

# 调亏灌溉对冬小麦产量和品质及其关系的调控效应

刘小飞<sup>1,2</sup>, 费良军<sup>2</sup>, 段爱旺<sup>1</sup>, 刘祖贵<sup>1</sup>, 孟兆江<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 农业部作物需水与调控重点开放实验室, 河南 新乡 453002;

2. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘要:** 在大型启闭式防雨棚条件下, 采用筒栽土培法, 以专用型冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 为试验材料, 就调亏灌溉 (regulated deficit irrigation, RDI) 对冬小麦籽粒产量和品质性状及其关系的影响进行了试验研究, 旨在寻求适宜的水分调亏阶段 (时期) 和调节亏水度, 为建立节水高产优质冬小麦 RDI 模式与指标提供技术参数。筒栽试验采用二因素 (水分调亏阶段和调节亏水度) 随机区组设计, 冬小麦设置 3 个水分调亏阶段: 返青—拔节 (I)、拔节—抽穗 (II)、抽穗—成熟 (III); 每个调亏阶段设置 3 个水分调亏程度: 轻度调亏 (L)、中度调亏 (M) 和重度调亏 (S), 土壤相对含水量 (绝对含水量占田间最大持水率的百分数) 分别为 60%~65%, 50%~55%, 40%~45%。结果表明: 小麦籽粒蛋白质含量与土壤含水量并非总是呈负相关关系, 不同生育阶段控水对蛋白质含量的影响存在明显差异性, 小麦蛋白质含量仅与拔节—抽穗期土壤相对含水量呈负相关关系。在小麦拔节以前施加轻度 (60%~65%) 或中度 (50%~55%) 水分调亏, 籽粒产量、蛋白质产量和氨基酸产量等不会显著降低, 甚或略有增产, 重度 (40%~45%) 调亏会导致显著减产; 拔节—抽穗期, 即使是轻度调亏也会导致显著减产; 灌浆期轻度调亏不会导致籽粒和蛋白质产量显著减少, 而氨基酸产量略有增加, 并且节水效果显著。小麦籽粒产量与蛋白质含量并非总是存在显著的负相关性, 在一定条件下可以减弱或改变这种关系; 小麦籽粒产量与品质性状间的关系在不同阶段 RDI 条件下存在显著差异性。据此认为, 高产与优质的矛盾并非不可协调, 初步证实了 RDI 提高小麦籽粒品质效应的真实存在和在小麦生产中“以水调质”的可行性。

**关键词:** 籽粒品质; 籽粒产量; 灌溉; 冬小麦; 调亏灌溉 (RDI)

**中图分类号:** S275      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0276-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.041

## Effect of Regulated Deficit Irrigation (RDI) on Grain Yield and Quality Traits of Winter Wheat and Their Relationship

LIU Xiaofei<sup>1,2</sup>, FEI Liangjun<sup>2</sup>, DUAN Aiwang<sup>1</sup>, LIU Zugui<sup>1</sup>, MENG Zhaojiang<sup>1</sup>

(1. Key and Open Laboratory of Crop Water Requirements Regulation, Ministry of Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002; 2. Water Resources Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**Abstract:** Under conditions of large-scale open-closed type rain-proof shelter, effects of regulated deficit irrigation (RDI) on grain yield and quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and their relationship were studied by the method of tubular soil cultivation, and the aim was to find suitable appropriate stages to impose RDI and degrees of water deficit, offering technical parameters to the establishment of RDI model with water-saving, high yield and good quality. A two-factor (RDI stages and the amount of water deficit) randomized block design was adopted in the pot experiment. Three water regulation deficit stages (beginning of spring growth (I), stem elongation (II) and grain filling (III)) were set up, and each stage included three levels of water deficit (60%~65%, 50%~55% and 40%~45% of the maximum field capacity for light, moderate and severe deficit, respectively). The results indicated that the grain protein content of winter wheat was not always negatively correlated with soil water content. There were differences in effects of RDI on grain protein content at different growing stages. The correlation between grain protein content and soil water moisture was negative at the stage II. Light (60%~65%) or middle degree (50%~55%) of water deficit before jointing stage did not significantly reduce grain yield, protein yield and amino acid content, or

收稿日期: 2018-10-31

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U1404528, 51079153); 现代农业小麦产业技术体系专项 (CARS-3-1-30); 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503130); 中央级科研院所基本科研业务费专项 (中国农业科学院农田灌溉研究所) (FIRI2017-02)

第一作者: 刘小飞 (1976—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事节水农业基础理论和技术研究。E-mail: lxffiri@163.com

通信作者: 孟兆江 (1958—), 男, 博士, 研究员, 主要从事作物水分高效利用研究。E-mail: zhaojiang\_meng@aliyun.com

even slightly increase grain yield, but severe degree (40%~45%) of water deficit would lead to significant yield reduction. However, even slight water deficit resulted in serious yields reduction after jointing stage. Light degree of water deficit at grain filling stage did not significantly decrease grain yield, but enhanced the water-saving effects and slightly increased amino acid yield. The results also showed that the correlation between grain yield and protein content was not always negative, which could be weakened or changed under certain conditions. There were significant differences in the relationship between grain yield and quality traits at different RDI stages. Therefore, it was suggested that coordinating high grain yield in contradiction to good grain quality might be possible. The results of this study preliminarily confirmed that RDI was a practicable technique for coordinating relationship between grain yield and quality characters in winter wheat.

**Keywords:** grain quality; grain yield; irrigation; winter wheat; regulated deficit irrigation (RDI)

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,人民的食物结构从“温饱型”转变成“小康型”,对食物的品种质量要求提高。小麦是全球种植的大宗农作物之一,是中国第二大农产品,年产量达1亿t左右,约占粮食总产量的1/5。小麦又是人们的主要食物来源之一,不仅给人类提供热量,也供应大量的蛋白质。据统计,世界小麦蛋白质数量等于肉、蛋、奶蛋白质的总和,籽粒营养价值为鸡蛋蛋白的50%~53%<sup>[1]</sup>。因此,提高小麦品质特别是蛋白质含量及质量,对人们的食物营养至关重要。小麦品质问题已随着产量水平的提高愈来愈成为遗传育种、耕作栽培、生态生理和农田灌溉等研究领域的主攻目标。试验研究和生产实践证明小麦籽粒品质是基因型与环境因子共同作用的结果,因此有必要进一步了解栽培措施和环境条件对小麦籽粒品质的影响效应,为制定以品质为依据的合理种植区划和优质栽培农水结合技术提供依据。

调亏灌溉是基于传统灌溉原理而提出的,其基本概念是根据作物的遗传和生态生理特性,在其生育期的某一或某些适当阶段,人为主动地对其施加一定程度的水分亏缺,以影响作物的生理和生化过程,对作物进行抗旱锻炼,提高作物的后期抗旱能力,调节其光合产物向不同组织器官的分配和运转,调控地上和地下生长动态,促进生殖生长,控制营养生长,舍弃有机合成物总量,从而提高经济产量和改善品质,即通过作物自身的变化实现高水分利用率,达到节水高产,优质高效和增加灌溉面积的目的<sup>[2-3]</sup>。调亏灌溉(regulated deficit irrigation, RDI)概念提出迄今,国内外研究者主要就其可行性<sup>[4-5]</sup>、节水增产功效与机理<sup>[6-7]</sup>、果树果实品质<sup>[8-9]</sup>、适宜指标<sup>[10-11]</sup>、水分利用效率<sup>[12-13]</sup>等问题进行了试验研究。但综观国内外研究资料,RDI对经济产品品质的影响研究主要集中于果树等少数园艺作物<sup>[14-16]</sup>,而关于RDI对大田粮食作物籽粒品质影响的研究报道资料甚为鲜见。因为RDI的提出和实施的目的在于不仅是在于节水增产,而更主要的是在于改善作物经济产品品质。鉴于此,本研究目的在于探索不同水分调控阶段和调亏度对小

麦籽粒产量和品质的影响,进一步充实和完善RDI理论,为建立节水高产、优质高效RDI综合指标与模式提供技术参数和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2015年10月至2016年6月和2016年10月至2017年6月在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场大型启闭式防雨棚下进行。试验场位于河南省新乡市东北郊(113°53' E, 35°19' N),属典型的暖温带半湿润半干旱地区。年平均降水量580 mm;年平均气温13.5℃;≥0℃积温年均均为5 070℃;年日照时间2 497 h;无霜期220 d;年潜在蒸散量2 000 mm。

### 1.2 供试材料

以冬小麦(*Triticum aestivum* L.)为试验材料,品种为中筋小麦“豫麦49-198”,由河南省农业科学院小麦研究所提供。采用筒测土培法,测筒为圆柱形,内径66 cm,深95 cm,埋入土中,上沿高出地面10.0 cm;底部铺20 cm厚的沙过滤层,每个筒内两侧各设置1根直径3 cm的供(排)水管,管周围打有小孔,并用密质纱网包裹以防堵塞;按原状土层次装土,装土平均体积质量为1.16 g/cm<sup>3</sup>,田间最大持水率24%(质量含水率);0—30 cm土层基础养分质量分数为有机质9.3 g/kg,全氮0.98 g/kg,碱解氮44.02 mg/kg,速效磷6.2 mg/kg,速效钾112 mg/kg,土壤质地为壤土,每筒混入1 000 g优质农家肥,全生育期每筒施N 28.0 g, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 14.0 g, K<sub>2</sub>O 21.0 g,其中N 1/2基施,1/2追施。精选种子,于10月16日浸后播种,每筒150粒,出苗后至三叶期定苗,每筒留苗100株。

### 1.3 试验设计

采用二因素随机区组设计,冬小麦设置3个水分调亏(亏缺)阶段:返青—拔节(I)、拔节—抽穗(II)、抽穗—成熟(III),各生育阶段对应的土壤计划湿润层深度分别为50, 60, 75 cm;每个调亏阶段设置3个水分调亏程度:轻度调亏(L)、中度调亏(M)和重度调亏(S),土壤相对含水率(绝对含水率占田间最大

持水率的比例)分别为 60%~65%, 50%~55%, 40%~45%;共 9 个处理组合,每个处理重复 6 次(3 次用于取样测定,3 次用于收获计产及测定品质);设对照(CK,土壤相对含水量 75%~85%)6 筒;调亏阶段灌水按处理设计水平(低于下限灌至上限),其余阶段按对照水平(75%~85%)控制水分。返青期开始水分处理,用时域反射仪(TDR)监测土壤水分(测筒装土时按 0—20, 20—40, 40—60, 60—80 cm 4 个层次埋设波导探头),每月用取土烘干法校正时域反射仪 1 次,用水量平衡法确定蒸发蒸腾量,当各筒土壤水分低于设计下限时用软管供水,水表计量,加水至上限,记录各筒每次加水量,由水量平衡方程计算各时期总的耗水量。

#### 1.4 取样时间及方法

2016 年 6 月和 2017 年 6 月冬小麦籽粒收获后,经 1 个月的生理后熟,进行品质特性(蛋白质含量及组分、氨基酸含量及组分等指标)的测定。

#### 1.5 测定项目及方法

蛋白质含量(PC):籽粒蛋白质含量采用 GB 2905—1982 谷类、豆类作物种子粗蛋白质测定法<sup>[17]</sup>(半微量凯氏定氮法)测定。总氮含量采用 1030 自动定氮仪(瑞典, Foss Tecator)测定;蛋白质含量由总氮含量乘以系数 6.25 计算得到;蛋白质产量(PY)由籽粒产量乘以籽粒蛋白质含量计算得到。

氨基酸含量(AAC)及组分:采用茚三酮染色法<sup>[18]</sup>测定,采用仪器设备为氨基酸分析仪(日本,日立 L-8800 全自动氨基酸分析仪)、分离柱(标准蛋白质水解法分离柱,可以分离 18 种氨基酸)。氨基酸产量(amino acid yield, AAY)由籽粒产量乘以籽粒氨基酸含量计算得到。

降落值(FN):按国际谷物化学学会(AACC)56—61 标准<sup>[19]</sup>测定。

#### 1.6 数据处理方法

所有数据采用 Excel 2010 和 DPS v 7.05 软件进行分析处理。不同处理间差异采用方差分析(ANOVA)检验,并利用 Duncan 法进行多重比较;利用相关分析检验籽粒品质参数与土壤含水量的关系和评价籽粒产量和籽粒品质性状间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 调亏灌溉对小麦籽粒蛋白质含量、氨基酸含量和降落值的影响

由表 1 可知,调亏阶段和调亏程度对籽粒蛋白质和氨基酸含量的影响在某些阶段达显著水平( $P < 0.05$ ),而不同调亏阶段和调亏程度对蛋白质含量和降落值的影响存在交互作用( $P < 0.05$ )。在返青—拔节期,调亏程度对籽粒品质性状的影响表现不一致,蛋白质表现为提高不显著趋势,氨基酸表现为增加趋势,降落值在轻度调亏下较对照显著下降,其他调亏程度与对照差异不显著;在拔节期之后采取水分调亏措施,可显著提高籽粒品质性状。在拔节—抽穗阶段,不同调亏处理下的蛋白质和氨基酸含量均显著( $P < 0.05$ )高于对照,轻度 L、中度 M、重度 S 调亏处理 2 年平均分别提高了 7.0%和 11.6%、9.3%和 13.5%、8.5%和 15.1%,降落值则显著( $P < 0.05$ )低于对照,2 年平均分别降低了 6.7%、6.9%、14.8%,随调亏程度的增大,降落值呈降低趋势;在抽穗—成熟期,调亏程度对降落值的影响表现为 2 年不一致,采取重度调亏可显著( $P < 0.05$ )提高籽粒蛋白质和氨基酸含量,2 年平均较对照提高了 8.1%和 13.4%。

表 1 水分调亏对冬小麦籽粒蛋白质、氨基酸含量及降落值的影响

调亏阶段	调亏程度	2015—2016 年			2016—2017 年			
		蛋白质含量/%	氨基酸含量/%	降落值/s	蛋白质含量/%	氨基酸含量/%	降落值/s	
I	对照	17.33±1.09a	16.04±1.03b	430±33a	16.23±0.75a	15.31±1.26a	411±22a	
	轻度	16.96±0.99a	16.79±0.59a	413±27b	16.20±1.36a	15.37±1.23a	404±23b	
	中度	16.64±0.85b	15.63±1.18b	442±39a	15.74±0.96b	14.92±1.34b	424±12a	
	重度	17.10±0.51a	16.90±1.16a	430±25a	16.24±0.94a	15.74±1.11a	417±27a	
II	对照	17.33±0.42b	16.04±0.98c	430±38a	16.23±1.17b	15.31±1.18c	411±23a	
	轻度	18.34±1.29a	17.87±1.32a	390±25b	17.56±1.04a	17.12±0.57a	394±22b	
	中度	18.50±1.34a	18.22±1.50a	396±35b	18.16±0.87a	17.37±1.09a	387±18b	
	重度	18.42±1.04a	18.38±0.59a	349±19c	17.97±1.41a	17.70±1.54a	367±22c	
III	对照	17.33±0.84b	16.04±0.49c	430±30a	16.23±1.04b	15.31±1.15c	411±27a	
	轻度	16.48±0.10c	16.49±0.70c	428±24a	15.72±1.11c	15.40±0.65c	420±30a	
	中度	17.21±1.24b	17.09±1.49b	396±15b	16.65±0.70b	16.15±1.12b	421±29a	
	重度	18.34±0.33a	18.16±1.30a	414±29a	17.90±1.61a	17.38±1.16a	431±12a	
方差分析	调亏阶段	17.015**	9.832**	11.079**	14.299**	11.083**	16.965**	
	调亏程度	3.645*	9.376**	4.007*	5.395**	6.302**	0.463ns	
F 值及显著性		程度 * 阶段	4.181**	2.352ns	3.615*	3.523*	1.922ns	3.528*

注:表中数据为平均值±标准误差;同一水分亏缺阶段内的数值标有不同字母表示不同处理间分别在 0.05( $P < 0.05$ )或 0.01( $P < 0.01$ )水平存在显著差异;ns 表示并不显著。下同。

## 2.2 RDI 对小麦籽粒产量、蛋白质、氨基酸和赖氨酸产量的影响

由表 2 可知,总体上看,随着水分调亏阶段的推移,籽粒产量对水分调亏程度的反应越来越敏感。具体分析各调亏阶段又存在明显差异性。在阶段 I,轻、中度调亏比 CK 差异不显著;重度调亏减产达极显著水平。在阶段 II,随调亏程度加重,籽粒产量呈明显下降趋势,各

调亏处理与 CK 相比减产幅度为 17.4%~70.1%,减产均达极显著水平。说明此阶段水分调亏对籽粒产量最为不利。在阶段 III,轻度调亏减产不显著,中、重度调亏减产达极显著水平,中、重度调亏处理与 CK 相比下降幅度为 1.7%~45.9%。蛋白质产量、氨基酸产量和赖氨酸产量等籽粒品质指标对各阶段水分调亏程度的反应与籽粒产量呈基本相似规律。

表 2 RDI 对小麦成熟期籽粒产量和蛋白质及氨基酸产量的影响

单位:kg/hm<sup>2</sup>

调亏阶段	调亏度	2015—2016 年				2016—2017 年			
		籽粒产量	蛋白质产量	氨基酸产量	赖氨酸产量	籽粒产量	蛋白质产量	氨基酸产量	赖氨酸产量
I	CK	8575±17.5a	1486±3.0a	1375±2.8ab	37.73±0.08ab	10908.9±292.95a	1769.9±47.53a	1390.3±37.34bc	48.0±1.29a
	L	8752±9.8a	1484±1.7a	1469±1.6a	41.13±0.05a	10722.5±583.52a	1737.0±94.53a	1647.5±89.66a	50.4±2.74a
	M	7625±20.9ab	1269±3.5ab	1192±3.3bc	34.31±0.09bc	10271.1±393.60a	1616.7±61.95a	1531.9±58.71bc	46.2±1.77a
	S	6576±6.6b	1124±1.1b	1111±1.1c	30.20±0.03c	8193.5±521.42b	1330.6±84.68b	1289.7±82.07c	37.7±2.40b
II	CK	8575±17.5a	1486±3.0a	1375±2.8a	37.73±0.08a	10908.9±292.95a	1769.9±47.53a	1390.3±37.34a	48.0±1.29a
	L	6497±6.6b	1191±1.2b	1161±1.2a	31.18±0.03b	9006.5±656.87ab	1581.6±115.35ab	1541.5±112.42a	43.2±3.15ab
	M	4685±19.4c	867±3.6c	854±3.5b	22.95±0.10c	6770.1±857.65bc	1229.5±155.75bc	1176.0±148.97ab	33.2±4.20bc
	S	2562±2.5d	472±0.5d	471±0.5c	13.06±0.01d	4771.9±646.40c	857.5±116.16c	844.4±114.38b	24.3±3.30c
III	CK	8575±17.5a	1486±3.0a	1375±2.8a	37.73±0.08a	10908.9±292.95a	1770.0±47.53a	1390.3±37.34b	48.0±1.29a
	L	8425±17.5a	1389±2.9a	1389±2.9a	38.76±0.08a	10419.5±359.70a	1637.4±56.53a	1604.1±55.38a	47.9±1.65a
	M	6063±30.1b	1043±5.2b	1036±5.1b	28.49±0.14b	8190.6±89.82b	1363.3±14.95b	1322.4±14.50b	38.5±0.42b
	S	4637±33.1c	850±6.1b	842±6.0b	22.72±0.16b	7134.7±278.22b	1277.1±49.80b	1239.6±48.34b	35.0±1.36b

注:同列数据标有相同小写字母表示与 CK 差异不显著。

## 2.3 小麦籽粒产量和蛋白质产量与不同阶段土壤水分的关系

采用回归分析方法模拟了优质冬小麦籽粒产量、蛋白质产量和氨基酸产量等与不同调亏阶段土壤相对含水量的关系(表 3)。

结果表明,籽粒产量与各调亏阶段土壤含水量均

呈二次曲线关系。蛋白质产量(PY)与土壤含水量(SWC)呈开口向下二次曲线关系。然而,在 2016—2017 年蛋白质产量与灌浆期土壤含水量的关系呈开口向上的二次曲线型,其原因有待进一步试验研究。氨基酸产量(AAY)和土壤含水量也呈开口向下的二次曲线关系。

表 3 冬小麦成熟期籽粒产量和蛋白质及氨基酸等产量与不同调亏阶段土壤水分关系模拟

年份	籽粒参数	调亏阶段	回归方程	决定系数(R <sup>2</sup> )	均方误差
2015—2016 年	籽粒产量	I	$GY=46962 SWC-30646SWC^2-9313.6$	0.97*	178.64
		II	$GY=21306 SWC-1121 SWC^2-7782.3$	0.99**	74.50
		III	$GY=55644SWC-31901SWC^2-15368$	0.95*	406.74
	蛋白质产量	I	$PY=5933.7 SWC-3564.4SWC^2-965.7$	0.96*	36.84
		II	$PY=6625.2SWC-2506.5SWC^2-2212.2$	0.99**	5.12
		III	$PY=5352.6 SWC-2385.6SWC^2-1249.5$	0.97*	51.62
	氨基酸产量	I	$AAY=6738.4SWC-4360.6SWC^2-1196.5$	0.80	73.48
		II	$AAY=8487.1 SWC-4205.3SWC^2-2722.4$	0.99**	2.28
		III	$AAY=8709.3 SWC-5197.6SWC^2-2239.7$	0.94	67.96
2016—2017 年	籽粒产量	I	$GY=70059 SWC-47278 SWC^2-14948$	0.98**	82.80
		II	$GY=23760SWC-2394SWC^2-6538$	0.99**	67.24
		III	$GY=31966 SWC-14165 SWC^2-5453$	0.96*	390.25
	蛋白质产量	I	$PY=9664.5SWC-6327.8SWC^2-1915.8$	0.99**	13.65
		II	$PY=9053.4SWC-4587.7SWC^2-2529.5$	0.99**	4.61
		III	$PY=247.6 SWC+1157.8SWC^2+847.4$	0.97*	63.47
	氨基酸产量	I	$AAY=16649SWC-12486SWC^2-998.3$	0.96**	14.17
		II	$AAY=17691 SWC-12067 SWC^2-5011.8$	0.94**	73.49
		III	$AAY=10369SWC-7412SWC^2-2126.8$	0.67	124.67

注:GY 为小麦籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>);PY 为蛋白质产量(kg/hm<sup>2</sup>);AAY 为氨基酸产量(kg/hm<sup>2</sup>);SWC 为土壤含水率(%);\* 表示 P<0.05;

\*\* 表示 P<0.01。下同。

## 2.4 RDI 条件下小麦籽粒产量与品质性状间的关系

对优质小麦籽粒产量(GY)、蛋白质产量(PY)、氨基酸产量(AAY)、籽料蛋白质含量(GPC)、氨基酸含量

(AAC)、降落值(FN)和赖氨酸含量(LC)等指标进行了相关分析(表 4),结果表明,小麦产量与品质性状间的关系在不同阶段 RDI 条件下存在明显差异性。

表 4 返青期、拔节期和灌浆期调亏灌溉条件下小麦籽粒产量和品质性状间的相关性

年份	调亏阶段		蛋白质产量	氨基酸产量	赖氨酸产量	籽粒蛋白质含量	氨基酸含量	降落值	赖氨酸含量	
2015—2016 年	I	GY	0.99**	1.00**	0.97**	0.18	-0.20	-0.50	-0.07	
		PY	1	0.98**	0.95*	0.30	-0.16	-0.52	-0.11	
		AAY		1	0.98**	0.14	-0.17	-0.53	0	
		GPC			1	0.37	-0.35	-0.29		
		AAC				1	-0.74	0.75		
	II	FN					1	-0.68		
		GY	1.00**	1.00**	1.00**	-0.81	-0.88*	0.93*	-0.97**	
		PY	1	1.00**	1.00**	-0.77	-0.85	0.93*	-0.95**	
		AAY		1	1.00**	-0.78	-0.86	0.93*	-0.96**	
		GPC			1	0.99**	-0.76	0.92*		
		AAC				1	-0.84	0.96**		
		FN					1	-0.94*		
		GY	0.99**	1.00**	1.00**	-0.79	-0.97**	0.70	-0.92*	
		PY	1	0.99**	0.98**	-0.73	-0.97**	0.72	-0.95*	
		III	AAY		1	1.00**	-0.82	-0.96*	0.69	-0.90*
GPC				1	0.76	-0.27	0.60			
AAC					1	-0.54	0.98**			
FN						1	-0.57			
GY	0.99**		0.99**	0.99**	-0.41	-0.73	-0.36	0.17		
2016—2017 年	I	PY	1	1.00**	1.00**	-0.30	-0.64	-0.47	0.29	
		AAY		1	1.00**	-0.27	-0.62	-0.50	0.32	
		GPC			1	0.92	-0.70	0.83		
		AAC				1	-0.37	0.55		
		FN					1	-0.98*		
	II	GY	1.00**	1.00**	1.00**	-0.69	-0.99**	0.95	-0.98*	
		PY	1	1.00**	1.00**	-0.66	-1.00**	0.96*	-0.98*	
		AAY		1	1.00**	-0.69	-0.99**	0.95	-0.98	
		GPC			1	0.61	-0.43	0.52		
		AAC				1	-0.98*	0.99**		
		FN					1	-0.99**		
		GY	1.00**	0.99**	1.00**	-0.96*	-0.94	-0.8	-0.92	
		PY	1	1.00**	1.00**	-0.93	-0.91	-0.74	-0.89	
		III	AAY		1	1.00**	-0.92	-0.90	-0.73	-0.88
			GPC			1	1.00**	0.94	0.99**	
AAC					1	0.95*	1.00**			
FN						1	0.97*			

在返青期 RDI 条件下,籽粒产量与蛋白质含量呈微弱正相关,与氨基酸含量、赖氨酸含量及降落值均呈微弱负相关,使产量与品质关系得到进一步改善。表明此阶段也是通过 RDI 实现产量和品质同步提高的适宜阶段。在拔节期 RDI 条件下,籽粒产量与蛋白质含量呈负相关,接近显著水平;与氨基酸含量和赖氨酸含量均呈显著负相关。表明此阶段难以通过 RDI 解决产量与品质之间的矛盾。在灌浆期 RDI 条件下,籽粒产量是与蛋白质含量呈负相关,与降落值呈正相关,但均不显著;而籽粒产量与氨基酸含量呈极显著负相关,与赖氨酸含量呈显著负相关。表明此阶段通过 RDI 也难以协调好产量与品质的关系。

上述结果表明,籽粒产量与品质性状间既有统一性,又有对立性,在一定条件下这种关系又可以发生转

化,因而高产与优质的矛盾并非不可协调,这为通过 RDI 对小麦的品质实现“定向调控”提供了理论依据。

## 3 讨论

(1)关于冬小麦籽粒蛋白质含量与土壤水分的关系,本试验结果与已有许多研究<sup>[20-22]</sup>结论不尽一致。在全生育期控水条件下得到的试验结果是“土壤含水量与小麦蛋白质含量呈负相关”。而在本试验“变水”条件下土壤含水量与小麦蛋白质含量的关系比较复杂,即不同生育阶段控水对蛋白质的影响存在明显差异性,只有在拔节—抽穗期“土壤含水量与小麦蛋白质含量呈负相关”的结论才成立。在冬小麦拔节期以前的水分调亏基本上是降低蛋白质含量,只有拔节—抽穗期的土壤含水量与小麦蛋白质含量呈负相关关系,即随水分调亏程度加重(土壤相对含水量降低)蛋

白质含量呈提高趋势(提高幅度为1.01~1.17个百分点),各水分调亏处理间差异不显著,但与对照(充分供水处理)差异均达极显著水平。显然,此阶段是通过水分调亏调控蛋白质含量的适宜阶段。在灌浆期,轻度水分调亏蛋白质含量比对照低0.85个百分点,差异达显著水平;中度调亏与对照接近;重度调亏比对照高1.01个百分点,差异达极显著水平。说明灌浆期也是通过水分调亏调控蛋白质含量的较为适宜阶段。因此认为,土壤含水量与小麦蛋白质含量的关系并非是简单的线性关系,二者的确切关系及机理值得进一步深入研究。

(2)在小麦拔节以前施加轻或中度水分调亏,籽粒产量、蛋白质产量和氨基酸产量等不会显著降低或略有增产,过度调亏会显著减产;拔节以后的水分调亏会导致严重减产,尤其是拔节—抽穗期(Ⅱ),即使是轻度调亏也会导致严重减产;但灌浆期轻度调亏不会导致籽粒明显减产,而且节水效果显著,对改善品质也十分有利。可能原因:一是在这些阶段的水分亏缺抑制了作物营养生长而对光合作用没有显著影响;二是作物遭受轻度干旱能够促进光合产物向籽粒转移;三是作物在拔节期经历干旱锻炼在下阶段复水后具有生长补偿和生理生化补偿效应<sup>[23]</sup>。已有研究<sup>[24]</sup>证明,水分调亏并非总是降低产量,相反,在一些作物生长前期的适度水分调亏能够增加产量。然而,作物经历适度水分亏缺复水后的补偿效应的生化和分子机制有待进一步研究。

(3)已有研究<sup>[25-32]</sup>认为,小麦产量与品质之间存在明显的相关性,如籽粒产量与蛋白质含量间一般存在显著的负相关<sup>[30,33-37]</sup>,但在适宜条件下二者也能够同步增长<sup>[38-40]</sup>。然而,有关小麦籽粒产量与品质性状间的关系多限于全生育期某一固定控制水分(静水)条件下的数据分析,而在不同生育阶段不同水分(变水)条件下这些相关性是否会发生改变尚缺乏研究。本研究表明,小麦产量与蛋白质含量并非总是存在显著的负相关性,在一定条件下可以减弱或改变这种关系;小麦产量与品质性状间的关系在不同阶段RDI条件下存在显著差异性。在返青期RDI条件下,籽粒产量与蛋白质含量呈微弱正相关,与氨基酸含量、赖氨酸含量及降落值均呈微弱负相关,使产量与品质关系得到进一步改善。表明此阶段也是通过RDI实现产量和品质同步提高的适宜阶段。在拔节期RDI条件下,籽粒产量与蛋白质含量呈负相关,接近显著水平;与氨基酸含量和赖氨酸含量均呈显著负相关。表明此阶段难以通过RDI解决产量与品质之间的矛盾。在灌浆期RDI条件下,籽粒产量是与蛋白质含量呈负相关,与降落值呈正相关,但均不显著;而籽粒产

量与氨基酸含量呈极显著负相关,与赖氨酸含量呈显著负相关。表明此阶段通过RDI也难以协调好产量与品质的关系。

## 4 结论

(1)在冬小麦拔节期以前的水分调亏基本上是降低蛋白质含量,只有拔节—抽穗期的土壤含水量与小麦蛋白质含量呈负相关关系,即随水分调亏程度加重(土壤相对含水量降低)蛋白质含量呈提高趋势;此阶段是通过水分调亏调控蛋白质含量的适宜阶段。灌浆期也是通过水分调亏调控蛋白质含量的较为适宜阶段。因此认为,土壤含水量与小麦蛋白质含量的关系并非是简单的线性关系,二者的确切关系及机理值得进一步深入研究。

(2)在小麦拔节以前施加轻或中度水分调亏,籽粒产量、蛋白质产量和氨基酸产量等不会显著降低或略有增产,过度调亏会显著减产;拔节以后的水分调亏会导致严重减产,尤其是拔节—抽穗期,即使是轻度调亏也会导致严重减产;但灌浆期轻度调亏不会导致籽粒明显减产,而且节水效果显著,对改善品质也十分有利。

(3)小麦产量与蛋白质含量并非总是存在显著的负相关性,在一定条件下可以减弱或改变这种关系;小麦产量与品质性状间的关系在不同阶段RDI条件下存在显著差异性。在返青期RDI条件下,籽粒产量与蛋白质含量呈微弱正相关,与氨基酸含量、赖氨酸含量及降落值均呈微弱负相关,使产量与品质关系得到进一步改善。表明此阶段也是通过RDI实现产量和品质同步提高的适宜阶段。在拔节期RDI条件下,籽粒产量与蛋白质含量呈负相关,接近显著水平;与氨基酸含量和赖氨酸含量均呈显著负相关。表明此阶段难以通过RDI解决产量与品质之间的矛盾。在灌浆期RDI条件下,籽粒产量是与蛋白质含量呈负相关,与降落值呈正相关,但均不显著;而籽粒产量与氨基酸含量呈极显著负相关,与赖氨酸含量呈显著负相关。表明此阶段通过RDI也难以协调好产量与品质的关系。

籽粒产量与品质性状间既有统一性,又有对立性,在一定条件下这种关系又可以发生转化,因而高产与优质的矛盾并非不可协调。初步证实了RDI提高优质小麦籽粒品质效应的真实存在,显示了RDI在优质小麦生产中“以水调质”的可行性。这为通过RDI对专用型小麦的品质实现“定向调控”提供了理论依据。

### 参考文献:

[1] 薛盈文,于立河,郭伟.影响小麦品质的因素及改善小麦

- 品质的途径[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2005, 17(3): 32-38.
- [2] 康绍忠, 蔡焕杰. 作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [3] Rowland L S, Smith H K, Taylor G. The potential to improve culinary herb crop quality with deficit irrigation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 242: 44-50.
- [4] 胡亚州. 调亏灌溉在农业中的应用分析[J]. 现代农业科技, 2018(22): 170, 172.
- [5] 成杨贵, 齐广平. 调亏灌溉在农业生产上的应用进展研究[J]. 农业科技与信息, 2016(19): 119-120.
- [6] 魏永霞, 马瑛瑛, 刘慧, 等. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 252-260.
- [7] Marsal J, Casadesus J, Lopez G, et al. Sustainability of regulated deficit irrigation in a mid-maturing peach cultivar [J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(3): 201-208.
- [8] Hernández M L, Velázquez-Palmero D, Dolores Sicardo M, et al. Effect of a regulated deficit irrigation strategy in a hedgerow ‘Arbequina’ olive orchard on the mesocarp fatty acid composition and desaturase gene expression with respect to olive oil quality [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 204: 100-106.
- [9] Ju Y L, Yang B H, He S, et al. Anthocyanins accumulation and biosynthesis are modulated by regulated deficit irrigation in Cabernet Sauvignon (*Vitis Vinifera* L.) grapes and wines [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 135: 469-479.
- [10] 梁森, 韩莉, 李慧娟, 等. 水稻旱作栽培方式及调亏灌溉指标试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 13-19.
- [11] 孟兆江, 刘安能, 庞鸿宾, 等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 94-98.
- [12] Liu X G, Qi Y T, Li F S, et al. Impacts of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of Arabica coffee under different shading levels in dry and hot regions of southwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 204: 292-300.
- [13] Yang H, Du T S, Qiu R J, et al. Improved water use efficiency and fruit quality of greenhouse crops under regulated deficit irrigation in northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 193-204.
- [14] 依提卡尔·阿不都沙拉木, 朱成立, 柳智鹏, 等. 调亏灌溉对枣树生长与果实品质和产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(10): 948-951.
- [15] 马福生, 康绍忠, 王密侠, 等. 调亏灌溉对温室梨枣树水分利用效率与枣品质的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 37-43.
- [16] 刘炼红, 莫言玲, 杨小振, 等. 调亏灌溉合理滴灌频率提高大棚西瓜产量及品质[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 95-104.
- [17] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Pinckney A J, Greenaway W T, Zeleny L. Further developments in the sedimentation test for the wheat quality [J]. *Cereal Chemistry*, 1957, 34: 16-25.
- [20] 马东辉, 王月福, 赵长星, 等. 施氮量和花后土壤含水量对小麦氮代谢特性和子粒蛋白质含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1035-1041.
- [21] 赵长星, 马东辉, 王月福, 等. 施氮量和花后土壤含水量对优质强筋小麦产量和品质的影响[J]. 生态学报, 2007, 28(9): 4396-4404.
- [22] 戴相林, 廖文华, 高小丽, 等. 水氮耦和对春小麦产量、蛋白质含量及其组分含量的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(12): 2883-2889.
- [23] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523-526.
- [24] Cui N B, Du T S, Kang S Z, et al. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees [J]. *Agricultural Water Manage*, 2008, 95(4): 489-497.
- [25] Bassett L M, Allan R E, Rubenthaler G I. Genotype × environment interactions on soft white winter wheat quality [J]. *Agronomy Journal*, 1989, 81: 955-960.
- [26] 蔡大同, 王义柄, 菲泽圣, 等. 播期和氮肥对不同生态系统优质小麦品种产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, 9(1): 72-83.
- [27] 闫翠萍, 张永清, 张定一, 等. 播期和种植密度对强、中筋冬小麦蛋白质组分及品质性状的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1733-1740.
- [28] 郭天财, 彭羽, 朱云集, 等. 播期对不同穗型、筋型冬小麦影响效应研究[J]. 耕作与栽培, 2001(2): 19-20.
- [29] 郭天财, 张学林, 樊树平, 等. 不同环境条件对 3 种筋型小麦品质性状的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 917-920.
- [30] 荆奇, 姜东, 戴廷波, 等. 基因型与生态环境对小麦籽粒品质与蛋白质组分的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1649-1653.
- [31] 金善宝. 小麦生态理论与实践[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 1992.
- [32] 兰涛, 潘洁, 姜东, 等. 生态环境和播期对小麦籽粒产量及品质性状间相关性的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(4): 72-78.
- [33] Tribio E, Abad A, Michelena A, et al. Environmental effects on the quality of two wheat genotypes. I. Quantitative and qualitative variation of storage proteins [J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(1): 47-64.

60 cm 呈现积盐现象,而埋深为 10 cm 的微润灌处理在播种后 57 天就已经开始积盐。2015 年在向日葵成熟收获后埋深为 20 cm,充分灌溉的 T1 处理的盐分积累较小,0—60 cm 土壤平均相对积盐率为 9.3%,比 T2、T5 处理分别低 53.3%,45.9%。2016 年在播种后不同时期 0—60 cm 土壤均呈现脱盐现象,脱盐率随着微润带埋深增加而增加,随着灌溉定额减少而减少。

(4)在相同埋深下,产量及产量构成因子随着灌溉水量的增多呈逐渐递增的趋势。2015 年和 2016 年 T1 比 T2、T3、T4 处理分别显著提高 12.50%,23.93%,24.77%和 7.59%,23.13%,28.30%。在灌溉定额相同的情况下,微润带埋深为 20 cm 比 10 cm 各对应处理(T1 与 T5 对应,依次类推)产量相比具有增加趋势,且差异显著。

(5)综合来看,埋深为 20 cm 时,充分灌溉处理在 0—60 cm 土层内土壤积盐率最小为 9.3%,作物产量最高,且 WUE 较高。推荐河套地区种植向日葵微润带布置埋深为 20 cm,进行充分灌水,并进行秋浇将土壤表层盐分淋洗。

#### 参考文献:

[1] 张子卓,张珂萌,牛文全,等.微润带埋深对温室番茄生长和土壤水分动态的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):122-129.

[2] 薛万来,牛文全,张子卓,等.微润灌溉对日光温室番茄生长及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):61-66.

[3] Li J P, Xu X X, Lin G, et al. Micro-irrigation improves grain yield and resource use efficiency by co-locating the roots and N-fertilizer distribution of winter wheat in the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2018, 643(25): 367-377.

[4] 田德龙,郑和祥,李熙婷.微润灌溉对向日葵生长的影响研究[J].节水灌溉,2016(9):94-97,101.

(上接第 282 页)

[34] 王绍中,章练红,徐雪林,等.环境生态条件对小麦品质的影响研究进展[J].华北农学报,1994,9(增刊1):141-144.

[35] Wheeler T R, Batts G R, Ellis R H, et al. Growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum*) crops in response to CO<sub>2</sub> and temperature [J]. The Journal of Agricultural Science, 1996, 127(1):37-48.

[36] 吴东兵,曹广才,强小林,等.生育进程和气候条件对小麦品质的影响[J].应用生态学报,2003,14(8):1296-1300.

[37] 张艳,何中虎,周桂英,等.基因型和环境对我国冬播麦区小麦品质性状的影响[J].中国粮油学报,1999,14(5):1-5.

[5] 弋鹏飞.膜下滴灌棉田土壤水盐运移规律试验研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.

[6] 史丽艳,牛文全,张俊.灌水方式对轻度盐化土壤玉米生长及土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):152-156,175.

[7] 牛文全,张俊,张琳琳,等.埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J].农业机械学报,2013,44(12):128-134.

[8] Meshram D T, Gorantiwar S D, Singh N V, et al. Response of micro-irrigation systems on growth, yield and WUE of Pomegranate (*Punica granatum* L.) in semi-arid regions of India [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246(4): 686-692.

[9] 吕殿青,王全九,王文焰,等.膜下滴灌水盐运移影响因素研究[J].土壤学报,2002,39(6):794-801.

[10] Karlberg L, Rockström J, Annandale J G, et al. Low-cost drip irrigation: A suitable technology for southern Africa: An example with tomatoes using saline irrigation water [J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(1/2): 59-70.

[11] 李朝阳,王兴鹏,杨玉辉,等.不同水头压力的微润灌对土壤水盐运移的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(6):22-26.

[12] 张子卓,牛文全,许健,等.膜下微润带埋深对温室番茄土壤水盐运移的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(9):1112-1121.

[13] Patel N, Rajput T B S. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato [J]. Agricultural Water Management, 2006, 88(1): 209-223.

[14] 梁建财,史海滨,李瑞平,等.不同覆盖方式对中度盐渍土壤的改良增产效应研究[J].中国生态农业学报,2015,23(4):416-424.

[15] 王淑红,张玉龙,虞娜,等.保护地渗灌管的埋深对土壤水盐动态及番茄生长的影响[J].中国农业科学,2003,36(12):1508-1514.

[16] 牛文全,吕望,古君,等.微润管理深与间距对日光温室番茄土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2017,33(19):131-140.

[38] Cooper M, Woodruff D R, Phillips I G, et al. Genotype-by-management interactions for grain yield and grain protein concentration of wheat [J]. Field Crops Research, 2001, 69(1): 47-67.

[39] Daniel J M, Gustavo A S. Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations [J]. Field Crops Research, 1995, 43(2/3): 55-66.

[40] Daniel C, Tribouy E. Changes in wheat protein aggregation during grain development: Effects of temperatures and water stress [J]. European Journal of Agronomy, 2002, 16(1): 1-12.