

花后盐与渍水逆境对小麦籽粒产量及蛋白质和淀粉积累的影响^{*}

郑春芳^{1,2,3} 姜 东^{1**} 戴廷波¹ 荆 奇¹ 曹卫星¹

(¹ 南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室/江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 南京 210095; ² 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江温州 325000; ³ 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 浙江温州 325005)

摘 要 采用盆栽试验,研究了花后渍水、盐胁迫和盐渍处理对 2 个小麦品种(扬麦 12 和淮麦 17)籽粒产量及蛋白质和淀粉积累与组分的影响。结果表明:与对照相比,花后渍水、盐胁迫和盐渍处理显著降低了小麦花前贮藏氮素(花前贮藏干物质)转运量和花后同化氮素(花后同化物)输入籽粒量,从而导致小麦籽粒产量、蛋白质和淀粉产量显著降低,其中盐胁迫和盐渍处理表现更为明显。与对照和渍水处理相比,盐胁迫和盐渍处理显著降低了小麦籽粒蛋白质积累量及谷/醇蛋白比,显著提高了蛋白质组分含量,同时降低了小麦籽粒淀粉积累量、淀粉组分含量及直/支链淀粉比。盐胁迫处理对扬麦 12 的影响较盐渍处理明显,而盐渍处理对淮麦 17 的影响较盐胁迫处理明显。渍水条件下小麦籽粒蛋白质和淀粉积累量均下降,除淮麦 17 谷蛋白和清蛋白含量有所提高外,淮麦 17 其他蛋白组分含量和扬麦 12 各蛋白组分含量均下降。

关键词 冬小麦 盐渍 产量 组分 氮素再分配

文章编号 1001-9332(2009)10-2391-08 **中图分类号** S512 **文献标识码** A

Effects of salt and waterlogging stress at post-anthesis stage on wheat grain yield and quality. ZHENG Chun-fang^{1,2,3}, JIANG Dong¹, DAI Ting-bo¹, JING Qi¹, CAO Wei-xing¹(¹Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ²Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325000, Zhejiang, China; ³Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-resource, Wenzhou 325005, Zhejiang, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2009 20(10): 2391-2398.

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of salt (ST), waterlogging (WL), and their combination (SW) at post-anthesis on the grain yield and its starch and protein components of wheat cultivars Yangmai 12 and Huaimai 17. Comparing with the control, treatments ST, WL, and SW, especially ST and SW, decreased the allocation of nitrogen and carbon assimilates at pre- and post-anthesis to the grains significantly, resulting in an obvious decrease of grain yield and its protein and starch contents. Both ST and SW had significant negative effects on the glutenin / gliadin and amylase / amylopectin ratios in the grains, compared to CK and WL. Yangmai 12 was more sensitive to ST than SW, while Huaimai 17 was in adverse. WL decreased the accumulation of protein and starch in the grains of the two cultivars. Except that the glutenin and albumin in Huaimai 17 had some increase, the globulin and gliadin in Huaimai 17 and all protein components in Yangmai 12 were decreased under WL.

Key words: winter wheat; salt and waterlogging; yield; component; N redistribution.

^{*} 国家自然科学基金项目(30671216, 30700483)、江苏省自然科学基金项目(BK2008329)和教育部新世纪优秀人才计划项目(06-0493)资助。
^{**} 通讯作者。E-mail: jiangd@njau.edu.cn
2009-01-09 收稿, 2009-08-24 接受。

随着全球变暖,沿海区域农业将遭受日益频繁的海水倒灌威胁^[1],不合理灌溉或暴雨也会引起盐渍双重胁迫,造成农作物减产和品质下降^[2]。小麦营养器官积累的干物质和氮素向籽粒中的再转运会影响籽粒淀粉和蛋白质及其组分的积累^[3],进而显著影响面制品的加工品质^[4-5]。研究发现,渍水降低小麦籽粒产量和蛋白质各组分的积累量^[6],盐胁迫也可降低籽粒产量,但显著提高蛋白质含量^[7],而盐害和渍水双重(盐渍)胁迫对小麦产量、蛋白质及淀粉积累的影响研究较少,仅有研究表明,盐渍和盐胁迫显著降低小麦籽粒产量,且在疏松土壤中盐渍较盐胁迫表现更明显^[8]。此外,花后渍水还降低小麦营养器官花前贮藏氮素的再转运量和再转运率及花后同化氮素向籽粒输入的量^[9]。但盐渍条件对小麦植株物质转运特性及蛋白质和淀粉组分的影响研究尚未见报道。本试验在盆栽条件下,研究花后不同处理(渍水、盐胁迫和盐渍处理)对小麦籽粒产量、蛋白质和淀粉积累及其组分形成、以及植株贮藏干物质和氮素再转运的影响,旨在为小麦优质高产抗逆栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于 2006—2008 年在南京农业大学卫岗试验站进行。供试小麦品种为淮麦 17 和扬麦 12,供试土壤为黄棕壤,土壤养分含量为:有机质 $12.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $29.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $29.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $72.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。自然风干土过筛,播种前与肥料充分混匀,装入高 22 cm、直径 25 cm 的塑料桶,每桶 7.5 kg。每桶施用全氮 1.2 g、 P_2O_5 0.36 g 和 K_2O 0.9 g,每桶留苗 7 株。试验共设 4 个处理:对照(相当于田间持水量的 70%~80%)、盐胁迫(土壤含盐为 0.45% NaCl)、渍水(保持 1~2 cm 的水层)和盐渍胁迫(0.45% NaCl + 渍水)。从花后 7 d 开始处理,盐胁迫和盐渍处理每天每盆加入 6.75 g NaCl,5 d 后土壤含盐量达到 0.45% NaCl;渍水和盐渍处理 5 d 后,将水倒出收集,经浓缩后再倒回原盆中,保持养分和盐分不丢失。试验为随机区组设计,3 次重复。

1.2 测定项目与方法

籽粒蛋白质和淀粉组分及氮素转运:开花期选择同一天开花、大小均匀的穗子挂牌标记,于花后 7、14、21、28、35 和 42 d 取样。按叶、茎鞘、穗轴(颖壳)、籽粒等器官分样,每次取样 3 盆,105 °C 杀青

30 min,80 °C 下烘干至恒量,测定干物质积累量和氮素含量。蛋白质组分测定采用连续提取法^[10],植株和籽粒全氮测定采用半微量凯氏定氮法^[10],籽粒含氮量乘以 5.7 得到籽粒蛋白质含量。总淀粉含量的测定采用旋光法^[10],直链淀粉含量测定采用碘-碘化钾比色法^[10]。各营养器官干物质、氮素积累与转运特征参数按以下公式计算^[3]:

营养器官花前贮藏同化物转运量 = 开花期营养器官干物质质量 - 成熟期营养器官干物质质量

营养器官花前贮藏同化物转运率 = (开花期干物质质量 - 成熟期干物质质量) / 开花期干物质质量 × 100%

花后同化物输入籽粒量 = 成熟期籽粒干物质质量 - 营养器官花前贮藏同化物转运量

花前贮存同化物或花后同化物对籽粒产量的贡献率 = 花前贮藏物质转运量(花后同化物量) / 成熟期籽粒干物质质量 × 100%

花前贮藏氮素转运量 = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量

氮素转运率 = 花前贮藏氮素转运量 / 开花期营养器官氮素积累量 × 100%

花后氮素积累量 = 成熟期籽粒氮素积累量 - 花前贮藏氮素转运量

氮素对籽粒氮的贡献率 = 花前贮藏氮素转运量(花后氮素积累量) / 成熟期籽粒氮素积累量 × 100%

1.3 数据处理

采用 SPSS 软件对试验数据进行方差分析和 LSD 显著性测验。由于两年的试验结果趋势基本一致,因此本文仅列出 2007—2008 年度数据。

2 结果与分析

2.1 花后盐渍逆境对小麦籽粒产量及其构成因素和籽粒蛋白质与淀粉产量的影响

由表 1 可以看出,渍水、盐胁迫和盐渍处理均显著降低了两小麦品种籽粒产量、蛋白质和淀粉产量($P < 0.05$)。与对照相比,渍水胁迫显著降低了扬麦 12 的籽粒产量、穗粒数、蛋白质和淀粉产量($P < 0.05$),显著降低了淮麦 17 的籽粒产量、千粒重、蛋白质和淀粉产量($P < 0.05$)。与对照和渍水处理相比,盐胁迫和盐渍处理均显著降低了两小麦品种籽粒产量、有效穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量、蛋白质和淀粉产量($P < 0.05$)。盐胁迫下扬麦 12 的籽粒产量及其构成因素及蛋白质和淀粉产量均低于盐渍

表 1 不同处理对两小麦品种籽粒产量及其构成因素和籽粒蛋白质与淀粉产量的影响
Tab.1 Effects of different treatments on grain yield and its components , and yields of protein and starch in grains of two wheat cultivars

品 种 Cultivar	处 理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (g · pot ⁻¹)	有效穗数 Effective spike number	穗粒数 Grain number	千粒重 1000-kernel mass(g)	蛋白质产量 Protein yield (g · pot ⁻¹)	淀粉产量 Starch yield (g · pot ⁻¹)
扬麦 12	CK	32. 8a	22. 3a	37. 1b	43. 4a	4. 6a	24. 7a
Yangmai 12	WL	29. 3b	21. 9a	32. 7c	43. 5a	3. 3b	17. 7b
	ST	11. 5d	14. 9c	27. 4d	27. 3c	1. 6d	6. 9d
	SW	13. 8d	15. 6c	28. 3d	27. 4c	1. 7d	7. 9d
淮麦 17	CK	28. 7b	18. 2b	40. 0a	39. 6b	3. 3b	19. 0b
Huaimai 17	WL	18. 1c	17. 6b	39. 0ab	27. 2c	2. 1c	11. 4c
	ST	7. 9e	13. 4d	32. 8c	18. 1d	1. 3e	4. 4e
	SW	6. 5e	11. 0e	32. 0c	17. 2d	0. 9f	3. 2e

CK :对照 Control ;WL :渍水 Waterlogging ;ST :盐害 Salinity ;SW 盐渍 Salinity × Waterlogging. 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0. 05$) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0. 05 level. 下同 The same below.

处理 ,而淮麦 17 的蛋白质和淀粉产量及籽粒产量及其构成因素均高于盐渍处理 ,且其有效穗数和蛋白质产量达到显著差异 ($P < 0. 05$) . 渍水、盐胁迫及盐渍条件下扬麦 12 的籽粒产量、蛋白质和淀粉产量均显著高于淮麦 17 ,且下降幅度明显小于淮麦 17 ,表明扬麦 12 对渍水和盐胁迫的耐性强于淮麦 17 .

2. 2 花后盐渍逆境对小麦籽粒蛋白质和淀粉积累量动态变化的影响

小麦籽粒蛋白质和淀粉积累量随着灌浆进程呈上升趋势(图 1). 与对照相比 ,渍水、盐胁迫和盐渍处理均降低了两小麦品种籽粒蛋白质和淀粉积累量. 盐渍和盐胁迫处理缩短了小麦籽粒的灌浆持续

期 ,导致蛋白质和淀粉积累量在花后第 28 天开始显著低于对照和渍水处理($P < 0. 05$) ;而渍水处理与对照相比 ,仅降低了蛋白质和淀粉的积累量 ,未影响小麦籽粒的灌浆持续期. 扬麦 12 的籽粒蛋白质、淀粉积累量在花后第 28 天就开始显著低于对照和渍水处理($P < 0. 05$) ,表现为对照 > 渍水 > 盐渍 > 盐胁迫 ,淮麦 17 的籽粒蛋白质、淀粉积累量均在花后第 21 天开始显著低于对照和渍水处理($P < 0. 05$) ,表现为对照 > 渍水 > 盐胁迫 > 盐渍 ,且渍水处理与对照之间差异显著($P < 0. 05$) . 各处理对淮麦 17 性状变化的影响幅度大于扬麦 12 ,表明淮麦 17 对逆境胁迫的反应比扬麦 12 更敏感.

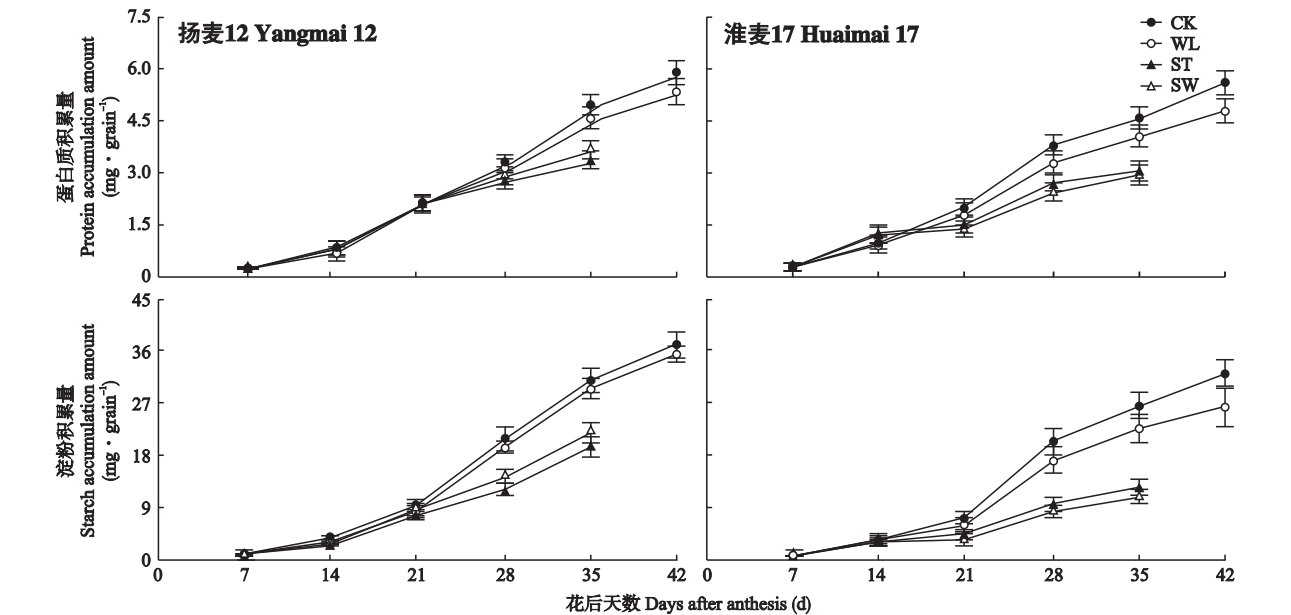


图 1 不同处理两小麦品种籽粒蛋白质和淀粉积累量的变化
Fig.1 Changes of protein and starch accumulation amount in grains of two wheat cultivars under different treatments (mean ± SD).
CK :对照 Control ;WL :渍水 Waterlogging ;ST :盐害 Salinity ;SW :盐渍 Salinity × Waterlogging. 下同 The same below.

2.3 花后盐渍逆境对小麦籽粒直链、支链淀粉含量及直/支动态变化的影响

小麦籽粒直链、支链淀粉含量及直/支随着灌浆进程而明显提高,到花后第 28 天后增势变缓(图 2)。清水、盐胁迫和盐渍处理下小麦籽粒直链和支链淀粉含量均低于对照。与对照相比,清水处理显著降低了淮麦 17 的籽粒直链淀粉含量($P < 0.05$),但对支链淀粉含量的影响不大;盐胁迫和盐渍处理下淀粉组分含量显著低于对照和清水处理($P < 0.05$),并以盐渍处理最低。说明清水逆境降低淮麦 17 籽粒淀粉含量主要是通过减少直链淀粉含量,而盐胁迫和盐渍处理降低淀粉含量则主要是通过减少直链和支链淀粉含量。与淮麦 17 相似,各处理对扬麦 12 籽粒直链淀粉的影响较支链淀粉明显,盐胁迫和盐渍处理较清水处理显著,且在盐胁迫处理下淀粉各组分含量最低。清水、盐胁迫及盐渍逆境降低了籽粒直/支,且对淮麦 17 的影响均达到了显著水平($P < 0.05$),而仅盐胁迫和盐渍逆境对扬麦 12 的影响达到显著水平($P < 0.05$)。说明在这几种逆境条

件下直链淀粉含量的变化直接影响了淀粉直/支比。渍水、盐胁迫和盐渍处理对淮麦 17 的籽粒直、支链淀粉含量及直/支的影响较扬麦 12 明显。

2.4 花后盐渍逆境对小麦籽粒蛋白质组分含量及谷/醇蛋白动态变化的影响

两小麦品种籽粒清蛋白和球蛋白含量均随灌浆进程逐渐降低(图 3)。盐胁迫和盐渍处理下两小麦品种清蛋白和球蛋白含量均显著高于对照和渍水处理($P < 0.05$),盐胁迫下扬麦 12 清蛋白、球蛋白含量均显著高于盐渍处理($P < 0.05$),而淮麦 17 盐胁迫与盐渍处理间籽粒清蛋白和球蛋白含量差异不显著($P < 0.05$)。此外,渍水降低了扬麦 12 籽粒清蛋白和球蛋白含量及淮麦 17 球蛋白含量,而显著提高了淮麦 17 籽粒清蛋白含量($P < 0.05$)。与清蛋白和球蛋白含量变化趋势相反,醇溶蛋白和谷蛋白含量在整个灌浆期均呈不断上升趋势(图 3)。盐胁迫和盐渍处理下两小麦品种籽粒谷蛋白、醇溶蛋白含量均显著高于渍水和对照处理($P < 0.05$),但盐胁迫和盐渍处理间差异不显著($P < 0.05$);渍水处理下,

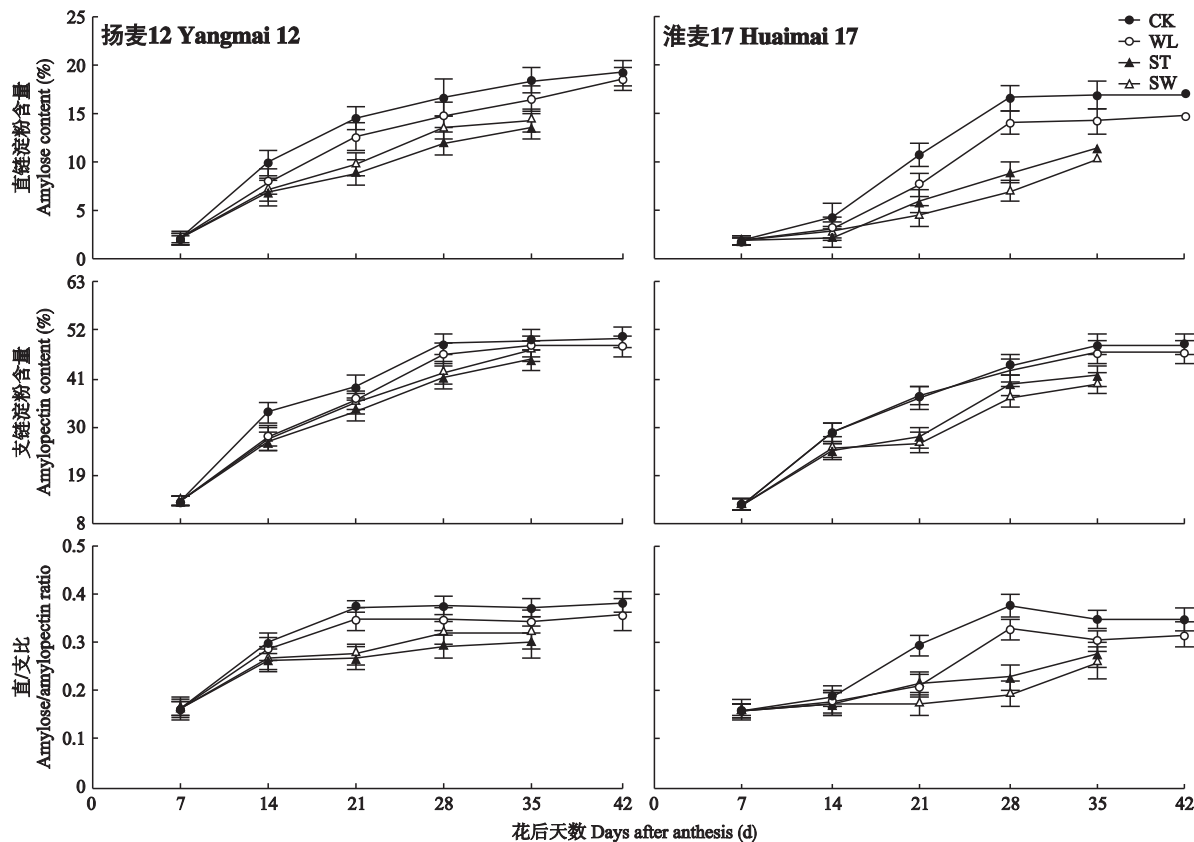


图 2 不同处理两小麦品种籽粒直链、支链淀粉含量及直/支的变化
Fig.2 Changes of contents of amylose , amylopectin and amylose/amylopectin ratio in grains of two wheat cultivars under different treatments (mean ± SD).

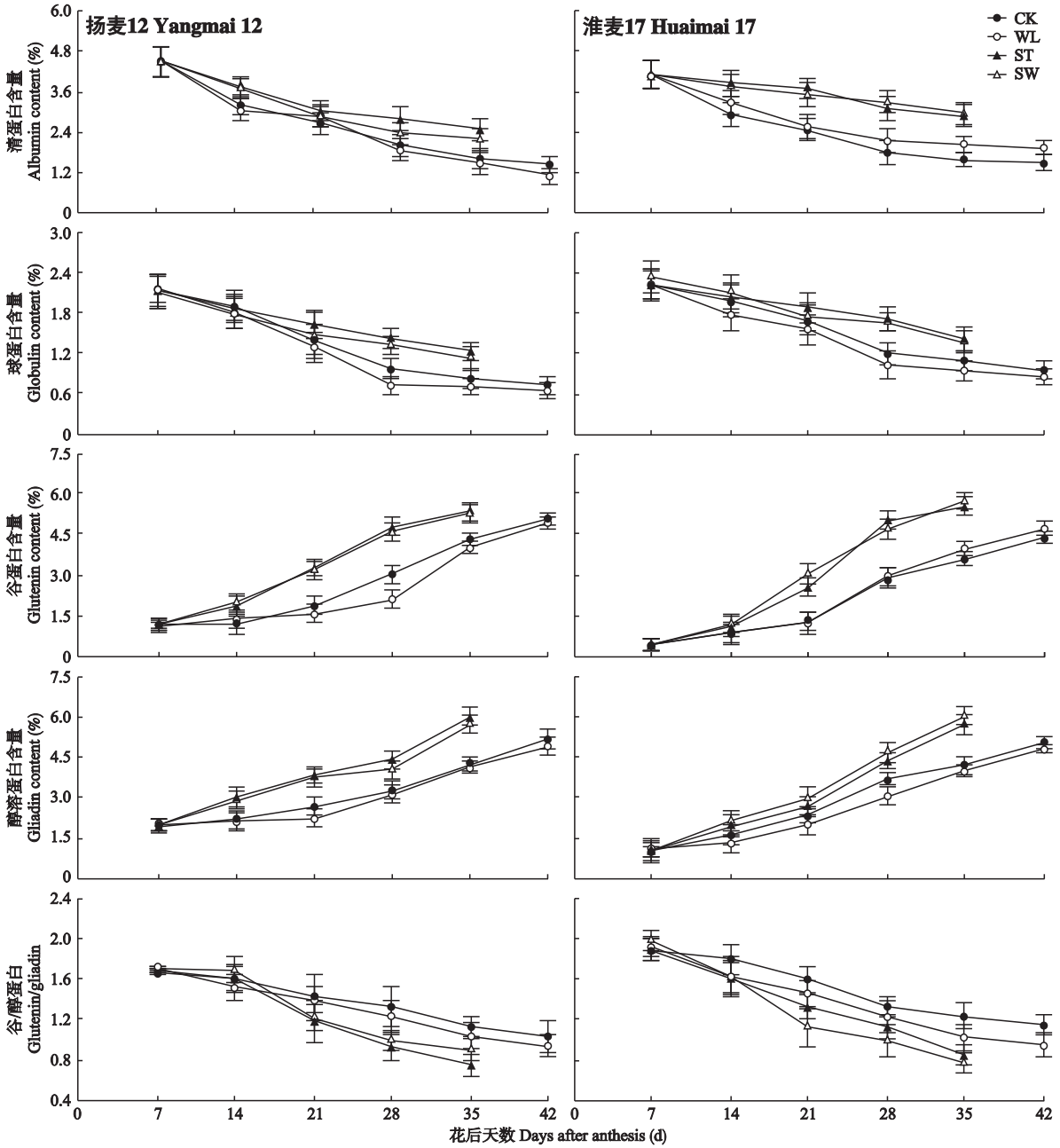


图 3 不同处理两小麦品种籽粒蛋白质组分含量及谷/醇蛋白值的变化

Fig.3 Changes of protein component contents and glutenin/gliadin ratio in grains of two wheat cultivars under different treatments (mean ± SD).

除淮麦 17 籽粒谷蛋白含量有所增加外, 扬麦 12 籽粒谷蛋白、醇溶蛋白含量及淮麦 17 籽粒醇溶蛋白含量均低于对照. 除渍水处理对扬麦 12 谷/醇溶蛋白的影响无显著差异外($P < 0.05$), 渍水、盐胁迫和盐渍处理均显著降低了两小麦籽粒谷/醇溶蛋白含量($P < 0.05$), 且逆境条件下淮麦 17 籽粒蛋白组分变化幅度较扬麦 12 大, 表明逆境对淮麦 17 蛋白组分的影响较扬麦 12 更明显.

2.5 花后盐渍逆境对小麦花前同化物再转运和花后同化的影响

与对照相比, 渍水、盐胁迫和盐渍处理均降低了两小麦品种旗叶、其余叶、茎鞘、颖壳和穗轴各营养器官花前贮藏物质再转运量和再转运率以及营养器官贮藏物质总的再转运量和再转运率, 品种间和器官间的变化趋势基本一致(表 2). 盐胁迫和盐渍处理下两小麦品种各营养器官花前贮藏物质再转运量

表 2 不同处理对两小麦品种营养器官花前贮藏同化物再转运和花后同化的影响
Tab.2 Effects of different treatments on remobilization of pre-anthesis stored assimilates and post-anthesis assimilates of two wheat cultivars

品 种 Cultivar	处 理 Treatment	花前营养器官贮藏物质再转运										GM	CAGM	AATG	CPGM
		Redistribution of assimilates accumulated before anthesis													
		旗 叶 Flag leaf		其余叶 Others leaf		茎鞘 Stem and sheath		颖壳 + 穗轴 Hull and rachis		总量 Total					
		AR	RR	AR	RR	AR	RR	AR	RR	AR	RR				
扬麦 12	CK	29.9	33.1	76.2	28.7	309.0	24.9	93.6	17.3	508.7	31.2	1930.0b	24.6c	1454b	75.3a
Yangmai 12	WL	24.6	27.3	69.4	26.1	283.6	20.3	103.4	19.1	481.0	29.0	1897.0b	25.3c	1403b	74.7a
	ST	16.5	18.3	52.0	19.6	139.6	11.2	57.4	10.6	262.5	14.0	852.4e	39.1b	520e	60.9b
	SW	20.9	23.2	61.2	23.1	144.0	11.6	74.1	13.7	300.2	16.3	1096.4d	30.7bc	760d	69.3ab
淮麦 17	CK	24.7	25.1	59.4	27.5	311.3	25.2	236.6	30.3	631.9	37.2	2250.0a	26.4c	1655a	73.6a
Huaimai 17	WL	18.1	18.4	43.2	20.1	285.0	23.1	223.9	28.7	570.4	32.4	1635.4c	34.8bc	1067c	65.2b
	ST	12.7	12.9	26.4	12.3	210.6	17.0	170.1	21.8	419.2	21.9	756.4f	59.5a	306f	40.50c
	SW	10.9	11.2	19.4	9.0	146.5	11.8	150.9	19.3	327.4	16.4	650.4g	58.7a	269f	41.3c

AR : 营养器官花前贮藏同化物再转运量 Amount of remobilization of pre-anthesis stored assimilate (mg · stem⁻¹); RR : 营养器官花前贮藏同化物转运率 Rate of remobilization of pre-anthesis stored assimilate (%). GM : 成熟期籽粒产量 Grain mass at maturity stage (mg · stem⁻¹); CAGM : 花前贮藏同化物对籽粒产量的贡献率 Contribution of pre-anthesis stored assimilates to grain mass (%); AATG : 花后同化物输入籽粒量 Amount of post-anthesis assimilates transferring into grain (mg · stem⁻¹); CPGM : 花后同化物对籽粒产量的贡献率 Contribution of post-anthesis assimilates to grain mass (%).

(率) 和花前贮藏物质总转运量(率) 均显著低于渍水处理($P < 0.05$); 盐渍处理下 , 扬麦 12 各营养器官花前贮藏物质再转运量(率) 和花前贮藏物质总转运量(率) 均高于盐胁迫处理 , 而淮麦 17 则是盐胁迫处理高于盐渍处理.

花后渍水、盐胁迫和盐渍处理均降低了两小麦品种成熟期籽粒产量、花后同化物输入籽粒量和花后同化物对籽粒产量的贡献率 , 而提高了花前贮藏同化物对籽粒产量的贡献率 , 且盐胁迫和盐渍处理达到了显著水平($P < 0.05$). 表明这几种逆境下籽粒中来自开花前营养器官贮藏物质的比例升高. 不

同逆境下成熟期籽粒产量、花后同化物输入籽粒量、花后同化物对籽粒产量的贡献率以及花前贮藏同化物对籽粒产量的贡献率均表现为对照 > 渍水 > 盐胁迫(盐渍), 这与各逆境对营养器官花前贮藏物质再转运量(率) 和花前贮藏物质总转运量(率) 的影响趋势一致. 盐胁迫处理下 , 扬麦 12 成熟期籽粒产量、花后同化物输入籽粒量、花后同化物对籽粒产量的贡献率以及花前贮藏同化物对籽粒产量的贡献率均低于盐渍处理 , 且成熟期籽粒产量和花后同化物输入籽粒量达到显著水平($P < 0.05$), 而淮麦 17 则为盐渍处理大于盐胁迫处理 , 且成熟期籽粒产量达到

表 3 不同处理对两小麦品种花前贮藏氮素再转运和花后氮素同化的影响
Tab.3 Effects of different treatments on remobilization of pre-anthesis stored nitrogen and post-anthesis assimilation of nitrogen of two wheat cultivars

品 种 Cultivar	处 理 Treatment	花前营养器官氮素再转运										GNA	NCTA	NPAA	NCPA
		Redistribution of N accumulated before anthesis													
		旗 叶 Flag leaf		其余叶 Others leaf		茎 鞘 Stem and sheath		颖壳 + 穗轴 Hull and rachis		总 量 Total					
		TA	TR	TA	TR	TA	TR	TA	TR	TA	TR				
扬麦 12	CK	1. 2	60. 3	4. 7	77. 2	7. 9	71. 7	3. 3	63. 1	17. 6	70. 3	31. 8a	22. 8g	24. 5a	77. 2a
Yangmai 12	WL	1. 19	59. 6	4. 3	70. 1	6. 9	62. 2	2. 9	55. 6	15. 1	62. 5	29. 7a	39. 9e	20. 6b	70. 1b
	ST	0. 61	30. 4	3. 5	57. 1	3. 3	29. 5	2. 1	41. 1	9. 5	38. 9	17. 8c	59. 7b	7. 1d	40. 3e
	SW	0. 75	37. 6	3. 9	64. 2	4. 0	36. 5	2. 3	44. 7	11. 2	45. 3	19. 5b	53. 4c	9. 2d	46. 6d
淮麦 17	CK	1. 21	54. 4	4. 3	66. 2	7. 6	68. 8	3. 0	57. 6	16. 1	64. 4	30. 7a	27. 4f	22. 3ab	72. 6b
Huaimai 17	WL	0. 8	37. 5	4. 2	64. 0	7. 21	63. 2	1. 9	47. 5	13. 2	58. 1	21. 5b	46. 2d	11. 6c	53. 8c
	ST	0. 6	26. 8	2. 9	57. 4	2. 9	25. 9	1. 7	32. 1	8. 8	34. 1	19. 2b	75. 8a	4. 7e	24. 2f
	SW	0. 5	23. 9	3. 0	58. 4	2. 8	25. 6	1. 5	27. 6	8. 0	32. 9	18. 9bc	78. 8a	4. 2e	21. 3g

TA : 营养器官花前贮藏氮素转运量 Translocation amount of pre-anthesis stored N (mg · stem⁻¹); TR : 营养器官花前贮藏氮素转运率 Translocation rate of pre-anthesis stored N (%); GNA : 籽粒全氮量 Grain nitrogen accumulation (mg · stem⁻¹); NCTA : 花前贮藏氮素对籽粒氮素的贡献率 Contribution of pre-anthesis stored N to grain nitrogen (%); NPAA : 花后氮素积累量 Post-anthesis accumulated nitrogen (mg · stem⁻¹); NCPA : 花后氮素积累量对籽粒氮素的贡献率 Contribution of post-anthesis accumulated nitrogen to grain nitrogen (%).

显著差异($P < 0.05$).

2.6 花后盐渍逆境对小麦花前贮藏氮素再转运量和花后氮素同化的影响

渍水、盐胁迫和盐渍处理均降低了两小麦品种茎鞘、颖壳和穗轴营养器官花前贮藏氮素转运量和转运率(表3).与对照相比,渍水处理显著降低了淮麦17的旗叶、茎鞘、颖壳和穗轴的转运量和转运率($P < 0.05$),而仅显著降低了扬麦12的其余叶片、茎鞘、颖壳和穗轴的转运量和转运率($P < 0.05$).与对照和渍水相比,盐胁迫和盐渍处理均显著降低了两小麦品种营养器官花前贮藏氮素转运量和转运率($P < 0.05$).盐渍处理扬麦12的其余叶、茎鞘转运量和旗叶、其余叶片、茎鞘转运率显著高于盐胁迫处理($P < 0.05$),而盐胁迫处理淮麦17的旗叶、颖壳和穗轴转运率显著高于盐渍处理($P < 0.05$).

渍水、盐胁迫和盐渍处理显著降低了两小麦品种花后氮素积累量和贮藏氮素对籽粒氮素的贡献率($P < 0.05$),显著提高了花前贮藏氮素对籽粒氮素的贡献率($P < 0.05$).与对照和渍水处理相比,盐胁迫和盐渍处理显著降低了两小麦品种营养器官花前贮藏氮素转运量和转运率、籽粒全氮量、花后籽粒积累量及花后氮素积累量对籽粒氮素的贡献率($P < 0.05$),而显著提高了花前贮藏氮素对籽粒氮素的贡献率($P < 0.05$).表明渍水、盐胁迫和盐渍逆境显著抑制了小麦营养器官花前贮藏氮素转运量和花后同化氮素输入籽粒量.

3 讨 论

研究表明,花后渍水可显著降低小麦穗数、穗粒数、千粒重、生物及籽粒产量^[11],而高盐胁迫可显著降低小麦叶片光合特性、叶面积指数、叶片相对含水量和穗干物质积累量^[12-13].本研究发现,渍水下小麦籽粒产量及各产量构成因素降低,尤以盐胁迫和盐渍处理的抑制作用更明显.此外,盐渍处理下淮麦17籽粒产量低于盐胁迫,而盐胁迫处理下扬麦12籽粒产量低于盐渍处理,但两处理间差异均未达到显著水平.表明盐胁迫和盐渍逆境对小麦产量的影响因品种而异.各逆境下扬麦12产量降低幅度小于淮麦17,表明扬麦12耐渍水和盐胁迫的能力强于淮麦17.

花后渍水处理可显著降低小麦籽粒蛋白质和淀粉及其组分积累量^[6].随着土壤含盐量增加,小麦籽粒蛋白质积累量显著降低,而蛋白质各组分均随着土壤盐分的增加而显著提高^[14],这与本研究结果

一致.本试验还发现,渍水、盐胁迫和盐渍处理下籽粒蛋白质产量显著降低,并以盐胁迫和盐渍处理的影响更明显.此外,盐胁迫和盐渍逆境对谷蛋白含量的影响明显大于醇溶蛋白,导致谷/醇溶蛋白下降,这可能会在很大程度上影响小麦加工品质和烘烤品质,具体尚有待深入研究.

小麦籽粒氮素来源于花后直接吸收和开花前植株贮藏氮素的再转运.而花后营养器官氮素营养水平是决定小麦籽粒产量、籽粒氮素积累量和蛋白质含量的一个重要因素^[15].本研究中,两小麦品种各营养器官花前贮藏氮素转运量和转运率均表现为对照>渍水>盐胁迫(盐渍).盐渍和盐胁迫处理显著降低了花后氮素积累量对籽粒氮素的贡献率,而显著增加了花前贮藏氮素对籽粒氮素的贡献率.因此,盐胁迫和盐渍处理下籽粒氮素主要来源于开花前营养器官贮藏氮素的再转运,而植株直接吸收同化的氮素量显著降低,导致籽粒含氮量降低.渍水处理也降低了籽粒全氮量,尤其对淮麦17的影响更显著.综合分析,籽粒全氮量和蛋白质产量的降低主要与花后氮素同化能力下降及花前贮藏氮素转运率降低有关.说明花后渍水、盐胁迫和盐渍逆境通过抑制花前贮藏氮素的转运和花后氮素积累而降低籽粒蛋白质产量.

开花后小麦营养器官花前积累干物质向籽粒中的转运是决定籽粒产量的重要因素^[16],而源(叶)同化物的生成、转运及向(库)籽粒中的分配累积能力是制约其淀粉积累的重要因素^[17].本试验结果显示,渍水、盐胁迫和盐渍处理主要通过抑制花前贮藏物质转运量和花后干物质积累量而显著降低淀粉产量.不同处理扬麦12花后同化物输入籽粒量表现为对照>渍水>盐渍>盐胁迫,而淮麦17表现为对照>渍水>盐胁迫>盐渍.此外,小麦籽粒淀粉含量与支/直决定了面条、馒头的加工品质^[18].本研究中,渍水处理降低了两小麦品种的直链和支链淀粉含量,抑制了淀粉积累,导致直/支下降.盐胁迫和盐渍处理还缩短了籽粒灌浆持续期,淀粉积累严重受阻,淀粉积累量明显下降.盐胁迫和盐渍处理下,小麦直链、支链淀粉含量及直/支均随着灌浆进程而明显下降,且下降幅度显著大于渍水处理.

综上,盐胁迫和盐渍逆境缩短了小麦籽粒灌浆持续期,导致籽粒、蛋白质和淀粉产量显著降低,同时也对小麦籽粒蛋白质和淀粉组分含量产生显著影响.花后渍水、盐胁迫和盐渍逆境下小麦籽粒蛋白质和淀粉积累量的下降与营养器官花前贮藏同化物的

转运率和花后同化物输入籽粒量的下降有关,也与小麦营养器官花前贮藏氮素再转运率和花后氮素积累量对籽粒氮素的贡献率下降有关,尤以盐胁迫和盐渍逆境更为严重。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007 : Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press , 2007
- [2] Ashraf M , Saeed MM. Effect of improved cultural practices on crop yield and soil salinity under relatively saline groundwater applications. *Irrigation and Drainage Systems* , 2006 , **20** : 111–124
- [3] Xie Z-J (谢祝捷) , Jiang D (姜 东) , Cao W-X (曹卫星) , *et al.* Effects of plant growth regulation substances on photosynthetic characteristics and assimilates transportation in winter wheat under post-anthesis drought and waterlogging. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报) , 2004 , **30** (10) : 1047–1052 (in Chinese)
- [4] Holm J. Bioavailability of starch in various wheat based bread product : Evaluation of metabolic responses in healthy subjects and rate and extent of in vitro starch digestion. *American Journal of Clinical Nutrition* , 1992 , **55** : 420–429
- [5] Deng Z-Y (邓志英) , Tian J-C (田纪春) , Hu R-B (胡瑞波) , *et al.* Effects of genotype and environment on wheat main quality characteristics. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报) , 2006 , **26** (8) : 2757–2763 (in Chinese)
- [6] Fan X-M (范雪梅) , Jiang D (姜 东) , Dai T-B (戴廷波) , *et al.* Effects of nitrogen on grain yield and quality in wheat grown under drought or waterlogging stress from anthesis to maturity. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报) , 2004 , **28** (5) : 680–685 (in Chinese)
- [7] Li S-H (李树华) , Xu X (许 兴) , Li H-X (李红霞) , *et al.* Effect of salinity on seed protein and yield characters of wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究) , 2002 , **20** (4) : 38–41 (in Chinese)
- [8] Saqib M , Akhtar J , Qureshi RH. Pot study on wheat growth in saline and waterlogged compacted soil. I. Grain yield and yield components. *Soil & Tillage Research* , 2004 , **77** : 169–177
- [9] Jiang D (姜 东) , Xie Z-J (谢祝捷) , Cao W-X (曹卫星) , *et al.* Effects of post-anthesis drought and waterlogging on photosynthetic characteristics , assimilates transportation in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报) , 2004 , **30** (2) : 175–182 (in Chinese)
- [10] Shanghai Institute of Plant Physiology (上海植物生理研究所). Modern Experimental Manual on Plant Physiology. Beijing : Science Press , 1999 (in Chinese)
- [11] Tan W , Liu J , Dai T , *et al.* Alterations in photosynthesis and antioxidant enzyme activity in winter wheat subjected to post-anthesis waterlogging. *Photosynthetica* , 2008 , **46** : 21–27
- [12] Zheng Y , Wang Z , Sun X , *et al.* Higher salinity tolerance cultivars of winter wheat relieved senescence at reproductive stage. *Environmental and Experimental Botany* , 2008 , **62** : 129–138
- [13] Ruan Y , Hu Y , Schmidhalter U. Insights on the role of tillering in salt tolerance of spring wheat from detillering. *Environmental and Experimental Botany* , 2008 , **64** : 33–42
- [14] Shen Y-X (申玉香) , Guo W-S (郭文善) , Zhou Y (周 影) , *et al.* Effect of salinity stress on grain and its component accumulation in wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报) , 2006 , **26** (6) : 100–103 (in Chinese)
- [15] Li S-Q (李世清) , Wang R-J (王瑞军) , Zhang X-C (张兴昌) , *et al.* Research advancement of wheat nitrogen nutrition and nitrogen transportation in wheat grain filling. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报) , 2004 , **18** (3) : 106–111 (in Chinese)
- [16] Han Z-Q (韩志卿) , Zhang D-X (张电学) , Wang J-Y (王介元) , *et al.* The effect of long-term fertilization on the relationship between dynamic changes of oxidation stability of soil organic matter and soil fertility. *Journal of Agricultural University of Hebei* (河北农业大学学报) , 2000 , **23** (3) : 31–35 (in Chinese)
- [17] Wang Z-L (王振林) , He M-R (贺明荣) , Fu J-M (傅金民) , *et al.* Effects of source sink manipulation on production and distribution of photosynthate after flowering in irrigated and rainfed wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报) , 1999 , **25** (2) : 162–168 (in Chinese)
- [18] Zhao C-X (赵长星) , Ma D-H (马东辉) , Wang Y-F (王月福) , *et al.* Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis soil water content on yield and quality of high-quality strong gluten wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报) , 2008 , **28** (9) : 4396–4404 (in Chinese)

作者简介 郑春芳,女,1979年生,博士研究生,助理研究员.主要从事植物生理生态学研究,发表论文8篇. E-mail : zcf66@sina.com

责任编辑 张凤丽