生育期达到峰值,表现为 JT>TF>SS>SJ>FG。

综合考虑不同灌水水平对玉米生长指标、水分利用率、产量和土壤水分特征的影响,玉米生长指标及产量等不随灌水量增大而增加,处理 W2 玉米产量最高,且水分利用率最大。在本试验条件下,W2 处理是较适宜的浅埋滴灌供水方案,可为我国半干旱地区玉米节水灌溉提供参考。

参考文献:

- [1] 李雨欣,薛东前,宋永永.中国水资源承载力时空变化与趋势预警[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1574-1584.
- [2] 魏子涵,魏占民,李春强,等.井灌区节水灌溉效率与潜力分析:以内蒙古通辽市为例[J].干旱地区农业研究,2016,34(6):143-149.
- [3] Ayars J E, Phene C J, Hutmacher R B, et al. Subsurface drip irrigation of row crops: A review of 15 years of research at the water management research laboratory [J].Agricultural Water Management,1999, 42(1):1-27.
- [4] 黄兴法,李光永.地下滴灌技术的研究现状与发展[J].农业工程学报,2002,18(2):176-181.
- [5] 张雪晨,李越,陈志君,等.膜下滴灌土壤水盐与玉米产量对节水控盐灌溉模式响应的模拟[J].农业工程学报,2022,38(增刊 1):47-58.
- [6] 郭晓雯,陈静,鲁晓宇,等.生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响[J].环境科学,2022,43(9):4625-4635.
- [7] 周罕觅,张硕,杜新武,等.滴灌条件下水肥耦合对苹果幼树生长与生理特性的影响[J].农业机械学报,2021,52(10):337-348.
- [8] 侯云鹏,孔丽丽,尹彩侠,等.覆膜滴灌下氮肥与种植密度互作对东北春玉米产量、群体养分吸收与转运的调控效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(1):54-65.
- [9] 李森,王凤新,赵健宇,等.灌水定额和施钾量对膜下滴灌马铃薯产量及水肥利用效率的影响[J].中国农业大学学报,2022,27(10):100-110.
- [10] 戚迎龙,李彬,赵举,等.西辽河流域春玉米节水灌溉模式评价与优选[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):44-50.
- [11] 王士杰,尹光华,李忠,等.浅埋滴灌水肥耦合对辽西半干旱区春玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):139-147.
- [12] 戚迎龙,赵举,史海滨,等.覆土浅埋滴灌玉米田双作物系数模型参数全局敏感性分析[J].农业工程学报,2020,36(7):99-108.
- [13] 邵继承,韩镁琪,杨恒山,等.浅埋滴灌下尿素减量配施UAN对春玉米干物质积累及氮效率的影响[J].华北农学报,2022,37(3):136-144.
- [14] 张明伟,杨恒山,范秀艳,等.浅埋滴灌下水氮减量对春玉米干物质积累及水氮利用效率的影响[J].玉米科学,2021,29(2):149-156.
- [15] Wang X W, Huo Z L, Guan H D, et al. Drip irrigation enhances shallow groundwater contribution to crop water consumption in an arid area [J]. Hydrological Processes,2018,32(6):747-758.
- [16] Papastylianou P, Bilalis D, Travlos I. Effect of limited drip irrigation regime on yield and yield components of sesame under mediterranean conditions[J].Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca Horticulture,2017,74(1):e71.
- [17] 杨恒山,张雨珊,葛选良,等.浅埋滴灌下不同滴灌量对玉米花后碳代谢和光合氮素利用效率的影响[J].作物学报,2022,48(10):2614-2624.
- [18] 朱永华,张生,孙标,等.科尔沁沙地典型区地下水、降水变化特征分析[J].干旱区地理,2017,40(4):718-728.
- [19] 中华人民共和国水利部.灌溉试验规范:SL 13—2015[S].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [20] 内蒙古自治区农业标准化技术委员会.露地玉米浅埋滴灌技术规程:DB15/T 1382—2018[S].呼和浩特:内蒙古自治区质量技监局,2018.
- [21] Vergni L, Vinci A, Todisco F. Effectiveness of the new standardized deficit distance index and other meteorological indices in the assessment of agricultural drought impacts in central Italy[J].Journal of Hydrology,2021,603:e126986.
- [22] 赵靖丹.内蒙古通辽地区滴灌玉米耗水特性与 SIMDual_Kc 模型模拟研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [23] 孙耀民,王勇,周宇伟,等.引黄畦灌土壤水分变化特征及作物耗水规律研究[J].水利科技与经济,2021,27(9):22-27,33.
- [24] 刘明虎,张景波,尚敏,等.乌兰布和沙区不同供水水量下杨树林地土壤水分和温度效应研究[J].中国农学通报,2012,28(16):30-35.
- [25] 张旭东,王智威,韩清芳,等.玉米早期根系构型及其生理特性对土壤水分的响应[J].生态学报,2016,36(10):2969-2977.
- [26] 刘亚男,来兴发,杨倩,等.控水对饲草作物间作群体产量/根冠比及水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):113-121.
- [27] 朱国龙,王转,龙怀玉,等.负压供水下土壤水分对樱桃萝卜生长及水分利用效率的影响[J].中国农业科技导报,2020,22(12):127-136.
- [28] 谢小清,唐怀君,张磊,等.欠量灌溉供水率胁迫强度与玉米产量的规律分析[J].新疆农业科学,2022,59(1):70-78.
- [29] 黄悦,李思恩,胡丹,等.基于 Meta-Analysis 方法分析滴灌对玉米水分利用效率及产量的影响[J].中国农业大学学报,2022,27(5):96-105.
- [30] 吴宣毅,佟玲,康德奎,等.调亏灌溉对西北地区不同种植密度玉米耗水和产量的影响[J].农业工程学报,2022,38(增刊):59-67.