植物营养与肥料学报 2014,20(2):298-308
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0205

大田淹水对夏玉米养分吸收与转运的影响

任佰朝,张吉旺*,李 霞,范 霞,董树亭,刘 鹏,赵 斌
(作物生物学国家重点实验室/山东农业大学农学院,山东泰安 271018)

摘要:选用郑单958(ZD958)和登海605(DH605)为试验材料,在大田条件下研究淹水对夏玉米氮、磷、钾养分吸收与运转特性的影响。结果表明,淹水胁迫显著降低夏玉米的氮、磷、钾养分积累量,三叶期淹水6 d对其影响最显著,ZD958和DH605成熟期的氮、磷、钾养分积累量较CK分别减少了50.55%、36.50%、27.21%和42.86%、45.50%、32.53%。淹水胁迫后各器官的养分积累量较CK显著降低,但茎秆和叶片中养分的分配比例较CK升高,籽粒的养分分配比例显著下降,且茎秆和叶片中的养分含量较CK升高,而籽粒中的养分含量较CK显著下降;淹水胁迫后夏玉米各器官的干物质积累量显著降低,三叶期淹水6 d对其影响最显著,ZD958和DH605成熟期的茎秆、叶片、籽粒的干重较CK分别下降25.93%、30.14%、43.39%和28.28%、32.27%、50.28%。淹水胁迫后茎秆和叶片中的养分积累量的降低主要是由于淹水胁迫后干物质积累量显著降低,茎秆和叶片的养分向籽粒的转移量显著降低。三叶期淹水的影响最显著,拔节期淹水次之,开花后10 d淹水影响较小,其影响随淹水胁迫时间的延长而加剧。

关键词:夏玉米;大田淹水;氮、磷、钾养分;干物质
中图分类号:S311;S513 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2014)02-0298-11

Effect of waterlogging on nutrient uptake and transport of summer maize

REN Bai-zhao, ZHANG Ji-wang*, LI Xia, FAN Xia, DONG Shu-ting, LIU Peng, ZHAO Bin
(*State Key Laboratory of Crop Biology/Agronomy College of Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China*)

Abstract: Two summer-maize hybrids, Zhengdan958 (ZD958) and Denghai605 (DH605), were selected as experimental materials. A field experiment was performed to explore the effect of waterlogging on nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) absorption and transport of summer maize. Results show that N, P and K accumulation amounts are reduced significantly after waterlogging, and the decreases of nutrient accumulation of two cultivars are the most in the treatment of waterlogging at the three-leaf stage for 6 d, with 42.86%, 45.50% and 32.53% in ZD958 and 50.55%, 36.50% and 27.21% in DH605. The nutrient accumulation amounts of each organ and nutrient allocation proportions of grain are decreased significantly after the waterlogging, while the nutrient allocation proportions of stem and leaf are increased. The nutrient contents of stems and leaves are increased, while the nutrient contents of grains are decreased. Furthermore, each organ's dry matter accumulation is reduced significantly after the waterlogging, and the decreases of two cultivars are the most at the treatment of the waterlogging at the three-leaf stage for 6 d. At the maturity, the dry matter weights of stem, leaf and grain of ZD958 are decreased by 25.93%, 30.14% and 43.39, and the dry matter weights of leaves and grains of DH605 are decreased by 28.28%, 32.27% and 50.28%. The reductions of stem and leaf nutrient accumulation after the waterlogging are mostly due to the decrease of dry matter accumulation, and the nutrient transfer from stems and leaves to grains is decreased significantly after the waterlogging. It is most sensitive to be waterlogged at the three-leaf stage, followed by the six-leaf stage and the 10^{th} day after the flower stage, and decreased with the increase of

收稿日期:2013-05-17 **接受日期**:2013-10-17
基金项目:山东省现代农业产业技术体系建设经费(SDAIT-01-022-05);公益性行业(农业)科研专项(201103003);国家粮食丰产科技工程课题(2011BAD16B09)资助。
作者简介:任佰朝(1987—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事玉米栽培生理生态方面的研究。E-mail:renbaizhao@sina.com
* 通信作者 Tel:0538-8245838;E-mail:jwzhang@sdau.edu.cn

waterlogging duration.

Key words: summer maize; field waterlogging; N, P and K nutrients; dry matter

涝渍害是全球许多国家所面临的重大自然灾害。据统计,全球受湿涝灾害影响的耕地面积约为耕地总面积的 12%[1]。涝渍害在很大程度上影响甚至破坏了作物的生长发育,降低了产量。就我国而言,长江中下游地区以及黄淮海平原受害现象最为显著,大约占全国总受灾面积的 3/4 以上[2]。黄淮海区域降水多集中在夏玉米生长季节,常造成农田积水,导致玉米涝害。淹水胁迫导致土壤局部缺氧,根系呼吸作用受到显著影响,限制了根系的正常生长发育[3,4],导致根冠生长失调[5]。并且随着无氧呼吸增强,土壤中大量有害物质(如 H_2S、FeS 等)积累,根际环境恶化,导致矿质离子和有益微量元素的吸收大大减少[6-9]。任一时期对小麦进行渍涝胁迫,均会严重抑制小麦对氮素的吸收和积累[10],使小麦籽粒最终氮素含量下降[11-12]。不同生育时期根际土壤渍水逆境显著影响冬小麦根系对氮、磷素的吸收、运转与分配,而不同生育时期根际土壤渍水逆境对钾素的吸收影响较小[13-14]。谢家琦等认为涝渍对小麦氮 、磷、钾素在地上部各器官中的分配比例的影响各异,涝渍逆境导致根系、功能叶片氮 、磷积累量占单株总积累量的比例下降,茎秆和籽粒所占比例上升;而对钾在地上部各器官中的分配比例影响较小[15]。涝渍逆境导致作物减产的原因可能是由于土壤氧气亏缺,抑制了作物的主要代谢,改变了作物的营养状况和土壤养分的有效性,或是由于较低的土壤氧化还原电位使得营养的吸收与积累的下降[16-20]。而关于涝渍对夏玉米氮 、磷、钾等养分吸收与转运特性的影响鲜见报道,氮 、磷、钾等养分的吸收与利用与产量和品质密切相关[21-22],本论文在大田条件下,研究不同淹水时期和淹水持续时间对夏玉米氮、磷、钾的吸收与利用的影响,为减轻夏玉米涝渍胁迫造成危害的营养调控提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料与设计

本试验于 2011 ～2012 年在山东农业大学试验农场中进行,土壤类型为棕壤土,播种前 0—20 cm 土层有机质含量 10.71 g/kg,全氮 0.89 g/kg,速效磷 40.65 mg/kg,速效钾 86.15 mg/kg。每个小区的面积为 4 m ×4 m。在每个小区的四周挖深 2 m、宽 50 cm 的沟,放上事先做好的 PVC 板,然后将 4 块 PVC 板焊接、密封固定,每块 PVC 板长 4 m × 宽 2.3 m,其中地面以上保留 0.3 m,地下 2 m。播种前精细整地,造墒。6 月 16 日播种,种植密度 67500 株/hm^2,按 12000 kg/hm^2 的产量水平施用 N 300 kg/hm^2,P_2O_5 120 kg/hm^2,K_2O 240 kg/hm^2;氮肥为尿素(含 46% N, 652 kg/hm^2),磷肥为过磷酸钙(含 17% P_2O_5, 706 kg/hm^2),钾肥为氯化钾(含 60% K_2O, 400 kg/hm^2);氮肥分别于拔节期施入 40%,大喇叭口期施入 60%,磷肥和钾肥于播种前一次性施入。距离玉米种植行 10—15 cm 开沟施肥。按高产田水平进行田间管理。淹水处理期间保持水层 2—3 cm。试验处理见表 1。每个处理 3 次重复,随机排列。

表 1　2011 ～2012 年大田淹水试验处理

Table 1　Treatments of waterlogging experiment in 2011 and 2012

年 Year	处理代号 Code	生育期 Growth stage	淹水天数(d) Waterlogging days
2012	V3-3	三叶期 Three-leaf stage	3
	V3-6		6
2011 2012	V6-3	拔节期 Jointing stage	3
	V6-6		6
	10VT-3	开花后 10 d 10^{th} day after flowering	3
	10VT-6		6
	CK		

1.2　测定方法

1.2.1 干物质积累　分别于拔节期(V6)、大喇叭口期(V12)、开花期(VT)、乳熟期(R3)和成熟期(R6)取样 5 株,V6、V12 和 VT 将植株分为茎秆和叶片,乳熟期和成熟期将植株分茎秆、叶片、穗轴和籽粒,于 105℃杀青 30 min,80℃烘干至恒重,称重。

1.2.2 氮、磷、钾养分含量的测定　将粉碎后各器官样品称重 0.200 g,以 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后用 BRAN + LUEBBE III 型连续流动分析仪测定全氮、全磷含量;用 FP6410 型火焰光度计测定全钾含量。

1.2.3 测产　每小区收取中间 3 行的具有代表性的 30 个果穗自然风干,用于室内考种。

产量(kg/hm^2) = 收获穗数(ears/hm^2) × 穗粒

数×千粒重(g/1000 grains)/1000×(1-含水量%)/(1-14%)

1.3 数据分析

采用SigmaPlot 10.0进行数据处理、作图,采用SPSS 17.0软件进行数据统计和分析。因2011和2012年数据变化趋势基本一致,本文重点以2012年数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 淹水对夏玉米氮素积累与转运的影响

图1表明,淹水显著影响夏玉米氮(N)素的积累与转运,淹水胁迫后夏玉米的N素积累量显著下降,在成熟期ZD958的V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3和10VT-6处理的N素积累量较CK分别下降47.22%、50.55%、34.10%、47.00%、20.64%和28.20%,DH605的分别下降38.43%、42.86%、28.27%、39.81%、11.23%和16.41%。三叶期淹水对其影响最大,拔节期淹水次之,开花后10 d淹水对其影响最小,其影响随淹水持续时间的延长而加剧,淹水对ZD958的N素积累量的影响大于DH605。淹水胁迫后成熟期各器官的N素积累量较CK显著降低,ZD958的V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3和10VT-6处理的茎秆N素积累量较CK分别下降13.76%、19.28%、4.77%、15.28%、0.99%和6.75%,叶片N素积累量较CK分别下降17.26%、19.83%、10.39%、16.02%、2.26%和5.81%,穗轴N素积累量较CK分别下降38.70%、54.16%、38.01%、51.41%、22.86%和28.93%,籽粒N素积累量较CK分别下降54.97%、57.68%、40.15%、54.18%、25.15%和33.45%。可见,各器官的N素积累量均以三叶期淹水的最低,且淹水持续时间越长其下降幅度越大。在淹水胁迫条件下,不同处理间N素的分配比例不同,但并不改变各器官之间分配比例的大小次序。不同处理间的叶片、茎秆、穗轴和籽粒N素的分配趋势基本一致,均为穗轴N素积累量<茎秆N素积累量<叶片N素积累量<籽粒N素积累量,但淹水胁迫后茎秆、叶片和穗轴的N素积累量占总N素积累量的比例与CK相比有所上升,而籽粒N素积累量占总N素积累量的比例显著下降,且淹水时间越长对其影响越显著(表2)。淹水胁迫后,茎秆和叶片中的N素含量较CK有所上升,ZD958的V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3和10VT-6处理的茎秆N含量较CK分别提高了5.35%、8.73%、4.61%、6.68%、0.71%和1.07%,叶片N含量分别提高了0.69%、8.40%、0.73%、7.23%、0.57%和3.27%,但淹水3 d与CK之间差异不显著。淹水后穗轴和籽粒中的N素含量较CK显著下降,穗轴的N素含量较CK分别下降17.54%、34.86%、26.50%、31.78%、10.23%和12.53%,籽粒的N素含量较CK分别下降31.36%、25.16%、19.02%、26.46%、10.93%和13.37%。DH605的变化趋势与ZD958的一致(表3)。

2.2 淹水对夏玉米磷素积累与转运的影响

淹水对磷(P)素的积累与转运具有显著影响,淹水后各生育时期的P素积累量显著降低,淹水后P素的积累速率也显著降低。三叶期淹水的影响最大,拔节期淹水次之,开花后10 d淹水对其影响较小,其影响随淹水持续时间的延长而加剧,在成熟期ZD958和DH605的V3-6处理的P素积累量较CK

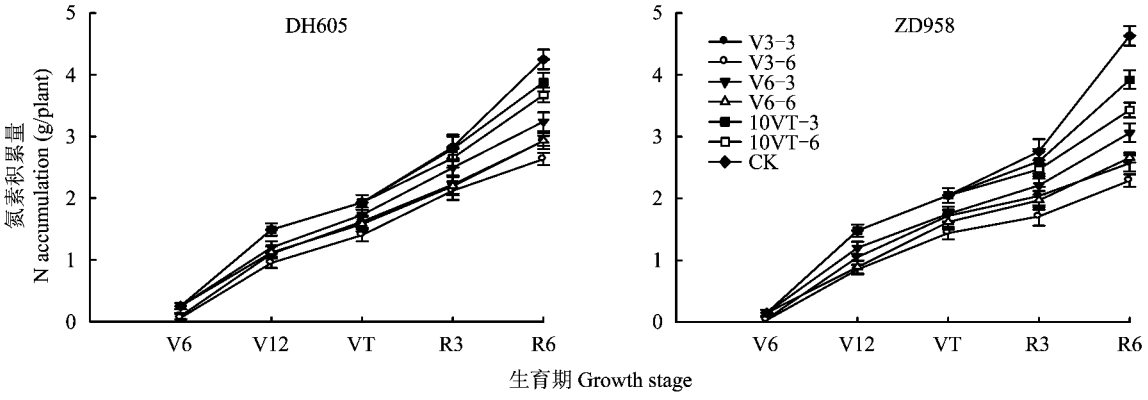

图1 淹水对夏玉米氮素积累的影响

Fig.1 Effect of waterlogging on the N accumulation of summer maize

表 2　淹水对成熟期夏玉米氮素积累(g/plant)与分配(%)的影响

Table 2　Effect of waterlogging on N accumulation (g/plant) and distribution proportion (%) of N in summer maize at the maturity stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	总积累量 Total	茎 Stem		叶 Leaf		轴 Cob		籽粒 Grain	
			(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)
DH605	V3-3	2.15 cd	0.28 bc	12.82	0.35 bc	16.14	0.08 bc	3.70	1.45 cd	67.34
	V3-6	2.02 d	0.26 c	12.80	0.34 c	16.69	0.06 c	2.95	1.36 d	67.55
	V6-3	2.69 bc	0.30 ab	11.33	0.38 abc	14.00	0.08 bc	3.00	1.93 bc	71.67
	V6-6	2.16 cd	0.27 bc	12.54	0.35 bc	16.31	0.06 c	2.92	1.48 cd	68.23
	10VT-3	3.24 b	0.32 a	9.79	0.41 a	12.68	0.10 ab	3.10	2.41 b	74.44
	10VT-6	2.93 b	0.30 ab	10.19	0.40 ab	13.51	0.09 abc	3.15	2.14 b	73.15
	CK	4.08 a	0.32 a	7.79	0.42 a	10.39	0.13 a	3.09	3.22 a	78.74
ZD958	V3-3	2.39 d	0.21 b	8.61	0.47 abc	17.36	0.14 bc	5.80	1.63 c	68.23
	V3-6	2.22 d	0.20 b	8.93	0.43 c	19.39	0.13 c	5.66	1.46 c	66.03
	V6-3	2.78 cd	0.27 a	9.68	0.50 a	17.94	0.15 bc	5.41	1.86 c	66.97
	V6-6	2.34 d	0.26 a	11.09	0.45 bc	19.45	0.14 bc	5.91	1.48 c	63.56
	10VT-3	3.44 ab	0.27 a	7.94	0.49 ab	14.31	0.21 a	6.11	2.47 ab	71.65
	10VT-6	3.24 bc	0.27 a	8.28	0.47 abc	14.50	0.19 ab	5.72	2.32 b	71.50
	CK	3.88 a	0.29 a	7.39	0.53 a	13.68	0.21 a	5.44	2.85 a	73.49

注(Note): 不同小写字母表示处理间差异显著达5%水平 Different small letters mean significantly different among treatments at the 5% level.

表 3　淹水对成熟期夏玉米氮素含量的影响(mg/g)

Table 3　Effect of waterlogging on N content of summer maize at the maturity stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	茎 Stem	叶 Leaf	轴 Cob	籽粒 Grain
ZD958	V3-3	5.46 ab	12.20 bc	3.95 bc	11.11 e
	V3-6	5.66 a	13.23 a	3.12 d	12.12 de
	V6-3	5.42 bc	12.21 bc	3.52 cd	13.11 cd
	V6-6	5.54 ab	13.06 a	3.27 d	11.91 e
	10VT-3	5.21 cd	12.19 c	4.30 a	14.42 b
	10VT-6	5.23 cd	12.53 b	4.19 b	14.03 bc
	CK	5.17 d	12.12 c	4.79 a	16.19 a
DH605	V3-3	3.98 d	16.50 b	5.61 bc	13.60 b
	V3-6	4.33 c	17.53 a	5.56 c	15.01 a
	V6-3	4.72 b	16.05 b	6.02 b	13.76 b
	V6-6	5.16 a	16.82 b	5.81 bc	13.55 b
	10VT-3	4.40 c	14.41 c	6.97 a	15.63 a
	10VT-6	4.52 bc	14.84 c	6.87 a	15.79 a
	CK	4.34 c	14.66 c	7.08 a	14.54 ab

注(Note): 不同小写字母表示处理间差异显著达5%水平 Different small letters mean significantly different among treatments at the 5% level.

分别降低36.50%和45.50%(图2)。淹水胁迫后成熟期各器官的P素积累量较CK显著降低,ZD958的V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3和10VT-6各处理的茎秆P素积累量较CK分别下降15.99%、20.09%、6.95%、9.78%、1.77%和4.29%,叶片P素积累量较CK分别下降23.35%、17.61%、27.35%、36.56%、13.21%和5.54%,穗轴P素积累量较CK分别下降40.57%、45.25%、25.38%、40.21%、18.07%和29.08%,籽粒P素积累量较CK分别下降42.70%、45.44%、32.09%、46.07%、16.37%和24.84%。可见,三叶期淹水对其影响最大,并随淹水持续时间的越长而加剧,淹水后籽粒P素积累量较CK的下降率最大。在淹水胁迫下,不同处理间P素的分配比例不同,但并不改变各器官之间分配比例的大小次序。不同处理间的叶片、茎秆、穗轴和籽粒P素的分配趋势基本一致,P素积累量均为穗轴<叶片<茎秆<籽粒,且茎秆和籽粒P素的分配比例较大,但淹水后茎秆、叶片和穗轴的P素积累量占总P素积累量的比例与CK相比有所上升,而籽粒P素积累量占总P素积累量的比例较CK有所下降,且淹水持续时间越长,影响越显著(表4)。淹水胁迫后,茎秆和叶片中的

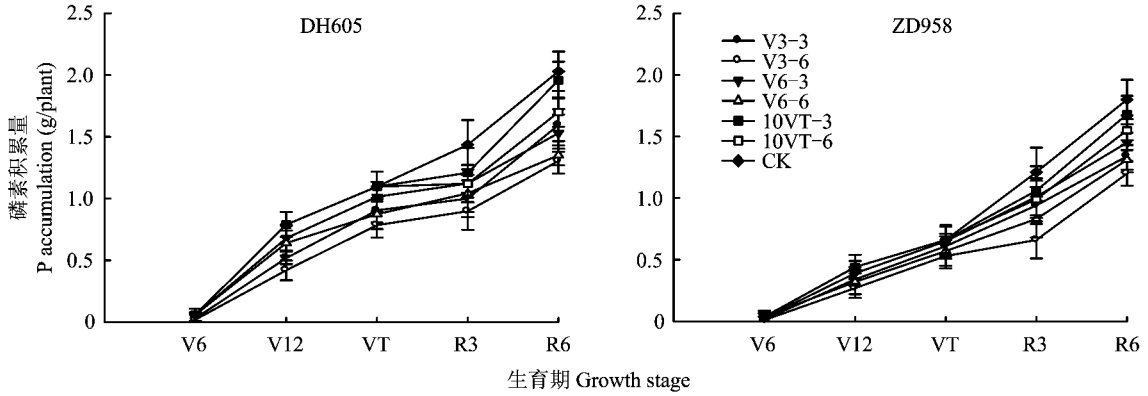

图2 淹水对夏玉米磷素积累的影响

Fig. 2 Effect of waterlogging on the P accumulation of summer maize

表4 淹水对成熟期夏玉米磷素积累(g/plant)与分配(%)的影响

Table 4 Effect of waterlogging on P accumulation (g/plant) and distribution proportion (%) in summer maize at the maturity stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	总积累量 Total	茎 Stem		叶 Leaf		轴 Cob		籽粒 Grain	
			(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)
ZD958	V3-3	1.10 de	0.18 bc	16.00	0.16 bcd	14.60	0.09 b	8.08	0.68 b	61.32
	V3-6	1.07 e	0.17 c	15.73	0.17 bcd	16.22	0.08 b	7.70	0.64 b	60.35
	V6-3	1.26 cd	0.20 ab	15.49	0.15 cd	12.10	0.11 ab	8.87	0.80 ab	63.54
	V6-6	1.05 e	0.19 abc	18.07	0.13 d	12.70	0.09 b	8.55	0.64 b	60.68
	10VT-3	1.50 ab	0.21 a	13.77	0.18 abc	12.16	0.12 ab	8.20	0.99 ab	65.87
	10VT-6	1.39 bc	0.20 ab	14.43	0.20 ab	14.24	0.11 ab	7.64	0.89 ab	63.68
	CK	1.74 a	0.21 a	11. 90	0.21 a	12.04	0.15 a	8.66	1.18 a	67.40
DH605	V3-3	1.16	0.19 bc	16.33	0.17 ab	14.65	0.12	10.16	0.68 c	58.86
	V3-6	0.97 d	0.17 c	17.73	0.14 c	14.76	0.09 c	9.74	0.56 c	57.77
	V6-3	1.29 c	0.22 ab	17.21	0.18 ab	13.92	0.13 ab	10	0.76 bc	58.87
	V6-6	1.13 cd	0.20 abc	17.69	0.16 bc	14.01	0.12 bc	10.74	0.65 c	57.56
	10VT-3	1.49 b	0.22 ab	15.01	0.18 ab	11.85	0.16 ab	10.51	0.93 ab	62.63
	10VT-6	1.53 b	0.22 ab	14.02	0.18 ab	11.73	0.12 bc	7.58	1.02 ab	66.48
	CK	1.78 a	0.23 a	12.81	0.19 a	10.65	0.17 a	9.39	1.20 a	67.15

注(Note):不同小写字母表示处理间差异显著达5%水平 Different small letters mean significantly different among treatments at the 5% level.

P 素含量较 CK 有所上升,ZD958 的 V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3 和 10VT-6 处理的茎秆 P 含量较 CK 分别提高了 8.07%、12.77%、7.63%、17.10%、5.31%和 8.81%,叶片 P 含量分别提高了 21.46%、34.69%、10.29%、10.01%、17.42%和 29.33%。淹水后穗轴和籽粒中的 P 素含量较 CK 显著下降,穗轴的 P 素含量较 CK 分别下降 23.02%、25.09%、14.81%、19.16%、8.19%和 15.96%,籽粒的 P 素含量较 CK 分别下降 12.47%、3.30%、7.91%、13.25%、0.27%和 1.94%,但开花后 10 d 淹水对其的影响差异不显著。DH605 的变化趋势与 ZD958 的一致(表 5)。

表 5　淹水对成熟期夏玉米磷素含量的影响(mg/g)

Table 5　Effect of waterlogging on P content of summer maize at the maturity stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	茎 Stem	叶 Leaf	轴 Cob	籽粒 Grain
ZD958	V3-3	3.49 abc	5.65 b	4.42 bc	5.18 d
	V3-6	3.68 ab	6.80 a	4.30 c	5.72 b
	V6-3	3.48 bc	4.95 cd	4.89 b	5.45 c
	V6-6	3.87 a	4.93 cd	4.64 bc	5.14 d
	10VT-3	3.39 bc	5.38 bc	5.27 a	5.90 a
	10VT-6	3.52 ab	6.28 a	4.82 b	5.80 ab
	CK	3.21 c	4.44 d	5.74 a	5.92 a
DH605	V3-3	3.67 cd	6.07 a	4.78 de	5.70 c
	V3-6	3.77 bc	5.84 ab	4.19 f	5.74 bc
	V6-3	3.90 ab	5.67 b	5.17 bcd	5.62 c
	V6-6	3.99 a	5.77 b	5.12 cd	5.94 a
	10VT-3	3.60 cd	5.20 c	5.19 bcd	5.91 ab
	10VT-6	3.62 cd	5.21 c	4.42 ef	5.94 a
	CK	3.59 d	5.19 c	5.62 a	6.11 a

注(Note): 不同小写字母表示处理间差异显著达 5% 水平 Different small letters mean significantly different among treatments at the 5% level.

2.3　淹水对夏玉米钾素积累与转运的影响

淹水对两品种钾(K)素的积累趋势无显著影响,各处理的 K 素积累趋势一致,呈现先增长后降低的趋势,在 R3 时 K 素积累量达到最大。不同淹水时期和不同淹水持续时间对植株的 K 素积累有显著影响,淹水后植株在各生育时期的 K 素积累量显著减少,K 素积累速率显著降低。不同的淹水处理时期对其的影响不同,具体的影响程度表现为:三叶期 > 拔节期 > 开花后 10 d。随着淹水持续时间的增加,夏玉米 K 素积累量显著降低。成熟期 ZD958 的 V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3 和 10VT-6 处理的 K 素积累量较 CK 分别下降 17.63%、27.21%、13.40%、24.36%、7.41%和 11.52%,DH605 的较 CK 分别下降 24.19%、32.53%、14.57%、24.01%、1.96%和 6.98%(图 3)。此外,淹水后器官的 K 素积累量较 CK 显著降低,三叶期淹水对其的影响最大,拔节期淹水次之,开花后 10 d 淹水对其的影响较小,且其影响随淹水持续时间的延长而加剧。成熟期 ZD958 的 V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3 和 10VT-6 各处理的茎秆 K 素积累量较 CK 分别下降 3.57%、15.72%、5.39%、13.69%、0.23%和 2.92%,叶片 K 素积累量较 CK 分别下降 9.04%、22.23%、7.20%、20.55%、1.74%和 8.20%,穗轴 K 素积累量较 CK 分别下降 22.94%、4.32%、13.09%、13.64%、10.67%和 2.57%,籽粒 K 素积累量较 CK 分别下降 41.02%、53.72%、28.81%、45.05%、20.22%和 28.55%。在淹水胁迫下,不同处理间的叶片、茎秆、穗轴和籽粒 K 素的分配趋势基本一致,K 素积累量均为穗轴 < 叶片 < 籽粒 < 茎秆。淹水后茎秆、

叶片和穗轴的K素积累量占总K素积累量的比例较CK有所上升,而籽粒K素积累量占总K素积累量的比例较CK相比下降,且淹水持续时间越长,影响越显著(表6)。此外,淹水胁迫后茎秆、叶片和穗轴中的K素含量较CK有所上升,ZD958的V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3和10VT-6处理的茎秆K含量较CK分别提高了14.90%、12.12%、3.49%、7.92%、0.99%和4.47%,叶片K含量分别提高了10.74%、6.68%、5.28%、3.09%、1.62%和1.92%,穗轴的K素含量较CK分别提高了1.69%、25.05%、1.10%、15.96%、1.98%和15.02%。淹水后籽粒中的K素含量较CK显著下降,各处理较CK分别下降10.17%、18.21%、3.74%、11.88%、5.13%和7.04%(表7)。可见,三叶期淹水对其的影响最大,淹水持续时间越长其影响越显著,但不同生育时期淹水3 d对穗轴的K含量影响之间差异不显著,DH605的变化趋势与ZD958的一致。

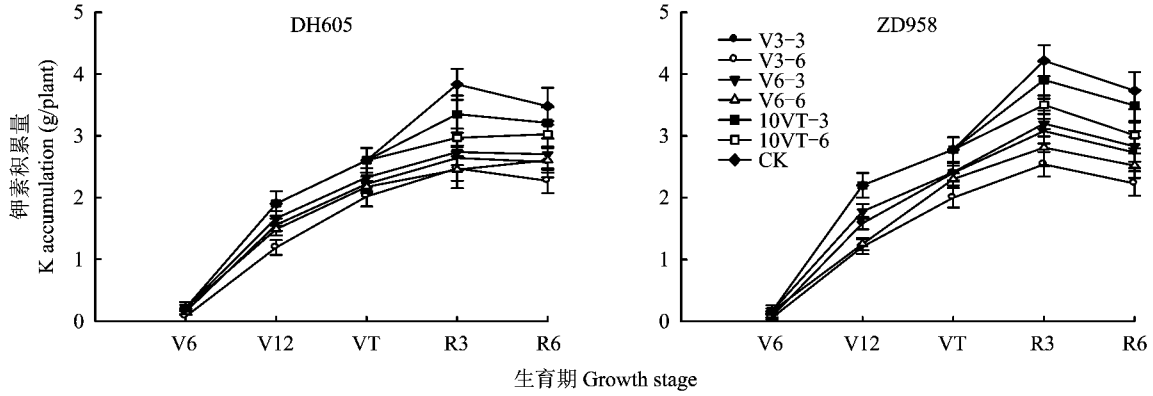

图3 淹水对夏玉米钾素积累的影响

Fig. 3 Effect of waterlogging on the K accumulation of summer maize

表6 淹水对成熟期夏玉米钾素积累(g/plant)与分配(%)的影响

Table 6 Effect of waterlogging on K accumulation (g/plant) and distribution proportion (%) in summer maize at the maturity stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	总积累量 Total	茎 Stem		叶 Leaf		轴 Cob		籽粒 Grain	
			(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)
ZD958	V3-3	2.65 bcd	1.25 ab	47.01	0.60 b	22.64	0.24 c	9.01	0.57 cd	21.35
	V3-6	2.34 d	1.09 e	46.49	0.51 c	21.9	0.30 ab	12.66	0.44 d	18.96
	V6-3	2.79 bcd	1.22 b	43.87	0.61 b	21.96	0.27 bc	9.66	0.68 bc	24.51
	V6-6	2.44 cd	1.12 d	45.82	0.52 c	21.53	0.27 bc	10.99	0.53 cd	21.66
	VT-3	2.98 ab	1.29 a	43.27	0.65 a	21.75	0.28 ab	9.29	0.77 ab	25.69
	VT-6	2.85 abc	1.26 ab	44.06	0.61 b	21.27	0.30 ab	10.6	0.69 bc	24.07
	CK	3.22 a	1.29 a	40.3	0.66 a	20.54	0.31 a	9.62	0.96 a	29.8
DH605	V3-3	2.08 bc	0.78 b	37.46	0.51 bc	24.30	0.25 c	12.13	0.54 bcd	26.11
	V3-6	1.86 c	0.72 b	38.82	0.43 d	23.24	0.26 c	14.09	0.44 d	23.85
	V6-3	2.35 ab	0.93 a	39.45	0.47 cd	20.07	0.27 bc	11.65	0.68 bc	28.84
	V6-6	2.09 bc	0.91 a	43.61	0.43 d	20.41	0.26 c	12.43	0.49 cd	23.55
	VT-3	2.70 a	0.94 a	34.75	0.70 a	25.87	0.31 a	11.39	0.75 ab	27.99
	VT-6	2.56 a	0.92 a	36.00	0.66 a	25.67	0.30 ab	11.57	0.68 bc	26.76
	CK	2.75 a	0.95 a	34.49	0.55 b	19.93	0.30 ab	10.83	0.95 a	34.75

注(Note):不同小写字母表示处理间差异显著达5%水平 Different small letters mean significantly different among treatments at the 5% level.

表 7　淹水对成熟期夏玉米钾素含量的影响 (mg/g)

Table 7　Effect of waterlogging on K content of summer maize at the maturity stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	茎 Stem	叶 Leaf	轴 Cob	籽粒 Grain
ZD958	V3-3	24.68 a	21.08 a	11.84 c	4.34 b
	V3-6	23.90 a	20.17 ab	15.53 a	3.95 c
	V6-3	21.76 c	19.87 bc	11.77 c	4.65 ab
	V6-6	22.81 b	19.42 bcd	13.85 b	4.26 bc
	10VT-3	21.21 c	19.13 cd	11.88 c	4.58 ab
	10VT-6	21.98 bc	19.19 bcd	13.70 b	4.49 ab
	CK	21.00 c	18.82 d	11.64 c	4.83 a
DH605	V3-3	15.13 cd	17.72 b	10.25 bc	4.54 b
	V3-6	15.78 bc	17.59 b	11.59 a	4.54 b
	V6-3	16.23 b	15.16 c	10.94 abc	5.00 a
	V6-6	18.15 a	15.80 c	10.94 abc	4.49 b
	10VT-3	15.09 d	20.39 a	10.17 bc	4.78 ab
	10VT-6	15.50 bc	19.38 a	10.97 ab	4.66 ab
	CK	14.88 d	15.12 c	9.97 c	4.86 ab

注(Note): 不同小写字母表示处理间差异显著达 5% 水平 Different small letters mean significantly different among treatments at the 5% level.

2.4　淹水对夏玉米产量和干物质积累与分配的影响

如图 4 所示,淹水胁迫后植株的干物质积累量显著减少,干物质积累速率显著降低,不同淹水时期和淹水持续时间对干物质积累的影响不同,不同淹水处理的影响程度表现为: 三叶期淹水 > 拔节期淹水 > 开花后 10 d 淹水,其影响随着淹水持续时间的延长而加剧。V3-6 处理造成的影响最显著,成熟期 DH605 和 ZD958 的干物质积累量较 CK 分别下降 41.61% 和 37.30%。此外,淹水显著影响夏玉米花前和花后干物质的积累量以及花后干物质所占比例。三叶期和拔节期淹水显著影响花前干物质的积累,DH605 的 V3-3、V3-6、V6-3 和 V6-6 的花前干物质积累量较 CK 分别下降 24.57%、33.28%、10.74% 和 18.53%, ZD958 分别下降 21.70%、38.71%、15.87% 和 24.22%。且淹水显著降低花后干物质的积累量,DH605 的 V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3 和 10VT-6 较 CK 分别下降 34.41%、45.97%、30.46%、44.23%、21.22% 和 29.40%, ZD958 分别下降 32.31%、36.54%、22.39%、36.45%、17.92% 和 27.38%。开花后 10 d 淹水显著影响花后干物质积累量所占总干重的比例,且淹水时间越长,所占比例越小。淹水胁迫后,各处理间的干物质分配比例发生显著变化,但并不改变各器官之间分配比例的大小次序。不同处理间的叶片、茎秆、穗轴和籽粒的干物质分配趋势基本一致,干重均为穗轴 < 叶片 < 茎秆 < 籽粒,三叶期淹水 6 d 对各器官干物质重的影响最大,成熟期 ZD958 和 DH605 的茎秆、叶片、穗轴、籽粒的干重较 CK 分别下降 25.93%、30.14%、27.46%、43.39% 和 28.28%、32.27%、24.37%、50.28%。此外,淹水后茎秆、叶片以及穗轴干重占总干重的比例与对照相比有所上升,说明淹水对茎秆和叶片的干重比例存在正向的影响,其比例呈现相对增加的趋势。且淹水时期不同趋势也有所不同,并且淹水时间越长,相对增加的趋势越明显。而淹水后籽粒重占总干重的比例呈现减少的趋势。淹水对 DH605 影响的变化趋势与 ZD958 的变化趋势一致,但受影响程度大于 ZD958。淹水胁迫后夏玉米产量显著降低,ZD958 的 V3-3、V3-6、V6-3、V6-6、10VT-3 和 10VT-6 处理较 CK 分别减产 21.33%、35.22%、15.39%、33.20%、6.89% 和 12.49%, DH605 分别减产 23.20%、32.14%、19.66%、24.45%、7.54% 和 18.41%(表 8)。

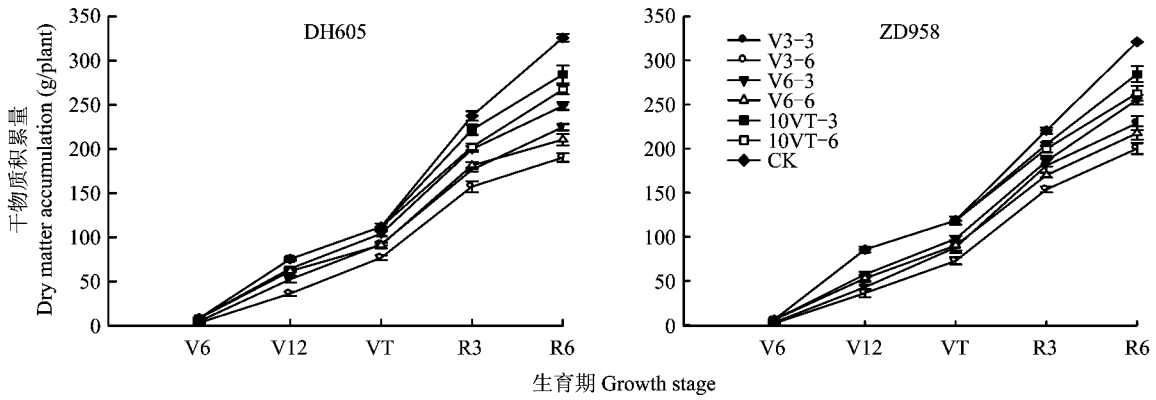

图4 淹水对夏玉米干物质积累的影响

Fig. 4 Effects of waterlogging on dry matter accumulation of summer maize

表8 淹水对夏玉米成熟期干物质积累(g/plant)与分配(%)的影响

Table 8 Effect of waterloggging on dry matter accumulation (g/plant) and distribution proportion (%) in summer maize at the maturity stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	总干重 Total dry matter (g/plant)	茎 Stem		叶 Leaf		轴 Cob		籽粒 Grain		产量 Yield (kg/hm²)
			(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	(g/plant)	(%)	
ZD958	V3-3	229.67 d	50.53 c	22.00	28.48 cd	12.40	20.18 bc	8.78	130.50 d	56.82	10765.10 e
	V3-6	202.61 e	45.60 d	22.51	25.45 d	12.56	19.10 c	9.43	112.46 e	55.51	9512.27 g
	V6-3	256.93 c	56.23 b	21.88	30.83 bc	12.00	22.89 ab	8.91	146.99 cd	57.21	11261.68 d
	V6-6	219.19 de	48.93 cd	22.32	27.00 c	12.32	19.33 c	8.82	123.93 de	56.54	10590.97 f
	10VT-3	285.21 b	60.85 a	21.34	33.90 ab	11.89	23.32 ab	8.18	167.14 b	58.60	12960.64 b
	10VT-6	263.51 bc	57.10 ab	21.67	31.58 ab	11.98	22.05 bc	8.37	152.78 bc	57.98	11437.29 c
	CK	321.56 a	61.56 a	19.14	35.00 a	10.88	26.33 a	8.19	198.67 a	61.78	14017.73 a
DH605	V3-3	224.72 d	51.63 c	22.98	28.59 c	12.72	24.67 bc	10.98	119.83 de	53.32	10942.88 e
	V3-6	190.27 e	45.65 d	23.99	24.52 d	12.89	22.55 c	11.85	97.55 f	51.27	9011.60 g
	V6-3	248.69 cd	57.10 b	22.96	31.10 bc	12.51	25.01 b	10.06	135.48 cd	54.48	11769.72 d
	V6-6	210.50 de	50.20 c	23.85	27.00 cd	12.83	23.73 bc	11.27	109.58 e	52.05	9291.55 f
	10VT-3	284.35 b	62.10 a	21.84	34.20 ab	12.03	30.19 a	10.62	157.86 b	55.52	12951.30 b
	10VT-6	267.15 bc	59.40 ab	22.23	33.88 b	12.68	26.98 ab	10.10	146.90 bc	54.99	12173.28 c
	CK	325.85 a	63.65 a	19.53	36.20 a	11.11	29.82 a	9.15	196.19 a	60.21	13910.08 a

注(Note): 不同小写字母表示处理间差异显著达5%水平 Different small letters mean significantly different among treatments at the 5% level.

3 讨论

淹水胁迫后N、P、K养分的积累与分配发生显著变化,不同生育时期淹水对养分的影响程度不同。任何时期对小麦进行渍涝胁迫,均会严重抑制其对N的吸收和积累[10],使小麦籽粒最终氮素含量下降[11-12]。魏凤珍等[13-14,24]研究认为不同生育时期根际土壤渍水显著影响冬小麦根系对N、P素的吸收、运转与分配,以孕穗期渍水逆境影响最大,其次为灌浆期和拔节期,而不同生育时期根际土壤渍水逆境对K素的吸收影响较小。涝渍对N、P、K素在地上部各器官中的分配比例的影响各异,涝渍逆

境导致根系、功能叶片 N、P 积累量占单株总积累量的比例下降,茎秆和籽粒所占比例上升;而对 K 在地上部各器官中的分配比例影响较小[15]。本研究表明,淹水胁迫后夏玉米茎秆和叶片的养分积累量占总养分积累量的比例较 CK 升高,而籽粒养分的比例显著下降,且淹水持续时间越长对其影响越显著。不同生育时期淹水均显著降低了养分积累量,各器官养分的积累量较 CK 显著降低。涝渍胁迫后各器官氮磷钾积累的减少,影响了地上部光合和营养生理过程,削弱了植株光合产物的积累量和积累速度,进而影响正常的生长发育。功能叶片营养元素的亏缺不仅造成"库"的减少,也同时会影响"源"的正常光合性能及籽粒灌浆结实,籽粒千粒重也随之下降,导致产量显著下降。三叶期淹水对夏玉米养分积累的影响最显著,拔节期淹水次之,开花后 10 d 淹水造成的影响较小,其影响随淹水持续时间的延长而加剧。但淹水胁迫后,茎秆和叶片的养分含量较 CK 升高,籽粒的养分含量显著降低,说明淹水胁迫对茎秆和叶片养分吸收能力的影响较小,淹水显著减弱了茎秆和叶片中养分向籽粒的转移。

淹水胁迫后茎秆和叶片中的养分积累量显著降低,但其养分含量较 CK 显著升高,说明其养分含量的降低主要是由于淹水胁迫后干物质积累量显著降低。淹水胁迫后干物质的积累与分配发生显著变化,胡继超等[25]认为淹水后小麦各器官干物质积累量较 CK 显著下降,茎秆和叶干物质的分配比例均有增大的趋势。本研究表明,淹水胁迫后夏玉米各生育时期的干物质积累量显著降低。三叶期和拔节期淹水主要是影响花前干物质的积累,而开花后 10 d 淹水主要是影响花后干物质的积累。淹水胁迫后茎秆和叶片的干物质重占总干重的比例升高,而籽粒干物质重占总干重的比例降低。可见,淹水胁迫后茎秆和叶片的干物质积累量相对提高,而干物质从茎秆和叶片向籽粒的转移量显著降低,进而导致夏玉米产量显著下降。三叶期淹水对其的影响最显著,拔节期淹水次之,开花后 10 d 淹水的影响较小,其影响随淹水持续时间的延长而加剧。

4　结论

淹水胁迫显著影响夏玉米养分的吸收与转运,淹水胁迫后养分积累量显著降低,茎秆和叶片中养分向籽粒的转移量显著减少。三叶期淹水对其影响最显著,拔节期淹水次之,开花后 10 d 淹水对其影响较小,其影响随淹水持续时间的延长而加剧。

参 考 文 献:

[1] Li J C. Waterlogging physiology of wheat and its relation with wheat productivity[J]. Plant Physiol. Commun., 1997, 33(4): 304-312.

[2] 时明芝, 周保松. 植物涝害和耐涝机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(2): 209-210.
Shi M Z, Zhou B S. Research advance in physiological damage of flooding and waterlogging resistance[J]. J. Anhui Agric. l Sci., 2006, 34(2): 209-210.

[3] Yordanova R Y, Popova L P. Flooding-induced changes in photosynthesis and oxidative status in maize plants[J]. Acta Physiol. Plant, 2007, 29: 535-541.

[4] Christiane F, Trevor G, Sergey S. Nutritional and chlorophyll fluorescence responses of Luceme (*Medicago sativa*) to waterlogging and subsequent recovery[J]. Plant Soil, 2005, 270: 31-45.

[5] 宋凤斌, 王晓波. 玉米非生物逆境生理生态[M]. 北京: 科学出版社. 2005, 235-271.
Song F B, Wang X B. Abiotic Stress Physio-logical Ecology of Maize[M]. Beijing: Science Press. 2005, 235-271.

[6] Ashraf M, Habib-ur-Rehman. Interactive effects of nitrate and long-term waterlogging on growth, water relations, and gaseous exchange properties of maize (Zea mays L.)[J]. Plant Science, 1999,144 (1): 35-43.

[7] Li C, Jiang D, Wollenweber B *et al*. Waterlogging pretreatment during vegetative growth improves tolerance to waterlogging after anthesis in wheat[J]. Plant Sci., 2011, 180(5): 672-678.

[8] 李香颜, 刘忠阳, 李彤宵. 淹水对夏玉米性状及产量的影响试验研究[J]. 气象科学, 2011,31(1): 79-82.
Xiang Y L, Liu Z Y, Li T X. An impact test study of the flood disaster on summer corn's characters and yield[J]. Sci. Meteor. Sin., 2011, 31(1): 79-82.

[9] Changes of antioxidative enzyme and lipid preoxidation in leaves and roots of waterlogging-tolerant and waterlogging-sensitive maize genotypes at seedling stage[J]. Agric. Sci. Chin., 2010, 9(5): 651-661.

[10] 常江, 李金才. 渍水对小麦氮磷钾营养效应的研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(3): 423-427.
Chang J, Li J C. Study on influence of waterlogging on the effectiveness of nitrate, phosphorus and potassium to wheat nutrition[J]. Acta Pedol. Sin., 1999, 36(3): 423-427.

[11] 戴廷波, 赵辉, 荆奇, 等. 灌浆期高温和水分逆境对冬小麦籽粒蛋白质和淀粉含量的影响[J]. 生态学报, 2006(11): 3670-3676.
Dai T B, Zhao H, Jing Q *et al*. Effects of high temperature and water stress during grain filling on grain protein and starch formation in winter wheat[J]. Acta Ecol. Sin., 2006(11): 3670-3676.

[12] 范雪梅, 姜东, 戴廷波, 等. 花后干旱和渍水下氮素供应对小麦籽粒蛋白质和淀粉积聚关键调控酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1132-1141.
Fan X M, Jiang D, Dai T B *et al*. Effects of nitrogen rates on

activities of key regulatory enzymes for grain starch and protein accumulation in wheat grown under drought and waterlogging from anthesis to maturity[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(6): 1132-1141.

[13] 魏凤珍, 李金才, 尹钧, 等. 不同生育时期根际土壤渍水逆境对冬小麦N、P、K素营养的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 162-165.
Wei F Z, Li J C, Yin J *et al*. Effects of waterlogging stress on nitrogen and phosphorus, potassium nutrition in winter wheat at different stages[J]. J. Soil Wheat Cons., 2006, 20(3): 162-165.

[14] 魏凤珍, 李金才, 李磊, 等. 土壤渍水对孕穗期冬小麦氮磷钾营养的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6): 556-560.
Wei F Z, Li J C, Li L *et al*. Effects of waterlogging on nitrogen and phosphorus and potassium nutrition in winter wheat at booting stage[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(6): 556-560.

[15] 谢家琦, 李金才, 魏凤珍. 花后渍水逆境对冬小麦产量及氮磷钾营养状况的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 425-429.
Xie J Q, Li J C, Wei F Z. Effects of post-anthesis waterlogging stress on economic yield and nitrogen, phosphorus, potassium nutrition state in winter wheat[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2008, 24(7): 425-429.

[16] Stephen P. Milroy, Michael P. Bange, Pongmanee Thongbai. Cotton leaf nutrient concentrations in response to waterlogging under field conditions[J]. Field Crops Res., 2009, 113: 246-255.

[17] 石岩, 林琪, 李素美, 等. 土壤水分胁迫对小麦养分分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 50-56.
Shi Y, Lin Q, Li S M *et al*. Effect of soil water stress on nutrient distribution and yield of wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(1): 50-56.

[18] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对高产夏玉米抗倒伏性能的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2440-2448.
Ren B Z, Zhang J W, Li X *et al*. Effects of waterlogging on stem lodging resistance of summer maize under field conditions[J]. Sci. Agric. Sin., 2013, 46(12): 2440-2448.

[19] 周苏玫, 王晨阳, 贺德先. 土壤渍水对冬小麦根系生长及营养代谢的影响[J]. 作物学报, 2001, 7(5): 674-679.
Zhou S M, Wang C Y, He D X. Effect of waterlogging on the growth and nutrient metabolism of the root system of winter wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2001, 7(5): 674-679.

[20] Tan W, Liu J, Jing Q *et al*. Alterations in Photosynthesis and antioxidant Enzyme activity in Winter wheat subjected to Post-anthesis waterlogging[J]. Photosynthetica, 2008, 46(1): 21-27.

[21] Milroy S P, Bange M P, Thongbai P. Cotton leaf nutrient concentrations in response to waterlogging under field conditions[J]. Field Crops Res., 2009, 113: 246-255.

[22] Araki H, Hamada A, Hossain M A *et al*. Waterlogging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling[J]. Field Crops Res., 2012, 137: 27-36.

[23] Stieger P A. Feller U. Nutrient accumulation and translation in maturing wheat plants grown on waterlogging soil[J]. Plant Soil, 1994, 160: 87-91.

[24] 魏凤珍, 李金才, 尹钧, 等. 孕穗期渍水逆境对冬小麦氮营养及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9): 127-129.
Wei F Z, Li J C, Yin J *et al*. Effects of waterlogging stress on nitrogen nutrition and yield in winter wheat at booting stage[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2006, 22(9): 127-129.

[25] 胡继超, 曹卫星, 姜东, 等. 小麦水分胁迫影响因子的定量研究 I. 干旱和渍水胁迫对光合、蒸腾及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2004, 3(4): 315-320.
Hu J C, Cao W X, Jiang D *et al*. Quantification of water stress factor for crop growth simulation I. Effects of drought and waterlogging stress on photosynthesis, transpiration and dry matter partitioning in winter wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2004, 3(4): 315-320.