

▪ 作物水肥高效利用 ▪

文章编号: 1672-3317(2022)05-0008-09

不同品种和灌溉模式对冬小麦耗水时空变化及产量的影响

贾潇倩, 王 硕, 房 琴, 李瑞奇*

(河北农业大学 农学院/省部共建华北作物改良与调控国家重点实验室/

河北省作物生长调控实验室, 河北 保定 071001)

摘 要:【目的】探究冬小麦品种耗水时空差异对产量的影响, 为筛选抗旱型品种以提高缺水地区冬小麦产量提供理论依据。【方法】采用双因素裂区设计试验, 以沧麦 6002 (CM6002) 和衡麦 4399 (H4399) 2 个试验品种作为主处理, 每个品种下设 3 个水分处理: 全生育期不灌水 (W0 处理)、春季灌一水 (拔节期灌水, W1 处理) 及春季灌二水 (拔节期和开花期分别灌水, W2 处理), 研究了不同品种冬小麦耗水时空差异对产量的影响。【结果】CM6002 品种总耗水量、土壤贮水消耗量及其占总耗水量的比例和 H4399 品种差异不显著, 但阶段耗水量有较大差异。其中, 播种期至拔节期, CM6002 品种的土壤贮水消耗量、耗水量均高于 H4399 品种; 拔节—开花期, CM6002 品种的土壤贮水消耗量、耗水量显著低于 H4399 品种; 开花期至成熟期, CM6002 品种土壤贮水消耗量、耗水量要高于 H4399 品种, 且在 W1 处理下 2 个品种的差异达到显著水平。W0 处理下, CM6002 品种的 120~200 cm 土层贮水的消耗量要显著高于 H4399 品种。W1、W2 处理下, H4399 品种在 0~40 cm 土层土壤贮水消耗量显著高于 CM6002 品种, 但 120~160 cm 土层显著低于 CM6002 品种。与 H4399 品种相比, CM6002 品种降低了花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率, 但增加了花后干物质积累量和对籽粒的贡献率。W0、W1、W2 处理下, CM6002 品种产量分别较 H4399 品种提高了 2.7%、1.3%、3.2%。【结论】减少拔节—开花期耗水, 增加播种—拔节期、开花—成熟期耗水和深层土壤贮水消耗量, 有利于提高冬小麦产量。沧麦 6002 通过调控不同生育阶段及不同土壤层次的土壤贮水量, 增加了穗数、穗粒数、千粒质量、花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率, 从而获得了较好的产量。

关 键 词: 冬小麦品种; 耗水特性; 干物质积累量; 产量

中图分类号: S512.11

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021606

OSID:



贾潇倩, 王硕, 房琴, 等. 不同品种和灌溉模式对冬小麦耗水时空变化及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 8-16.

JIA Xiaoqian, WANG Shuo, FANG Qin, et al. Effects of Spatial-temporal Dynamics in Crop Water Consumption on Grain Yield of Winter Wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 8-16.

0 引 言

【研究意义】冬小麦是华北平原主要粮食作物之一, 区域冬小麦产量占全国总产量的 50.0%以上^[1]。华北平原从北到南, 冬小麦整个生长季多年平均降水量约为 60~150 mm, 而耗水量却高达 350~470 mm。为了满足作物生长发育的水分需求, 确保较高的产量水平, 冬小麦生长季一般需要灌溉 2~4 次。在华北北部地区, 大规模灌溉导致地下水过度开采, 地下水位不断下降, 严重威胁到水资源平衡^[2]。因此, 筛选抗旱节水型冬小麦品种, 并制定科学合理的灌溉制度, 对区域农业水资源的可持续利用及农业生产的可持续发展具有十分重要的意义。

【研究进展】居辉等^[3]研究发现, 冬小麦拔节时期, 灌水有利于增加穗粒数。开花期灌水提供了灌浆期所需水分, 有利于增加千粒质量^[4]。根据作物需水及降水情况, 合理减少灌溉用水量, 可在保证产量不明显降低的前提下, 提高水分利用效率 (WUE) 10.0%~50.0%^[5]。旱作及限水灌溉条件下, 播前土壤贮水是冬小麦生长季耗水的重要来源, 占总耗水量的 50.0%~80.0%, 充分利用播前土壤贮水是冬小麦高产的关键因素之一^[4, 6]。研究显示, 20 世纪 80 年代至今, 现代品种抗旱能力明显提升, 一个重要的原因是现代品种对土壤贮水的利用能力显著高于过去的品种^[7]。旱作条件下, 抗旱型冬小麦品种耗水量每增加 1.0 mm, 产量可增加 29.6 kg/hm²^[8]。也有研究显示, 冬小麦现代品种和老品种全生育期的耗水量差异并不显著, 但现代品种通过减少花前耗水、增加花后耗水促进了花后干物质的积累^[9], 从而实现更好的产量表现。冬小麦对各土层土壤贮水的吸收与根系分布密切相关, Fang 等^[9]研究表明, 深根系品种 CH1 和浅根系品种

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 国家小麦产业技术体系项目 (CARS-03-05); “十三五” 国家重点研发计划课题 (2017YFD0300900)

作者简介: 贾潇倩 (1997-), 女。硕士研究生, 主要从事作物高产优质理论与技术的研究。E-mail: 3297645399@qq.com

通信作者: 李瑞奇 (1969-), 男。教授, 博士, 主要从事作物高产优质理论与技术的研究。E-mail: li-rq69@163.com

CH58 相比, 0~100 cm 土层贮水消耗量差异不大, 但却明显增加了 100~200 cm 土层的贮水消耗量。适当的干旱有利于促进冬小麦根系下扎, 增强对深层土壤贮水的吸收能力。

【切入点】筛选抗旱型冬小麦品种, 合理减少灌溉用水量是华北平原北部地区应对水资源短缺和干旱胁迫的有效措施。许多研究显示, 冬小麦品种耗水特性存在较大差异, 但关于耗水时空差异如何影响冬小麦产量形成的研究相对较少。【拟解决的关键问题】本研究选用 2 个冬小麦品种, 设置 3 个水分处理, 通过田间试验研究冬小麦各生育阶段、不同土层的贮水消耗量, 阐明耗水时空差异对冬小麦产量的影响, 以期筛选抗旱型冬小麦品种、提高缺水地区冬小麦产量提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020—2021 年在河北省石家庄市藁城区刘家庄村 (114.82°E, 38.00°N) 进行。试验区属半湿润半干旱季风气候, 1991—2020 年 30 a 气象记录显示, 冬小麦整个生长季平均降水量为 121.3 mm, 日平均温度为 8.2 °C。试验区土壤类型为砂质壤土, 0~200 cm 土层平均体积质量为 1.4 g/cm³。播前测定的 0~20 cm 土层有机质量为 16.5 g/kg, 全氮量为 1.1 g/kg, 碱解氮量为 102.2 g/kg, 速效磷量为 10.2 g/kg、速效钾量为 187.0 g/kg。

1.2 试验材料

试验品种为强抗旱型品种沧麦 6002 (CM6002) 和弱抗旱型品种衡麦 4399 (H4399)。CM6002 品种由沧州市农林科学院培育, 抗旱性强, 并有较高的丰产性和稳定性。H4399 品种由河北省农林科学院旱作农业研究所选育, 对水分较为敏感。

1.3 试验设计

试验采用双因素裂区设计, 小麦品种为主处理, 布置在主区, 2 个水平分别为 CM6002 品种和 H4399 品种; 水分处理为副处理, 布置在副区, 3 个水平分别为全生育期不灌水 (W0)、春季灌一水 (拔节期灌水, W1) 和春季灌二水 (分别在拔节期和开花期灌水, W2), 每次灌水量 60.0 mm。2 个因素共组合为 6 个处理, 每个处理重复 3 次, 共设置 18 个试验小区, 每个小区面积为 45.0 m²。

1.4 田间管理措施

前茬玉米收获后秸秆粉碎还田, 冬小麦全生育期施用尿素 (含纯 N 46.0%) 521.7 kg/hm²、磷肥 (P₂O₅, 46.0%) 260.7 kg/hm² 和钾肥 (K₂O, 60.0%) 199.9 kg/hm²。磷肥和钾肥全部作为底肥施用, W0 处理氮

肥全部底施, W1 处理和 W2 处理的氮肥 50.0%作为底肥, 50.0%作为追肥在拔节期施入。施底肥后旋耕 3 遍, 于 2020 年 10 月 11 日播种。播前 0~200 cm 土层平均土壤体积含水率为 31.6%, 土壤贮水量为 631.4 mm。整个生育期内, 各试验小区其他的田间管理措施完全一致, 按当地高产麦田的管理标准实施。

1.5 测定项目与方法

1.5.1 生育期降水量和平均温度

1991—2020 年和 2020—2021 年冬小麦生长季降水量和日平均温度数据来自河北省藁城气象站。

1.5.2 土壤含水率

土壤质量含水率: 选择地势平整、冬小麦生长均匀的地点, 采用土钻在 0~200 cm 土壤剖面上分层采集土样, 每 20 cm 为 1 层, 分别于播种前、越冬期、拔节期、开花期、灌浆期、成熟期进行。采集的土样先装入铝盒中, 测定鲜土质量, 然后放入烘箱中, 于 105 °C 条件下鼓风干燥至恒定质量, 测定干土质量。

土壤质量含水率计算式为:

$$\text{土壤质量含水率} = (\text{鲜土质量} - \text{干土质量}) / (\text{干土质量} - \text{铝盒质量}) \times 100\% \quad (1)$$

土壤体积含水率 = 土壤质量含水率 × 土壤体积质量。 (2)

1.5.3 土壤贮水消耗量 (SWD)

土壤贮水消耗量计算式为:

$$SWD = \sum_{i=1}^n [\frac{\gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2})}{10}], \quad (3)$$

式中: γ_i 为第 i 层土壤体积质量 (g/cm³); H_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); θ_{i1} 和 θ_{i2} 为第 i 层土壤时段初和时段末的土壤质量含水率 (%), 以占干土质量的百分数表示; n 为土壤分层取样的层数。

1.5.4 冬小麦耗水量 (ET) 和水分利用效率 (WUE)

冬小麦各生育阶段的耗水量采用水量平衡法计算:

$$ET = SWD_i + I + R - R_i - D + CR, \quad (4)$$

式中: SWD_i 为阶段土壤贮水消耗量 (mm); I 为时段内的灌水量 (mm); R 为时段内降水量 (mm); R_i 为时段内地面径流交换量 (mm); D 为 0~200 cm 土层的水分渗漏量 (mm); CR 为下部水分上升到 0~200 cm 土层的水量 (mm)。由于试验区内地势平坦, 土层深厚, 整个生育期没有与外界发生水平方向的水分交换, 因此, R_i 忽略不计。由于该地区的地下水位埋深超过 40.0 m, 且整个生育期没有发生大的降水与灌水过程, 因此 D 和 CR 忽略不计, 式 (4) 可简化为:

$$ET = SWD_i + I + R. \quad (5)$$

水分利用效率计算式:

$$WUE = Y/ET, \quad (6)$$

式中: WUE 为水分利用效率 (kg/(hm²·mm)); Y 为冬小麦籽粒产量 (kg/hm²); ET 为全生育期总耗水量 (mm)。

1.5.5 冬小麦干物质积累量

于拔节期、开花期和成熟期分别测定地上部干物质积累量,每个处理重复3次。拔节期在每个小区选取有代表性的植株20株,开花期和成熟期则选取有代表性的20棵单茎。选取的样株收割后,置于105℃烘箱中杀青30 min,然后在80℃鼓风干燥条件下烘干至恒质量,测定各样本的干物质积累量。

1.5.6 冬小麦产量及构成因素

收获前于各小区定点调查各小区单位面积穗数,换算为每公顷穗数。调查时连续取20穗,计算确定平均每穗结实粒数。各取样点获得的样穗,混合晒干后脱粒,用于测定千粒质量。测定时随机选取2组各500粒作为2个样本,测定质量,2份样本质量的差值除以2份样本重量的平均值,如得数小于或等于5.0%,将2份质量相加即为千粒质量;如果差异超过5.0%,则需要选取第3份500粒样本称质量,将3个样本中2份质量相近的相加即为千粒质量。成熟期每个小区均收获2.0 m²植株,脱粒、风干后称取质量,计算确定单位面积的实际籽粒产量。

表1 1991—2020年和2020—2021年冬小麦生长季降水量和日平均气温

Table 1 Rainfall and daily average temperature of winter wheat from 1991 to 2020 and from 2020 to 2021

气象因子	年份	播种期—拔节期	拔节期—开花期	开花期—成熟期	全生育期
降水量/mm	1991—2020	53.2	27.0	36.4	116.7
	2020—2021	60.6	4.3	10.1	75.0
日平均气温/℃	1991—2020	12.0	15.3	21.9	8.2
	2020—2021	14.7	15.6	22.5	9.3

2.2 不同处理下冬小麦土壤体积含水率的变化过程

不同处理冬小麦各生育期土壤体积含水率的变化过程如图1所示。随着生育期的推进,各处理的土壤体积含水率均呈逐渐降低的趋势。120 cm以下土层的体积含水率在整个生育期的变化幅度较小,

1.6 统计分析

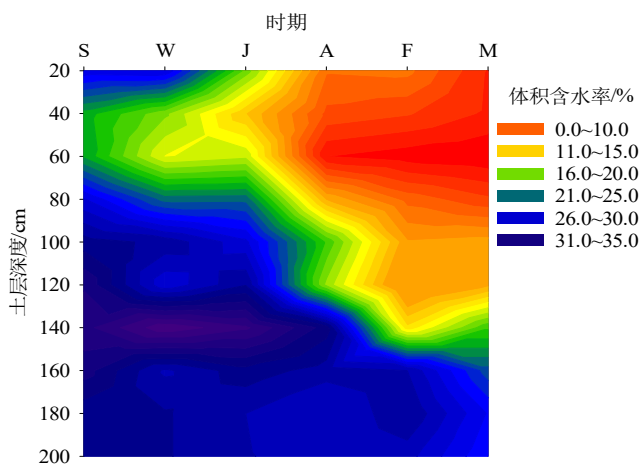
使用Microsoft Excel 2019和IBM SPSS Statistics 25.0进行单因素方差分析(ANOVA),在5.0%的概率水平上,采用邓肯多重检验比较处理间的平均差异,并进行显著性差异检验(LSD法)。利用Microsoft Excel 2019和SigmaPlot 14.0绘图。

2 结果与分析

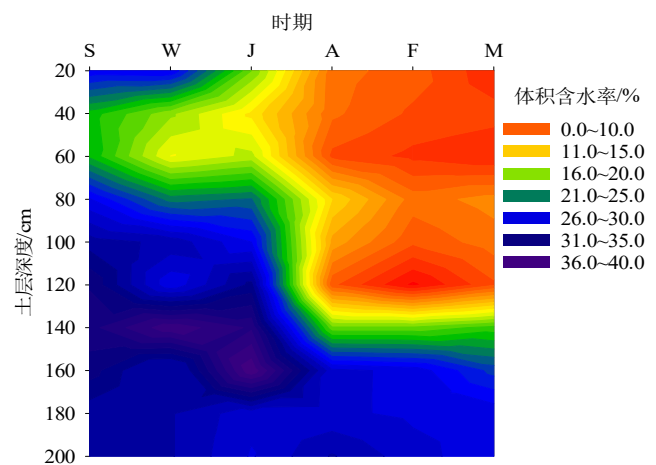
2.1 冬小麦2020—2021生长季降水量和气温变化

整个冬小麦生长季各生育时期的降水量和平均气温见表1,2020—2021年冬小麦生长季降水量仅为75.0 mm,远低于1991—2020年多年平均降水量(116.7 mm)。降水主要发生在播种—拔节期,达60.6 mm,占生育期总降水量的80.8%,而拔节—开花期、开花—成熟期的降水量分别为4.3 mm和10.1 mm,显著低于多年平均值。在这样的气候条件下,全生育期不灌水的W0处理,冬小麦生育后期极易遭受干旱胁迫。2020—2021冬小麦全生育期的日平均温度为9.3℃,明显高于1991—2020年多年平均温度(8.2℃)。

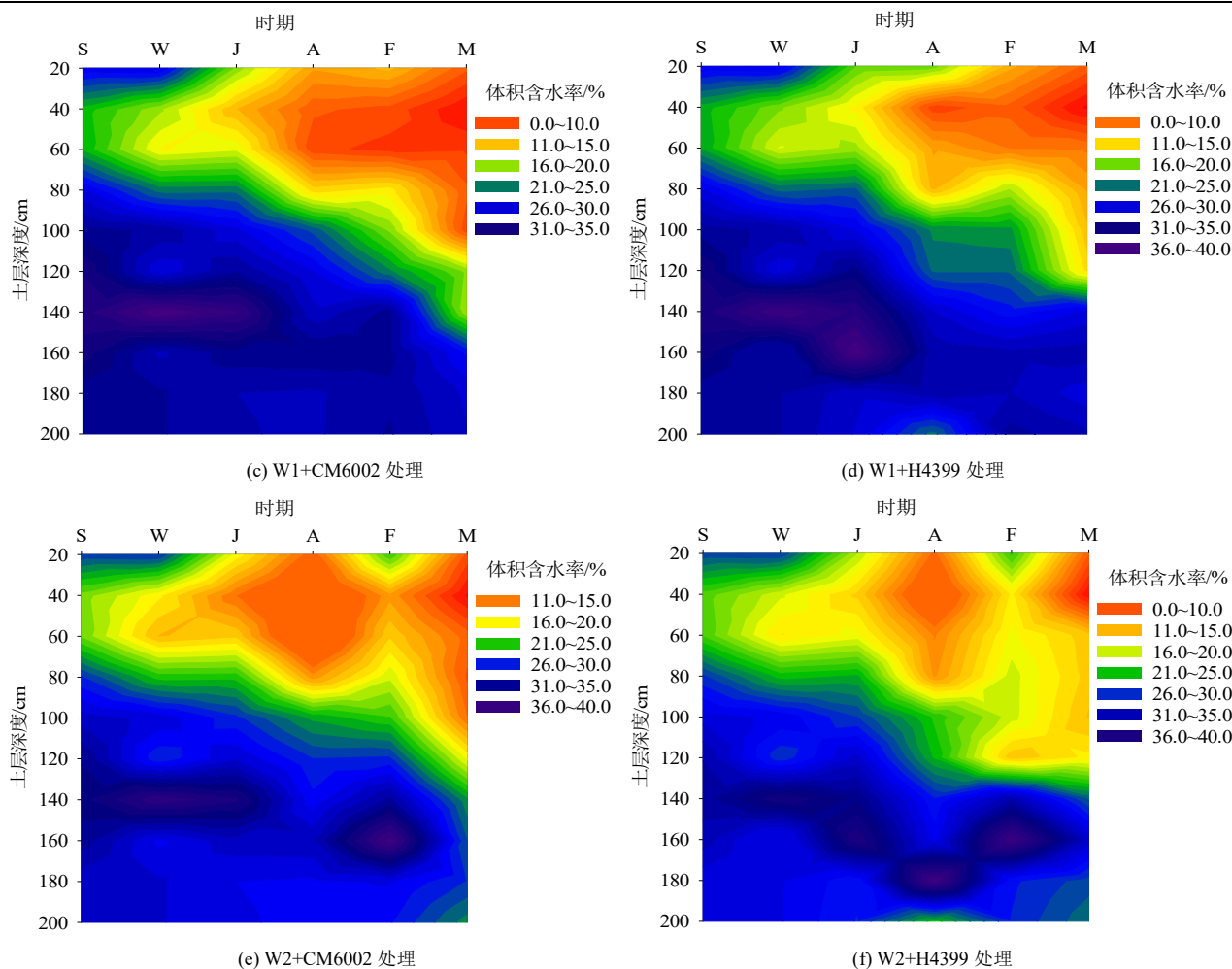
说明冬小麦消耗的水分主要来自0~120 cm土层。W1处理于拔节期、W2处理于拔节和开花期进行了灌水,土壤水分得到补充,因此土壤含水率下降程度要低于W0处理。



(a) W0+CM6002 处理



(b) W0+H4399 处理



注 S 播种期, W 越冬期, J 拔节期, A 开花期, F 灌浆期, M 成熟期。

图 1 冬小麦生育期 0~200 cm 土层体积含水率的变化

Fig.1 Soil water content at different growing stages of winter wheat in 0~200 cm soil layers

2.3 不同处理下冬小麦的总耗水量及耗水组成

由表 2 可知, CM6002 品种全生育期总耗水量、土壤贮水消耗量及其占总耗水量的比例在各水分处理条件下均高于 H4399 品种,而降水量和灌水量占总耗水量的比例则均低于 H4399 品种,但 2 个品种的差异均未达到显著水平。不同处理间比较, CM6002 品

种和 H4399 品种的土壤贮水消耗量、土壤贮水消耗量与降水量占总耗水量的比例均表现为 W0 处理>W1 处理>W2 处理;总耗水量、灌水量占总耗水量的比例则表现为 W2 处理>W1 处理>W0 处理,且 W0 处理和 W2 处理差异显著。由此可见,减少灌水量有利于提高冬小麦对土壤贮水和降水的利用率。

表 2 冬小麦总耗水量及其耗水组成

Table 2 Composition and proportion of water consumption of winter wheat

灌水处理	品种	土壤贮水消耗量		降水量		灌水量		总耗水量/mm
		数值/mm	比例/%	数值/mm	比例/%	数值/mm	比例/%	
W0	CM6002	305.0a	80.3a	75.0	19.7ab	0.0	0.0c	380.0bc
	H4399	290.5ab	79.5a	75.0	20.5a	0.0	0.0c	365.5c
W1	CM6002	266.9bc	66.4b	75.0	18.7bc	60.0	14.9b	401.9ab
	H4399	243.4cd	64.3b	75.0	19.8ab	60.0	15.9b	378.4bc
W2	CM6002	227.1d	53.8c	75.0	17.8c	120.0	28.4a	422.1a
	H4399	219.4d	52.9c	75.0	18.1c	120.0	29.0a	414.4a

注 同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著,下同。

2.4 不同处理下冬小麦各生育阶段的耗水量变化

各处理不同生育阶段的水分消耗量及来源如表 3 所示。拔节一开花期是整个生育期耗水量最大的阶段,

其中 CM6002 品种和 H4393 品种的耗水模系数分别在 35.0%~36.7%、41.8%~45.8%范围内变化。在播种一拔节期,CM6002 品种的土壤贮水消耗量、总耗水量、

耗水模系数均高于 H4399 品种,但尚未达到显著水平。拔节—开花期, CM6002 品种的土壤贮水消耗量、耗水量显著低于 H4399 品种。开花—成熟期, CM6002 品种土壤贮水消耗量、耗水量高于 H4399 品种,但只在 W1 处理下差异显著。CM600 品种在生育前期(播种—拔节期)和生育后期(开花—成熟期)对土壤贮水的利用量都比 H4399 品种要高,而在生育中期则要低于 H4399 品种。

表 3 冬小麦各生育阶段土壤贮水消耗量、耗水量及耗水模系数

Table 3 Soil water storage consumption, water consumption and Water consumption model coefficient at each growth stage of winter wheat

灌水处理	品种	播前一拔节期			拔节—开花期			开花—成熟期		
		土壤贮水	总耗	耗水模	土壤贮水	总耗	耗水模	土壤贮水	总耗	耗水模
		消耗量/mm	水量/mm	系数/%	消耗量/mm	水量/mm	系数/%	消耗量/mm	水量/mm	系数/%
W0	CM6002	73.2a	133.8a	35.2a	134.1b	138.4c	36.4b	97.7ab	107.8bc	28.4ab
	H4399	54.9a	115.5a	31.6a	162.1a	166.4ab	45.5a	73.5bc	83.6c	22.9b
W1	CM6002	73.2a	133.8a	33.3a	83.3d	147.6bc	36.7b	110.4a	120.5ab	30.0ab
	H4399	54.9a	115.5a	30.5a	108.8c	173.1a	45.8a	79.5bc	89.8c	23.7b
W2	CM6002	73.2a	133.8a	31.7a	83.3d	147.6bc	35.0b	70.6bc	140.7a	33.3a
	H4399	54.9a	115.5a	27.9a	108.8c	173.1a	41.8ab	55.7c	125.8ab	30.4ab

2.5 不同处理下全生育各土层水分消耗状况

由表 4 可知,冬小麦耗水主要来自 0~120 cm 土层, CM6002 品种和 H4399 品种在 0~120 cm 土层的土壤贮水消耗量分别占 0~200 cm 土层贮水消耗量的 77.6%~79.0%、80.7%~88.8%。

W0 处理下,除 80~120 cm 土层外,其余各土层的土壤贮水消耗量均为 CM6002 品种高于 H4399 品种,在 40~80 cm 和 160~200 cm 土层品种间差异达到显著水平。W1 处理和 W2 处理下, CM6002 品种在 0~40、80~120 cm 土层土壤贮水消耗量低于 H4399 品

种,且在 0~40 cm 土层的差异达到显著水平,说明 H4399 品种更有利于吸收表层土壤水分;而在 40~80、120~200 cm 土层 CM6002 品种的土壤贮水消耗量则高于 H4399 品种,且在 120~160 cm 土层品种间差异显著,说明 CM6002 品种更有利于吸收深层土壤水分。

土壤贮水消耗量呈现出随着灌水量的增加而减少的趋势,其中 CM6002 品种在 0~160 cm 土层, H4399 品种在 40~160 cm 土层的土壤贮水消耗量差异显著,说明增加灌溉量主要降低了 2 个品种对 160 cm 以上土层土壤贮水的吸收。

表 4 冬小麦播种—成熟期 0~200 cm 土层的土壤贮水消耗量分布

Table 4 Distribution of soil water storage consumption in 0~200 cm soil layer of winter wheat from sowing to maturity

灌水处理	品种	土层深度/cm									
		0~40		40~80		80~120		120~160		160~200	
		数值/mm	比例/%	数值/mm	比例/%	数值/mm	比例/%	数值/mm	比例/%	数值/mm	比例/%
W0	CM6002	75.1ab	24.6b	77.3a	25.3a	85.0ab	27.9a	47.8a	15.7a	19.8a	6.5b
	H4399	71.2ab	24.5b	67.0b	23.1bc	96.3a	33.1a	44.1ab	15.2a	11.9b	4.1c
W1	CM6002	68.1b	25.5b	65.9bc	24.7ab	76.8bc	28.8a	46.2a	17.3a	9.9b	3.7c
	H4399	75.8a	31.1a	61.1c	25.1ab	79.3bc	32.6a	18.5c	7.6b	8.7b	3.6c
W2	CM6002	57.6c	25.4b	51.2d	22.5c	67.4c	29.7a	31.9b	14.0a	19.0a	8.4a
	H4399	70.5ab	32.1a	42.1e	19.2d	70.7bc	32.2a	17.7c	8.1b	18.4a	8.4a

2.6 冬小麦生育前期和生育后期对土壤贮水消耗的差异

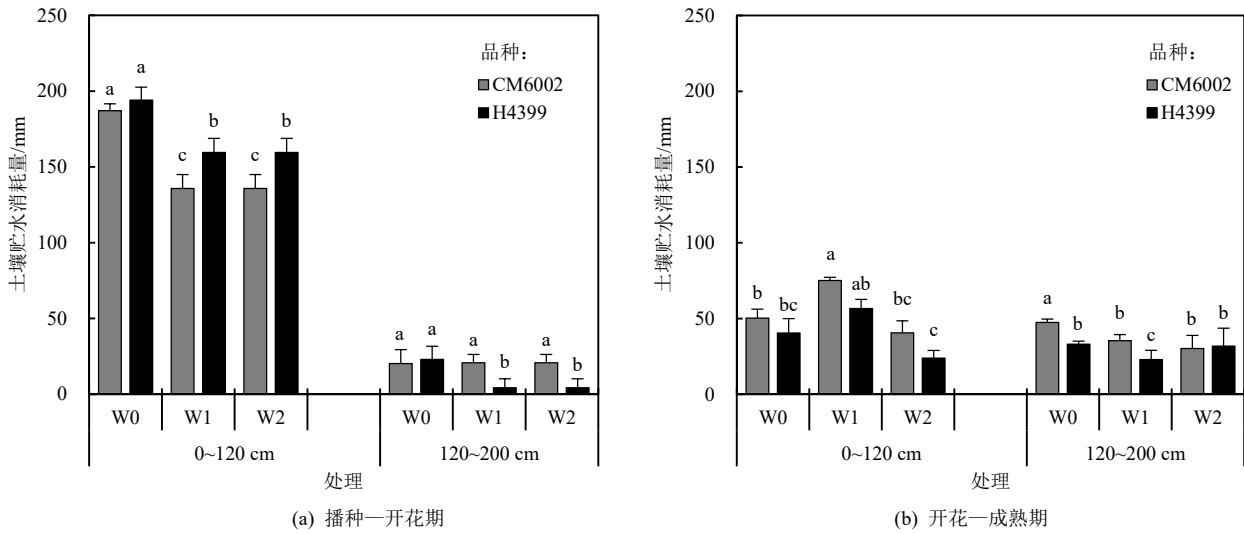
图 2 为生育前期(播种—开花期)和生育后期(开花—成熟期)各处理对上层土壤(0~120 cm)和下层土壤(120~200 cm)土壤贮水的消耗情况。2 个品种均表现为生育前期对上层土壤贮水消耗量显著高于生育后期,而对下层土壤贮水消耗量则表现为生育后

期高于生育前期,显示随生育时期推进,冬小麦对深层土壤贮水吸收能力变强,这可能与开花期至成熟期降水量较少,表层土壤含水率较低,干旱促进了根系对深层土壤水分的吸收有关。

2 个品种相比,在播种至开花期, CM6002 品种较 H4399 品种的 0~120 cm 土层土壤贮水消耗量要低,但 120~200 cm 土层土壤贮水消耗量要高,这一趋势

在 2 个灌水处理下的差异均达到显著水平；在开花—成熟期，CM6002 品种相比 H4399 品种在上层和下层土壤的贮水消耗量均要高，且在 W0、W1 水分处理下均达到显著水平，表明 CM6002 品种有利于降

低生育前期对 0~120 cm 土层土壤贮水的吸收，增加开花后对 0~200 cm 土层土壤贮水的吸收，特别是对 120 cm 以下土层贮水的吸收。



注 不同小写字母表示同一土层不同处理间在 0.05 水平下差异显著。

图 2 冬小麦播种—开花期和开花—成熟期的耗水时空分布变化

Fig.2 Temporal and spatial distribution of water consumption of winter wheat from sowing to anthesis and from flowering to maturity

2.7 不同处理下各生育阶段干物质积累量及对籽粒的贡献率

由表 5 可知，CM6002 品种播种—拔节期、拔节—开花期、开花—成熟期的阶段干物质积累量均比 H4399 品种高，且在拔节—开花期 2 个品种的差异达到显著水平。花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率均表现为 H4399 品种 > CM6002 品种，而花后干物质积累对籽粒的贡献率则表现为 CM6002 品种 > H4399 品种，说明 CM6002 品种可增加各生育阶段干物质积累量和花后干物质对籽粒的贡献率，但花前干物质向籽粒中的转运率则较低。

不同水分处理之间比较，拔节—开花期，2 个品

种阶段干物质积累量均表现为灌水处理显著高于不灌水处理，且 2 个灌水处理间没有差异；开花—成熟期，2 个品种均表现出阶段干物质积累量随灌水量的增加显著增加的趋势，但 CM6002 品种各处理之间的差异达到显著水平，而 H4399 品种表现灌水与不灌水处理差异显著，2 个水分处理之间的差异不显著。花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率表现为 W0 处理 > W1 处理 > W2 处理，花后干物质对籽粒贡献率则表现为 W2 处理 > W1 处理 > W0 处理。拔节期和开花期灌水促进了花后干物质积累及向籽粒转运，但不利于花前干物质向籽粒转运。

表 5 冬小麦各生育时期干物质积累量和干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率

Table 5 Dry matter accumulation, dry matter mobilization, dry matter mobilization efficiency and contribution rate to grain of winter wheat at different growth stages

灌水处理	品种	阶段干物质积累量/(kg·hm ⁻²)			花前干物质转运		干物质积累对籽粒的贡献率/%	
		播种—拔节期	拔节—开花期	开花—成熟期	转运量/(kg·hm ⁻²)	转运率/%	花前	花后
W0	CM6002	4 474.6a	8 327.9b	2 673.4c	3 648.6b	28.5b	57.7b	42.3bc
	H4399	3 667.9a	6 502.6c	1 645.8c	4 508.1a	44.3a	73.3a	26.7c
W1	CM6002	4 474.6a	11 934.7a	5 392.2b	2 990.3b	18.2d	35.7c	64.3ab
	H4399	3 667.9a	8 498.6b	5 236.4b	3 038.4b	25.0c	36.7c	63.3ab
W2	CM6002	4 474.6a	11 934.7a	8 463.3a	1 164.4c	7.1f	12.1d	87.9a
	H4399	3 667.9a	8 498.6b	7 707.4ab	1 617.5c	13.3e	17.4d	82.7a

2.8 不同处理下产量、产量构成要素及 WUE 的变化

不同处理的产量、产量构成要素及 WUE 的变化见表 6。穗数、穗粒数、千粒质量等指标均表现为 CM6002 品种高于 H4399 品种的趋势，其中穗粒数差

异达到了显著水平。

在各水分处理下，CM6002 品种的产量都要高于 H4399 品种，但差异未达到显著水平。不同水分处理相比较，随着灌水量的增加，2 个品种的产量均会显

著增加。2 个品种的 WUE 均以 W2 处理最高, W1 处理次之, W0 处理最低, 表明灌水能够明显提高冬小麦产量和 WUE 。

表 6 冬小麦产量、产量构成要素及水分利用效率

Table 6 Yield, yield components and water use efficiency (WUE) of winter wheat

灌水处理	品种	千粒质量/g	穗数/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数	产量/(kg·hm ⁻²)	水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
W0	CM6002	38.4bc	600.0b	35.8cd	6 322.0c	16.6c
	H4399	36.4c	555.0b	32.4e	6 153.9c	16.8c
W1	CM6002	40.9ab	765.0a	40.4a	8 382.5b	20.9b
	H4399	40.0ab	753.4a	36.1cd	8 274.8b	21.9ab
W2	CM6002	42.4a	868.4a	37.8bc	9 627.7a	22.8a
	H4399	41.4a	803.4a	35.3d	9 324.9a	22.5ab

3 讨论

王克武等^[10]研究表明, 同一灌水量下, 品种间总耗水量差异不显著, 但产量差异显著。高春华等^[11]研究表明, 高产品种总耗水量和产量显著高于低产品种。本研究中, CM6002 品种和 H4399 品种的总耗水量无显著差异, 但 CM6002 品种相比 H4399 品种产量增加了 1.3%~3.2%, 这与已有的研究相似。另有研究指出, 品种间各生育阶段耗水差异对产量的影响要大于总耗水量差异的影响^[12]。吴金芝等^[13]研究认为, 抗旱高产型品种增加了播种—拔节期的耗水量, 降低了开花—成熟期的耗水量。播种—拔节期阶段耗水量的增加维持了冬小麦较快的生长势, 积累了较多的同化物, 有利于分蘖成穗和幼穗分化^[13-14]。本研究中, 高产 CM6002 品种在该阶段耗水量相比 H4399 品种提高了 15.8%, 最终穗数和穗粒数也都高于 H4399 品种, 这与吴金芝等^[13]的研究一致。不同的是, 本研究中 CM6002 品种开花—成熟期阶段耗水量也有所增加。Yang 等^[15]、王得梅等^[16]研究认为, 开花后耗水较多的冬小麦品种有利于籽粒灌浆, 提高籽粒产量。本研究中, 开花后降水量仅为 10.1 mm, 且单次降水未超过 4.0 mm, 冬小麦极易遭受干旱胁迫, CM6002 品种通过增加花后耗水量, 千粒质量较 H4399 品种提高了 2.3%~5.5%, 与以往研究结果相一致。

干物质是产量形成的基础, 其积累和转运是决定产量的关键。全锦等^[14]研究表明, 花前耗水量与花前干物质积累量和转运量显著正相关, 超高产品种通过增加花前耗水量显著提高了花前干物质转运量、转运率和对籽粒的贡献率。本研究中, CM6002 品种则是通过增加花后耗水量, 提高花后干物质积累量和对籽粒的贡献率提高产量, 该结果与蒋逢春等^[17]研究一致, 但与全锦等^[14]的结果有所不同, 因此仍需深入研究相关的作用机理。

华北平原夏季降水较多, 冬小麦播种前土壤贮水充足, 充分利用播种前的土壤贮水是减少灌水量及保持冬小麦高产稳产的关键^[4]。作物对土壤贮水的吸收

利用与根系分布密切相关, 冬小麦根系下扎深度可达 200 cm, 但由于深层根系较少, 因此发生土壤贮水显著消耗的土层只有 120 cm, 且耗水主要来自 0~60 cm 土层^[18]。本研究中, 冬小麦贮水消耗主要来自 0~120 cm 土层, 占 0~200 cm 总量的 77.6%, 这与杨晓亚等^[19]研究结果一致。高春华等^[11]研究认为, 高产品种可有效利用 140~200 cm 土层的深层土壤贮水。隋鹏等^[20]研究显示, 同一水分处理下, 抗旱型和喜水肥品种 0~200 cm 土层土壤贮水消耗量差异不显著, 但抗旱型品种减少了 0~100 cm 土层土壤贮水消耗量, 增加了 100~200 cm 深层土壤贮水消耗量, 产量提高了 5.7%。Kirkegaard 等^[21]研究显示, 旱作条件下, 冬小麦从 135~185 cm 土层多吸收 10.0 mm 的土壤水分, 产量可增加 600.0 kg/hm²。本研究中, 高产 CM6002 品种明显增加了对深层土壤贮水的吸收利用, 120~200 cm 土层贮水消耗量较 H4399 品种高 20.7%~106.8%, 深层土壤贮水消耗量的增加为其获得高产奠定了良好的基础。

冬小麦的阶段耗水量, 除了与品种特性有关外, 还与所处的生育时期、土壤条件、气候状况、特别是降水模式及灌溉制度有着密切联系^[22-23]。由于只有 1 a 的试验数据, 并且 2020—2021 年冬小麦生育期降水总量严重偏少, 且主要分布在播种—拔节期间, 因此本文所得结论的代表性还有待进一步检验, 尚需要在不同水文年型下开展多年试验, 才能全面反映不同品种、不同灌水处理对耗水量、土壤贮水消耗量、产量及水分利用效率的影响, 得出具有较好通用价值的研究结果。

4 结论

1) 沧麦 6002 和衡麦 4399 的 2 个品种的全生育期总耗水量差异不显著, 但不同生育阶段的耗水量有较大差异。与衡麦 4399 相比, 沧麦 6002 增加了播种—拔节期、开花—成熟期的耗水量, 降低了拔节—开花期耗水量。

2) 冬小麦对土壤贮水的消耗主要来自 0~120 cm

土层,与衡麦 4399 相比,沧麦 6002 降低了播种一开花期 0~120 cm 土层贮水消耗量,增加了开花一成熟期 0~200 cm 土层贮水消耗量。

3) 沧麦 6002 通过调控不同生育阶段和不同土壤层次贮水的消耗,增加了穗数、穗粒数、千粒质量、花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率,实现了最终产量的提高。

参考文献:

- [1] LI Jiamin, L N A N A G A Shinobu, LI Zhaohu, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2005, 76(1): 8-23.
- [2] SUN Hongyang, LIU Changming, ZHANG Xiyi, 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.
- [3] 居辉, 兰霞, 李建民, 等. 不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究[J]. 中国农业大学学报, 2000(5): 23-29.
JU Hui, LAN Xia, LI Jianmin, et al. Effects of different irrigation systems on winter-wheat yield and water consumption [J]. Journal of China Agricultural University, 2000(5): 23-29.
- [4] 邵云, 李晓波, 崔景明, 等. 华北平原南部一年两熟区不同搭配作物光合性能比较研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 84-91.
SHAO Yun, LI Xiaobo, CUI Jingming, et al. Comparative study on photosynthetic performance of different collocation patterns in the double-cropping area in the southern part of North China Plain[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2020, 48(6): 84-91.
- [5] QIN Shujing, LI Sien, KANG Shaozhong, et al. Can the drip irrigation under film mulch reduce crop evapotranspiration and save water under the sufficient irrigation condition[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 128-137.
- [6] ZHANG Xiyi, WANG Yanzhe, SUN Hongyong, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply[J]. Irrigation Science, 2013, 31(5): 1103-1112.
- [7] ZHANG Xiyi, CHEN Suying, SUN Hongyong, et al. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors[J]. Field Crops Research, 2009, 114(1): 75-83.
- [8] 任婕, 孙敏, 任爱霞, 等. 不同抗旱性小麦品种耗水量及产量形成的差异[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(2): 211-220.
REN Jie, SUN Min, REN Aixia, et al. Difference in water consumption and yield among different drought-resistant wheat cultivars[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 211-220.
- [9] FANG Yan, DU Yanlei, WANG Jun, et al. Moderate drought stress affected root growth and grain yield in old, modern and newly released cultivars of winter wheat[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8(672): 1-14.
- [10] 王克武, 王志平, 郑雅莲, 等. 小麦高 *WUE* 品种筛选和田间耗水规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 69-73.
WANG Kewu, WANG Zhiping, ZHENG Yalian, et al. Study on wheat high *WUE* variety screening and water consumption in field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 69-73.
- [11] 高春华, 于振文, 石玉, 等. 测墒补灌条件下高产小麦品种水分利用特性及干物质积累和分配[J]. 作物学报, 2013, 39(12): 211-219.
GAO Chunhua, YU Zhenwen, SHI Yu, et al. Water use characteristics and dry matter accumulation and distribution of high-yield wheat varieties under supplemental irrigation with soil moisture measurement[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(12): 211-219.
- [12] ZHOU Lingyun. Water supply and potential productivity in rainfed wheat field in Fengqiu region[J]. Journal of Soil, 1993(3): 297-303.
- [13] 吴金芝. 冬小麦不同抗旱性品种光合、物质运转和水分利用特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
WU Jinzhi. Characteristics of photosynthesis, matter transport and water use in winter wheat cultivars with different drought resistance [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [14] 全锦, 孙敏, 任爱霞, 等. 高产小麦品种植株干物质积累运转、土壤耗水与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2020, 53(17): 3467-3478.
TONG Jin, SUN Min, REN Aixia, et al. Relationship between plant dry matter accumulation and operation, soil water consumption and yield of high yield wheat varieties [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(17): 3467-3478.
- [15] YANG Wenjia, LIU Weijian, LI Yulin, et al. Increasing rainfed wheat yield by optimizing agronomic practices to consume more subsoil water in the loess plateau[J]. The Crop Journal, 2021, 9(6): 1418-1427.
- [16] 王德梅, 于振文, 许振柱, 等. 高产条件下不同小麦品种耗水特性和水分利用效率的差异[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6552-6560.
WANG Demei, YU Zhenwen, XU Zhenzhu, et al. Differences in water consumption characteristics and water use efficiency among wheat cultivars under high yield conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6552-6560.
- [17] 蒋逢春. 测墒补灌条件下不同小麦品种土壤水分利用与光合特性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
JIANG Pengchun. Study on soil water use and photosynthetic characteristics of different wheat varieties under supplementary irrigation with soil moisture measurement[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [18] 张建军, 唐小明, 党翼, 等. 灌水量及其分配方式对冬小麦水分利用效率、光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2008(1): 85-90.
ZHANG Jianjun, TANG Xiaoming, DANG Yi, et al. Effects of irrigation amount and distribution patterns on water use efficiency, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2008(1): 85-90.
- [19] 杨晓亚. 灌水时期和灌水量对小麦产量形成和水分利用特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
YANG Xiaoya. Effects of irrigation period and irrigation amount on yield formation and water use characteristics of wheat [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2008.
- [20] 隋鹏, 张海林, 许翠, 等. 节水抗旱与喜水肥型小麦品种土壤水分消耗特性的比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005(4): 26-88.
SUI Peng, ZHANG Hailin, XU Cui, et al. Comparison of soil water consumption characteristics between water-saving and drought-resistant wheat cultivars and water-loving wheat cultivars[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005(4): 26-88.
- [21] KIRKEGAARD J A, LILLEY J M, HOWE G N, et al. Impact of subsoil water use on wheat yield[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58: 303-315.
- [22] FANG Yan, LIANG Liyan, LIU Shuo, et al. Wheat cultivars with small root length density in the topsoil increased post-anthesis water use and grain yield in the semi-arid region on the loess plateau-sciencedirect[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 124: 126243-126256.
- [23] 刘为健, 杨文稼, 王盈盈, 等. 2 个小麦品种水分利用效率的差异及其与深层水分利用的关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 245-258.
LIU Weijian, YANG Wenjia, WANG Yingying, et al. Difference of water use efficiency between two wheat cultivars and its relationship with deep water use[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 245-258.

Effects of Spatial-temporal Dynamics in Crop Water Consumption on Grain Yield of Winter Wheat

JIA Xiaoqian, WANG Shuo, FANG Qin, LI Ruiqi*

(College of Agronomy, Hebei Agricultural University/State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation/
Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Hebei Province, Baoding 071001, China)

Abstract: **【Objective】** The effect of water consumption of winter wheat varieties on yield was investigated to provide theoretical basis for selecting drought-resistant varieties to improve winter wheat yield in water-deficient areas. **【Method】** A two-factor randomized block design was adopted, Cangmai 6002 (CM6002) and Heng 4399 (H4399) were used as the main treatments. Three water treatments were set for each variety: no irrigation in the whole growth stage (W0), spring first water (irrigation at jointing stage, W1) and spring second water (irrigation at jointing stage and anthesis stage, W2), each irrigation amount was 60.0 mm. The effects of water consumption difference in different growth stages and soil layers on winter wheat yield were studied. **【Result】** There was no significant difference between CM6002 and H4399 in total water consumption, soil water storage consumption and its proportion in total water consumption, but there was a great difference in water consumption at different stages. From sowing to jointing stage, soil water storage consumption and water consumption of CM6002 were higher than H4399, but there was no significant difference among varieties. From jointing to anthesis stage, CM6002 soil water storage consumption and water consumption were significantly lower than H4399. From anthesis to maturity, water storage consumption and water consumption of CM6002 were higher than those of H4399, and there were significant differences between the two cultivars under W1. Under W0, soil water storage consumption of CM6002 in 120~200 cm soil layer was significantly higher than that of H4399. Under W1 and W2, soil water storage consumption of H4399 in 0~40 cm soil layer was significantly higher than that of CM6002, but that in 120~160 cm soil layer was significantly lower than that of CM6002. Compared with H4399, CM6002 decreased the pre-anthesis dry matter mobilization, dry matter mobilization efficiency and contribution rate to grain, but increased the post-anthesis dry matter accumulation and contribution rate to grain. The yield of CM6002 was 2.7%, 1.3% and 3.2% higher than that of H4399 for W0, W1 and W2, respectively. **【Conclusion】** Under the experimental conditions, reducing water consumption from jointing to anthesis, increasing water consumption from sowing to jointing, anthesis to maturity and deep soil water storage consumption were beneficial to increase winter wheat yield.

Key words: winter wheat varieties; water consumption characteristics; dry matter accumulation; yield

责任编辑: 韩 洋