

豫北地区冬小麦滴灌灌水技术参数研究

衣若晨¹, 申孝军^{1,2}, 李松敏¹, 薛铸¹, 董建舒¹, 杨丽霞³, 高阳²

(1.天津农学院水利工程学院, 天津 300392; 2.中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 3.太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 为优化豫北地区冬小麦在滴灌条件下的灌水技术参数, 通过田间试验系统研究了不同滴头流量 (2.0, 4.0, 6.0 L/h) 和滴灌带间距 (40, 60, 80, 100, 120 cm) 对灌溉水在土壤中分布、冬小麦产量以及水分利用效率的影响。结果表明: 就灌水均匀度而言, 缩小滴灌带间距和增加滴头流量可以提高灌溉水在冬小麦根区的分布均匀度; 本试验条件下滴灌带铺设超过 80 cm, 会影响冬小麦产量及其构成, 滴灌带间距相同时, 冬小麦产量随着滴头流量的增加呈递增趋势。就水分利用效率而言, 适宜的滴灌带间距及滴头流量组合能在同一灌水条件下, 有效减小耗水量并提高水分利用效率; 本试验条件下滴灌带间距 60 cm、滴头流量 2.0 L/h 的参数组合的产量最高, 达到 10 626.45 kg/hm², 水分利用效率最高, 达到 2.42 kg/m³。综合分析灌溉水均匀度、冬小麦产量以及水分利用效率, 滴灌带间距 60 cm、滴头流量 2.0 L/h, 以及滴灌带间距 80 cm、滴头流量 6.0 L/h 的参数组合是适宜的冬小麦滴灌灌水技术参数。

关键词: 冬小麦; 滴头流量; 滴灌带间距; 灌水定额; 产量; 水分利用效率; 土壤水分

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)02-0208-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.024

Research on Drip Irrigation Technical Parameters of Winter Wheat in Northern Henan Province

YI Ruochen¹, SHEN Xiaojun^{1,2}, LI Songmin¹, XUE Zhu¹, DONG Jianshu¹, YANG Lixia³, GAO Yang²

(1.College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392;

2.Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002;

3.School of Hydraulic Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: In order to optimize the drip irrigation technical parameters of winter wheat under drip irrigation in northern Henan province, the effects of different dripper discharges (2.0, 4.0, 6.0 L/h) and the spacing of drip irrigation lateral springs (40, 60, 80, 100, 120 cm) on soil distribution of irrigation water, winter wheat yield and water use efficiency were studied in a field experiment. The result showed that: In terms of the drip irrigation uniformity, reducing the distance between drip irrigation lateral spacing and increasing the dripper discharge could improve the distribution uniformity of irrigation water in the root zone of winter wheat. Under the experimental conditions in this study, the yield and composition of winter wheat were affected by the spread of drip irrigation lateral spacing over 80 cm, and the yield of winter wheat increased with the increase of the dripper discharge with the same drip irrigation lateral spacing. In terms of water use efficiency, the appropriate combination of drip irrigation lateral spacing and dripper discharge could effectively reduce water consumption and improve water use efficiency under the same irrigation condition. The present results suggested that the parameter combination of drip irrigation lateral spacing of 60 cm and dripper discharge 2.0 L/h had the highest yield (10 626.45 kg/hm²) and the highest water use efficiency (2.42 kg/m³). Through the comprehensive analysis of irrigation water uniformity, winter wheat yield and water use efficiency, the parameter combination of 60 cm drip irrigation lateral spacing, dripper discharge 2.0 L/h, 80 cm drip irrigation lateral spacing, and dripper discharge 6.0 L/h were the optimal technical parameters for

收稿日期: 2022-08-19

资助项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项基金项目 (CARS-03); 国家自然科学基金项目 (51879267); 山西省水利科学研究与推广项目 (2022GM005)

第一作者: 衣若晨 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: yiruochen1@163.com

通信作者: 高阳 (1978—), 男, 研究员, 博士, 主要从事作物高效用水理论与技术研究。E-mail: gaoyang@caas.cn

winter wheat drip irrigation.

Keywords: winter wheat; dripper discharge; drip irrigation lateral spacing; irrigation quota; yield; water use efficiency; soil moisture

华北地区是中国最重要的优质原粮生产基地之一,该区小麦耕地面积占全国总耕地面积的 25%,小麦总产量占全国的 67%^[1-2]。华北地区属于暖温带季风气候,冬季干燥寒冷,夏季高温多雨,年降水量为 500~900 mm,降水较少且干湿变化明显^[3]。大范围、高强度且频发的干旱导致华北地区小麦减产、水资源短缺等现象频频发生,从而影响粮食生产安全^[4]。豫北地区作为华北地区的小麦优质高产区,小麦产量及生产潜力较大。但该地区水资源严重不足,降水稀少和时空分布不均对冬小麦的优质稳产和生产力稳定造成很大影响,严重制约该地区农业的可持续发展^[5-6]。

滴灌水肥一体化技术是目前高效节水措施之一,对于缓解该地区的水资源短缺、促进冬小麦高效生产具有十分重要的作用。滴灌技术可根据作物自身的营养需求规律将水分与肥料定量运输到作物根系的周围,在提高农田水分利用效率的同时可有效降低湿润面积,减少棵间蒸发,改变作物的农田生态小气候,使作物根系生长有良好的水气、热生态环境^[7],为粮食作物高效生产提供可能。因此,研究滴灌条件下不同灌水技术参数与其对作物产量、耗水 and 水分利用效率的影响,以产量和水分利用效率双优为目标优化冬小麦滴灌灌水技术参数,对进一步提高农田灌溉水利用效率,提升区域农业水资源高效利用具有十分重要的现实意义^[8]。

滴灌带间距、滴头流量和灌水定额作为滴灌灌水技术的基本参数,对于调控土壤水分运动、作物生长和制定合理的灌溉制度具有重要作用^[9]。不同的灌水技术参数直接影响灌溉水、肥在冬小麦根区土壤分布的均匀度,从而影响冬小麦根系对根区土壤水肥的吸收,最终影响冬小麦的生长及产量。杨开静等^[10]在甘肃省的大田试验研究表明,西北旱区春小麦的灌

水定额为 45 mm 时,水分利用效率和产量等综合效益最高;张娜等^[11]研究认为,滴灌带间距为 60 cm 时干物质积累和产量更优,但考虑经济效益滴灌带间距为 75 cm 最适合大田种植;黄兴法等^[12]综合考虑成本、产量等因素认为,西北旱区春小麦滴头流量为 3.1 L/h、滴灌带布置方式为 1 管 5 行的组合最优。这些研究大多集中于部分灌水技术参数对小麦生长、产量及水分利用效率等的影响,但有关基于根区灌溉水分分布均匀度、小麦生长、产量及水分利用效率等指标的优化灌水技术参数的研究还相对较少,滴灌技术特别是华北地区冬小麦滴灌灌溉水技术参数有待进一步优化。为此,本文通过田间试验设置不同的滴头流量和滴灌带间距,研究不同灌水技术参数对根区水分分布的影响,在此基础上探究其适宜的灌水定额,并综合分析产量、水分利用效率,探究豫北地区冬小麦适宜的滴灌灌水技术参数组合,以期为华北地区冬小麦的节水高效栽培提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在中国农业科学院农田灌溉研究所新乡综合试验基地进行,试验基地位于河南省新乡县七里营镇(35°18'N,113°54'E)。该区位于豫北人民胜利渠引黄灌区内,属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温 14℃,无霜期 210 天,日照时间 2 399 h,蒸发量 2 000 mm(直径 20 cm 蒸发皿值),年平均降水量 582 mm,其中 6—10 月降水量占全年降水量的 70%~80%。冬小麦生长季日最低气温、日最高气温和降水量见图 1。该区域光热资源丰富,耕作制度以 1 年 2 熟为主,土壤类型为壤土(表 1),0—100 cm 土层平均土壤干体积密度为 1.51 g/cm³,田间持水率 20.5%(质量含水率),地下水埋深>5 m。

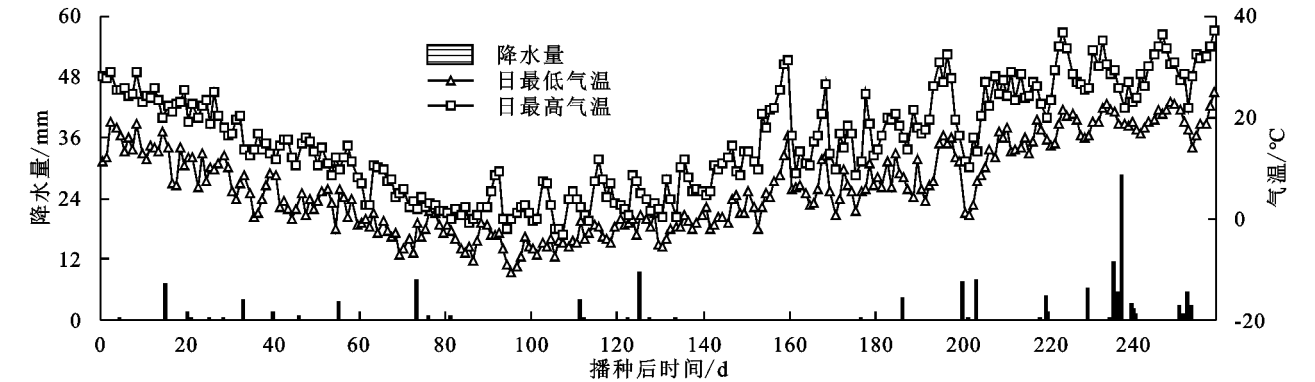


图 1 冬小麦生育期内降水量和日最高、最低气温

表 1 试验地土壤特性主要参数

土层 深度/cm	粒径分级/%			土壤干体积密度/ (g·cm ⁻³)
	<0.002 mm	0.02~0.002 mm	2.0~0.02 mm	
0—20	3.81	43.14	53.06	1.56
20—40	6.61	45.43	47.96	1.58
40—60	6.06	48.33	45.62	1.54
60—80	4.55	47.49	47.96	1.42
80—100	1.57	16.95	81.49	1.45

1.2 试验设计

冬小麦滴灌试验在中国农业科学院农田灌溉研究所七里营基地进行,供试品种为“郑麦 366(强筋)”。前茬玉米收获后秸秆全部粉碎还田后整地播种,于 2020 年 10 月 20 日播种,播量为 195 kg/hm²,种植行距为 18 cm,各处理的 P、K 肥都作为基肥施入,施用量分别为 750,240 kg/hm²(相当于 P₂O₅ 120 kg/hm²,K₂O 120 kg/hm²)。施氮量设为 240 kg/hm²,基追比设为 4:6,在返青期—灌浆期分 3~5 次采用随水施肥方式追施尿素(含 N 46%)315 kg/hm²(相当于施纯 N 144 kg/hm²)。

滴灌带管径 16 mm,滴头间距 30 cm,单滴头流量 2.0 L/h,灌水技术参数试验共设 8 个处理(表 2),其中滴灌带间距试验设置 5 个水平,分别为 40,60,80,100,120 cm(处理 D1、D2、D3、D4 和 D5),当滴灌带与麦行重叠时,滴灌带紧贴麦行布设,并利用铁丝固定,滴头流量均为 2.0 L/h;滴头流量试验设置 3 个水平,分别为 2.0,4.0,6.0 L/h(D6、D7 和 D8),滴灌带间距均为 80 cm(为了使滴水点处产生 2.0,4.0,6.0 L/h 的滴头流量,处理 D6、D7 和 D8 分别安装 1,2,3 条滴灌毛管,其中布设 2,3 条滴灌管时,滴灌管均并在一起,滴灌管间距为 0,且各滴灌管上的滴头相互对应,使同一滴水点处形成不同的滴头数,可得到不同的滴水流量)。

表 2 试验设计

处理	滴头流量/ (L·h ⁻¹)	滴灌带 间距/cm	灌水 定额/mm
D1	2.0	40	37.5
D2	2.0	60	37.5
D3	2.0	80	37.5
D4	2.0	100	37.5
D5	2.0	120	37.5
D6	2.0	80	37.5
D7	4.0	80	37.5
D8	6.0	80	37.5

试验将冬小麦生育期划分为播种出苗期、苗期、越冬期、返青期、拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期 8 个生育阶段,根据当地冬小麦的耗水规律,拔节期—灌浆期为冬小麦需水关键期,其他阶段为非需水关键

期。全生育期充分供水,需水关键期灌水周期为 7~10 天,非需水关键期灌水周期为 10~20 天,灌水定额均为 37.5 mm。试验共 8 个处理,各处理 3 次重复,共 24 个小区(3.6 m×30 m),试验区面积约 0.26 hm²,由 1 条支管控制。各处理间设置保护行,宽 1.2 m。灌溉水源为地下水,灌水量用水表计量,其余农事操作同一般高产田。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 土壤含水率 土壤含水率采用烘干法结合 TRIME 土壤水分仪分层测定(每 20 cm 测定 1 次)。测定时间为每月的 1,11,21 日,生育期内测定土层深度为 0—100 cm,播后及收获前采用烘干法测定 0—200 cm 土层的土壤含水率。

滴灌带间距为 40,60,80,100,120 cm 处理的土壤水分取样点分别设在距滴灌带 0,20 cm,0,30 cm,0,20,40 cm,0,25,50 cm,0,20,40,60 cm。

1.3.2 生长发育进程 记录冬小麦播种、出苗、分蘖、越冬、返青、拔节、开花、灌浆、成熟等各生育期开始和结束日期。

1.3.3 产量及产量构成因子 在成熟期(6 月 5 日),每个小区随机选取 2 m²小麦为样本,籽粒经自然风干后称重,换算成产量。收取每个处理的 4 个 1 m 行的冬小麦,记录 1 m 行的穗数;将 1 m 行的小麦在 105 ℃下杀青 30 min,然后在 75 ℃下烘干至恒重,称重记录地上部生物量。室内考种,测定株高、穗长、有效穗数、无效小穗数、穗粒数、千粒重等指标。

2 结果与分析

2.1 不同滴头流量和滴头间距对灌溉水再分布的影响

为了探索不同灌水技术参数对滴灌冬小麦根区土壤水分分布的影响,在返青期第 1 次灌水后利用烘干法监测冬小麦根区土壤水分,灌水结束后 24 h 不同处理根区土壤水分分布情况见图 2。从图 2 可以看出,灌水结束后 24 h 冬小麦根区土壤水分分布情况除受滴头间距和灌水定额的影响外,还受滴灌带布设间距和滴头流量的影响。当灌水定额和滴头间距完全相同时,灌水前土壤含水率大致相同条件下,灌溉水在冬小麦根区分布的均匀度主要受滴灌带布设间距和滴头流量的影响。

就灌溉水在麦田根区土壤水分分布均匀度而言,处理 D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7 和 D8 灌水后麦田根区剖面不同位置处的土壤含水率(质量含水率)与剖面平均值的方差分别为-1.96~2.02,-2.13~2.93,-5.56~3.27,-5.44~3.94,-3.70~5.85,-5.28~4.07,-3.62~4.81,-3.08~3.09,缩小滴灌带布设间距或增加滴头流量可以提高灌溉水在冬小麦根区的分布均匀度。由图 3 可知,滴头流量相同时,灌溉水

在根区土壤中分布的均匀度随着滴灌带间距的增加呈降低趋势,当毛管间距为 40 cm 时(图 3a),2 条毛管之间 0—60 cm 土层的土壤含水率趋近于一维层状分布,表层土壤含水率均在 20%左右,深层土壤含水率虽然有所降低,但在水平方向上大致相同,50 cm 深处土壤含水率在 17%左右;而毛管间距为 120 cm 的处理(图 3e),滴灌带下方土壤含水率一直处于较高水平,在 60 cm 深处土壤含水率为 19%左右,但距滴灌带 60 cm 处的土壤含水率明显低于滴灌带下方,表层土壤含水率仅 8%左右,与灌前土壤含水率大致相同。当灌水定额和毛管间距相同时,随着滴头流量的增大,根区土壤水分在水平上更趋于均一(图 2

(D6—D8))。进一步分析发现,处理 D8 根区土壤水分呈层状分布,表层(0—20 cm)土壤水分明显高 40—60 cm 土层土壤水分,但水平方向上,距滴灌带 40 cm 处的土壤水分与滴灌带下方的土壤水分大致相同,说明滴头流量的增加有利于农田根区土壤湿润体呈宽浅型湿润区;与处理 D8 相比,处理 D6 根区土壤水分在垂直方向上变化不大,不同土层土壤含水率大致相同,但水平方向上,土壤含水率随着距滴灌带距离的增加呈降低趋势,在距滴灌带 40 cm 处土壤含水率低于滴灌带下方 50%。综合考虑毛管用量和灌溉水在根区土壤分布均匀度,处理 D2 和处理 D8 可以作为冬小麦适宜的滴灌带布设方案。

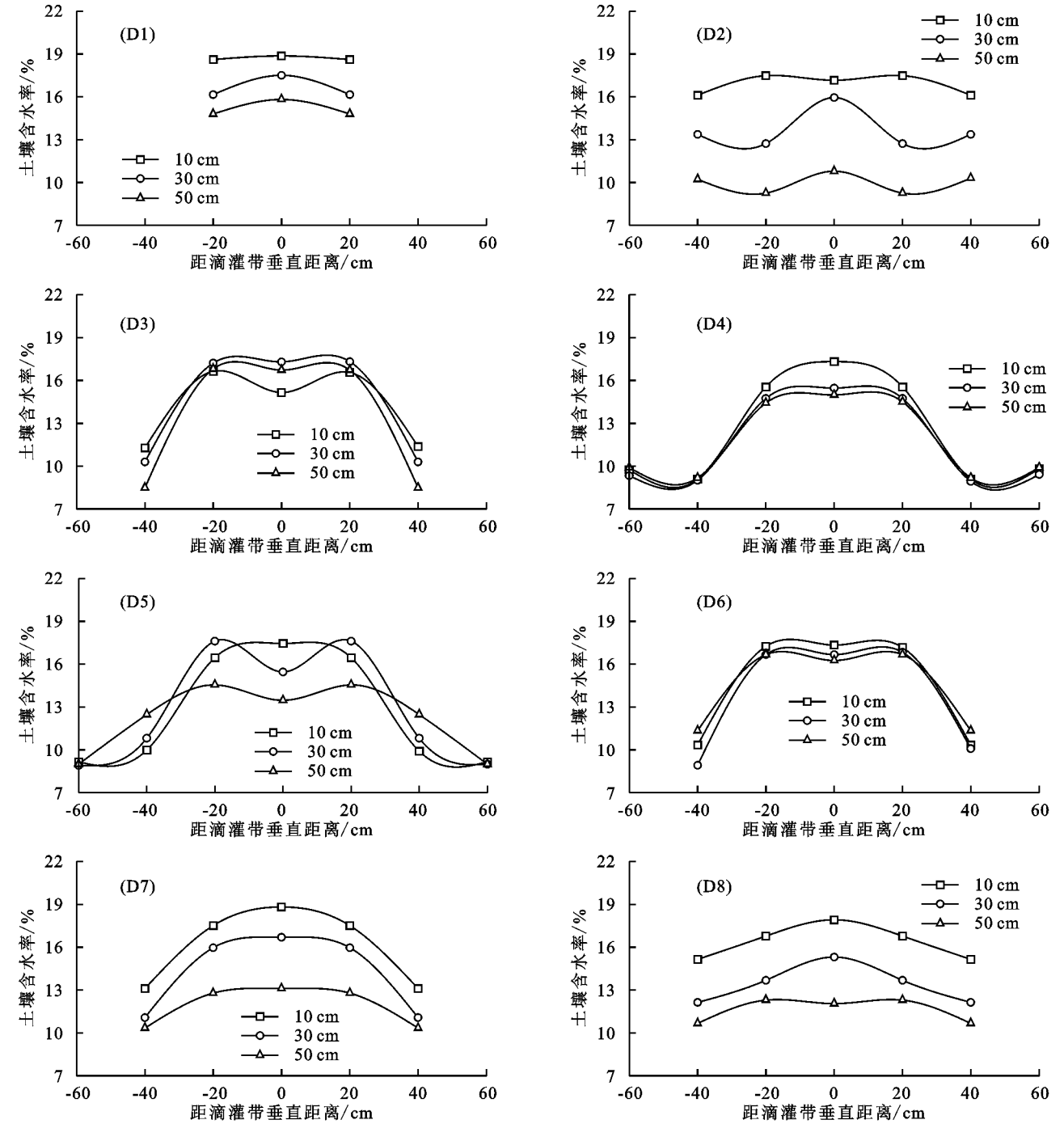


图 2 不同滴灌带布设条件下麦田水分分布

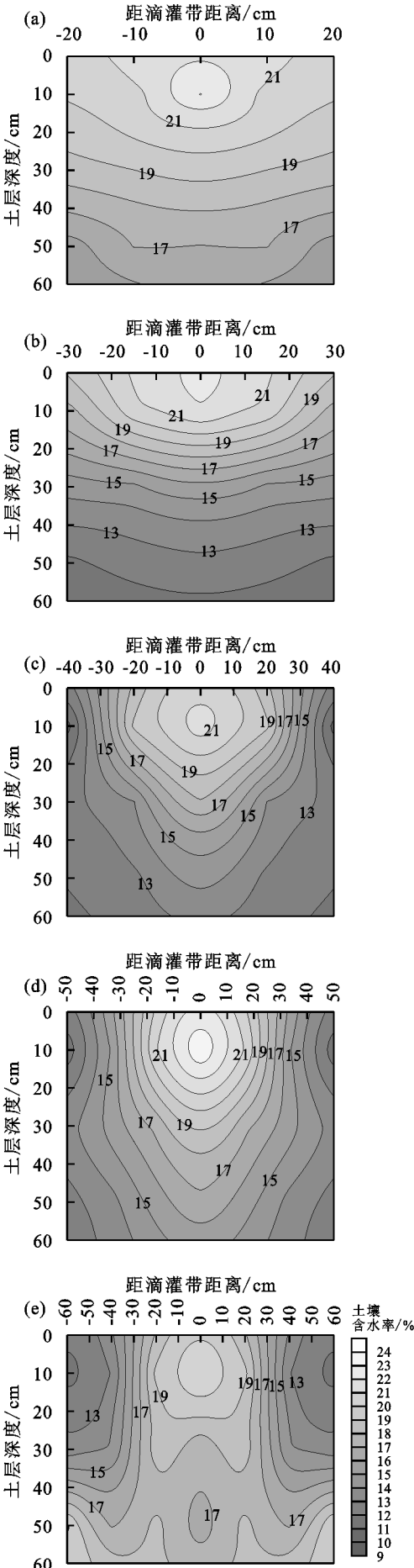


图 3 不同毛管间距对灌水均匀度的影响

2.2 不同灌水定额对灌水均匀度的影响

在不同间距和不同滴头流量田间试验基础上,通过田间控制试验研究不同灌水定额对冬小麦根区土壤水分分布的影响。毛管间距为 60 cm,滴头流量为 2.0 L/h,滴水定额设置 3 个水平,分别为 37.5,52.5,67.5 mm(M1、M2 和 M3)。从图 4 可以看出,灌水前冬小麦根区土壤含水率随着土层深度的增加呈升高趋势,但在水平方向上,各重复之间差异不大,0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60,60—70,70—80,80—90,90—100 cm 土层土壤含水率的标准差分别为 0.010 3,0.011 1,0.015 2,0.010 6,0.007 5,0.008 3,0.013 4,0.005 9,0.008 7,0.012 0 cm³/cm³,说明灌前麦田根区土壤含水率在水平方向上分布相对均一。

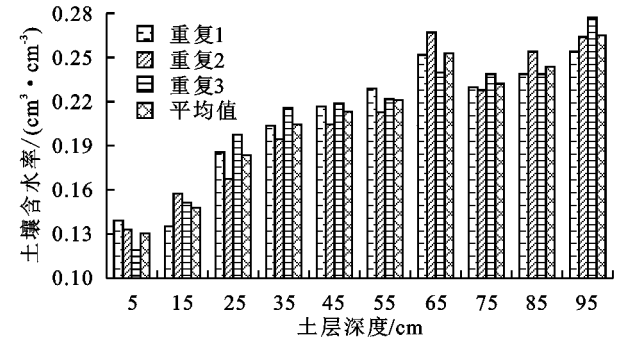


图 4 灌水前麦田土壤含水率

灌水结束后 24 h 田间土壤水分监测结果(图 5)表明,麦田根区土壤水分随着灌水定额的增大呈增大趋势。垂直方向上,土壤含水率呈增高趋势,水平方向上更趋于均匀。进一步分析发现,当灌水定额为 37.5 mm 时(图 5a),滴灌带下方(距 2 条滴灌带中心—30,30 cm 处)的土壤含水率明显高于 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率。

0—10,10—20,20—30 cm 土层的滴灌带下方的平均土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.179 6,0.147 1,0.089 7 cm³/cm³,2 条滴灌带中心点位置 30 cm 以下的土壤含水率与灌前土壤含水量大致相同,说明灌水定额为 37.5 mm 时,灌溉对 2 条滴灌带中心位置 30 cm 以下土层的土壤含水率影响不大;当灌水定额为 52.5 mm 时(图 5b),灌溉对 2 条滴灌带中心位置 30 cm 以下土层的土壤含水率影响不大,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 0—10 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.071 4,0.073 1,0.047 2 cm³/cm³,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 10—20 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.093 7,0.086 7,0.077 0 cm³/cm³,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 20—30 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.085 6,0.086 6,0.065 8 cm³/cm³;

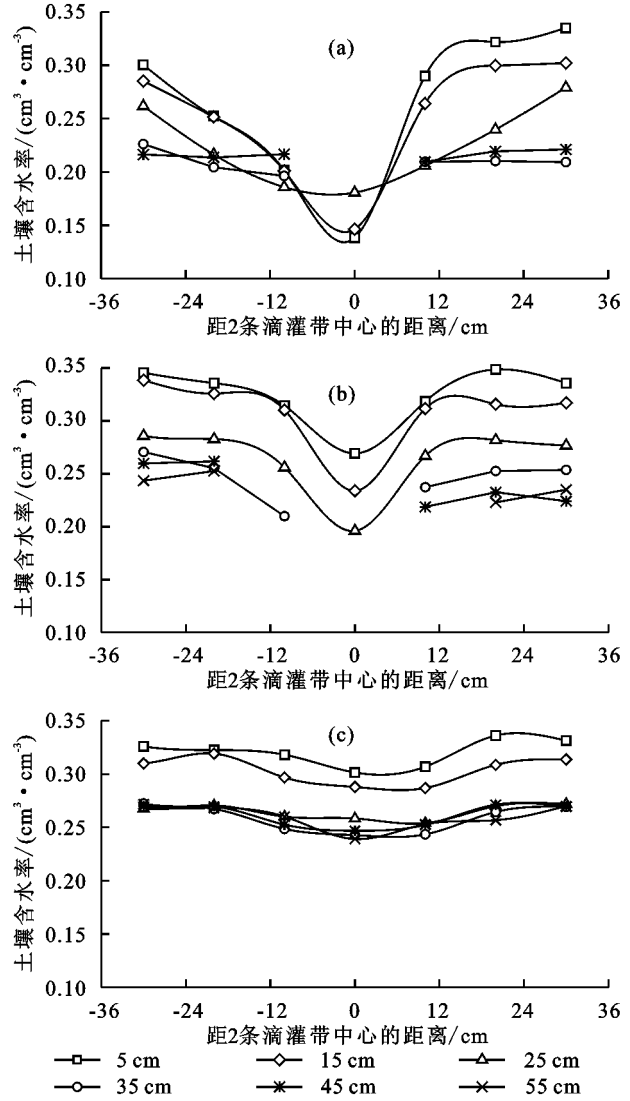
当灌水定额为 67.5 mm 时(图 5b),灌溉对 2 条滴灌带中心位置 0—60 cm 土层的土壤水分均有不同程度的补充,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 0—10 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.027 1,0.027 9,0.011 1 cm³/cm³,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 10—20 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.024 1,0.026 3,0.004 2 cm³/cm³,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 20—30 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.011 3,0.011 7,—0.001 2 cm³/cm³,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 30—40 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.028 3,0.023 1,0.003 4 cm³/cm³,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 40—50 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.022 2,0.023 3,—0.005 3 cm³/cm³,距 2 条滴灌带中心 30,20,10 cm 处 50—60 cm 土层的土壤含水率比 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率分别提高 0.031 2,0.023 2,0.017 3 cm³/cm³。

从图 5 还可以看出,当灌水定额超过 52.5 mm 时,水平方向上土壤含水率差异明显小于灌水定额为 37.5 mm 的处理,而且距滴灌带 20 cm 处的土壤含水率已与滴灌带下方土壤含水率大致相同,能够满足冬小麦正常生长根系水分的需求。当灌水定额达到 67.5 mm 时,水平方向上各观测点的土壤含水率无明显差异,说明当滴头流量为 2.0 L/h,滴灌带间距 60 cm,灌水定额在 37.5~52.5 mm 为宜。

2.3 不同灌水参数对冬小麦产量的影响

滴灌带布设间距及滴头流量均不同程度地影响冬小麦株高及产量构成指标。从表 3 可以看出,冬小麦株高随着滴灌带铺设间距的增加呈降低趋势,当滴灌带间距<80 cm 时,各处理的冬小麦株高无明显差异,但当滴灌间距为 100,120 cm 时,冬小麦株高明显低于 D1 处理(滴灌带间距 40 cm),说明过宽的滴灌带间距不利于作

物株高发育。抽穗扬花期株高生长调查结果表明, D4 和 D5 处理开始出现明显的高矮行,滴灌带中间的株高明显低于滴灌带下附近的株高,统计分析结果表明,差异达到极显著水平。当滴灌带间距和灌水定额完全相同条件下,各处理的株高随着滴头流量的增加呈递增趋势,但各处理间的差异未达到极显著水平。



注:(a)、(b)和(c)分别为 37.5,52.5,67.5 mm 灌水处理停水后 24 h 的土壤水分情况。

图 5 不同灌水定额对根区土壤水分的影响

表 3 不同处理冬小麦产量及产量构成

处理	株高/ cm	总穗数/ (万头·hm ⁻²)	穗长/ cm	小穗数	无效 穗数	穗粒数/ (粒·穗 ⁻¹)	千粒重/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
D1	63.20	615.65	11.34	16.52	1.95	38.60	44.04	10114.35
D2	64.20	601.10	12.21	16.53	1.30	37.40	45.57	10626.45
D3	64.79	589.91	12.10	16.27	2.60	35.57	43.89	8974.29
D4	56.54	534.25	10.64	16.13	1.55	32.97	41.62	8120.80
D5	47.87	529.05	10.80	16.10	1.72	30.44	41.27	7552.67
D6	64.79	589.91	12.10	16.27	2.60	35.57	43.89	8974.29
D7	65.62	596.45	11.04	15.58	1.49	35.73	42.76	9288.42
D8	65.85	603.10	11.30	15.81	1.19	36.03	42.21	9843.51

就产量构成而言,滴灌条件下不同灌水参数组合直接影响灌溉水肥在冬小麦根区土壤的分布均匀度,从而影响冬小麦根系对根区土壤水肥的吸收,影响冬小麦株高、叶面积以及根冠比等生长指标和叶片光合速率以及光合同化产物的分配,最终影响冬小麦成穗率、有效穗数、单穗穗粒数、籽粒千粒重和冬小麦的经济产量(籽粒产量和品质)。从表 3 还可以看出,D1 处理的总穗数最高,达到 616 万头/hm²,D5 处理最低,仅为 529 万头/hm²,D4、D5 处理的成穗率明显低于其他处理,说明滴灌带铺设间距超过 80 cm 对成穗率造成不可逆转的负面影响;有效穗数和穗粒数均随滴灌带间距的增加呈下降趋势,随滴头流量的加大呈增加趋势,这主要是因为进入返青期后频繁地灌水,导致水分和养分在麦田根区分布的均匀度降低,过宽的滴灌带铺设间距使养分和水分在滴灌带附近聚集甚至产生深层渗漏,而滴灌带中间的 2~3 行小麦由于远离滴灌带,灌溉水肥难以均匀分布在 2 条滴灌中间的冬小麦根区,从而限制冬小麦根系对水肥的吸收利用,进而影响冬小麦的生长发育,影响籽粒的形成以及后期灌浆速率,最终降低单穗穗粒数和千粒重,导致收获籽粒产量的降低。进一步分析发现,D2 处理的籽粒产量最高,达到 10 626.45 kg/hm²,D8 处理

的籽粒产量与 D2 处理基本相当,均明显高于 D3、D4、D5、D6 和 D7 处理。与 D1 处理相比,D2 处理的籽粒产量提高 5.06%,D3、D4、D5、D6、D7 和 D8 处理的冬小麦籽粒产量分别降低 11.27%,19.71%,25.33%,11.27%,8.17%和 2.68%。

2.4 不同灌水参数对滴灌冬小麦耗水量及水分利用效率的影响

试验期间各处理灌水量均为 225.0 mm,降水量为 87.7 mm,不同处理的耗水量及水分利用效率见表 4。从表 4 可以看出,各处理的耗水量为 417~452 mm,水分利用效率为 1.8~2.4 kg/m³,灌溉水利用效率达到 3.3~4.0 kg/m³。

就水分利用效率而言,D2 处理最高,D5 处理最低;灌溉水利用效率最高的是 D2 处理,最低的是 D5 处理。同一灌水条件下,D2 处理的耗水量仅高于 D4 和 D5 处理,但水分利用效率达到各处理最高值,说明适宜的滴灌带间距及滴头流量组合能减小耗水量,并有效提高水分利用效率。故综合分析产量、水分利用效率以及滴灌带用量,本试验条件下,滴灌带间距 60 cm、滴头流量 2.0 L/h,以及滴灌带间距 80 cm、滴头流量 6.0 L/h 是比较理想的冬小麦滴灌灌水技术参数。

表 4 不同处理冬小麦耗水量及水分利用效率

处理	灌水量/ mm	降水量/ mm	耗水量/ mm	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	灌溉水利用效率/ (kg·m ⁻³)
D1	225.0	87.7	451.45	10114.35	2.24	4.50
D2	225.0	87.7	439.87	10626.45	2.42	4.72
D3	225.0	87.7	442.49	8974.29	2.03	3.99
D4	225.0	87.7	417.67	8120.80	1.94	3.61
D5	225.0	87.7	418.90	7552.67	1.80	3.36
D6	225.0	87.7	442.49	8974.29	2.03	3.99
D7	225.0	87.7	445.26	9288.42	2.09	4.13
D8	225.0	87.7	447.84	9843.51	2.20	4.37

3 讨论

3.1 不同滴头流量和滴头间距对灌溉水再分布影响

本试验条件下,当灌水定额和滴头间距完全相同、灌水前土壤含水率大致相同条件下,缩小滴灌带布设间距或增加滴头流量可以提高灌溉水在冬小麦根区的分布均匀度。

已有研究^[13]指出,滴灌带间距对作物产量和灌溉水生产率的影响并不显著。在水分供给充足的条件下,探究合理滴灌带间距的主要作用在于调控土壤水分分布,适宜的滴灌带间距可以使土壤水分均匀分布在作物根区,通过土壤水分的分布对作物根系分布形态进行调控,从而影响其地上部分生长和产量。本

试验条件下,滴头流量相同时,灌溉水均匀度随着滴灌带间距的增加呈降低趋势,这是因为滴灌带间距的增加不利于各滴水点处的土壤湿润区相互交汇,与李东伟等^[14]研究结果基本一致。本试验进一步分析发现,且当毛管间距缩小至 40 cm 时(图 3a),2 条毛管之间 0—60 cm 土层的土壤含水率趋近于一维层状分布。

通过试验发现,除缩小滴灌带间距外,增加滴头流量可以提高灌溉水在冬小麦根区的分布均匀度。滴头流量的增大,可以增加灌溉水在表层土壤的扩散速度,增大湿润面积,从而增大表层的土壤含水率。曹振玺等^[15]研究表明,在相同的灌水定额条件下,更高的滴头流量可以增大表层土壤含水率和土壤湿润面积,灌溉水入渗深度更深,土壤水分分布呈宽浅型

湿润区,与本试验研究结果基本一致。本试验条件下,土壤含水率随着距滴灌带距离的增加呈降低趋势,且与滴头流量为 6.0 L/h 的处理相比,滴头流量为 2.0 L/h 的处理根区土壤水分在垂直方向上变化不大,但水平方向上 40 cm 处与滴灌带下方土壤含水率差异较大。故滴灌带间距 80 cm 的条件下,滴头流量为 6.0 L/h 的处理灌溉水的均匀度较高。

本试验通过综合考虑滴灌带间距和滴头流量对根区土壤分布均匀度的影响,得出滴灌带间距 60 cm、滴头流量 2.0 L/h 和滴灌带间距 80 cm、滴头流量 6.0 L/h 的参数组合是适宜的冬小麦滴灌灌水技术参数。

3.2 不同灌水定额对灌水均匀度的影响

已有研究^[16-17]表明,随着灌水定额的增大导致土壤水分入渗范围变大,湿润体的影响范围也随之变大,土壤水分由于受重力和表面张力作用不断向滴灌带四周运动,形成的湿润体在作物根区使水分再分布。故本试验在不同滴灌带间距和不同滴头流量田间试验基础上,研究了不同灌水定额对冬小麦根区土壤水分分布的影响,旨在探究其适宜的灌水定额参数。

本试验条件下,灌水定额的增大可明显增加 0—60 cm 土壤的含水率,灌水前和灌水结束后 24 h 冬小麦根区土壤含水率均随着土层深度的增加呈升高趋势,水平方向上的土壤水分灌水后比灌水前更趋于均匀。不同处理的滴灌带下方(距 2 条滴灌带中心—30,30 cm 处)的土壤含水率均高于 2 条滴灌带中心位置处的土壤含水率。在水平方向上,土壤含水率表现为距离滴灌带越远,灌水前后的变化值越小。

当灌水定额超过 52.5 mm 时,水平方向上土壤含水率差异明显小于灌水定额为 37.5 mm 处理,而且距滴灌带 20 cm 处的土壤含水率已与滴灌带下方土壤含水率大致相同,能够满足冬小麦正常生长根系水分的需求。因此本试验条件下,当滴头流量为 2.0 L/h,滴灌带间距 60 cm,灌水定额在 37.5~52.5 mm 为宜。

3.3 不同灌水参数对冬小麦产量的影响

滴灌条件下不同灌水参数组合,直接影响灌溉水肥在冬小麦根区土壤的分布均匀度,从而影响冬小麦根系对根区土壤水肥的吸收,直接影响作物根系的生长和分布,进而影响冬小麦株高、叶面积以及根冠比等生长指标和叶片光合速率以及光合同化产物的分配,最终影响冬小麦成穗率、有效穗数、单穗穗粒数、籽粒千粒重和冬小麦的产量(籽粒产量和品质)。

本试验发现,滴灌带过宽不利于株高发育,且随着滴灌带的增加,有效穗数和穗粒数均呈下降趋势,滴灌带铺设间距超过 80 cm 对成穗率造成不可逆转

的负面影响。各处理的株高、有效穗数和穗粒数随着滴头流量的增加呈递增趋势,这主要是因为进入返青期后频繁地灌水,导致水分和养分在麦田根区分布的均匀度降低,过宽的滴灌带铺设间距使养分和水分在滴灌带附近聚集甚至产生深层渗漏,而滴灌带中间的 2~3 行小麦由于远离滴灌带,灌溉水肥难以均匀分布在 2 条滴灌带中间的冬小麦根区,从而限制冬小麦根系对水肥的吸收利用,影响冬小麦的生长发育和籽粒的形成以及后期灌浆速率,最终降低单穗穗粒数和千粒重,导致收获籽粒产量的降低。本试验条件下滴头流量为 2.0 L/h,滴灌带间距 60 cm 的处理籽粒产量最高,达到 10 626.45 kg/hm²,是比较理想的冬小麦滴灌灌水技术参数,滴灌带间距 80 cm、滴头流量 6.0 L/h 的处理次之,均远高于其他处理。

3.4 不同灌水参数对滴灌冬小麦耗水量及水分利用效率的影响

已有研究^[18-21]表明,土壤水分、灌水量、灌水时间对冬小麦的优质高产和节水有着非常复杂的影响,而灌溉水资源严重不足又迫使冬小麦的灌溉必须走节水灌溉的道路。因此,迫切需要深入开展冬小麦滴灌技术的研究及优化,达到优质高产和节水的双赢。

李东伟等^[14]通过研究土壤带状湿润均匀性对膜下滴灌棉花生长及水分利用效率的结果表明,随着土壤湿润区由窄深型向宽浅型过渡,膜下土壤带状湿润均匀性越好,水分利用效率也越高,且宽浅型土壤湿润区能在保持水分利用效率不降低的情况下,显著提高产量,这与本试验结果基本一致。本试验在滴头流量 2.0 L/h 的条件下,60 cm 的滴灌带间距的处理水分利用效率和灌溉水利用效率最高,这也为灌溉水均匀度较高的灌水技术参数。滴灌带间距 80 cm,滴头流量 6.0 L/h 时,灌水均匀度较高,土壤湿润区呈宽浅型,土壤水分利用效率和产量均处于较高水平。

故综合分析灌溉水均匀度、冬小麦产量以及水分利用效率,滴灌带间距 60 cm,滴头流量 2.0 L/h,以及滴灌带间距 80 cm,滴头流量 6.0 L/h 是比较理想的冬小麦滴灌灌水技术参数。

4 结论

(1)综合考虑滴灌带用量和轮灌周期,滴灌带间距 60 cm、滴头流量 2.0 L/h 和滴灌带间距 80 cm、滴头流量 6.0 L/h 的参数组合是适宜的冬小麦滴灌灌水技术参数。

(2)综合考虑冬小麦产量以及水分利用效率,滴灌带间距 60 cm、滴头流量 2.0 L/h 条件下,灌水定额 37.5~52.5 mm 是滴灌冬小麦适宜的灌水技术参数组合。

参考文献:

- [1] 夏旭,李银坤,陈敏鹏,等.碳氮水添加对华北小麦—玉米双季轮作系统碳平衡的影响[J].西北大学学报,2020,50(2):250-259.
- [2] 任思洋,张青松,李婷玉,等.华北平原五省冬小麦产量和氮素管理的时空变异[J].中国农业科学,2019,52(24):4527-4539.
- [3] 秦雪超,潘君廷,郭树芳,等.化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响[J].农业环境科学学报,2020,39(7):1558-1567.
- [4] 马雪晴,胡琦,王靖,等.基于 SPEI_KC 的华北平原小麦玉米周年干旱特征分析[J].农业工程学报,2020,36(21):164-174.
- [5] 熊淑萍,高明,张志勇,等.基于 GIS 的河南省小麦产量及产量构成要素时空差异分析[J].中国农业科学,2022,55(4):692-706.
- [6] 马新明,张浩,熊淑萍,等.基于 GIS 技术的河南粮食核心区小麦玉米区域潜力研究[J].农业工程学报,2010,26(增刊 1):162-168.
- [7] 陈四龙,陈素英,孙宏勇,等.耕作方式对冬小麦棵间蒸发及水分利用效率的影响[J].土壤通报,2006,37(4):817-820.
- [8] 张迎春,张富仓,范军亮,等.滴灌技术参数对南疆棉花生长和土壤水盐的影响[J].农业工程学报,2020,36(24):107-117.
- [9] 李德智,佟玲,吴宣毅,等.不同滴头流量和灌水频率对玉米产量、耗水及水分利用效率的影响[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):208-215.
- [10] 杨开静,王凤新,马丹,等.滴灌灌水定额对西北旱区春小麦耗水和产量的影响研究[J].节水灌溉,2013(12):12-19.
- [11] 张娜,张永强,唐江华,等.滴灌带配置方式对冬小麦生长及产量的影响[J].麦类作物学报,2013,33(6):1197-1201.
- [12] 黄兴法,胡斌,欧胜雄.滴灌带布置及滴头流量对土壤水氮分布和春小麦产量的影响[J].农业工程,2019,9(10):81-87.
- [13] 要家威,齐永青,李怀辉,等.地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1076-1084.
- [14] 李东伟,李明思,周新国,等.土壤带状湿润均匀性对膜下滴灌棉花生长及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2018,34(9):130-137.
- [15] 曹振玺,李勇,申孝军,等.不同灌水技术参数对农田水盐运移的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(3):57-62.
- [16] 张波,吕廷波,赵秀杰,等.不同灌溉定额对滴灌骏枣生长的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):168-174.
- [17] 李长城,李宏,张志刚,等.滴灌条件下砂壤土枣林的水分入渗及再分布过程[J].西南农业学报,2016,29(9):2155-2161.
- [18] 申孝军,孙景生,刘祖贵,等.灌水控制下限对冬小麦产量和品质的影响[J].农业工程学报,2010,26(12):58-65.
- [19] 丛鑫,庞桂斌,张立志,等.减氮适水对冬小麦光合特性与土壤水氮分布的影响[J].农业机械学报,2021,52(6):324-332.
- [20] 朱嘉伟,赵聪佳,郭蕊蕊,等.水资源约束条件下的县域冬小麦节水灌溉制度[J].农业工程学报,2021,37(1):92-100.
- [21] 党建友,裴雪霞,张定一,等.微喷灌水氮一体化对冬小麦生长发育和水肥利用效率的影响[J].应用生态学报,2020,31(11):3700-3710.
- [24] Dong S Y, Xu Y, Zhou B T, et al. Assessment of indices of temperature extremes simulated by multiple CMIP5 Models over China[J].Advances in Atmospheric Sciences,2015,32(8):1077-1091.
- [25] Zhu H H, Jiang Z H, Li J, et al. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? [J].Advances in Atmospheric Sciences,2020,37(10):1119-1132.
- [26] 张歆然,陈昊明.CMIP6 模式对青藏高原东坡暖季降水的模拟评估[J].气候变化研究进展,2022,18(2):129-141.
- [27] Gao Y H, Xiao L H, Chen D L, et al. Comparison between past and future extreme precipitations simulated by global and regional climate models over the Tibetan Plateau[J].International Journal of Climatology,2018,38(3):1285-1297.
- [28] 姚檀栋,余武生,邬光剑,等.青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险[J].科学通报,2019,64(27):2770-2782.
- [29] 龚成麒,董晓华,魏冲,等.1978—2018 年青藏高原降水区划及各区降水量时空演变特征[J].水资源与水工程学报,2022,33(5):96-108.
- [30] Hu W, Yao J, He Q, et al. Elevation-dependent trends in precipitation observed over and around the Tibetan Plateau from 1971 to 2017[J].Water,2021,13(20):e2848.

(上接第 158 页)