

水分亏缺对青藏高原小麦族作物籽粒中氮磷钾和氨基酸含量的影响

白羿雄^{1,2,3,4} 姚晓华^{1,2,3,4} 姚有华^{1,2,3,4} 杨莉娜⁵ 吴昆仑^{1,2,3,4*}

(1. 青海大学 农林科学院, 西宁 810016;

2. 青海省青稞遗传育种重点实验室, 西宁 810016;

3. 国家麦类改良中心青海青稞分中心, 西宁 810016;

4. 农业部作物基因资源与种质创制青海科学观测实验站, 西宁 810016;

5. 青海大学 农牧学院, 西宁 810016)

摘要 为探明不同水分处理青稞和春小麦籽粒中养分、蛋白质和氨基酸含量的变化规律,为青藏高原小麦族作物抗旱和品质育种提供理论依据。以春青春41号(小麦)和昆仑14号(青稞)为参试材料,设水分充足处理(C1)、水分轻度亏缺处理(C2)和水分重度亏缺处理(C3)3个水平,随机区组设计,研究不同水分处理对籽粒中NPK、蛋白质和氨基酸含量的影响。相比于C2,两种小麦族作物在C3处理下的氮磷钾、蛋白质、必需氨基酸、非必需氨基酸和氨基酸总量均呈升高的趋势,但青稞中各指标的增幅较大。水分亏缺对小麦和青稞籽粒中NPK、蛋白质和氨基酸含量均会产生一定影响,但其变化模式存在一定差异。小麦籽粒中氮磷钾、蛋白质、必需氨基酸、非必需氨基酸和氨基酸总量的变化规律均呈先降低后升高的趋势;青稞籽粒中氮钾、蛋白质、必需氨基酸、非必需氨基酸和氨基酸总量的含量呈显著增高趋势且增幅随水分亏缺程度的加剧而变大。水分亏缺会对小麦族作物籽粒中氮磷钾、蛋白质、必需氨基酸含量、非必需氨基酸含量产生影响,但青稞和小麦的响应机制存在一定差异。相比于水分充足处理,水分亏缺处理下青稞籽粒养分、蛋白质及其组分呈显著升高趋势而小麦籽粒中呈先降低后升高趋势,表明小麦族作物中小麦对水分亏缺的耐受性较低。

关键词 水分亏缺; 养分含量; 氨基酸; 蛋白质

中图分类号 S512.1; S311

文章编号 1007-4333(2018)07-0011-08

文献标志码 A

Effects of water deficit on the contents of N,P and K and amino acids accumulation in wheat grains of Qinghai-Tibet Plateau

BAI Yixiong^{1,2,3,4}, YAO Xiaohua^{1,2,3,4}, YAO Youhua^{1,2,3,4}, YANG Lina⁵, WU Kunlun^{1,2,3,4*}

(1. College of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Qinghai Key Laboratory of Hulled Barley Genetics and Breeding, Xining 810016, China;

3. National Wheat Improvement center Qinghai Highland Barley Sub-center, Xining 810016, China;

4. Qinghai Research Station of Crop Gene Resource & Germplasm Enhancement, Ministry of Agriculture, Xining 810016, China;

5. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract This study aimed at exploring the changes of nutrient, protein and amino acid content in the grains of barley and spring wheat under different water treatments to provide theoretical basis for the drought resistance and quality breeding of the wheat family crops in the Qinghai-Tibet Plateau. The experiment was conducted by taking Qingchun 41 (wheat) and Kunlun 14 (barley) as study materials. Three treatments were designed including sufficient treatment (C1), mild deficit treatment (C2) and severe deficit treatment (C3). Randomized block was design to study the effects of different water treatments on the NPK, protein and amino acid contents in its kernels. The results showed that:

收稿日期: 2017-08-07

基金项目: 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y33); 青海省科技支撑项目(2015-NK-114); 青海省农林科学院创新基金重大专项(2017-NKY-01); 国家大麦青稞产业技术体系(CARS-05); 青海大学中青年科研基金项目(2017-QNY-2)

第一作者: 白羿雄, 助理研究员, E-mail: yixiongbai@163.com

通讯作者: 吴昆仑, 研究员, 主要从事青稞分子育种研究, E-mail: wklqaaf@163.com

Compared with C2, the total NPK contents, protein, essential amino acids, non-essential amino acids and amino acids of two wheat crops increased in C3 treatment. However, there were some differences in the patterns of water deficit on N, P and K content, protein and amino acid between wheat and barley grains. The changes of total N, P and K, protein, essential amino acids, nonessential amino acids and total amino acids in wheat grain showed decreased first and then increased. The contents of nitrogen and potassium, protein, essential amino acids, nonessential amino acids and total amino acids increased, and increased more significantly when under the severe water deficit. The effects of water deficit on the content of N, P and K, protein essential amino acid and non-essential amino acid in grain of wheat family crops had some differences. Compared with sufficient water treatment, under water deficit treatment, the nutrient content of barley grains, protein and its components increased significantly while the index of wheat grains decreased first and then increased in the underwater deficit treatment, suggesting that the resistance of wheat to water deficit was lower.

Keywords water deficit; nutrient accumulation; amino acid; protein

青海地处青藏高原东北部, 现有耕地面积 56 万 hm^2 , 其中小麦 (*Triticum aestivum* Linn)、青稞 (*Hordeum vulgare* Linn. var. *nudum* Hook. f.) 的种植面积高达 28.1 万 hm^2 左右, 占总耕地面积的一半以上。小麦和青稞同属禾本科小麦族作物, 属于该族中的小麦亚族和大麦亚族, 分别为小麦属和大麦属作物。春小麦是青海地区最主要的粮食作物^[1], 青稞是藏族同胞的主食, 因具有独特的营养结构和保健作用而成为最具特色的农作物之一^[2-3]。因此, 小麦和青稞对青海区域经济发展和粮食安全保障意义重大。

籽粒矿质元素、蛋白质和氨基酸对功能小麦、青稞品质育种和功能食品研发极其重要。目前, 对小麦^[4]、玉米^[5]、水稻^[6-7]、大麦^[8]、马铃薯^[9]和小米^[10]等作物生产系统中营养元素的研究重点集中在大量需求的氮磷钾元素。籽粒中醇溶蛋白、谷蛋白含量是决定小麦面团弹性和韧性、面粉筋力的重要因素^[11-12]。氨基酸是蛋白质的基本组成单位, 其结构和化学性质决定了所合成蛋白质的特性和功能^[13]。籽粒中游离氨基酸对机体生长和组织更新有重要作用^[14], 改善作物中必需氨基酸的比例, 尤其是赖氨酸^[15]是生物营养强化研究领域的热点之一。

作物中营养元素和营养物质含量在同一作物不同品种间存在一定差异^[16-18], 也受栽培措施^[19-20]与非生物胁迫^[21-22]的影响。陈秀晨等^[6]研究结果表明水稻杂交后代的农艺和经济性状表现超高亲分离的现象, 且籽粒 K 和 Mg 等元素含量与产量密切相关。Nascente 等^[23]研究结果表明, 吸收更多 N 和 P 的普通大豆基因型具有更高的粮食产量, 并发现大豆品种 CNFC 15874 是最高产的冬性大豆基因型。李鸿伟等^[4]研究结果表明超高产栽培小麦和水稻养分吸收与积累呈现生育前期较低和生育中后期较高

的特点, 且养分吸收利用效率提高。Lhungdim 等^[24]研究结果表明手工除草处理下谷粒产量, 蛋白质含量和蛋白质产量方面表现最佳。Shabbir 等^[25]研究结果表明叶面喷施 NPK 显著提高渗透保护剂的浓度和氮同化活性以及抗氧化活性, 渗透剂的积累量和活性又提高了产量和产量构成三因素。

不同灌溉水平或是水分处理水平也会对作物中营养元素和营养物质含量的累积产生一定程度的影响。李桂荣等^[26]研究结果表明不同灌水制度对燕麦籽粒中蛋白质、磷素和钾素含量有显著影响, 郑志松等^[27]研究结果表明小麦籽粒蛋白质和氨基酸含量随灌水量增加而降低, 但当灌水量超过 282.0 mm 时各指标变化不再明显。张晓英等^[28]研究结果表明: 与自根嫁接黄瓜相比, 适度亏缺灌溉下, 异根嫁接黄瓜的生长势较强, 每株黄瓜 N、P 和 K 养分的积累量分别提高 49.6%~53.3%、16.7~29.0% 和 32.2%~40.5%。Hussein 等^[29]研究结果表明水分亏缺灌溉提高高粱植株从土壤中获取 N、P、K 的速率, 适度减少灌溉也能提高高粱的水分利用效率。Khalil 等^[30]研究结果表明随着水分胁迫程度的增加, 莠苣种子的蛋白质和矿物离子含量显著降低。这些变化伴随着莠苣种子的脯氨酸和氨基酸含量的增加。以往关于水分亏缺处理对单一作物中养分、蛋白质等方面的研究有所涉及, 而对水分亏缺下小麦族不同属作物籽粒中养分吸收、蛋白质和氨基酸含量在变化规律尚不明确。本研究通过研究不同水分亏缺处理对青稞、春小麦籽粒中的 NPK 养分、蛋白质和各氨基酸组分和总量的影响, 以期明确在不同水分处理下的变化规律, 为青藏高原小麦族主粮作物的抗旱育种和品质育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2015年4—9月在青海省农林科学院(101°77'E、36°62'N)的温室内进行。试验地土质为沙壤土,容重为1.5 g/cm³。田间持水率为15.2%(体积含水量),试验区地下水埋深>5 m。2016年土壤耕层基础养分含量为有机质22.49 g/kg,全氮1.78 g/kg,速效磷37.48 mg/kg,速效钾286 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设3个水分处理,分别为田间体积持水率25%(C1)的充分灌溉处理和田间持水率15%(C2)和7.5%(C3)的轻度和重度水分亏缺处理^[31]。供试的春小麦、青稞品种分别青春41号和昆仑14号,均由青海省农林科学院自主选育而成。根据生产上青稞品种的施肥量,翻耕前施用磷酸二氢铵300 kg/hm²和尿素150 kg/hm²作为基肥,在苗期追加37.5 kg/hm²的尿素做追肥。

试验采用随机区组设计,小区面积为9 m²(3 m×3 m),每个处理3次重复。为防止灌溉水分侧渗,各小区间设置3层塑料膜隔水,塑料膜埋深1.5 m。各小区间设置1.5 m的间距。土壤含水量利用AWOS-TR02土壤水分测定仪对土壤中的含水率进行测定。

当计划湿润层的平均土壤含水率达到或接近灌水下限时开始灌水。 W_1 :水分下限, W_2 :水分测定值, I :灌水量, S :土壤表面积,渗水深度以0.5 m进行估算, $I=(W_1-W_2) \times S \times 0.5$,灌水后3 h对其含水量进行测定,根据该灌水量和测定值等比例再补充相应体积水量,使其上浮体积含水量<2%。灌水方式为畦灌,用水表记录灌水量。小麦和青稞均采用等行距株距的方式进行点播,小麦和青稞行距为20 cm,株距5 cm。小麦和青稞均于2016年4月6日播种,分别于2016年7月17日和8月3日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量的测定及灌水量计算

土壤水分状况检测 土壤含水率采用土壤水分测定仪测定,0~20 cm土层每5 d测定1次,20 cm以下土层每10 d测定1次,灌水前后各加测1次。

测定深度至计划湿润层底部,每20 cm取1层。

1.3.2 籽粒中氮磷钾和蛋白质含量的测定

小麦和青稞籽粒中氮元素含量根据NY/T 3—1982《谷物、豆类作物种子粗蛋白质测定法(半微量凯氏法)》^[32]进行测定。所用仪器为意大利产的UDK159全自动凯氏定氮仪,氮含量乘以5.7即为蛋白质含量。小麦和青稞籽粒中磷和钾元素含量测定利用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)进行测定,所用仪器为iCAP RQ型号的电感耦合等离子体发射质谱仪。

1.3.3 籽粒中氨基酸含量的测定

收获后各小区取适量小麦、青稞籽粒样品,晾晒脱水后在每个小区取200 g籽粒样品在农业部谷物测试中心进行测定,使用布拉本德拉磨粉仪进行磨粉。利用德国产的S433D型氨基酸自动分析仪测定其氨基酸含量及其组分。

1.4 数据处理与统计分析

用Microsoft Excel 2010整理数据,试验数据用SPSS 22.0软件对测定指标进行方差分析和显著性检验,利用Microsoft Excel 2010软件对统计结果进行作图。

2 结果与分析

2.1 水分亏缺对籽粒中NPK积累量的影响

相比于C2,在C3处理下春小麦和青稞中NPK含量均增高,小麦中NPK含量增幅分别为5.3%、10.1%和14.7%,青稞中NPK含量增幅分别为29.4%、14.3%和12.3%(图1)。水分亏缺对小麦和青稞籽粒中N、P、K的积累量均会产生一定程度的影响,但其变化模式存在一定差异。在水分亏缺条件下,春小麦籽粒中N、P、K含量呈先下降后上升的趋势且差异极显著而青稞中N、K含量呈上升的趋势,且随着水分亏缺程度的加剧而升高且差异显著。

2.2 水分亏缺对籽粒中蛋白质含量总量的影响

与C2相比,C3处理下小麦和青稞籽粒中蛋白质含量均升高,增幅分别为5.4%和29.34%(图2)。水分亏缺处理下,青稞和小麦籽粒中蛋白质含量的变化规律存在一定差异,小麦中呈先降低后升高的趋势,在青稞中呈不断升高的趋势差异,其差异均极显著。青稞籽粒中蛋白质含量则随水分亏缺程度的加剧而进一步升高。

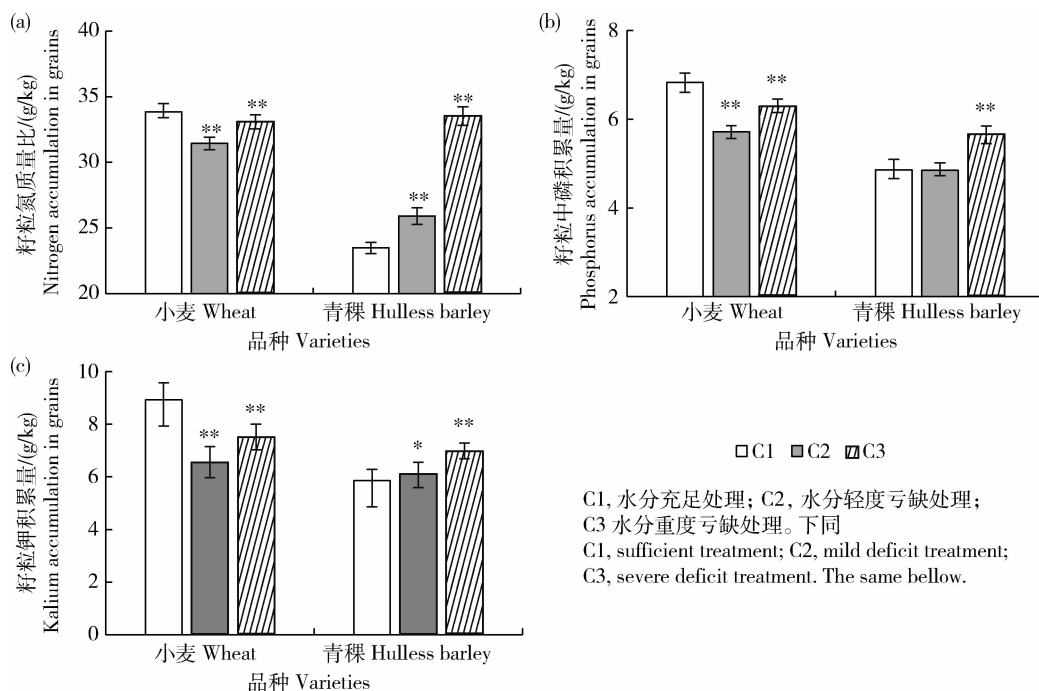


图1 水分调控处理对作物籽粒中氮(a)、磷(b)和钾(c)含量的影响

Fig. 1 The effect of grain N (a), P (b) and K (c) accumulation of different crops under water regulation

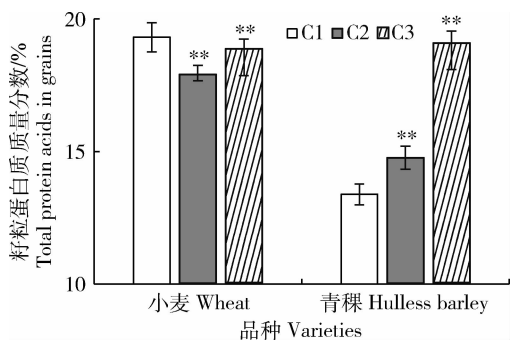


图2 水分调控处理对作物籽粒中蛋白质含量的影响

Fig. 2 The effect of grain protein accumulation of different crops under water regulation

2.3 水分亏缺对籽粒必需氨基酸组分的影响

与C2相比,C3处理下小麦和青稞中除蛋氨酸外,其余6种必需氨基酸含量均升高,而青稞中各组分的增幅较大,致使必需氨基酸总量增幅分别为2.0%和27.96%(表1)。相比于C1,在水分亏缺处理下青稞籽粒中除蛋氨酸外,其余6种必需氨基酸含量均升高,且其增幅随着水分亏缺程度的加剧而增大;相比于C1,水分亏缺处理下春小麦籽粒中除蛋氨酸外,其余6种必需氨基酸含量均降低且均呈现先降低后升高的趋势。

2.4 水分亏缺对籽粒非必需氨基酸组分的影响

相比于C2,在C3处理下青稞中10种非必需氨基酸和小麦中6种非必需氨基酸含量均升高,但青稞其差异均显著,小麦中仅谷氨酸含量差异显著,致使青稞和小麦中的非必需氨基酸总量增幅分别为28.6%和2.6%(表2)。相比于C1,青稞中9种非必需氨基酸含量和非必需氨基酸的总量均升高,且增幅随着水分亏缺程度的加剧而变大,导致C2和C3处理籽粒中非必需氨基酸总量也随着水分亏缺程度的加剧而增大,其增幅分别为10.8%和42.5%。相比于C1,C2处理下小麦中8种非必需氨基酸含量降低,C3处理下籽粒中9种非必需氨基酸含量降低,导致总非必需氨基酸降幅分别为7.9%和5.5%。

表明水分亏缺处理下,青稞籽粒中非必需氨基酸含量升高,且增幅随亏缺程度加剧而变大;水分亏缺处理下,小麦籽粒中非必需氨基酸的含量降低,且随亏缺程度加剧其含量呈小幅回升趋势。

3 讨论

3.1 水分亏缺对籽粒中NPK积累量的影响

水分亏缺会对不同作物植株^[30]和籽粒^[29]中N、P和K的积累量产生一定影响。本研究结果表明,

表 1 水分调控处理对作物籽粒中必需氨基酸含量的影响

Table 1 The grain essential amino acids accumulation of different crops under water regulation

作物 Crops	处理 Treatment	%							7 种必需氨基酸总量 Total essential amino acids content
		缬氨酸 Valine	蛋氨酸 Methionine	异亮氨酸 Isoleucine	苯丙氨酸 Phenylalanine	亮氨酸 Leucine	苏氨酸 Threonine	赖氨酸 Lysine	
青稞 Hullless barley	C1	0.67 d	0.14 c	0.48 d	0.72 d	0.94 d	0.48 d	0.42 c	3.91 e
	C2	0.71 c	0.14 c	0.53 c	0.82 bc	1.03 c	0.51 c	0.43 c	4.22 d
	C3	0.88 a	0.20 b	0.69 a	1.11 a	1.31 a	0.61 a	0.54 a	5.40 a
春小麦 Springwheat	C1	0.77 b	0.23 a	0.66 a	0.88 b	1.14 b	0.55 b	0.49 b	4.78 b
	C2	0.74 bc	0.22 ab	0.61 b	0.81 c	1.05 c	0.52 c	0.48 b	4.49 c
	C3	0.75 bc	0.22 ab	0.63 b	0.84 bc	1.07 c	0.53 bc	0.49 b	4.58 bc

注：同列不同小写字母表示差异达 5% 显著水平，下同。

Note: Different small letters in one column mean significant difference at 0.05 level, The same as following.

表 2 水分调控处理对作物籽粒中非必需氨基酸含量的影响

Table 2 The grain non-essential amino acids accumulation of different crops under water regulation

作物 Crops	处理 Treatment	%										非必需氨基酸总量 Total non-essential amino acids content
		天冬氨酸 Aspartic acid	丝氨酸 Serine	谷氨酸 Glutamic acid	甘氨酸 Glycine	丙氨酸 Alanine	胱氨酸 Cysteine	酪氨酸 Tyrosine	组氨酸 Histidine	精氨酸 Arginine	脯氨酸 Proline	
青稞 Hullless barley	C1	0.82 b	0.60 d	3.58 f	0.57 d	0.55 e	0.27 c	0.41 d	0.42 e	0.77 d	1.51 e	9.51 e
	C2	0.82 b	0.65 d	4.13 e	0.59 d	0.58 e	0.29 b	0.49 bc	0.43 e	0.81 d	1.75 d	10.54 d
	C3	0.99 a	0.80 c	5.54 d	0.70 c	0.69 c	0.31 a	0.58 a	0.53 d	0.97 c	2.44 a	13.55 b
春小麦 Spring wheat	C1	0.96 a	0.93 a	6.71 a	0.81 a	0.64 d	0.28 bc	0.52 b	0.59 c	0.92 c	2.14 b	14.49 a
	C2	0.94 a	0.85 bc	5.96 c	0.74 ab	0.61 de	0.28 bc	0.48 c	0.58 c	0.92 c	1.98 c	13.34 b
	C3	0.97 a	0.87 b	6.25 b	0.75 a	0.62 d	0.27 c	0.47 c	0.58 c	0.91 c	2.00 c	13.69 b

在3个处理下春小麦籽粒中NPK元素的含量呈现先降低后升高的趋势,该研究结果和李桂荣等^[27]对燕麦水分亏缺处理的研究结果一致。在青稞中N和K积累量在3个处理间呈线性升高的趋势,该研究结果和李鸿伟等^[5]对冬小麦和水稻的研究结果较为一致。青稞和小麦同作为小麦族作物,其籽粒中氮磷钾含量在水分亏缺处理下均随着水分亏缺程度的加剧而增加,水分重度亏缺严重阻碍小麦族作物的正常生长发育;相比于轻度水分亏缺处理小麦族作物籽粒中积累了较多的养分,该现象可能是机体为进一步减轻膜脂过氧化,更多的养分可能被用作物质基础以合成清除自由基等物质或是更多的养分被用于合成营养物质被转用或是自身在籽粒中合成所致。青稞和小麦虽同为小麦族作物但因分属于不同属,水分亏缺对其的影响机制仍存在一定差异,相比于充足处理,水分亏缺使小麦籽粒中N、P和K含量均降低,而水分亏缺处理使青稞籽粒中N和K的含量均升高,P含量在重度亏缺下显著增高,产生该现象的原因可能为水分亏缺产生的过氧化物对膜脂产生不可逆的损伤,进而使其籽粒中N、P和K含量均降低;而该水分亏缺处理仍未对青稞机体产生不可逆的损伤,籽粒中转运或积累较多的N、P和K以确保籽粒生长发育和应对逆境胁迫所致。

3.2 水分亏缺对籽粒中氨基酸组分和蛋白质含量的影响

水为植物中氨基酸和蛋白质合成提供液态环境和底物,故水分亏缺会对作物中的氨基酸组分和总量^[26]以及蛋白质^[33]的含量产生一定程度的影响。本研究结果表明水分亏缺下青稞籽粒的大部分必需氨基酸和非必需氨基酸的含量均上升,且增幅较大导致总的氨基酸含量和合成的蛋白质含量较高,该研究结果和Khalil等^[31]的研究结果较为一致。小麦籽粒必需氨基酸含量在水分亏缺处理中虽上升但升幅较小而非必需氨基酸含量呈先降后升的趋势,导致其总的氨基酸和蛋白含量均呈先降后升的趋势,该研究结果和李桂荣等^[27]的研究结果较为一致。水分亏缺下小麦族作物籽粒中必需和非必需氨基酸含量均升高,产生该现象可能为水分亏缺使部分代谢途径受阻,籽粒将更多地合成清除自由基的相应物质。青稞和小麦作为不同小麦族不同属作物,其对水分亏缺的响应机制存在一定差异,小麦中大部分必需和非必需氨基酸含量在水分亏缺下均降低而青稞中的含量均升高,且增幅随亏缺程度加剧

而增大。其可能是水分亏缺对小麦籽粒中酶活性等产生不可逆的损伤而青稞的耐受性较强,青稞籽粒中合成或转用较多的氨基酸以合成预防膜脂过氧化的产物以应对重度干旱胁迫所致。

4 结 论

水分亏缺会对小麦族作物籽粒中氮磷钾、蛋白质、必需氨基酸含量、非必需氨基酸含量产生影响,但青稞和小麦的响应机制存在一定差异。相比于水分充足处理,水分亏缺处理下青稞籽粒养分、蛋白质及其组分呈显著升高趋势而小麦籽粒中呈先降低后升高趋势,表明小麦族作物中小麦对水分亏缺的耐受性较低。

参考文献 References

- [1] 侯慧芝,吕军峰,郭天文,张国平,董博,张绪成.旱地全膜覆土穴播对春小麦耗水、产量和土壤水分平衡的影响[J].中国农业科学,2014,47(22):4392-4404
Hou H Z, Lv J F, Guo T W, Zhang G P, Dong B, Zhang X C. Effects of whole field soil-plastic mulching on spring wheat water consumption, yield, and soil water balance in semiarid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22): 4392-4404 (in Chinese)
- [2] 姚晓华,吴昆仑.青稞脂质转运蛋白基因 *blt4.9* 的克隆及其对非生物胁迫的响应[J].作物学报,2016,42(3):399-406
Yao X H, Wu K L. Isolation of *blt4.9* gene encoding LTP protein in hullless barley and its response to abiotic stresses [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(3): 399-406 (in Chinese)
- [3] Li H E, Guo Q Q, Lan X Z, Zhou Q, Wei N. Comparative expression analysis of five WRKY genes from Tibetan hullless barley under various abiotic stresses between drought-resistant and sensitive genotype [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 4(36):963-973
- [4] 李鸿伟,杨凯鹏,曹转勤,王志琴,杨建昌.稻麦连作中超高产栽培小麦和水稻的养分吸收与积累特征[J].作物学报,2013,39(3):464-477
Li H W, Yang K P, Cao Z Q, Wang Z Q, Yang J C. Characteristics of nutrient uptake and accumulation in wheat and rice with continuous cropping under super-high-yielding cultivation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(3):464-477 (in Chinese)
- [5] 牛平平,穆心愿,张星,杨春收,李潮海.不同年代玉米品种根系对低氮干旱胁迫的响应分析[J].作物学报,2015,41(7):1112-1120
Niu P P, Mu X Y, Zhang X, Yang C S, Li C H. Response of roots of maize varieties released in different years to low

- nitrogen and drought stresses[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015,41(7):1112-1120 (in Chinese)
- [6] 陈秀晨,王士梅,王海娟,王申.水稻子粒矿质元素含量遗传及主要农艺性状相关性分析[J].植物遗传资源学报,2015,16(3):460-466
Cheng X C, Wang S M, Wang H J, Wang S. Genetic analysis of rice grain mineral elements content and correlation analysis with main agronomic characters[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015,16(3):460-466 (in Chinese)
- [7] 侯云鹏,韩立国,孔丽丽,尹彩侠,秦裕波,李前,谢佳贵.不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):836-845
Hou Y P, Han G L, Kun L L, Yi C X, Qing Y B, Li Q, Xie J G. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015,21(4):836-845 (in Chinese)
- [8] 曾亚文,汪禄祥,杨晓梦,杨加珍,杜娟,普晓英,杜丽娟,杨树明,肖亚,杨涛.大麦 RIL 群体内不同类型苗粉和籽粒元素的差异[J].中国农业科学,2016,49(15):2857-2866
Zeng Y W, Wang L X, Yang X M, Yang J Z, Du J, Pu X Y, Du L J, Yang S M, Xiao Y, Yang T. Difference of elements in different types of seedling powder and its grains of barley recombinant inbred lines [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016,49(15):2857-2866 (in Chinese)
- [9] Fernandes A M, Soratto R P, Pilon C. Soil phosphorus increases dry matter and nutrient accumulation and allocation in potato cultivars[J]. *American Journal of Potato Research*, 2015,92(1):117-127
- [10] Dwivedi B S, Rawat A K, Dixit B K, Thakur R K. Effect of inputs integration on yield, uptake and economics of Kodo millet (*Paspalum scrobiculatum* L) [J]. *Economic Affairs*, 2016,61(3):519
- [11] 齐琳娟,胡学旭,周桂英,王爽,李静梅.2004—2011年中国主产省小麦蛋白质品质分析[J].中国农业科学,2012,45(20):4242-4251
Qi L J, Hu X X, Zhou G Y, Wang S, Li J M. Analysis of wheat protein quality in main wheat producing areas of China from 2004 to 2011[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012,45(20):4242-4251 (in Chinese)
- [12] 孙敏,葛晓敏,高志强,任爱霞,邓妍,赵维峰,赵红梅.不同降水年型休闲期耕作蓄水与旱地小麦籽粒蛋白质形成的关系[J].中国农业科学,2014,47(9):1692-1704
Sun M, Ge X M, Gao Z Q, Ren A X, Deng Y, Zhao W F, Zhao H M. Relationship between water storage conservation in fallow period and grains protein formation in dryland wheat in different precipitation years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014,47(9):1692-1704 (in Chinese)
- [13] 宋奇超,曹凤秋,巩元勇,程晓园,毕昕媛,刘来华.高等植物氨基酸吸收与转运及生物学功能的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1507-1517
Song Q C, Cao F Q, Gong Y Y, Cheng X Y, Bi X Y, Liu L H. Current research progresses of amino acids uptake, transport and their biological roles in higher plants[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012,18(6):1507-1517 (in Chinese)
- [14] 刘慧,王朝辉,李富翠,李可懿,杨宁,杨月娥.不同麦区小麦籽粒蛋白质与氨基酸含量及评价[J].作物学报,2016,42(5):768-777
Liu H, Wang C H, Li F C, Li K Y, Yang N, Yang Y E. Contents of protein and amino acids of wheat grain in different wheat production regions and their evaluation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016,42(5):768-777 (in Chinese)
- [15] Anjum F M, Ahmad I, Butt M S, Sheikh M A, Pasha I. Amino acid composition of spring wheats and losses of lysine during chapati baking[J]. *Journal of Food Composition & Anal*, 2005,18(6):523-532
- [16] 朱怡霖,张海生,杨淑芳,赵鑫帅,薛焕焕.18种大豆种子蛋白质、氨基酸和脂肪酸的组成成分分析[J].中国油脂,2017,42(1):144-148
Zhu Y L, Zhang H S, Yang S F, Zhao X S, Xue H H. Analysis of protein content, compositions of amino acid and fatty acid in 18 kinds of soybean seeds[J]. *China Oils and Fats*, 2017,42(1):144-148 (in Chinese)
- [17] 张翔,张新友,毛家伟,张玉亭.施氮水平对不同花生品种产量与品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1417-1423
Zhang X, Zhang X Y, Mao J W, Zhang Y T. Effects of nitrogen fertilization on yield and quality of different peanut cultivars [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011,17(6):1417-1423 (in Chinese)
- [18] 郭咏梅,李华慧,李少明,段延碧,黄平,涂建.糙米蛋白质含量与矿质元素含量的相关分析及 NIRS 模型的建立[J].植物遗传资源学报,2013,14(1):173-178
Guo Y M, Li H H, Li S M, Duan Y B, Huang P, Tu J. Correlation analysis of protein content and mineral content in brown rice and establishment of the math model for the NIRS analysis[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013,14(1):173-178 (in Chinese)
- [19] Ciampitti I A, Camberato J J, Murrell S T, Tony J V. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate. I. Macronutrients [J]. *Agronomy Journal*, 2013,105(3):783-795
- [20] 赵红梅,高志强,孙敏,赵维峰,李青,邓研,杨珍平.休闲期耕作对旱地小麦土壤水分、花后脯氨酸积累及籽粒蛋白质积累的影响[J].中国农业科学,2012,45(22):4574-4586
Zhao H M, Gao Z Q, Sun M, Zhao W F, Li Q, Deng Y, Yang Z P. Effect of tillage in fallow period on soil water, post-anthesis proline accumulation and grains protein accumulation in dryland wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012,45(22):4574-4586 (in Chinese)
- [21] 王亚江,魏海燕,颜希亭,葛梦婕,孟天瑶,张洪程,戴其根,霍中洋,许轲,费新茹.光、氮及其互作对超级粳稻产量和氮、磷、钾

- 吸收的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1235-1244
- Wang Y J, Wei H Y, Yan X T, Ge M J, Meng T Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Fei X R. Effects of light, nitrogen and their interaction on grain yield and nitrogen, phosphorus and potassium absorption in Japonica super rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1235-1244 (in Chinese)
- [22] 周瑞莲, 杨树德, 赵哈林, Mark W E. 发育早期变温对不同基因型大豆种子生长速率和蛋白质及脂肪含量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3580-3588
- Zhou R L, Yang S D, Zhao H L, Mark W E. Effects of temperature changes on growth rate and protein and oil contents at early seed-filling stage of different genetic soybeans [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3580-3588 (in Chinese)
- [23] Nascente A S, Carvalho M C S, Rosa P H. Growth, nutrient accumulation in leaves and grain yield of super early genotypes of common bean[J]. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 2016, 46(3): 292-300
- [24] Lhungdim J, Singh Y, Chongtham S K, Devi K N. Influence of weed control practices on grain yield and protein content of small seeded lentil (*Lens culinaris Medikus*) under rainfed condition[J]. *Journal of Food Legumes*, 2015, 28(3): 249-252
- [25] Shabbir R N, Waraich E A, Ali H, Nawaz F, Ashraf M Y, Ahmad R, Awan M I, Ahmad S, Irfan M, Hussain S, Ahmad Z. Supplemental exogenous NPK application alters biochemical processes to improve yield and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum L*) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(3): 2651-2662
- [26] 李桂荣, 赵宝平, 胡跃高, 程方民, 曾昭海, 赵宁春. 灌溉制度对不同基因型燕麦籽粒植酸、蛋白质和矿质元素含量的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(5): 866-870
- Li G R, Zhao B P, Hu Y G, Cheng F M, Zeng Z H, Zhao N C. Effect of irrigation regimes on phytic acid, protein, and mineral element contents in two oat cultivars [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(5): 866-870 (in Chinese)
- [27] 郑志松, 王晨阳, 牛俊义, 张美微, 张洁, 姚宇卿. 水肥耦合对冬小麦籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 788-793
- Zheng Z S, Wang C Y, Niu J Y, Zhang M W, Zhang J, Yao Y Q. Effects of irrigation and fertilization coupling on protein and amino acids contents in grains of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 788-793 (in Chinese)
- [28] 张晓英, 梁新书, 张振贤, 佟二建, 高丽红. 异根嫁接对黄瓜适度水分亏缺下营养生长和养分吸收的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(3): 137-144
- Zhang X Y, Liang X S, Zhang Z X, Tong E J, Gao H L. Influence of grafting on cucumber growth and nutrient absorption under water-deficient condition [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(3): 137-144 (in Chinese)
- [29] Hussein M M, Alva A K. Growth, Yield and water use efficiency of forage sorghum as affected by NPK fertilizer and deficit irrigation [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5(13): 2134
- [30] Khalil S E, Hussein M M, Khalil A M. Interaction effects of different soil moisture levels, arbuscular mycorrhizal fungi and three phosphate levels on: II-mineral ions, protein and amino acids contents of Garden Cress (*Lepidium sativum L*) plant [J]. *International Journal of Advanced Research*, 2014, 2(12): 263-78
- [31] Goldberg D, Gornat B, Rimón D. Drip irrigation, principles, design and agricultural practices [J]. *Drip Irrigation. Principles, Design and Agricultural Practices*, 1976, 2(8): 273-289
- [32] 胡学旭, 周桂英, 吴丽娜, 陆伟, 武力, 李静梅, 王爽, 宋敬可, 杨秀兰, 王步军. 中国主产区小麦在品质区域间的差异[J]. 作物学报, 2009, 35(6): 1167-1172
- Hu X X, Zhou G Y, Wu L N, Lu W, Wu L, Li J M, Wang S, Song J K, Yang X L, Wang B J. Variation of wheat quality in main wheat-producing regions in China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(6): 1167-1172 (in Chinese)
- [33] Brini F, Yamamoto A, Jlaiel L, Takeda S, Hobo T, Dinh H Q, Hattori T, Masmoudi K, Hanin M. Pleiotropic effects of the wheat dehydrin DHN-5 on stress responses in Arabidopsis [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2011, 52(4): 676-688

责任编辑: 吕晓梅