

张继波,薛晓萍,张新刚,等.水分关键期干旱胁迫对冬小麦矿质元素积累、产量和品质的影响[J].干旱气象,2023,41(2):223-232, [ZHANG Jibo, XUE Xiaoping, ZHANG Xingang, et al. Effects of drought stress on mineral element accumulation, yield and grain quality of winter wheat during water critical period[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(2): 223-232], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-02-0223

## 水分关键期干旱胁迫对冬小麦矿质元素积累、产量和品质的影响

张继波<sup>1,2</sup>,薛晓萍<sup>1,2</sup>,张新刚<sup>3</sup>,邱 粲<sup>1,2</sup>,谭方颖<sup>4</sup>,李 楠<sup>1,2</sup>

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2. 山东省气候中心,山东 济南 250031;3. 河南省焦作市气象局,河南 焦作 454002;4. 国家气象中心,北京 100081)

**摘 要:**干旱是制约我国粮食产量和品质提升的主要农业气象灾害之一。土壤水分与矿质元素交互作用,共同影响冬小麦的生长发育及产量、品质,探究水分关键期冬小麦叶片矿质元素积累、产量和籽粒品质对不同程度干旱胁迫的响应,对科学施肥和干旱灾害防御具有现实意义。本文以冬小麦品种“齐麦2号”为试材,在水分关键期(拔节—扬花期)设计5个梯度的水分控制试验(T1处理为适宜水平,T2、T3、T4处理分别按照基准补水量75.0 mm的80%、50%、25%一次性补水,T5处理不补水),模拟研究水分关键期干旱胁迫对冬小麦叶片氮、磷、钾矿质元素积累和光合色素、光合参数以及产量和籽粒品质的影响。结果表明:水分控制期间至复水后,T1处理下冬小麦叶片全氮、全磷、光合色素含量及最大净光合速率(Maximum Net Photosynthetic Rate,  $P_{\text{max}}$ )、表观量子效率(Apparent Quantum Efficiency, AQE)、光饱和点(Light Saturation Point, LSP)均最高,受干旱胁迫影响,T2、T3、T4和T5处理下上述要素均显著降低,且干旱胁迫程度越重降低幅度越大,T5处理叶片全氮、全磷含量和叶绿素a、叶绿素a+b、类胡萝卜素含量及 $P_{\text{max}}$ 、AQE、LSP分别较T1处理降低1.68%、0.15%、0.90  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、1.05  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、0.21  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、64.6%、65.8%、31.2%,而叶片全钾含量、光补偿点(Light Compensation Point, LCP)则随干旱胁迫加剧而升高,T5处理分别较T1处理升高1.20%和84.0%;干旱胁迫还造成冬小麦穗粒数、成穗率、千粒重显著降低,T5处理理论产量和籽粒蛋白质含量分别较T1处理降低56.6%和30.1%,而籽粒淀粉含量较T1处理升高11.6%。

**关键词:**冬小麦;水分关键期;干旱胁迫;矿质元素;产量;品质

**文章编号:**1006-7639(2023)02-0223-10 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-02-0223

**中图分类号:**P49

**文献标志码:**A

### 引 言

干旱与粮食安全已成为全球性问题(Lizumi et al., 2014),在全球变暖背景下降水异常导致的极端天气气候事件呈多发、频发、重发态势(周天军等, 2019;周波涛和钱进, 2021;IPCC, 2021;余荣和翟盘茂, 2021;王莺等, 2022;唐懿等, 2022)。干旱是我国最常见的气象灾害之一,是影响我国粮食生产最严重的气象灾害(王向辉和雷玲, 2011),威胁着国

家粮食安全。干旱能够引起作物矿质元素积累与分配的变化,导致叶片光合色素含量和光合能力下降,进而影响产量和籽粒品质(张继波等, 2021;张继波等, 2019;丁彤彤等, 2021;Jaleel et al., 2008)。因此,开展水分关键期干旱胁迫对冬小麦矿质元素积累、产量和籽粒品质影响的研究对于保障国家粮食安全意义重大。

氮、磷、钾等必需矿质营养元素在调控作物生

**收稿日期:**2023-01-05;改回日期:2023-03-06

**基金项目:**山东省气象局气象科学技术研究项目“基于小麦发育期图像智能解析的晚霜冻监测、预警技术研究”(2020sdqxm03)、“粮食作物主要农业气象灾害预警及影响评估技术”(2022sdqzx12)和社会公益性行业(气象)科研专项项目“干旱气象科学研究—我国北方干旱致灾过程及机理”(GYHY201506001)共同资助

**作者简介:**张继波(1987—),男,山东青州人,硕士,高级工程师,主要从事农业气象服务及研究。E-mail:zhangjb.196267@163.com。

**通信作者:**李楠(1984—),女,辽宁抚顺人,正高级工程师,主要从事农业气象服务及研究。E-mail:dogears0229@qq.com。

长发育及产量、品质形成中发挥着不可替代的作用(龙素霞等,2018;朱波等,2021),氮素和磷素是作物体内蛋白质、核酸、叶绿素、脂质和部分激素等生物大分子的重要组成部分,可以维持细胞代谢和调节酶活性(李武波等,2022),合理施用氮肥、磷肥能够显著提升作物光合能力、促进光合产物积累,而钾素则可以促进氮素吸收、蛋白质合成及光合产物、同化产物的输送,改善光合能力(韦素贞,2016)。因此,合理施用氮、磷、钾肥料是作物产量提升的重要调控手段之一(刘建玲等,2015;魏丹等,2017)。土壤是作物矿质元素吸收的主要来源,土壤水分是影响矿质元素可溶性和根表质流的主要因素,当土壤水分亏缺时,矿质元素的可溶性降低、离子分布改变,阻碍矿质离子向根系移动,进而影响矿质元素的吸收、转运和存贮(Chen et al., 2011; 闫永奎等, 2011; 周峻宇等, 2020)。研究发现,干旱胁迫降低了大豆叶片氮素、磷素含量,而对钾素含量影响不大(赵立琴等,2013),而烤烟叶片氮素含量则随干旱胁迫加剧而升高、磷素与钾素含量降低(董顺德等,2005);干旱胁迫造成小麦叶片和根系钙素含量降低、植株氮素积累和籽粒氮素含量减少(孙岩,2007;戴忠民等,2015)。然而,不同作物对水分响应的敏感阶段不同,探讨不同作物水分关键期干旱胁迫的影响,对作物产量构成尤为关键。为此,本文拟在冬小麦水分关键期(拔节—扬花期)开展水分控制试验,模拟研究麦田土壤水分变化特征及干旱发生发展过程,探究水分关键期干旱胁迫对冬小麦叶片氮、磷、钾等矿质元素积累的影响,以及叶片叶绿素含量、光合参数、产量及品质对干旱胁迫的响应,以期为农业生产科学管理及灾害影响定量评估提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2016年10月至2017年6月在山东省沂南县临沂设施农业气象试验站(118°14'54"E, 35°28'30"N;海拔高度148.0 m)水分控制场进行。该站年平均气温13.7℃,年平均降水量803.9 mm,年日照时数2 236.8 h,土壤类型为沙壤土。供试小麦品种为“齐麦2号”,试验期间无重大气象灾害和病虫害发生,冬小麦全生育期(2016年10月8日至2017年6月10日)平均气温9.7℃,降水量285.3 mm,日照时数1 568.1 h,分别较常年偏高(多)1.0℃、53.8 mm和58.9 h,各气象要素逐日变化见图1。文中所有时间均为北京时。

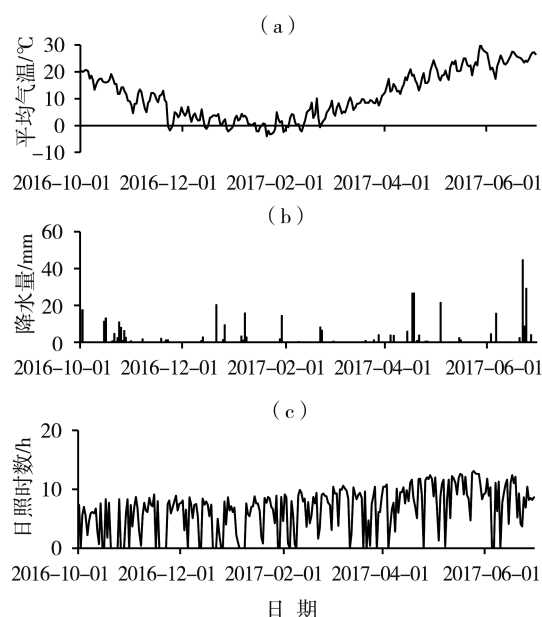


图1 试验期间田间平均气温(a)、降水量(b)和日照时数(c)逐日变化

Fig. 1 The daily variations of average temperature (a), precipitation (b) and sunshine duration (c) in field during the experiment

水分控制场地上部分安装的东西向电动式移动遮雨棚,长23.0 m、宽14.0 m、高5.0 m,遮雨棚顶部及四周为透光率85%的阳光板(保证冬小麦能够最大限度地接收散射光),雨雪天气来临前关闭遮雨棚遮蔽试验小区,其余时段为自然光照。试验场共设15个正方形试验小区,面积16.0 m<sup>2</sup>、深度2.0 m,四周及底部水泥墙均做了防水防渗处理。供试小麦于2016年10月8日以条播方式播种,行距25 cm,播种密度为每平米1 000株,播种前按照300 kg·hm<sup>-2</sup>施用复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15),播种后供水充分以保证出苗,拔节前追加一次尿素,其他管理措施与大田高产栽培模式一致。

### 1.2 试验设计

冬小麦拔节前各试验小区20 cm土壤相对湿度控制在60%左右。水分控制试验于拔节—扬花期进行,沂南县4月常年降水量约30.0 mm,灌水量约45.0 mm,将两者之和作为本试验基准补水量(75.0 mm)。其中,T1处理是拔节—扬花期20 cm土壤相对湿度始终保持在适宜水平(60%~80%),T2、T3和T4处理是在拔节期(4月1日)分别按照基准补水量的80%、50%和25%以喷灌形式进行一次性补水,至扬花期不再补水,而T5处理则是在拔节—扬花期不补水;扬花期后(4月28日)各小区复水至适宜水平,直至小麦成熟。试验采用单因素随机区组

设计,每个处理重复3次(图2)。

N(北)				
T3	T2	T1	T4	T5
T1	T5	T3	T4	T2
T2	T4	T5	T1	T3
S(南)				

图2 水分控制场试验小区分布

Fig. 2 Distribution of experiment districts in water control field

### 1.3 测定项目与方法

(1)土壤相对湿度测定。在冬小麦整个生长季每月8、18、28日采用烘干称重法测定20 cm土壤相对湿度,且在水分控制期间每月3、13、23日加密测定,每个处理重复3次。

(2)冬小麦叶片叶绿素含量测定。水分控制期间及复水后,每个小区选取10株长势良好的冬小麦功能叶片,采用丙酮乙醇法(张志良和翟伟菁,2003)测定叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量。

(3)冬小麦叶片光合参数测定。水分控制期间及复水后,利用LI-6400光合作用测定系统(Li-cor, USA)的6400-02B红蓝光叶室,在晴天09:00—12:00每个小区选取3株长势良好的冬小麦,测定其功能叶片光响应曲线,设置12个光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)水平,分别测定PAR为0、50、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时叶片净光合速率,设定参比室的叶片温度为25℃、CO<sub>2</sub>浓度为400  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。利用Photosynthesis Work Bench软件进行光响应曲线拟合,得到最大净光合速率(Maximum Net Photosynthetic Rate,  $P_{\text{max}}$ )、表观量子效率(Apparent Quantum Efficiency, AQE)、光补偿点(Light Compensation Point, LCP)、光饱和点(Light Saturation Point, LSP)等参数。

(4)冬小麦叶片干物质重及全氮、全磷、全钾含量测定。水分控制期间及复水后,叶片干物质重采用烘干称重法(袁蕊等,2016)测定,每隔10 d取样一次,各小区随机选取10株样本,将叶片摘下装袋,于105℃条件下杀青30 min,然后在80℃条件下烘至恒重,测定叶片干物重;将叶片干物质样本磨碎,分别参照凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度计法测定不同水分处理下叶片全氮、全磷、全钾含量。

(5)冬小麦产量测定。冬小麦成熟后,依据《农

业气象观测规范》(中国气象局,1993)每个小区选取50株植株进行考种,测定其成穗率、穗粒数、千粒重等产量构成指标。每个小区选取1 m×1 m样方取样、脱粒,自然风干后称重,并折算单位面积理论产量。

(6)冬小麦籽粒品质测定。取干净的小麦籽粒约100 g放置在测量盘中,分别参照国家标准《食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016》(中国疾病预防控制中心营养与食品安全所,2016a)和《食品中淀粉的测定:GB 5009.9—2016》(中国疾病预防控制中心营养与食品安全所,2016b),测定籽粒蛋白质和淀粉含量。

需要说明的是,由于冬小麦叶片取样及光合参数测定工作量较大,通常在土壤相对湿度测定前1~2 d进行取样、测定。另外,采用Duncan新复极差分析方法(盖钧镒,2020),检验不同水分处理间差异显著性( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分处理下土壤相对湿度变化

图3是水分控制期间不同水分处理下20 cm土壤相对湿度变化。可以看出,4月1日补水后,T1、T2、T3和T4处理下20 cm土壤相对湿度不同程度上升,T1、T2、T3处理升至80.0%左右,T4处理升至70.0%左右,T5处理因未补水略有降低;之后,由于不再补水,加之植株蒸腾和土壤水分蒸发,各处理下的土壤相对湿度持续下降,至扬花期土壤相对湿度较4月3日大幅降低,降幅分别为38.2%、38.8%、46.7%和39.2%。参照国家标准《农业干旱等级:GB/T 32136—2015》(国家气象中心等,2015)的干旱等级划分(表1),4月28日T2和T3处理土壤达到轻旱,土壤相对湿度分别为55.0%和52.0%,T4和T5处理分别达到中旱和重旱,土壤相对湿度分别为

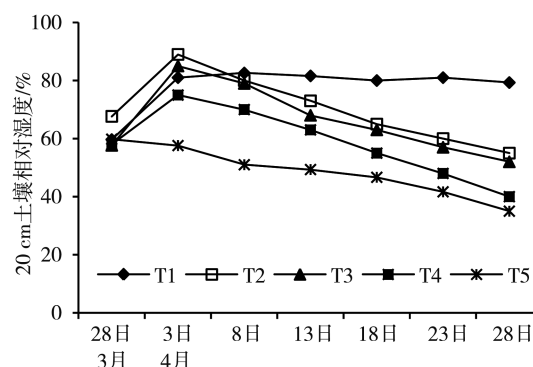


图3 不同水分处理下20 cm土壤相对湿度变化

Fig. 3 Change of soil relative moisture at 20 cm depth under different water treatments



表 1 基于土壤相对湿度的农业干旱等级划分

Tab. 1 Classification of agricultural drought grades based on soil relative moisture

单位: %		
等级	类型	土壤相对湿度( $R_{sm}$ )
0	无旱	$R_{sm} \geq 60$
1	轻旱	$50 \leq R_{sm} < 60$
2	中旱	$40 \leq R_{sm} < 50$
3	重旱	$30 \leq R_{sm} < 40$
4	特旱	$R_{sm} < 30$

40.0%和35.0%。

2.2 干旱胁迫对叶片矿质元素含量的影响

水分控制期间至复水后,冬小麦叶片全氮、全磷含量均呈持续增加趋势,其值均自T1、T2、T3、T4、T5依次降低[图4(a)、(b)]。结合 Duncan 新复极差分析结果,当土壤水分处于适宜水平时(T1处理,下同),冬小麦叶片全氮、全磷含量均最高,不同程度干旱胁迫下叶片全氮、全磷含量均显著低于T1处理,且干旱胁迫程度越强,下降幅度越大;T2、T3处理叶片全氮、全磷含量均显著低于T1处理,分别低0.77%、0.07%和1.10%、0.09%,但T2、T3处理间差异不显著;与T1处理相比,T4处理叶片全氮、全磷含量分别低1.46%、0.12%,T5处理分别低1.68%、0.15%,均显著低于T1处理,且T4、T5处理间差异也显著。其中,水分控制期间T1处理下叶片全氮、全磷含量累积量分别是T5处理的2.5倍和2.3倍,差异显著,这可能是干旱胁迫致使冬小麦植株蒸腾作用减弱,进而影响了氮、磷元素的吸收及转运。同样地,水分控制期间至复水后,冬小麦叶片全钾含量也呈现升高趋势[图4(c)],其值自T5、T4、T3、T2、T1处理依次降低,T1处理下叶片全钾含量最低,不同程度干旱胁迫下叶片全钾含量均显著高于T1处理,且干旱胁迫程度越强,升高幅度越大,这与全氮、全磷含量正相反;T2、T3处理下叶片全钾含量分别较T1处理高0.17%和0.29%,但T2、T3处理间差异不显著;T4、T5处理间叶片全钾含量差异显著,均显著较T1处理分别高出0.42%和1.20%。其中,水分控制期间T5处理下叶片全钾累积量是T1处理的1.8倍。复水后(4月28日,下同),各处理叶片全氮、全磷和全钾累积速率均降低,这可能是扬花期后冬小麦由营养生长向生殖生长阶段过渡,氮、磷、钾等矿质元素的分配向生殖器官转移所致。

2.3 干旱胁迫对叶片光合色素含量及光合参数的影响

水分控制期间至复水后,冬小麦叶片叶绿素a、

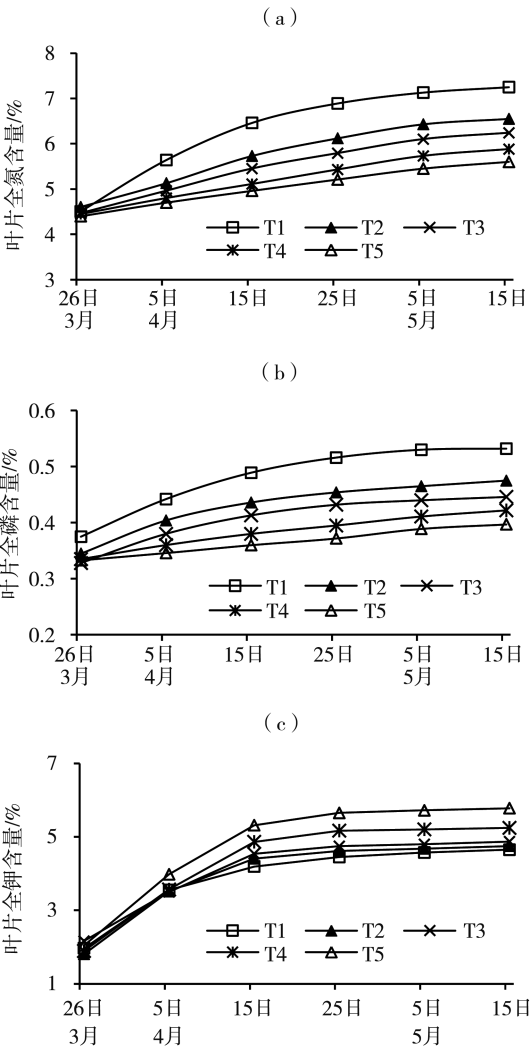


图4 不同水分处理下冬小麦叶片矿质元素含量变化 (a)全氮含量,(b)全磷含量,(c)全钾含量

Fig. 4 Change of mineral element contents of winter wheat leaves under different water treatments (a) total nitrogen content, (b) total phosphorus content, (c) total potassium content

叶绿素b、叶绿素a+b和类胡萝卜素等光合色素含量均呈先升后略降的趋势,其值均自T1、T2、T3、T4、T5处理依次降低(图5),不同程度干旱胁迫下叶片各光合色素含量均低于T1处理,且干旱胁迫程度越强,光合色素含量越低。结合 Duncan 新复极差分析结果,T2、T3、T4、T5处理叶绿素a含量与T1处理差异显著,分别较T1处理低0.28、0.47、0.65、0.90  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,而T3、T4、T5处理间差异不显著,均显著低于T2处理[图5(a)];不同程度干旱胁迫下叶绿素b含量差异不显著[图5(b)];T1处理下叶绿素a+b和类胡萝卜素含量分别为4.65、0.92  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,显著高于T2、T3、T4、T5处理,T5处理下二者含量均最低,分别较T1处理低1.05、0.21  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,T3、T4、T5处理间叶绿素a+b含

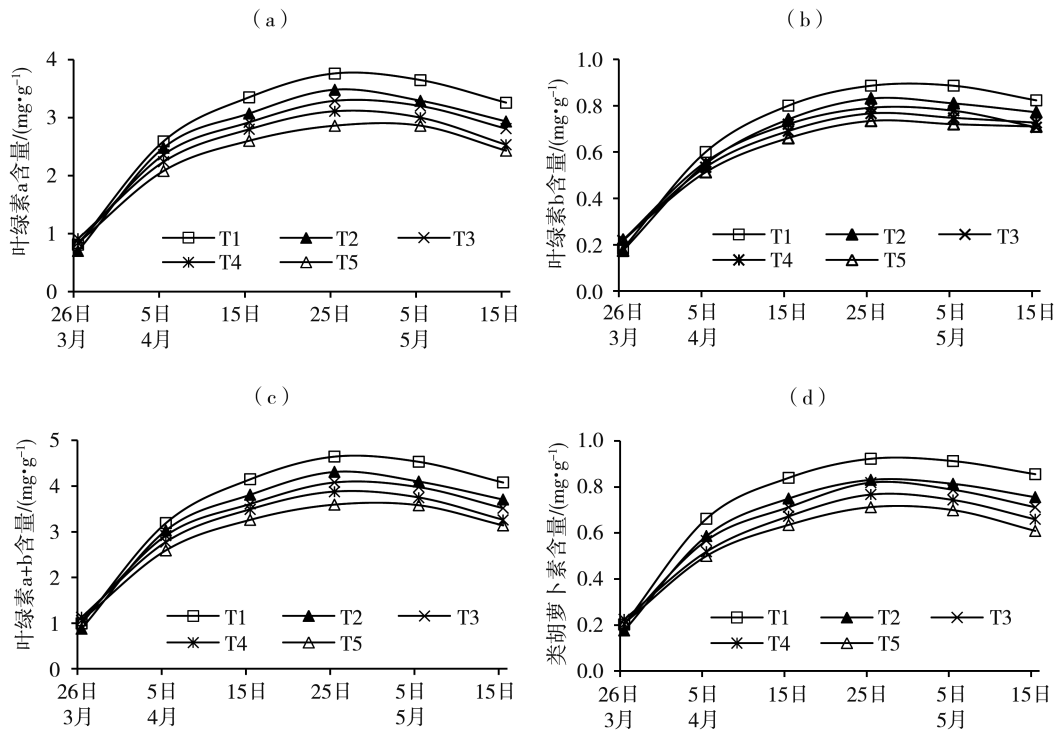


图5 不同水分处理下冬小麦叶片光合色素含量变化

(a)叶绿素a含量,(b)叶绿素b含量,(c)叶绿素a+b含量,(d)类胡萝卜素含量

Fig. 5 Change of photosynthetic pigment content of winter wheat leaves under different water treatments

(a) chlorophyll a content, (b) chlorophyll b content, (c) chlorophyll a+b content, (d) carotenoid content

量差异不显著,但均显著低于T2处理,而T2、T3处理间和T4、T5处理间类胡萝卜素含量差异均不显著,但T4、T5处理显著低于T2、T3处理[图5(c)、(d)]。水分控制期间,T1处理叶片叶绿素a、叶绿素a+b和类胡萝卜素累积量均是T5处理的1.3倍,而叶绿素b则为1.2倍;复水后,各处理下叶片光合色素含量均有所降低,这可能是扬花期后冬小麦吸收的氮素向穗部生殖器官转运增多、叶片分配减少所致。

由表2可知,水分控制期间至复水后,T1处理下各光合参数变化不显著,其余水分处理下冬小麦叶片最大净光合速率( $P_{nmax}$ )、表观量子效率(AQE)、光饱和点(LSP)均呈先降后升的趋势,其值均自T1、T2、T3、T4、T5处理依次降低。其中,拔节初期(4月1日)各处理冬小麦叶片 $P_{nmax}$ 、AQE和LSP相差不大;5d后(4月6日),各处理间叶片 $P_{nmax}$ 、AQE和LSP差异显现。水分控制期间(4月1—28日),不同程度干旱胁迫下叶片 $P_{nmax}$ 、AQE和LSP均显著低于T1处理,干旱胁迫程度越强,降低幅度越大;T2、T3处理间叶片 $P_{nmax}$ 、AQE和LSP差异不显著,但均显著低于T1处理,分别低52.7%、44.1%、10.7%和57.1%、45.3%、14.5%;T5处理 $P_{nmax}$ 、AQE和LSP分别较T1处理低64.6%、65.8%、31.2%,差异显著。与LSP变化

趋势相反,各处理下叶片光补偿点(LCP)呈现先升后降的趋势,其值自T5、T4、T3、T2、T1依次降低。拔节期初期,各处理冬小麦叶片LCP相差不大;5d后,各处理间叶片LCP差异显现。水分控制期间,不同程度干旱胁迫下叶片LCP均显著高于T1处理,干旱胁迫程度越强,升高幅度越大;T2与T3、T4与T5处理间叶片LCP差异显著,分别较T1处理高15.7%和22.0%、69.9%和84.0%。

复水后,5月15日各处理叶片 $P_{nmax}$ 、AQE、LSP和LCP得到不同程度恢复,轻旱处理下基本恢复至正常水平,而中旱和重旱处理下无法恢复至正常水平。

## 2.4 干旱胁迫对产量及品质的影响

随着干旱胁迫的加剧,冬小麦成穗率、穗粒数、千粒重和理论产量均呈现下降趋势(图6),T1处理下成穗率、穗粒数、千粒重和理论产量均最高,分别为23.0%、43.2粒、40.7g和0.83kg·m<sup>-2</sup>,不同程度干旱胁迫下成穗率、穗粒数、千粒重和理论产量均显著低于T1处理,T5处理分别较T1处理低78.3%、56.7%、11.8%和56.6%。其中,T3、T4处理的成穗率相差不大,显著低于T2处理、高于T5处理;T4处理的穗粒数与T5处理相差不大,显著低于T2、T3处

表2 不同水分处理下冬小麦叶片光合参数变化

Tab. 2 Changes of photosynthetic parameters of winter wheat leaves under different water treatments

日 期	水分 处理	$P_{nmax}/$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	AQE/ ( $\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	LCP/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	LSP/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
4月1日	T1	21.74±2.51a	0.0164±0.0019a	59.60±6.85c	1418.3±163.1a
	T2	20.34±1.75b	0.0158±0.0014a	65.00±5.59a	1435.5±123.5a
	T3	18.48±1.94d	0.0188±0.0021a	61.70±6.48b	1437.6±150.9a
	T4	19.40±1.86c	0.0158±0.0015a	63.30±6.08a	1425.1±136.8a
	T5	19.14±1.49c	0.0162±0.0013a	59.10±4.61c	1432.2±111.7a
4月6日	T1	19.40±2.23a	0.0159±0.0018a	60.80±6.99d	1424.5±163.8a
	T2	15.80±1.36b	0.0139±0.0012b	68.30±5.87c	1381.3±118.8a
	T3	13.92±1.46c	0.0122±0.0013c	72.40±7.62c	1372.6±144.1a
	T4	11.05±1.06d	0.0101±0.0012d	78.30±7.52b	1294.4±124.3b
	T5	10.05±0.78d	0.0099±0.0008d	85.90±6.71a	1274.2±99.4b
4月16日	T1	18.48±2.13a	0.0176±0.0021a	62.70±7.21d	1430.3±164.5a
	T2	10.51±0.92b	0.0092±0.0008b	70.60±6.07c	1311.3±112.8b
	T3	9.35±0.98c	0.0092±0.0011b	74.90±7.86c	1289.7±135.4b
	T4	8.02±0.77d	0.0088±0.0008b	90.50±8.69b	1187.6±114.0c
	T5	7.88±0.61d	0.0076±0.0006c	97.30±7.59a	1012.5±79.0d
4月26日	T1	18.39±2.11a	0.0161±0.0019a	64.40±7.41d	1432.6±164.7a
	T2	8.70±0.75b	0.0090±0.0008b	74.50±6.41c	1279.7±110.1b
	T3	7.89±0.83bc	0.0088±0.0009b	78.60±8.25c	1224.5±128.6b
	T4	7.01±0.67c	0.0066±0.0006c	109.40±10.50b	1052.4±101.0c
	T5	6.51±0.51d	0.0055±0.0004d	118.50±9.24a	985.5±76.9d
5月15日	T1	17.10±1.97a	0.0188±0.0022a	66.60±7.66d	1446.4±166.3a
	T2	17.80±1.53a	0.0138±0.0012b	71.90±6.18c	1327.4±114.2b
	T3	17.54±1.84a	0.0121±0.0013c	73.70±7.74c	1312.6±137.8b
	T4	14.79±1.42b	0.0090±0.0009d	92.50±8.83b	1137.4±109.2c
	T5	12.27±0.96c	0.0084±0.0007d	100.40±7.83a	1032.2±80.5d

注：不同字母表示在0.05的显著性水平上差异显著,相同字母则表示差异不显著;数字依次表示参数值及标准偏差。

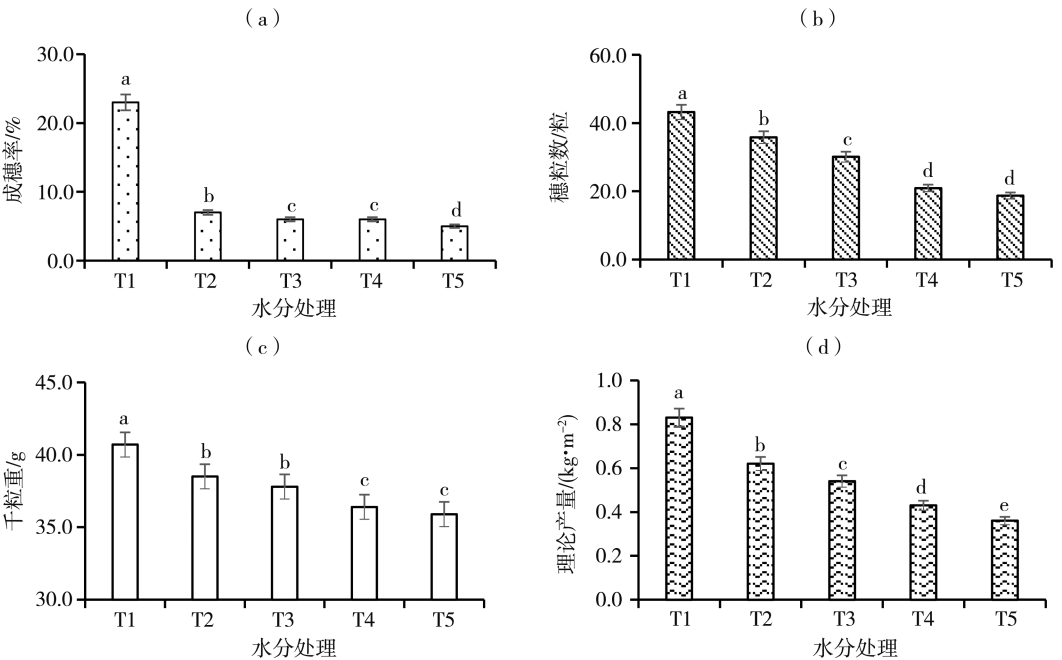


图6 不同水分处理下冬小麦产量主要构成要素变化  
(a)成穗率,(b)穗粒数,(c)千粒重,(d)理论产量

Fig. 6 Changes of main yield components of winter wheat under different water treatments  
(a) heading rate, (b) grain number per ear, (c) 1 000-grain weight, (d) theoretical yield

理,且T2、T3处理间差异显著;受干旱胁迫影响,T4、T5处理下冬小麦灌浆极不充分,两处理间的千粒重差异不显著,分别较T1处理低10.6%和11.1%,且显著低于T2、T3处理,而T2、T3处理间差异也不显著;T2、T3、T4、T5处理间理论产量差异显著,分别较T1处理低25.3%、34.9%、48.2%和56.6%,表明中度和重度干旱胁迫对冬小麦产量造成不可逆的影响。

冬小麦籽粒淀粉含量随干旱胁迫加剧而升高[图7(a)],T1处理下淀粉含量最低为50.7%,干旱胁迫下淀粉含量不同程度升高,T2、T3处理间差异不显著,分别较T1处理显著高出5.0%和5.6%;T4、T5

处理间差异也不显著,分别较T1处理显著高出10.6%和11.6%,且显著高于T2、T3处理。与淀粉含量变化相反,冬小麦籽粒蛋白质含量随干旱胁迫加剧呈降低趋势[图7(b)],T1处理下蛋白质含量最高为 $2.86 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,T2、T3处理间差异不显著,分别较T1处理低10.1%和14.0%;T4、T5处理显著低于T2、T3处理,分别较T1处理低27.6%和30.1%,但两处理间差异不显著。上述分析表明,适度干旱胁迫可在一定范围内有利于冬小麦籽粒淀粉积累,使得淀粉含量升高,但受氮素营养吸收和转运减少的影响,籽粒蛋白质含量会不同程度降低。

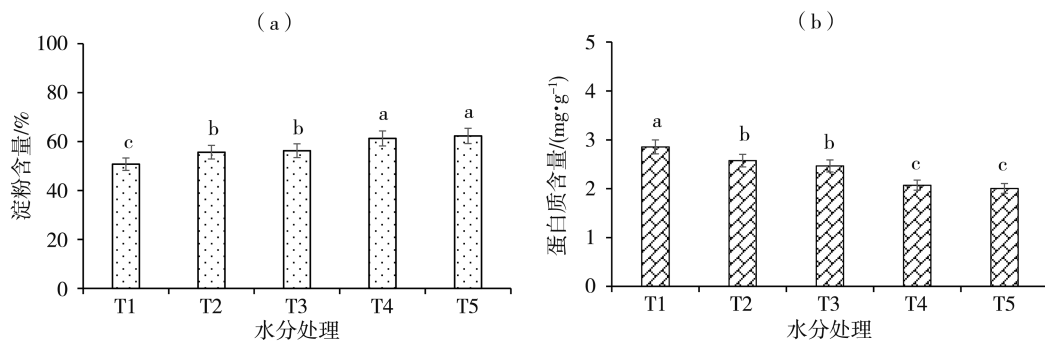


图7 不同水分处理下冬小麦籽粒淀粉含量(a)和蛋白质含量(b)变化

Fig. 7 Changes of starch content (a) and protein content (b) of winter wheat grain under different water treatments

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

干旱是威胁中国北方小麦生产的主要气象灾害之一,是造成小麦减产的主要原因(Liu et al., 2016)。作物生长所需的氮、磷、钾等矿质营养和水分主要依靠根系的吸收和转化(马福林和马玉花, 2022),土壤中矿质元素与水分的交互作用在植株蒸腾作用驱动下经根系吸收、维管束转运至植株各器官(Tegeder and Masclaux-Daubresse, 2018),以多种形式共同参与代谢和生理生化过程(李东晓等, 2017),进而影响植株的发育和产量、品质形成。土壤水分亏缺造成土壤中矿质元素可溶性降低、离子分布改变,致使作物对矿质元素的吸收与转运受阻、离子平衡紊乱,植株含水量、光合和呼吸能力明显下降,多种酶活性发生改变,蛋白质降解,籽粒产量、品质降低(Selote et al., 2004)。

众所周知,光合作用是作物进行光合产物合成的生物过程,是物质生产的基础。本研究表明:干旱胁迫造成冬小麦叶片氮、磷元素及光合色素含量不同程度降低,光合能力减弱,最大净光合速率、表观量子效率、光饱和点显著降低,光补偿点显著升高;随着干旱胁迫的持续,植株叶片钾元素迅速累

积,促进氮元素吸收、叶绿素含量升高、蒸腾速率降低,降低干旱胁迫对小麦植株造成的不利影响,这与韦素贞(2016)、乔鑫阳等(2022)研究结论基本一致。

干物质积累、转运和分配状况是决定作物产量高低的关键。干旱胁迫下,氮、磷、钾等矿质元素在作物干物质积累、分配和转运中起着至关重要的作用,充足的氮元素可以促进植株体内干物质的转运,进而提升籽粒灌浆速率,弥补干旱胁迫下光合能力受限和灌浆期缩短所造成的物质生产损失(Yang and Zhang, 2006)。水分关键期冬小麦成穗率、穗粒数、千粒重和理论产量均随干旱胁迫加剧而不同程度降低,这可能是干旱胁迫致使冬小麦植株光合能力下降,干物质积累减少,加之开花前干物质转运量增大,造成维持小麦生长的干物质减少、植株后期生长缓慢、成穗率降低、穗粒数减少、灌浆不充分,进而影响千粒重和产量(姚宁等, 2015; 李彦彬等, 2018)。淀粉占小麦籽粒干重65.0%以上,是粒重和产量的决定物质,蛋白质含量很大程度上决定小麦的加工品质(吕晓康, 2021)。干旱胁迫下,小麦籽粒淀粉含量升高,这可能是扬花期后复水,小麦花后光合产物向籽粒分配增多所



致,符合调亏灌溉理论,即干旱胁迫促进了光合产物向植株需要的组织器官分配;籽粒蛋白质含量则随干旱胁迫加剧显著降低,这是由于干旱胁迫导致氮素吸收减少,蛋白质合成及其向籽粒的转运量减少造成的。

本研究基于冬小麦水分关键期水分控制试验,模拟研究不同水分处理下麦田 20 cm 土壤相对湿度变化特征及干旱灾害发生发展过程,探究冬小麦叶片矿质元素积累、产量和籽粒品质对干旱胁迫的响应机制,为明确干旱胁迫致灾机理提供参考。今后需加强不同氮、磷、钾施肥组合对干旱胁迫补偿效应的研究,以期科学防御干旱灾害、减轻灾害损失提供理论依据。

### 3.2 结 论

(1)水分关键期,干旱胁迫越强,冬小麦叶片全氮和全磷含量越低、全钾含量越高。

(2)水分关键期,干旱胁迫越强,冬小麦叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素等光合色素含量及最大净光合速率、表观量子效率、光饱和点等光合参数越低,而光补偿点则越高。

(3)水分关键期,冬小麦成穗率、穗粒数、千粒重和理论产量均随干旱胁迫加剧而降低,胁迫越重,降幅越大;此外,干旱胁迫还造成小麦籽粒淀粉含量升高、蛋白质含量降低。

### 参考文献:

戴忠民,李妍,张红,等,2015.不同灌溉处理对小麦花后氮素积累和转运的影响[J].麦类作物学报,35(12): 1 712-1 718.

丁彤彤,李朴芳,曹丽,等,2021.干旱胁迫下不同基因型小麦干物质转运对产量形成的影响[J].干旱地区农业研究,39(6): 62-72.

董顺德,张延春,孙德梅,等,2005.干旱胁迫下烤烟矿质养分含量与烟叶产、质量的关系[J].烟草科技,(2): 30-34.

盖钧镒,2020.试验统计方法[M].5版.北京:中国农业出版社.

国家气象中心,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,中国气象局沈阳大气环境研究所,2015.农业干旱等级:GB/T 32136—2015[S].北京:中国标准出版社.

李东晓,王红光,张迪,等,2017.水分亏缺对不同小麦品种矿质元素吸收分布及水分利用的影响[J].中国生态农业学报,25(10): 1 475-1 484.

李武波,王依惠,姜雯,等,2022.不同氮磷增效肥对小麦旗叶衰老及产量的影响[J].浙江农业科学,63(7): 1 460-1 464.

李彦彬,朱亚南,李道西,等,2018.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,37(8): 76-82.

刘建玲,贾可,廖文华,等,2015.太行山山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化[J].土壤学报,52(6): 1 325-1 335.

龙素霞,李芳芳,石书亚,等,2018.氮磷钾配施对小麦植株养分吸收利用和产量的影响[J].作物杂志,(6): 96-102.

吕晓康,2021.花期不同形态氮素叶面喷施对冬小麦粒重和品质形成的调控效应及机理研究[D].杨凌:西北农林科技大学.

马福林,马玉花,2022.干旱胁迫对植物的影响及植物的响应机制[J].宁夏大学学报(自然科学版),43(4): 391-399.

乔鑫阳,杨鹏磊,褚丽丽,2022.干旱胁迫和施钾对作物补偿效应影响综述[J].农业与技术,42(12): 55-57.

孙岩,2007.水分胁迫对冬小麦的生长发育、生理特征及其养分运输的影响[D].北京:中国农业科学院.

唐懿,蔡雯悦,翟建青,等,2022.2021年夏季中国气候异常特征及主要气象灾害[J].干旱气象,40(2): 179-186.

王向辉,雷玲,2011.气候变化对农业可持续发展的影响及适应对策[J].云南师范大学学报(哲学社会科学版),43(4): 18-24.

王莺,张强,王劲松,等,2022.21世纪以来干旱研究的若干新进展与展望[J].干旱气象,40(4): 549-566.

韦素贞,2016.丛枝菌根真菌(AMF)和施钾对宁夏枸杞响应干旱胁迫的交互影响[D].杨凌:西北农林科技大学.

魏丹,李艳,李玉梅,等,2017.氮磷钾元素对黑龙江不同地区大豆产量和品质的影响[J].大豆科学,36(1): 87-91.

闫永奎,郝卫平,梅旭荣,等,2011.拔节期水分胁迫-复水对冬小麦干物质积累和水分利用效率的影响[J].中国农业气象,32(2): 190-195.

姚宁,宋利兵,刘健,等,2015.不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J].中国农业科学,48(12): 2 379-2 389.

余荣,翟盘茂,2021.关于复合型极端事件的新认识和启示[J].大气科学学报,44(5): 645-649.

袁蕊,李萍,胡晓雪,等,2016.干旱胁迫对小麦生理特性及产量的影响[J].山西农业科学,44(10): 1 446-1 449, 1 466.

张继波,李楠,邱粲,等,2021.水分临界期持续干旱胁迫对夏玉米光合生理与产量形成的影响[J].干旱气象,39(5): 734-741.

张继波,薛晓萍,李楠,等,2019.水分胁迫对扬花期冬小麦光合特性和干物质生产及产量的影响[J].干旱气象,37(3): 447-453.



- 张志良, 翟伟菁, 2003. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社: 67-69.
- 赵立琴, 龚振平, 马春梅, 2013. 干旱胁迫对大豆叶片矿质元素含量和累积量影响[J]. 东北农业大学学报, 44(2): 12-16.
- 中国疾病预防控制中心营养与食品安全所, 2016a. 食品安全国家标准食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中国疾病预防控制中心营养与食品安全所, 2016b. 食品安全国家标准食品中淀粉的测定: GB 5009.9—2016[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中国气象局, 1993. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社.
- 周波涛, 钱进, 2021. IPCC AR6报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 17(6): 713-718.
- 周峻宇, 李慧, 欧珍贵, 等, 2020. 干旱及复水对‘紫叶红花芋’干物质及氮、磷、钾积累和分配特征的影响[J]. 山地农业生物学报, 39(5): 38-44.
- 周天军, 陈晓龙, 吴波, 2019. 支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题[J]. 科学通报, 64(19): 1 967-1 974.
- 朱波, 徐绮雯, 马淑敏, 等, 2021. 干旱胁迫下施钾水平对油菜生长特性、籽粒品质和钾素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 27(6): 1 016-1 026.
- CHEN W, FENG C, GUO W, et al, 2011. Comparative effects of osmotic-, salt-and alkali-stress on growth, photosynthesis, and osmotic adjustment of cotton plants[J]. Photosynthetica, 49(3): 417-425.
- IPCC, 2021. Climate change 2021: the physical science basis [R]//MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York: Cambridge University Press.
- JALEEL C A, GOPI R, SANKAR B, et al, 2008. Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress[J]. Comptes Rendus Biologies, 331(1): 42-47.
- LIU Y, LIANG H Y, LV X K, et al, 2016. Effect of polyamines on the grain filling of wheat under drought stress [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 100: 113-129.
- LIZUMI T, LUO J J, CHALLINOR A J, et al, 2014. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops [J]. Nature Communications, 5, 3712. DOI: 10.1038/ncomms4712.
- SELOTE D S, BHARTI S, KHANNA-CHOPRA R, 2004. Drought acclimation reduces  $O_2^-$  accumulation and lipid peroxidation in wheat seedlings [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 314(3): 724-729.
- TEGEDER M, MASCLAUX-DAUBRESSE C, 2018. Source and sink mechanisms of nitrogen transport and use [J]. New Phytologist, 217(1): 35-53.
- YANG J, ZHANG J, 2006. Grain filling of cereals under soil drying[J]. New Phytologist, 169(2): 223-236.

## Effects of drought stress on mineral element accumulation, yield and grain quality of winter wheat during water critical period

ZHANG Jibo<sup>1,2</sup>, XUE Xiaoping<sup>1,2</sup>, ZHANG Xingang<sup>3</sup>, QIU Can<sup>1,2</sup>, TAN Fangying<sup>4</sup>, LI Nan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Ji'nan 250031, China;

2. Shandong Provincial Climate Center, Ji'nan 250031, China;

3. Jiaozuo Meteorological Bureau of Henan Province, Jiaozuo 454002, Henan, China;

4. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Drought is one of the major agro-meteorological disasters to restrict the improvement of grain production and quality in China. The soil moisture and mineral elements affect alternately to the growth and development of winter wheat as well as the yield and quality. The response of leaves mineral elements accumulation, yield and grain quality of winter wheat to different grades drought stress was explored at the moisture critical period, which has a certain realistic significance to scientific fertilization and drought disaster prevention. At the moisture critical period (jointing to flowerings stage), the winter wheat ‘Qimai 2’ was used as material to set the water control experiments with five gradients (T1 treatment, soil moisture at 20 cm depth was suitable (60%–80%) in the whole period, and T2, T3 and T4 treatments were supplied once with water at 80%, 50% and 25% of 75.0 mm base recharge, respectively, while T5 treatment wasn’t supplied water), the influences of drought stress on the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium mineral elements, photosynthetic pigments and photosynthetic parameters, yield and grain quality of winter wheat were simulated and analyzed. The results show that the total nitrogen, total phosphorus, photosynthetic pigment content and the maximum net photosynthetic rate ( $P_{\max}$ ), apparent quantum efficiency (AQE) and light saturation point (LSP) of winter wheat leaves were all the highest under T1 treatment during the water control to rewetting. Due to drought stress, the above-mentioned indicators reduced significantly under T2, T3, T4 and T5 treatments, and the heavier the drought stress, the greater the reduction was. Compared with T1 treatment, the total nitrogen, total phosphorus content, chlorophyll a, chlorophyll a+b, carotenoid content,  $P_{\max}$ , AQE and LSP of leaves reduced by 1.68%, 0.15%, 0.90 mg·g<sup>-1</sup>, 1.05 mg·g<sup>-1</sup>, 0.21 mg·g<sup>-1</sup>, 64.6%, 65.8% and 31.2% under T5 treatment, respectively. However, the total potassium content and light compensation point (LCP) of leaves increased with the aggravation of drought stress, and those under T5 treatment were 1.20% and 84.0% higher than under T1 treatment, respectively. In addition, the drought stress decreased significantly spike grains number, forming spike rate and thousand grains weight. Compared with T1 treatment, the theoretical yield and grain protein content decreased by 56.6% and 30.1%, respectively, while the grain starch content increased by 11.6% under T5 treatment.

**Key words:** winter wheat; water critical period; drought stress; mineral elements; yield; quality

(责任编辑:蔡迪花;校对:黄小燕)