

DOI:10.13866/j.azr.2026.05.16
CSTR:32277.14.AZR.20260516

土壤水分水平对干旱区冬小麦糖积累及产量的调节

张颖^{1,2}, 艾鹏睿^{1,2}, 马英杰^{1,2}, 付秋萍^{1,2}, 温嘉旭^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 冬小麦是中国西北地区主要粮食作物, 受水资源匮乏和灌溉方式不当影响, 其增产仍面临诸多挑战。本研究于2022—2024年以冬小麦不同生育期的田间持水量(FC)50%、65%、80%为土壤水分下限, 设计6个处理(W1~W6), 探究土壤水分下限对冬小麦耗水、生长、籽粒酶活性、糖积累、产量及水分利用效率(WUE)的调控效应并进行综合效益评价。结果表明: 成熟时, 2022—2024年W3处理均有利于小麦生长和产量形成。生长参数比W6处理增加了14.05%~17.42%, 籽粒灌浆速率快1.22~1.35倍, 产量提高20.22%, WUE提高19.15%。W3处理籽粒三种糖合成关键酶活性受损程度较轻, 灌浆中后期仍具备一定的碳同化能力, 糖积累量比W6处理增加13.38%~19.86%, 说明W3处理有利于籽粒蔗糖淀粉合成。相关性分析和偏最小二乘路径(PLS-PM)建模表明, 合理调控土壤水分可改善植株生长, 增强籽粒酶活性, 促进蔗糖代谢与淀粉积累, 从而提高产量和WUE。W3处理在综合效益评价中两年排名均第一, 产量分别为10625.54 kg·hm⁻²和10344.43 kg·hm⁻²。综上, 抽穗至灌浆期按80%FC作为土壤水分下限, 其他生育期均按65%FC, FC作为上限灌水是在干旱区种植冬小麦的较优灌溉方案。本研究阐明了较为合理的灌溉制度, 并为评估和选择更好的冬小麦种植管理实践提供了依据。

关键词: 冬小麦; 土壤水分下限; 酶活性; 蔗糖淀粉; 综合效益评价

小麦是我国重要的粮食作物之一, 其中, 西北地区占全国小麦总产地的35.9%^[1]。新疆位于西北内陆地区, 常年干旱少雨, 水资源短缺已成为当前农业生产中亟待解决的问题, 合理的灌溉制度是发展节水农业的关键, 也是保证作物高产优质高效的重要措施之一^[2]。土壤水分过多或过少都会限制生长, 小麦高产稳产和高效用水的关键在于通过合理灌溉调控土壤水分状况与小麦需水特性协调一致^[3]。

关键生育期的土壤水分和适当的灌水起始阈值是影响小麦生长和产量的关键^[4-5]。研究表明, 在拔节期50%或75%灌溉量都累积了较少的生物量(100%灌溉量为60 mm), 但在开花期或乳熟期50%灌溉量时的生物量受影响最小^[6]。抽穗期是小麦形态发育的关键需水期, 此阶段的水分亏缺会导致作物的株高、茎粗、叶面积等因细胞缺水而显著下降, 抽穗期后, 受到干旱胁迫将直接影响小麦叶片的衰

老使小麦产量下降^[7-8]。在拔节期和开花期分别灌水75 mm的处理下获得的产量最高, 优化了小麦花前花后的水分利用, 延长灌浆期, 增加花后干物质质量。灌浆期适宜的水分条件能够延缓小麦的灌浆过程, 增加灌浆持续时间, 显著提高千粒重, 进而达到增产效果^[9-10]。上述研究明确了单个或多个关键生育期土壤水分对小麦生长及产量的作用, 且将各生育期作为独立单元开展水分管理, 但忽略了干旱区冬小麦不同生育期土壤水分下限协同调控及生育阶段关联性这一关键问题, 未能揭示各生育阶段间的协同效应。

籽粒淀粉的合成与积累直接影响产量形成, 其含量占籽粒干重的65%~70%^[11]。源器官合成的光合同化物通过蔗糖形式输送到籽粒, 然后经过多种酶促反应转化为淀粉^[12], 糖向淀粉转化的效率主要受相关酶活性影响^[13]。现有研究表明, 低温和干旱

收稿日期: 2025-10-31; 修订日期: 2025-12-27

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目(2023B02024-3); 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2022A02011-2); 自治区人才发展基金“天山领军人才”计划项目(2024TSYCLJ0013); 新疆维吾尔自治区水利厅院士专家工作站(2024.D-004)

作者简介: 张颖(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事灌溉节水理论研究。E-mail: zying202303@163.com

通讯作者: 艾鹏睿。E-mail: a5124659@163.com

1077-1090页

<http://azr.xjegi.com>

胁迫通过影响籽粒干物质分配和淀粉合成降低小麦产量^[14-16],土壤水分与籽粒淀粉含量之间存在正相关关系^[13,17],水分过度亏缺会抑制小麦籽粒与淀粉合成相关酶活性,从而导致淀粉积累不足,影响小麦干物质生产和籽粒形成,降低籽粒产量。尚保华等^[18]指出,充足灌溉有助于提高小麦产量,但可能导致品质出现“稀释效应”。氮是蛋白质合成的关键元素^[19],过度灌溉稀释土壤氮素并导致根际缺氧,削弱根系对氮的吸收。生理胁迫引发代谢紊乱,使能量更多用于抗逆进而抑制蛋白质合成^[20],最终降低品质^[21]。因此,适宜的灌水量有利于小麦籽粒蛋白、淀粉及产量的提高^[22-24]。合理的灌水措施能够挖掘高产优质品种的潜力,实现产量与品质协调统一。

目前,关于水分水平对小麦生长、营养物质积累及产量形成的影响研究已取得较多成果,但受小麦品种、研究方法、土壤条件等多种因素的影响,不同研究得出的结果存在差异。对于土壤水分下限对干旱区冬小麦生长、产量和水分利用效率(WUE)的综合影响及各指标形成因果关系有待进一步研究;在不同土壤水分下限下揭示小麦籽粒酶活性变化对营养物质积累量的影响还有很大的研究空

间。为此,本研究量化不同土壤水分下限对小麦生长生理指标及产量的影响,阐明籽粒糖合成关键酶活性变化和籽粒中糖积累的关系,并对5个方面的13个指标进行综合评判,确定适宜的土壤水分下限灌溉策略。为实现新疆昌吉地区以及干旱区冬小麦节水栽培提供实践依据。

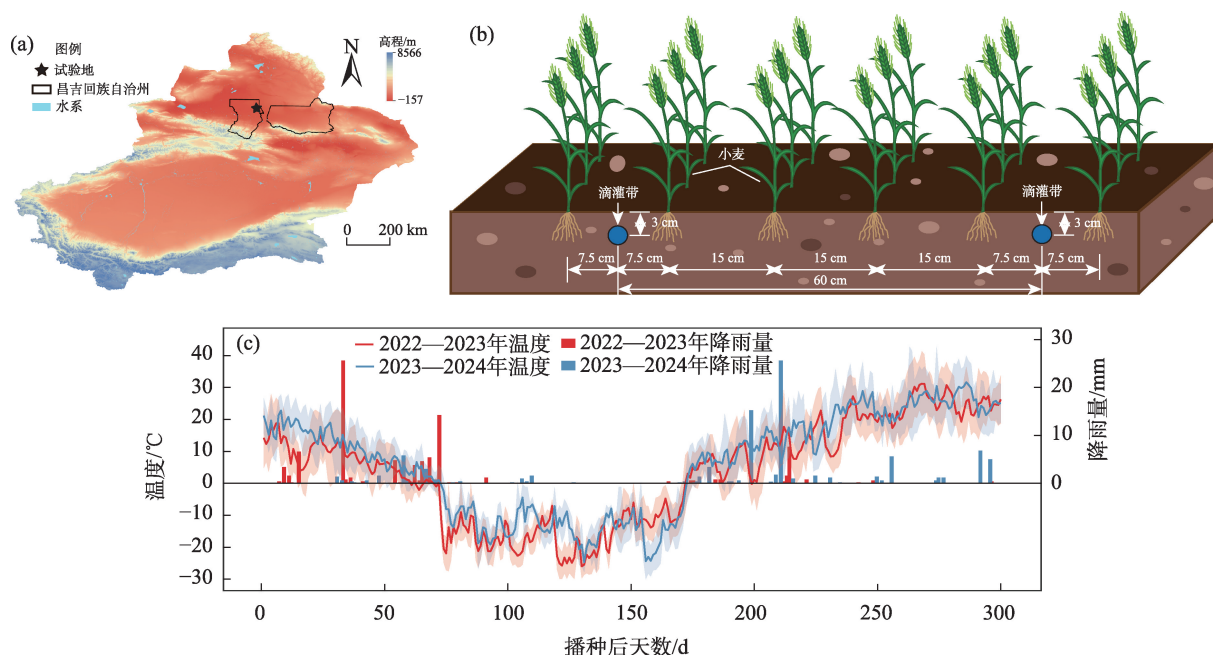
1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022—2024年在新疆昌吉华兴农场灌区试验基地(44°12'6"N, 87°18'0"E)进行(图1a, 图1c)。试验场地属于温带大陆性干旱气候,该地区降雨稀少,光热集中,年均气温6.5℃,年平均降水量为190 mm,年日照时数为2700 h,太阳年辐射总量为5489 MJ·m⁻²。两个生长季的日降水量和平均气温如图1c所示。播种前,从60 cm深度的土壤剖面(0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm)采集土壤样本,用于实验室测量土壤理化性质。试验场地的土壤质地为沙壤土,地下水埋深>10 m。具体土壤理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

新冬22号是西北干旱地区广泛栽培的小麦品



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2023)2767号,对底图边界无修改。

图1 试验地位置、生长季内日降水量、温度及试验地种植示意图

Fig. 1 Location of the experimental site, daily precipitation during the growing season, temperature, and planting schematic diagram of the experimental site

表1 试验地土壤理化性质

Tab. 1 Soil physical properties in the experimental field

土层 深度/cm	有机质/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	pH	容重/ (g·cm ⁻³)	田间持 水量/%
0~20	15.04	6.54	339.86	13.32	4.50	0.56	1.12	18.54	7.60	1.59	27.32
20~40	12.23	5.61	203.43	10.65	4.86	0.42	1.01	16.52	7.81	1.61	26.00
40~60	9.12	4.12	160.12	12.43	4.65	0.33	0.89	15.16	8.03	1.67	25.14

种,将其选作田间试验研究对象。试验采用1管4行的冬小麦种植模式,作物行距15 cm,滴灌带间距60 cm(图1b)。滴灌带分别布置在中间两行冬小麦正中间位置,每个小区有28行冬小麦、8条滴灌带,长度为44 m。本试验在冬小麦出苗-越冬期按照大田灌水方案,返青期开始通过控制土壤水分下限进行灌水,灌水上限均为田间持水量(FC)。完全随机区组设计,设置6个灌水处理分别为W1~W6,每个处理3次重复,计18个小区,每个小区面积为168 m²,试验灌溉水量由水表精确控制。各处理所用肥料施用量和除灌水外的其他环境因素,如病虫害防治、杂草防控等措施与当地田间管理保持一致。具体灌溉方案如表2所示。

表2 冬小麦各生长阶段的土壤水分下限值
(田间持水量百分比)和灌溉定额

Tab. 2 Lower limit values of soil moisture (FC percentage) and irrigation quota for winter wheat at different soil moisture levels

处理	返青 期/%	拔节 期/%	抽穗 期/%	开花 期/%	灌浆 期/%	成熟 期/%	灌溉定 额/mm
W1	65	65	50	50	50	65	428.02
W2	65	65	65	65	65	65	463.12
W3	65	65	80	80	80	65	470.14
W4	80	80	65	65	65	65	484.18
W5	50	50	65	65	65	65	409.30
W6	50	50	50	65	65	65	381.22

1.3 指标测定及方法

1.3.1 叶面积指数、SPAD值、株高和茎粗测定 自小麦花后10 d,每隔5 d取样一次,直至完全成熟。每个处理均在小区中心位置随机选取5株完整植株。先采用叶面积分析仪测定叶片面积,并计算叶面积指数(LAI);株高使用卷尺测量;游标卡尺对主茎基部的第二节茎粗进行测量;旗叶SPAD值采用手持式叶绿素仪测定。每项指标均测定三次,取平均值作为分析数据。

1.3.2 酶活性测定 测定籽粒中蔗糖合成酶(SS)、溶性淀粉合成酶(SSS)和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGPase)活性。自小麦开花后第10 d起,每隔5 d取5株同时开花植株籽粒,剥取后立即置于液氮罐中(一半用于酶活性测定,另一半用于蔗糖和淀粉含量测定)。称取1.0 g新鲜籽粒,加入9 mL生理盐水研磨,转入离心管,4 ℃、1000 g离心20 min,取上清备用。采用ELISA试剂盒(双抗一步夹心法)^[25]测定酶活性,将样品、标准品及HRP标记检测抗体加入预包被酶抗体的微孔中,温育洗涤后加TMB显色,用全波长酶标仪在450 nm处测定OD值,每个处理设3个生物学重复,依据标准曲线计算酶含量。

1.3.3 蔗糖和淀粉含量测定 主要采用陈炜等^[26]和Zi等^[27]理论方法并进行细微的改进。先通过碱共热处理样品以破坏还原糖,然后在酸性条件下水解蔗糖,生成葡萄糖和果糖。果糖随后与间苯二酚反应形成有色物质,并在480 nm波长下测定吸光度值,每个试验设置3个生物学重复,从而计算蔗糖含量。使用80%乙醇提取样品中的可溶性糖与淀粉,将淀粉通过酸水解分解为葡萄糖,并在620 nm波长下测定吸光度值。利用蒽酮比色法测定葡萄糖含量,结合3个生物学重复结果,最终计算淀粉含量。

1.3.4 千粒重和灌浆速率测定 花后10 d开始每5 d取样,每小区选取15个长势均匀一致的麦穗,直至收获。样品于105 ℃杀青30 min,80 ℃烘干至恒重,剥取籽粒并称重干重,折算成千粒重并计算籽粒灌浆速率。

1.3.5 灌浆特性分析 主要用韩占江等^[28]的方法, Logistic方程拟合籽粒动态,即:

$$Y = K / (1 + a e^{-bt}) \quad (1)$$

式中:以开花后天数(t)为自变量,千粒重(Y)为因变量; K 为拟合最大千粒重; a 、 b 为待定系数,对 Logistic方程求一阶导数,得灌浆速率方程:

$$V(t) = dY/dt = K a b e^{-bt} / (1 + a e^{-bt})^2 \quad (2)$$

基于 Logistic 方程及其灌浆速率方程,可进一步

计算最大灌浆速率 $[V_{\max}, (g \cdot d^{-1})]$ 、最大灌浆速率时的时间 (T_{\max}, d) 和灌浆全程的平均速率 $[V, (g \cdot d^{-1})]$,以及灌浆持续时间 (T, d) 、灌浆渐增期的灌浆速率 $[V_1, (g \cdot d^{-1})]$ 、快速增长期的灌浆速率 $[V_2, (g \cdot d^{-1})]$ 、缓慢增长期的灌浆速率 $[V_3, (g \cdot d^{-1})]$ 及各阶段的持续时间 $[(T_1, T_2, T_3), d]$ 等相关灌浆参数。

1.3.6 产量测定 在籽粒成熟期,每个处理均在小区中心位置随机手工收获3个3 m²地块的小麦植株。收获脱粒后手动清洁,自然干燥至12%的水分含量,称重并确定籽粒产量。

1.3.7 耗水量和WUE计算 耗水量(ET)的计算采用以下土壤水平衡方程式^[29]:

$$ET = P + I - \Delta S - D - R \quad (3)$$

式中: ΔS 表示从给定生育阶段开始到结束的土壤储水变化量(mm),采用自动土壤水分传感器对土壤水分进行实时监测,检测范围为土层0~80 cm; I 和 P 分别表示灌溉水量(mm)和降水量(mm); D 和 R 分别为深层渗漏(mm)和地表径流(mm)。该试验场地地势平坦降雨量少,地下水位>10 m,故 D 和 R 值可忽略不计。

WUE的计算用以下公式:

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

式中: Y 为籽粒产量(kg·hm⁻²)。

1.4 综合效益评价方法

本研究综合效益评价采用熵权-优劣解距离模型。熵权法可用于客观权重设置,降低主观赋权法造成的偏差。TOPSIS法适用于多个方案间比较,可结合熵权法所获得的客观权重,有效揭示各方案间的差异找出有限方案中的最优和最劣,计算各处理与最优解和最劣解的距离,并进行排序,最接近最优解的方案即为最优方案。模型理论可参考文献^[30]。

1.5 数据处理

所有数据初步整理与汇总通过Microsoft Excel 2016软件完成,统计分析借助SPSS 26.0进行,处理组间的多重比较采用Duncan法,显著性水平设定为 $P=0.05$ 。R语言进行相关性分析和PLS-PM建模。Adobe Illustrator 2023和Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤水分下限对植株生长的影响

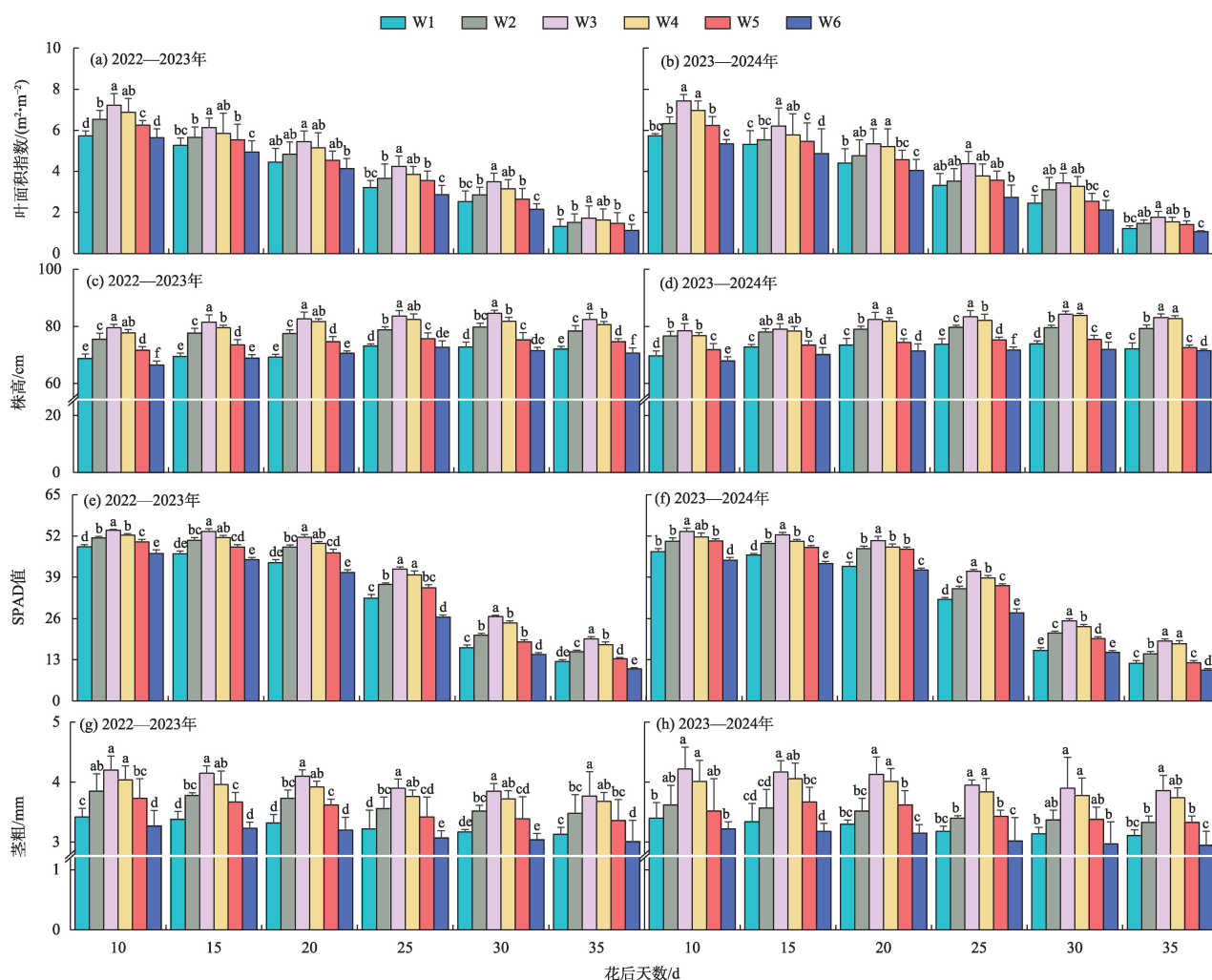
方差分析表明,土壤水分水平显著影响小麦的

性状,包括LAI、株高、SPAD和茎粗(图2, $P<0.05$)。从开花10~35 d,两个生长季的LAI、SPDA值呈显著下降趋势,株高呈细微增长趋势,茎粗变化不显著。成熟时,各处理LAI平均降低78.74%~79.42%,SPDA值平均降低70.72%~71.26%,茎粗平均降低8.80%~9.24%,株高平均升高4.37%~10.80%。表明水分调控显著影响植株生长($P<0.05$),且LAI的变化较其他指标大。成熟时,两年均在返青至抽穗期50%FC土壤水分下限(W6)抑制了植株的生长,生长指标显著低于抽穗至灌浆期80%FC土壤水分下限(W3)的生长指数,生长参数平均降低了14.05%~17.42%($P<0.05$)。因此,抽穗至灌浆期足够的水分补给有利于促进小麦的生长,土壤水分下限80%FC左右为宜。

2.2 土壤水分下限对籽粒蔗糖和淀粉的影响

2.2.1 籽粒相关酶活性变化 两季冬小麦灌浆期籽粒AGPase活性呈下降趋势,花后10 d为峰值(图3)。与其他处理相比,两年均花后20 d、35 d W6处理籽粒AGPase活性下降速率较快,分别下降33.17%~64.78%、29.20%~64.64%,W3处理下降速率较慢,分别下降23.42%~49.46%和18.35%~48.40%,W6处理AGPase活性降幅明显高于W3($P<0.05$)。SSS和SS活性表现出与AGPase相似的趋势。两年均花后20 d、35 d W6处理籽粒SSS活性下降速率较快,分别下降17.24%~64.70%、20.08%~63.62%,W3处理下降速率较慢,分别下降9.75%~47.95%、12.88%~45.42%,W6处理SSS活性降幅明显高于W3($P<0.05$)。W6处理籽粒SS活性下降速率较快,花后20 d、35 d分别下降了31.11%~57.09%、28.11%~53.04%,而W3处理SS活性下降速率较慢,分别下降18.23%~42.60%、18.93%~40.39%,W6处理SS活性降幅明显高于W3($P<0.05$)。表明在特定水分调控条件下,W3处理的三种酶活性受损程度较轻,灌浆中后期仍具备一定的碳同化能力。

2.2.2 籽粒蔗糖和淀粉含量变化 由图4a和图4b可知,两季不同土壤水分下限对灌浆期籽粒蔗糖含量有显著差异($P<0.05$)。蔗糖含量随开花天数而减少,花后10 d为峰值,与上述三种酶活性有相似趋势。花后10 d,籽粒中蔗糖W3处理合成较多,比W6提高13.59%~19.86%,从花后10~35 d,W6处理蔗糖含量降低速率较快,下降64.64%~66.75%。说明蔗糖合成关键酶活性的降低影响籽粒蔗糖的合



注:不同小写字母表示不同土壤水分水平间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图2 冬小麦各处理LAI、株高、SPAD值和茎粗变化

Fig. 2 Changes in leaf area index, plant height, SPAD value and stem thickness of winter wheat

成, W3处理相较于其他处理更有利于籽粒蔗糖的合成和积累。由图4c和图4d可知,不同土壤水分下限对灌浆期籽粒淀粉含量有显著差异($P < 0.05$)。籽粒淀粉含量随开花天数呈增长趋势,花后10~15 d、30~35 d增长速度慢,15~30 d增长速度较快。花后10~35 d, W3处理淀粉积累较多(72.54%~73.53%),比W6处理增加13.38%~15.52%。说明淀粉合成关键酶活性降低会导致籽粒中淀粉合成减少, W3处理相较于其他处理更有利于籽粒淀粉的合成和积累。

2.3 土壤水分下限对千粒重和灌浆速率的影响

方差分析表明,不同土壤水分下限显著影响千粒重的形成($P < 0.05$),两年均在花后10~25 d快速增长,其后趋于平缓,在灌浆期呈“S”型变化趋势,花后35 d达到最大值,平均增长了3.24倍(图5)。

W3处理千粒重较高,比W6处理提高26.57%~32.31%。两年灌浆速率呈先增长后下降的趋势,10~20 d平均增长了52.75%~57.20%,20~35 d平均下降了89.45%~92.20%,花后20 d达到峰值。W6处理较其他处理灌浆速率较慢,峰值点比W3处理降低17.01%~20.80%。采用Logistic方程对灌浆过程进一步拟合, R^2 值大于0.978,可以有效反映籽粒灌浆规律。Logistic方程中K值越大,说明生长越好。W3的K值达到50.12 g和48.02 g,表明其生长情况最好(表3)。灌浆速率在快增期加快,缓增期和渐增期都相对缓慢,3个阶段与千粒重形成“S”形曲线变化保持了一致, W3处理的 R_{max} 和R均最大(表4)。

2.4 土壤水分下限对产量和水分利用效率的影响

不同土壤水分下限的产量差异显著(图6, $P < 0.05$)。W3处理产量较大,比W6高20.22%。因此,

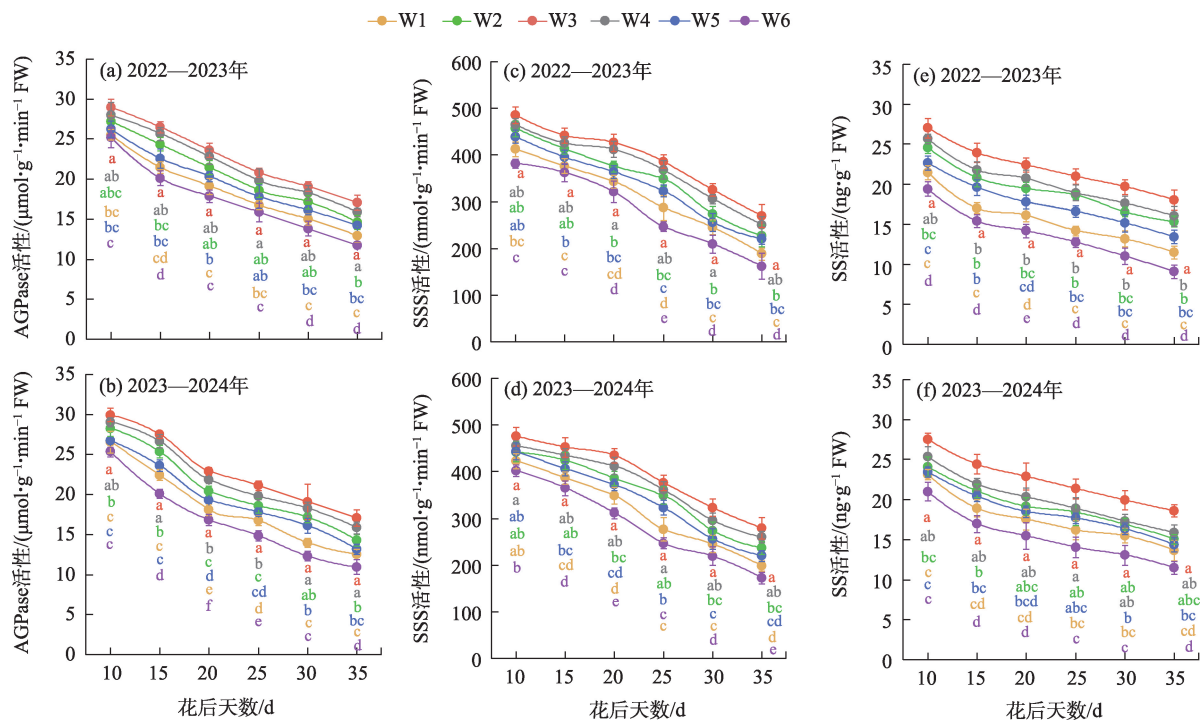


图3 冬小麦各处理籽粒三种酶活性变化

Fig. 3 Changes in three enzyme activities in winter wheat grains of each treatment

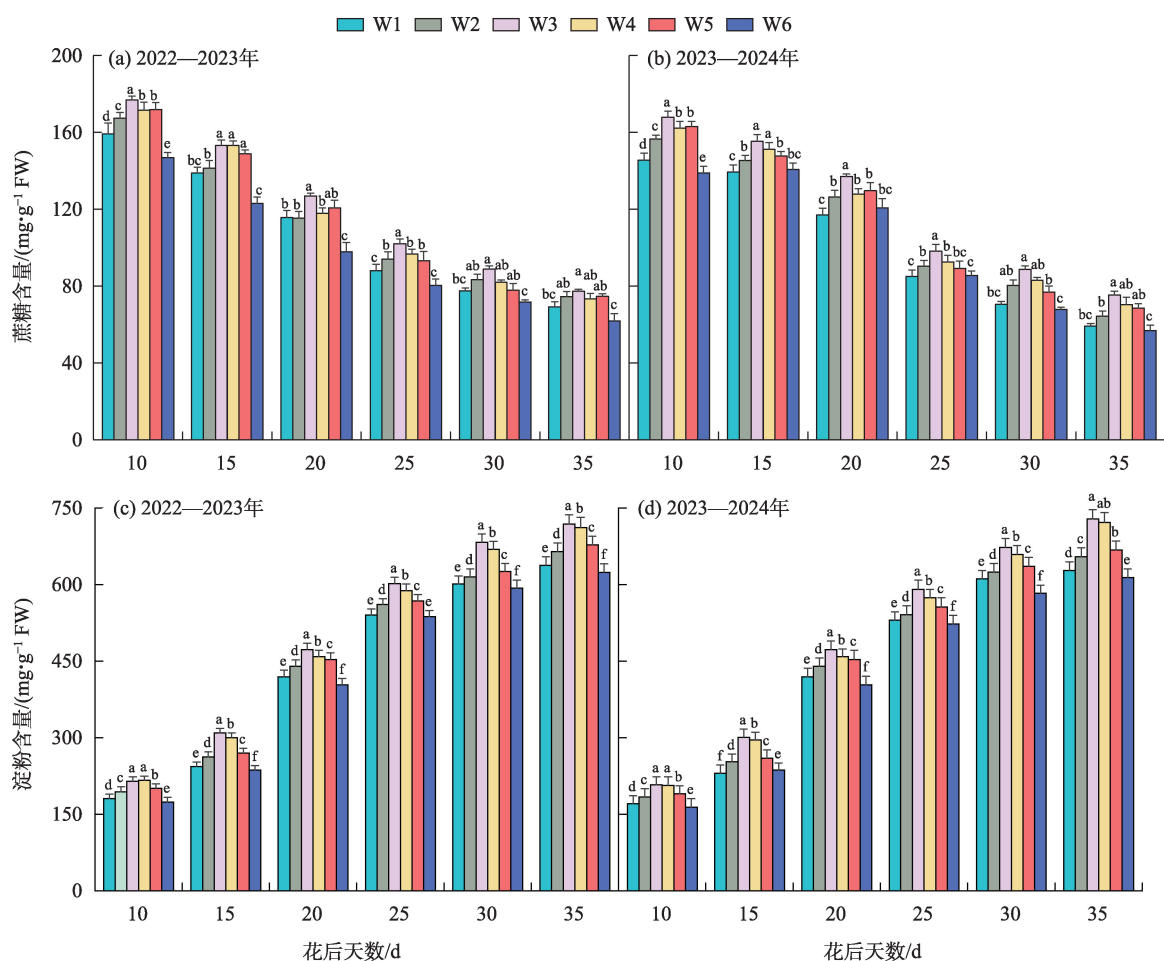


图4 冬小麦各处理籽粒蔗糖和淀粉含量变化

Fig. 4 Changes in sucrose and starch content in winter wheat grains of each treatment

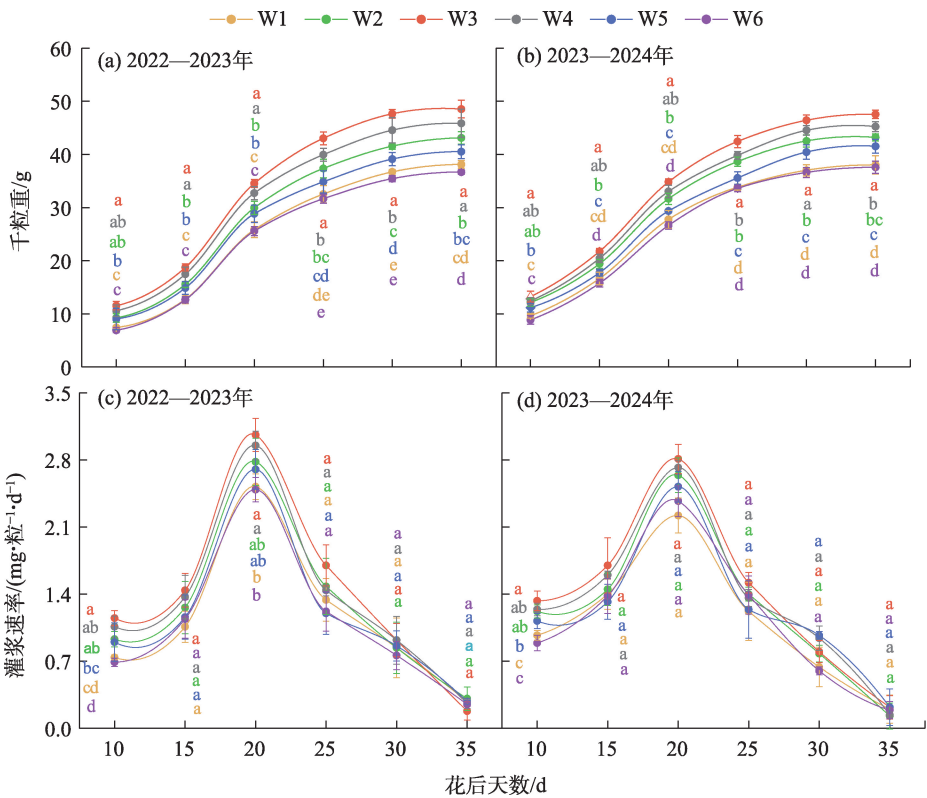


图5 冬小麦各处理千粒重和灌浆速率变化

Fig. 5 Changes in thousand grain weight and grain filling rate of winter wheat

表3 冬小麦各处理籽粒灌浆 Logistic 方程参数

Tab. 3 Logistic equation parameters for grain filling of winter wheat in various treatments

处理	2022—2023年				2023—2024年			
	<i>K</i> /g	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>K</i> /g	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
W1	39.66	4.48	0.218	0.987	38.53	4.42	0.220	0.978
W2	44.25	4.51	0.225	0.996	43.81	4.55	0.227	0.997
W3	50.12	4.65	0.234	0.982	48.02	4.68	0.235	0.986
W4	47.24	4.58	0.230	0.995	45.84	4.61	0.232	0.984
W5	41.75	4.45	0.222	0.986	42.21	4.49	0.224	0.996
W6	38.02	4.35	0.216	0.978	38.12	4.39	0.218	0.985

注:*K*为理论粒重;*a*和*b*为待定系数;*R*²为决定系数。

抽穗至灌浆期80%FC土壤水分下限促进产量的形成;相反,返青至抽穗期50%FC土壤水分下限有抑制作用。进一步说明在关键生育期适当的水分能促进小麦生长,过度水分亏缺不利于籽粒的形成。不同土壤水分下限的*ET*差异显著($P<0.05$),但两个生长季W1、W5和W6处理的*WUE*无显著差异($P<0.05$),其他处理差异显著(表5, $P<0.05$)。W4处理在两个生长季节中的*ET*最高,两年平均为630.03 mm,W3处理的*ET*均低于W4处理,平均降低2.23%,但*WUE*提高11.56%。说明在W3处理下冬小麦能够以较低

的耗水量实现较高的水分利用效率。W6处理的*ET*最低,两年平均为527.07 mm,但其*WUE*与W5处理相比并无显著变化。研究表明,在低水分供应条件下,小麦耗水量虽有所减少,但水分利用效率并未得到显著提高。

2.5 相关性网络及PLS-PM路径分析

由图7相关性分析得出,生长生理指标与产量和*WUE*均呈显著正相关(相关系数0.64~0.97, $P<0.05$),且散点呈线性分布。说明生理指标是冬小麦产量形成和*WUE*的关键调控因子。产量与*WUE*呈

表4 冬小麦各处理籽粒灌浆参数

Tab. 4 Grain filling parameters of winter wheat in various treatments

年份	处理	T/d	T_1/d	$V_1/(g \cdot d^{-1})$	T_2/d	$V_2/(g \cdot d^{-1})$	T_3/d	$V_3/(g \cdot d^{-1})$	T_{max}/d	$V_{max}/(g \cdot d^{-1})$	$V/(g \cdot d^{-1})$
2022—2023 年	W1	35	14.30	0.65	11.61	1.63	9.11	1.05	20.11	2.13	1.10
	W2	35	14.40	0.72	11.22	1.89	9.42	1.18	20.23	2.50	1.26
	W3	35	14.50	0.81	10.82	2.15	9.71	1.12	19.91	2.89	1.40
	W4	35	14.40	0.77	11.20	1.98	9.63	1.10	19.94	2.70	1.33
	W5	35	14.30	0.69	11.41	1.77	9.31	1.00	20.00	2.31	1.17
	W6	35	14.20	0.63	11.81	1.60	9.11	1.04	20.10	2.05	1.07
2023—2024 年	W1	35	14.28	0.63	11.58	1.60	9.12	1.03	20.12	2.10	1.07
	W2	35	14.44	0.70	11.21	1.86	9.39	1.16	20.32	2.44	1.23
	W3	35	14.51	0.79	10.83	2.12	9.72	1.10	19.80	2.80	1.36
	W4	35	14.40	0.75	11.14	1.95	9.61	1.08	19.90	2.63	1.30
	W5	35	14.32	0.67	11.37	1.74	9.23	0.98	20.00	2.30	1.15
	W6	35	14.21	0.61	11.79	1.57	9.17	1.02	20.10	2.04	1.05

注： V_1 为渐增期灌浆速率； V_2 为快增期灌浆速率； V_3 为缓增期灌浆速率； V_{max} 为最大灌浆速率； V 为平均灌浆速率； T 为灌浆持续时间； T_1 为灌浆渐增期时间； T_2 为灌浆快增期时间； T_3 为灌浆缓增期时间； T_{max} 为达到最大灌浆速率的时间。

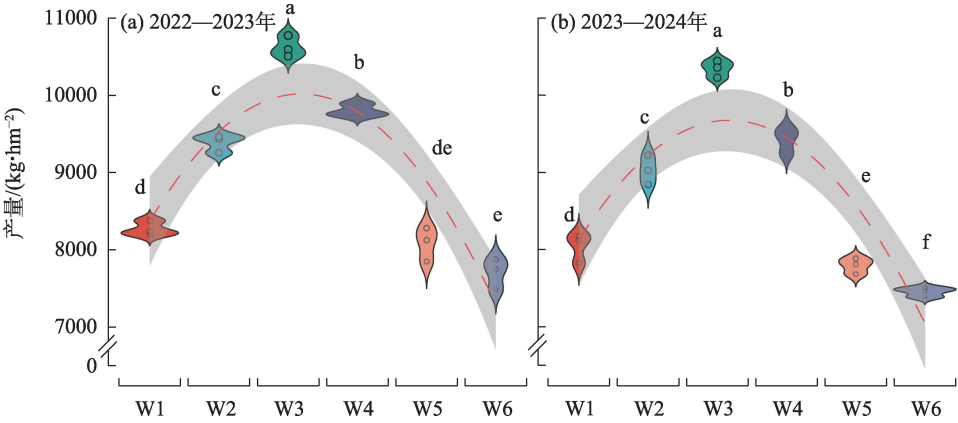


图6 冬小麦各处理产量变化
Fig. 6 Changes in yield of winter wheat in each treatment

表5 冬小麦各处理总耗水量和水分利用效率

Tab. 5 Total water consumption and water use efficiency of winter wheat treatments

处理	2022—2023 年		2023—2024 年	
	ET/mm	$WUE/(kg \cdot m^{-3})$	ET/mm	$WUE/(kg \cdot m^{-3})$
W1	573.62c	1.44c	574.12c	1.40c
W2	608.72b	1.54b	609.22b	1.48b
W3	615.74b	1.73a	616.24ab	1.68a
W4	629.78a	1.56b	630.28a	1.50b
W5	554.90c	1.46c	555.40d	1.40c
W6	526.82d	1.46c	527.32e	1.41c

注： ET 为耗水量； WUE 为水分利用效率。

显著正相关(相关系数 0.87),说明提高产量的同时也可以有效提高 WUE 。图8展示了调控土壤水分下

限对冬小麦耗水-生长-产量- WUE 影响的 PLS-PM 模型分析。籽粒酶(AGPase、SSS、SS)对糖的路径系数为 0.866,说明籽粒酶活性是糖积累的关键因子。籽粒糖对产量的路径系数为 0.725,表明籽粒糖是产量形成的物质基础。产量对 WUE 的路径系数为 0.912,说明产量是调控 WUE 的关键参数。除此之外,籽粒酶通过调控糖合成间接影响产量,但对产量没有直接正向调控作用。全局拟合度(GOF)为 0.771,模型拟合良好($R^2=0.835\sim0.941$)。综上,在合理调控水分下优化生长因子,增强籽粒酶活性,直接强化蔗糖代谢与淀粉积累,实现产量和 WUE 提升。

2.6 综合评价结果

采用熵权-优劣解距离法对冬小麦生长、酶活

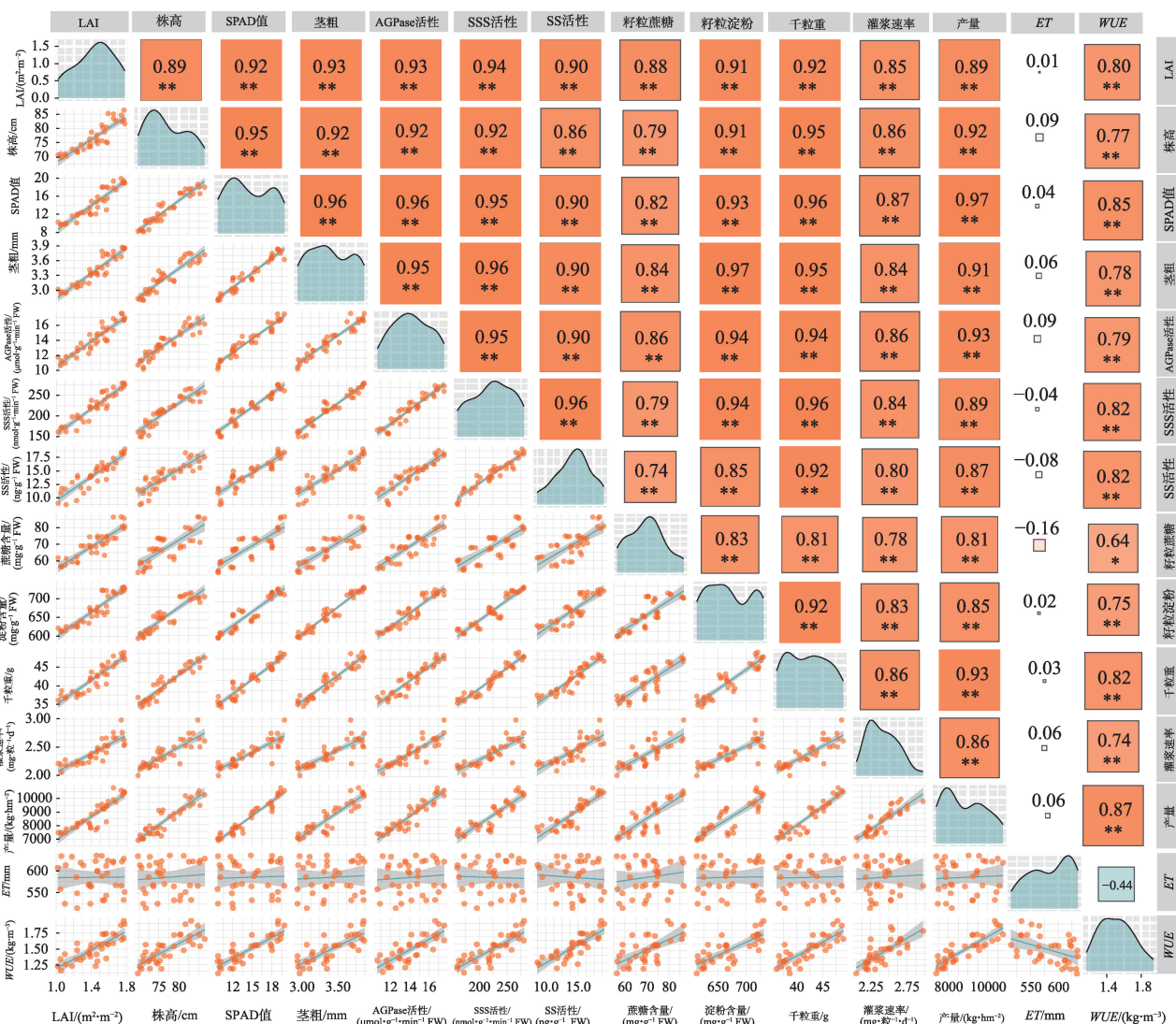
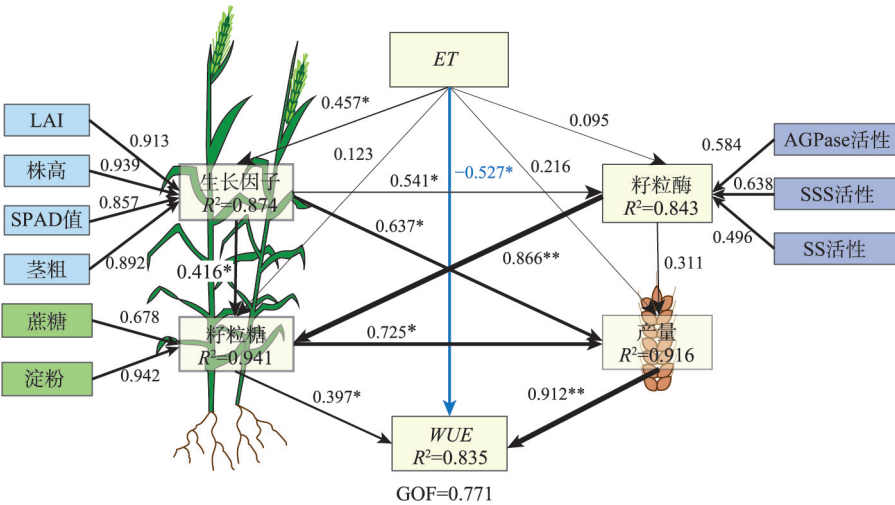


图7 冬小麦各指标与产量的相关网络图
Fig. 7 Correlation network diagram between winter wheat indicators and yield



注:图中箭头旁的数字表示标准化路径系数;箭头粗细对应路径系数强度,黑色箭头表示正向效应,蓝色箭头表示负向效应。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下差异显著。 R^2 表示方差解释率,模型拟合优度通过GOF统计量评估($GOF=0.771$)。

图8 基于PLS-PM模型生长因子、籽粒酶活性、糖和产量之间的直接效应、间接效应和总效应
Fig. 8 Direct, indirect, and total effects between growth factors, grain enzyme activity, sugar, and yield based on the PLS-PM model

性、籽粒糖、千粒重、灌浆速率、产量和WUE等13个指标进行综合评价,熵权法确定的冬小麦各项指标权重如表6,产量的共性权重较高,而LAI相对较低,灌浆速率的年际波动显著,其他指标相对稳定。TOPSIS评价法计算结果如表7,两季W3处理的综合评分相较于其他处理较高,W4次之,W6得分最低。各处理排名由大到小依次为W3>W4>W2>W5>W1>W6。W3处理相较于其他处理较适宜此地冬小麦生长、籽粒蔗糖淀粉及产量的形成,是较为经济的合理灌溉方案。在此处理下两年产量分别为

表6 熵权法指标权重计算结果

Tab. 6 Calculation results of index weights using entropy weight method

测试指标	2022—2023年	2023—2024年
	权重/%	权重/%
LAI	5.413	6.191
株高	9.326	8.948
SPAD值	7.829	7.792
茎粗	8.256	7.653
AGPase活性	7.475	6.665
SSS活性	7.024	6.419
SS活性	6.844	6.461
籽粒蔗糖	6.327	7.693
籽粒淀粉	8.709	8.599
灌浆速率	5.472	7.684
千粒重	9.408	9.123
产量	10.303	9.165
WUE	7.613	7.605

表7 TOPSIS评价法计算结果

Tab. 7 TOPSIS evaluation method calculation results

处理	2022—2023年		2023—2024年	
	综合得分指数	排序	综合得分指数	排序
W1	0.267	5	0.266	5
W2	0.599	3	0.442	3
W3	0.804	1	0.941	1
W4	0.753	2	0.767	2
W5	0.440	4	0.423	4
W6	0.118	6	0.167	6

10625.54 kg·hm⁻²和10344.43 kg·hm⁻²。

3 讨论

3.1 土壤水分下限对冬小麦生长的影响

土壤水分是影响植株发育的关键要素。株高

和茎粗是小麦的主要农艺性状之一,与茎秆强度和抗倒能力相关,是小麦稳产高产的基础。LAI和SPAD值不仅是评估光合作用效率的重要生长参数,也是影响小麦产量水平的因素之一^[31]。本研究表明,受到土壤水分调控后,两季生长参数在花后10 d左右各处理均开始出现变化且差异显著。花后35 d各处理LAI、茎粗、SPAD值呈显著降低趋势,株高呈增长趋势,说明不同的水分调控显著影响了小麦的生长。另一方面,成熟时,两年均为W3处理的植株生长参数较优,比W6处理LAI提高14.53%~20.11%,茎粗提高14.02%~16.76%,SPAD值提高92.98%~94.35%,株高提高20.16%~23.58%。随着株高增加,小麦倒伏风险通常也会增大^[32]。然而,在W3处理条件下,小麦不仅株高显著增加,茎粗也同步增长,有效增强了植株的物理稳定性,进而降低倒伏风险;同时,昌吉地区气候稳定、风力较弱且降水稀少,这些有利气候条件进一步降低倒伏发生的可能性。因此,尽管该处理下小麦株高有所增加,但其倒伏风险仍得到了有效控制。因此,说明在返青至抽穗3个时期按50%FC作为灌水下限(FC作为灌水上限,其他时期均按照65%FC灌水)不利于小麦植株生长,在此处理下可能会对小麦造成水分胁迫,其生殖生长会受到抑制。相反,在抽穗至灌浆期保持80%FC作为灌水下限有利于提高小麦生长参数。其原因可能是抽穗至灌浆期适当提高灌水下限有助于小麦根系向深处生长,从而促进小麦吸水,提高植株各生长指标,满足小麦生长的水分需求^[33-34]。

3.2 土壤水分下限对冬小麦酶活性及蔗糖淀粉积累的影响

蔗糖淀粉合成相关酶的活性与籽粒糖的积累量和积累速率密切相关。蔗糖含量越高,向籽粒输送光合产物的潜力就越大,对籽粒产量的形成更有利^[35]。本研究表明,各处理小麦花后籽粒蔗糖含量均下降,与三种酶活性有相似的趋势,花后10 d为峰值。籽粒淀粉含量均增加,花后35 d为峰值。在返青至抽穗期均按50%FC作为灌水下限时,三种酶活性下降速率较快,籽粒蔗糖淀粉积累量较少。在抽穗至灌浆期按照80%FC作为灌水下限对籽粒AGPase、SSS和SS三种关键酶活性影响较小,籽粒蔗糖积累较多,两年结果一致。说明在返青至抽穗期灌水下限较低,使酶活性降低速率较快,会对籽

粒内蔗糖与淀粉的合成产生影响,不利于小麦籽粒灌浆和产量的形成。在抽穗至灌浆期适度提升灌溉下限可以减少对酶活性的损害,使其在灌浆中后期仍具备一定的碳同化能力。主要原因在于适当的水分缺乏增强蔗糖和淀粉合成关键酶活性,使源器官中蔗糖向籽粒转化的能力提高,有利于籽粒淀粉的合成,促进作物生长发育,进而提高了产量。因此,更好地了解淀粉积累的机制,将有助于促进籽粒产量的形成。

水分调控会导致小麦体内转录水平及代谢物发生改变^[36],进而影响酶的表达及活性;同时,水分调控还可通过影响植物体内碳氮代谢平衡,间接调控酶的活性。有研究证实,在水分胁迫下,蔗糖磷酸合成酶基因在不同的器官和组织中表现出差异化的表达,并且其转录受到渗透胁迫的调控^[37],影响蔗糖合成。灌浆期间轻度的水不足,导致脱落酸含量增加,进而增强了淀粉分支酶的活性,能够形成淀粉分子^[38],在淀粉生产中起着关键作用。说明水分调控会通过调节相关酶的活性来适应环境变化,从而维持其正常的生理功能,影响蔗糖淀粉的积累,最终作用于产量。

3.3 土壤水分下限对冬小麦灌浆及产量形成的影响

产量构成的协同提升是小麦产量形成的生理基础,粒重在很大程度上取决于籽粒灌浆速率和持续时间^[39]。适宜的水分供应促进小麦生长发育,提高光合作用效率,改善灌浆速率,提升小麦产量。本研究发现,土壤水分水平显著影响植株千粒重、灌浆速率和产量的形成。成熟时千粒重平均增长了3.24倍,W3处理千粒重较高,W6处理较低。灌浆速率均呈先升高再降低趋势,花后20 d达到峰值,花后10~35 d,W3处理的灌浆速率为W6的1.25倍,同时也提高了产量。因此,说明籽粒千粒重的形成和灌浆速率会影响最终产量形成。另一方面,说明在特定水分调控下,抽穗至灌浆期按80%FC作为土壤水分下限灌水促进了籽粒千粒重、灌浆速率及籽粒产量的形成,返青至抽穗期按照50%FC作为土壤水分下限有抑制作用,进一步说明在关键生育期适当的水分胁迫能提高籽粒千粒重、灌浆速率及产量。

有研究发现,土壤水分下限是影响作物产量的重要因素,水分不足最终体现在作物产量上^[40]。过度水分亏缺会导致小麦前期营养生长过剩,使光合

产物更多的向营养器官分配,减少对籽粒的分配,降低产量^[41]。开花期和灌浆期干旱会影响结实率和灌浆持续时间,最终影响产量^[42]。小麦在营养阶段快速生长,产量容易受到水分亏缺的影响,但开花后缺水对冬小麦产量没有不利影响^[43~44]。进一步说明在拔节期和抽穗期适当提高土壤水分下限,花后适当水分亏缺更有利于小麦生长和产量形成。

本研究量化不同土壤水分下限对小麦生长生理指标及产量的影响后,采用熵权-优劣解距离法对13个研究指标进行综合效益评价分析,有效避免了单一指标评优所产生的误差,评价结果与杨晓琳等^[45]的研究结论类似。此外,本次试验结果在不同小麦品种、试验环境和土壤质地等条件下的适用性还需要进一步研究和探讨。

4 结 论

合理调控土壤水分水平能够有效改善植株生长状态,提升籽粒相关酶活性,从而直接促进蔗糖代谢和淀粉积累,实现产量提高。两年试验结果显示,W3处理较其他处理显著促进冬小麦的生长发育和产量形成,三种相关酶的活性下降速率减缓,成熟期植株仍具较强的碳同化能力,蔗糖淀粉的合成量显著增加。综合效益评价结果显示,W3处理综合得分最高,表现最优。综合考虑抽穗至灌浆期以80%FC为下限,FC为上限,其他生育时期以65%FC的灌溉策略,是本地冬小麦种植较为经济合理的灌溉方案。然而,由于干旱区生态条件的差异,未来研究可以在其他典型干旱地区(如黄河流域旱作区)进行大田试验,以检验结果的广泛适用性。此外,可以结合智能灌溉技术探索不同品种对水分梯度的响应,以提供更全面的品种筛选依据。

参考文献(References):

- [1] Lei Q, Tao W, Lin S, et al. The synergistic production effect of water and nitrogen on winter wheat in southern Xinjiang[J]. *Plants*, 2024, 13: 1391.
- [2] 李昊辰,胡广录,王涛,等. 黑河中游砂壤地农田不同灌溉模式土壤水分动态模拟[J]. *干旱区研究*, 2025, 42(7): 1333–1347. [Li Haochen, Hu Guanglu, Wang Tao, et al. Soil moisture under different irrigation patterns in sandy loam farmland in the middle reaches of the Heihe River dynamic simulation[J]. *Arid Zone Research*, 2025, 42(7): 1333–1347.]

- [3] Zhang C, Dong Z, Guo Q, et al. Ridge-furrow rainwater harvesting combined with supplementary irrigation: Water-saving and yield-maintaining mode for winter wheat in a semiarid region based on an 8-year in-situ experiment[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 259: 107239.
- [4] Contreras J, Alonso F, Cánovas G, et al. Irrigation management of greenhouse zucchini with different soil matric potential level, agronomic and environmental effects[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 183: 26–34.
- [5] Wang J, Niu W, Li Y. Nitrogen and phosphorus absorption and yield of tomato increased by regulating the bacterial community under greenhouse conditions via the alternate drip irrigation method[J]. *Agronomy*, 2020, 10: 315.
- [6] Meena R, Karnam V, Tripathi S, et al. Irrigation management strategies in wheat for efficient water use in the regions of depleting water resources[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 214: 38–46.
- [7] 李彦彬, 朱亚男, 李道西, 等. 阶段干旱及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(8): 76–80. [Li Yanbin, Zhu Yanan, Li Daoxi, et al. Effects of alternating drought and watering on growth, photosynthesis and yield of winter wheat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(8): 76–80.]
- [8] 苏盛楠. 不同生育期灌水对小麦产量形成和水分利用效率的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2018. [Su Shengnan. Effects of Irrigation at Different Growth Stages on Grain Yield and WUE of Wheat[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.]
- [9] Xu X, Zhang M, Li J, et al. Improving water use efficiency and grain yield of winter wheat by optimizing irrigations in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 219–227.
- [10] Alvarez P, Gimenez V, Ciancio N, et al. Grain growth and development in wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.): Coordination between water content and source/sink ratio[J]. *Field Crops Research*, 2023, 302: 109100.
- [11] 蔡雨佳, 杨凯钧, 王德鹏, 等. 不同小麦品种淀粉粒径的比较研究[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(7): 46–50. [Cai Yujia, Yang Kaijun, Wang Depeng, et al. Comparison on starch particle size of different wheat varieties[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(7): 46–50.]
- [12] Panigrahi R, Kariali E, Panda B, et al. Controlling the trade-off between spikelet number and grain filling: The hierarchy of starch synthesis in spikelets of rice panicle in relation to hormone dynamics[J]. *Functional Plant Biology*, 2019, 46(6): 507–595.
- [13] 李双, 司转运, 申孝军, 等. 水氮供应对灌浆期冬小麦籽粒淀粉合成相关酶活性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(4): 460–468. [Li Shuang, Si Zhuanyun, Shen Xiaojun, et al. Effects of different water and nitrogen levels on starch synthesis enzyme activity in wheat grains during grain filling stage and wheat yield[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(4): 460–468.]
- [14] Shivalal N, Mukti R, Binod P, et al. Drought stress effect, tolerance, and management in wheat—a review[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2024, 10(1): 2296094.
- [15] Zhang W, Zhang A, Zhou Q, et al. Low-temperature at booting reduces starch content and yield of wheat by affecting dry matter transportation and starch synthesis[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1207518.
- [16] 吴东明, 韩雅楠, 马宏亮, 等. 氮肥后移对中、弱筋小麦籽粒淀粉合成及其糊化特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(5): 186–197. [Wu Dongming, Han Yanan, Ma Hongliang, et al. Effects of postponing nitrogen fertilizer application on starch formation of medium and weak gluten wheat grains and its impacts on gelatinization characteristics[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(5): 186–197.]
- [17] Katyal M, Singh N, Chopra N, et al. Hard, medium-hard and extraordinarily soft wheat varieties: Comparison and relationship between various starch properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 123: 1143–1149.
- [18] 尚保华, 党建友, 高璐, 等. 糯小麦淀粉组分及特性对灌水的响应机制[J]. *华北农学报*, 2023, 38(1): 124–133. [Shang Baohua, Dang Jianyou, Gao Lu, et al. Response mechanism of starch components and properties in waxy wheats to irrigation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(1): 124–133.]
- [19] 王丽芳, 刘世洁, 卢素豪, 等. 黄淮南部水氮提升冬小麦籽粒蛋白产量和品质的协同效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(7): 1261–1273. [Wang Lifang, Liu Shijie, Lu Suhao, et al. Synergistic effects of irrigation and nitrogen application rates on grain protein yield and quality of winter wheat in the southern Huanghuai region of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(7): 1261–1273.]
- [20] 李琦, 王佳宇, 吴强, 等. 限水灌溉对河套灌区小麦籽粒品质的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(6): 28–33. [Li Qi, Wang Jiayu, Wu Qiang, et al. Effects of restricted irrigation on grain quality of wheat in Hetao Irrigation District[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 43(6): 28–33.]
- [21] 马瑞昆, 贾秀领, 张全国, 等. 石新 733 小麦的水分生理特点及节水灌溉效应[J]. *作物学报*, 2007, 33(9): 1446–1451. [Ma Ruikun, Jia Xiuling, Zhang Quanguo, et al. Physiological characteristics of water in wheat cultivar SX733: The effect of water-saving irrigation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(9): 1446–1451.]
- [22] 刘添, 李亚静, 李翠平, 等. 灌水对小麦产量和品质影响的研究进展[J]. *河北科技师范学院学报*, 2018, 32(3): 25. [Liu Tian, Li Yajing, Li Cuiping, et al. Progress on effect of irrigation on grain yield and quality in winter wheat[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2018, 32(3): 25.]
- [23] 周发宝, 路永强, 刘玉秀, 等. 灌水次数对小麦 A、B 淀粉和总淀粉含量及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(4): 521–528. [Zhou Fabao, Lu Yongqiang, Liu Yuxiu, et al. Effects of different irrigation on wheat starch the content, particle size and yield[J].

- Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(4): 521–528.]
- [24] 禹静涛, 赵晨, 双丽, 等. 灌水对强筋小麦籽粒产量及营养品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(12): 1514–1523. [Yu Jingtao, Zhao Chen, Shuang Li, et al. Effects of irrigation on grain yield and nutritional quality of strong gluten wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(12): 1514–1523.]
- [25] Kiszonas A, Morris C. Evaluation of commercial α -amylase enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) test kits for wheat[J]. Cereal Chemistry, 2018, 95(2): 206–210.
- [26] 陈炜, 李红兵, 邓西平. 不同栽培模式下冬小麦灌浆过程中旗叶蔗糖代谢和籽粒淀粉积累特性[J]. 西北农业学报, 2018, 27(5): 641–649. [Chen Wei, Li Hongbing, Deng Xiping. The characteristics of sucrose metabolism in flag leaves and grain starch accumulation during grain filling period under different cultivation modes [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(5): 641–649.]
- [27] Zi Y, Ding J, Song J, et al. Grain yield, starch content and activities of key enzymes of waxy and non-waxy wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4548.
- [28] 韩占江, 郜庆炉, 吴玉娥, 等. 小麦籽粒灌浆参数变异及与粒重的相关性分析[J]. 种子, 2008(6): 27–30. [Han Zhanjiang, Gao Qinglu, Wu Yu'e, et al. Variation of parameters grain filling and correlation analysis with grain weight in wheat[J]. Seed, 2008(6): 27–30.]
- [29] Abrisqueta I, Tapia L, Munguía J, et al. Basal crop coefficients for early-season peach trees[J]. Agricultural Water Management, 2013, 121: 158–163.
- [30] Jiang J, Chen Y, Chen Y, et al. TOPSIS with fuzzy belief structure for group belief multiple criteria decision making[J]. Expert Systems With Applications, 2011, 38: 9400–9406.
- [31] 李燕强, 张娟娟, 熊淑萍, 等. 不同冬小麦品种株高的高光谱估算模型[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 523–529. [Li Yanqiang, Zhang Juanjuan, Xiong Shuping, et al. Study on hyperspectral model for estimating the plant height of different winter wheat cultivars[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(3): 523–529.]
- [32] 张明伟, 姚义, 田洁, 等. 小麦倒伏原因与防倒抗倒技术研究进展[J]. 金陵科技学院学报, 2020, 36(4): 71–76. [Zhang Mingwei, Yao Yi, Tian Jie, et al. Research progress on causes of lodging and anti-lodging techniques in wheat[J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2020, 36(4): 71–76.]
- [33] 王森. 不同播种方案下拔节期补灌对冬小麦产量和水分利用效率调控的生理基础[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021. [Wang Sen. Physiological Basis for Regulation of Supplemental Irrigation at Jointing Stage on Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat with Different Sowing Schemes[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.]
- [34] 何平如, 张富仓, 范军亮, 等. 土壤水分调控对南疆滴灌棉花生长、品质及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 39–46. [He Pingru, Zhang Fucang, Fan Junliang, et al. Effects of soil moisture regulation on growth, quality and water use of cotton under drip irrigation in southern Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 39–46.]
- [35] Pierre S, Peterson C J, Ross A S, et al. Winter wheat genotypes under different levels of nitrogen and water stress: Changes in grain protein composition[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(3): 414–421.
- [36] Dai M, Yang X, Chen Q, et al. Comprehensive genomic identification of cotton starch synthase genes reveals that GhSS9 regulates drought tolerance[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1163041.
- [37] Solís G, Argüello A, López B, et al. Arabidopsis thaliana sucrose phosphate synthase (sps) genes are expressed differentially in organs and tissues, and their transcription is regulated by osmotic stress[J]. Gene Expression Patterns, 2017, 25–26: 92–101.
- [38] Yang J, Zhang J, Wang Z, et al. Activities of key enzymes in sucrose-to-starch conversion in wheat grains subjected to water deficit during grain filling[J]. Plant Physiology, 2004, 135: 1621–1629.
- [39] Li J, Zhang G, Liu Y, et al. Effects of micro-sprinkling with different irrigation amount on grain yield and water use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 224: 105736.
- [40] 张慧, 张凯, 陈冰, 等. 不同灌溉量对新疆棉花生长发育及产量形成的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1976–1985. [Zhang Hui, Zhang Kai, Chen Bing, et al. Effects of different irrigation rates on cotton growth and yield formation in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1976–1985.]
- [41] Xue Q, Zhu Z, Musick J, et al. Physiological mechanisms contributing to the increased water-use efficiency in winter wheat under deficit irrigation[J]. Plant Physiology, 2006, 163: 154–164.
- [42] Farooq M, Hussain M, Siddique H. Drought stress in wheat during flowering and grain filling periods[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2014, 33(4): 331–349.
- [43] Tari A. The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2016, 167: 1–10.
- [44] Zeng R, Lin X, Stephen M, et al. Impact of water deficit and irrigation management on winter wheat yield in China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 287: 108431.
- [45] 杨晓琳, 王语萌, 石恒煜, 等. 河北低平原适水粮饲模式构建及综合效益评价[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(7): 181–192. [Yang Xiaolin, Wang Yumeng, Shi Hengyu, et al. Different water saving grain-forage rotations and comprehensive benefit assessment in the low plains of Hebei Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(7): 181–192.]

Regulation of soil moisture level on sugar accumulation and yield of winter wheat in arid areas

ZHANG Ying^{1,2}, AI Pengrui^{1,2}, MA Yingjie^{1,2}, FU Qiuping^{1,2}, WEN Jiaxu^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Winter wheat is a major cereal crop in northwestern China. However, increases in its productivity are still constrained by water scarcity and inappropriate irrigation practices. A two-year field experiment was conducted from 2022 to 2024 using three soil moisture lower limits, namely 50%, 65%, and 80% of field capacity (FC), at different growth stages of winter wheat. Six treatments (W1–W6) were designed to investigate the regulatory effects of soil moisture lower limits on water consumption, plant growth, grain enzyme activity, sugar accumulation, yield, and water use efficiency (*WUE*), followed by a comprehensive benefit evaluation. The results showed that, at maturity, the W3 treatment was conducive to wheat growth and yield formation in both experimental years. Compared with the W6 treatment, W3 increased growth parameters by 14.05%–17.42%, accelerated the grain filling rate by 1.22–1.35 times, increased yield by 20.22%, and improved *WUE* by 19.15%. Under the W3 treatment, the activities of three key enzymes involved in grain sugar synthesis were less impaired, and grains retained a certain carbon assimilation capacity during the middle and late grain-filling stages. Sugar accumulation under W3 increased by 13.38%–19.86% compared with W6, indicating that W3 was favorable for sucrose and starch synthesis in grains. Correlation analysis and partial least squares path modeling (PLS-PM) further demonstrated that appropriate regulation of soil moisture could improve plant growth, enhance grain enzyme activity, and promote sucrose metabolism and starch accumulation, thereby increasing yield and *WUE*. In the comprehensive benefit evaluation, W3 ranked first in both years, with yields of 10625.54 and 10344.43 kg·hm⁻², respectively. In conclusion, using 80% FC as the soil moisture lower limit from heading to grain filling, and 65% FC during the other growth stages, with FC as the upper irrigation limit, represents an optimal irrigation strategy for winter wheat cultivation in arid regions. This study clarifies a relatively irrigation regime and provides a basis for evaluating and selecting improved management practices for winter wheat production.

Keywords: winter wheat; soil moisture lower limit; enzyme activity; sucrose and starch; comprehensive benefit evaluation