

淹水胁迫对不同土壤类型养分及玉米 苗期养分吸收分配的影响

张 星, 赵向阳, 管艳霞, 王秀玲, 张学林, 李潮海, 王 群

(河南农业大学农学院/河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450002)

摘 要: 采用盆栽试验, 以潮土和砂姜黑土为对象, 研究淹水胁迫下不同土壤类型速效养分变化及玉米苗期养分吸收分配的特征。结果表明, 淹水胁迫导致两类土壤速效氮含量显著下降, 随着淹水时间延长降低幅度增大; 土壤速效磷含量呈倒抛物线型, 在淹水 3 d 达最低值; 速效钾含量呈上升趋势, 潮土速效钾含量呈曲线上升趋势, 砂姜黑土速效钾含量呈线性增加趋势。玉米养分及干物质的累积量和产量随着淹水时间延长而降低, 氮、磷、钾的累积量分别降低 21.37% ~ 72.22%、22.00% ~ 42.10% 和 11.71% ~ 60.36%; 干物质的累积量下降 37.49% ~ 57.17%; 玉米产量下降 9.05% ~ 30.15%, 砂姜黑土的下降幅度大于潮土。淹水减少了叶片和茎秆的养分及干物质累积量, 增加了茎秆中的养分和干物质分配比例, 平均增加 25.95% 和 43.34%。

关键词: 玉米; 淹水; 土壤类型; 速效养分; 干物质累积

中图分类号: S513.047

文献标识码: A

Effects of Waterlogging Stress on Available Nutrients and Maize Nutrient Absorption and Distribution in Different Soil Types at Seedling Stage

ZHANG Xing, ZHAO Xiang-yang, GUAN Yan-xia, WANG Xiu-ling,

ZHANG Xue-lin, LI Chao-hai, WANG Qun

(College of Agronomy, Henan Agricultural University/

Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The pool experiment with two soil types (fluvo-aquic soil, lime concretion black soil) was conducted to investigate changes of soil available nutrient and maize nutrient uptake and distribution under waterlogging stress at seedling stage. The results showed that waterlogging caused available N content decreasing significantly in two soil types, and the more decreasing with longer waterlogging. The content of available P in two soil types showed an inverted parabola, and reached the lowest value at the 3rd day of waterlogging. The available K content was "up-down-up" curve in fluvo-aquic soil, and it was increasing with extend of waterlogging in lime concretion black soil. The nutrient and dry matter accumulation and yield of maize decreased significantly with prolong of waterlogging time, the accumulation of N, P and K was decreasing respectively by 21.37%–72.22%, 22.00%–42.10% and 11.71%–60.36%, the accumulation of dry matter decreased by 37.49%–57.17%, and yield decreased by 9.05%–30.15%. The decreasing in fluvo-aquic soil was higher than that in lime concretion black soil. The nutrient and dry matter accumulation of leaves and stems was reduced, but the proportion of nutrients and dry matter in stems was increased under waterlogging stress by 25.95% and 43.34% in average.

Key words: Maize; Waterlogging; Soil type; Soil available nutrient; Dry matter accumulation

录用日期: 2017-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(31201162)、国家玉米产业技术体系建设专项(CARS-02-19)、省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室项目、河南省国际合作项目(124300510013)

作者简介: 张 星(1991-), 男, 河南三门峡人, 硕士, 研究方向为作物生理生态。Tel: 15939033711 E-mail: star1205@163.com

王 群为本文通讯作者。E-mail: wangqun177@163.com

我国是世界气候变化敏感区和脆弱区之一,随着全球气候持续变暖,极端气候变化对农业生产的影响越来越复杂^[1]。随着极端降水概率事件的增多,涝害已成为我国农业自然灾害中的第二大灾害,占自然灾害的28%左右,成灾率达3.63%,且有增长的趋势^[2,3]。近10年来我国农业水灾受灾面积92 148.68千hm²,占总受灾面积的23.92%左右^[4],使农作物减产率高达23.7%^[5]。黄淮海地区是我国主要的玉米产区之一^[6],在我国粮食安全中占有重要地位,该区域玉米在生长发育过程中极易受到渍涝灾害的影响,尤其在较黏重的土壤上更甚^[7],渍涝成为制约该区玉米生产的主要逆境因素之一^[8,9]。前人研究表明,淹水胁迫改变了土壤的水、气、热状况,降低土壤氧化还原电位(Eh),土壤通气状况恶化,使土壤温度升高,导致土壤氮素损失增强,速效氮含量下降,影响土壤养分的形态和转化^[10~16],如白浆土随着淹水时间的延长,土壤速效磷的含量显著增加^[17]。在水稻土淹水试验中,淹水后土壤磷的释放量均有不同程度下降^[18],且土壤交换性钾保持较高的水平^[19~20]。淹水可以减少土壤对外源钾素的固定,增加土壤中的有效钾含量^[21]。淹水不仅影响土壤速效养分的含量和转化,也影响根系对养分的吸收。研究表明,淹水因影响根系呼吸代谢^[22],导致对矿质离子和有益微量元素的吸收大大减少^[23~25],如小麦土壤渍水显著影响了小麦根系对氮、磷元素的吸收^[26],夏玉米不同时期淹水也显著降低植株氮、磷、钾养分累积量,以苗期影响最大^[27]。由于土壤质地、类型与其有效养分含量存在显著相关^[28,29],因此不同土壤的养分供应状况和作物生长发育不同,淹水后不同土壤类型其速效养分如何变化尚不清楚。目前大量研究多集中于稻田、湿地、沼泽地及淹水条

件下设施农业等土壤养分变化规律,对旱作土壤遭遇涝害后土壤速效养分的变化规律及玉米养分吸收分配特征研究甚少。因此,本研究以不同土壤类型为对象,研究淹水胁迫下不同土壤类型养分变化规律及植株养分吸收特征,为旱田涝害胁迫后采取科学的土壤和肥料调控措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2014~2015年在河南农业大学科教园区(北纬34°16′,东经113°14′,海拔94 m左右)进行,该区气候属暖温带半湿润大陆性气候,无霜期220 d,日照时数2 400 h,试验期间日平均温度25.6℃,月平均降雨量103.7 mm。

1.2 试验设计

试验设土壤类型和淹水天数2因子。主因子为土壤类型,设潮土(FS)和砂姜黑土(LS);副因子为淹水天数,设未淹水(CK);淹水1d(T1);淹水3d(T2);淹水5 d(T3),共8个处理,随机区组设计。采用池栽,池区面积为1.0 m×1.2 m,池深1.0 m,池壁厚7 cm,水泥砖砌成,水泥砌面底封,并做防水处理防治侧部渗漏。播种前,分别采集0~20 cm、21~40 cm、41~60 cm、61~80 cm、81~100 cm土层土壤,风干后按照原状土顺序分层装入池中,土壤容重与所取土壤基本相同,填土后对土壤进行灌水压实,供试土壤颗粒组成和基础肥力见表1。每个处理3次重复。试验淹水于夏玉米5叶期进行,在整个试验中,对照的土壤含水量保持在田间持水量的60%。在处理期间,淹水处理定期加水以保持水面,其他栽培管理同一般大田生产。

表1 供试土壤颗粒组成及养分含量
Table 1 The soil particle constituents and nutrients content in different soil types

土壤类型 Soil type	土壤颗粒组成(%) Constituents of soil particle			有机质(g/kg) Organic matter	速效氮(mg/kg) Available N	速效磷(mg/kg) Available P	速效钾(mg/kg) Available K
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm				
潮 土	12	31	60	9.47	30.57	11.45	125.44
砂姜黑土	28	37	36	16.24	43.44	20.58	167.72

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤速效养分测定

用土钻分别钻取0~20 cm、21~40 cm、41~60 cm、61~80 cm土层土样,于室内自然风干,用于测定速效氮、速效磷、速效钾。土壤速效氮测定采用

碱解扩散法,土壤速效磷测定采用钼锑抗比色法,土壤速效钾测定采用火焰光度法^[30]。

1.3.2 植株养分

每个小区选取有代表性的植株3株,于105℃下杀青30 min,65℃烘干至恒重,称重并粉碎过筛,用

于测定植株N、P、K含量。采用AA-3连续流动分析仪测定植株N含量,采用钼锑抗比色法测定植株P含量,采用火焰光度计法测定植株K含量。

1.4 数据处理与分析

数据采用Microsoft Excel 2007软件处理和Sigmaplot作图,采用SPSS软件对试验数据进行差异显著性分析。因2014和2015年数据变化趋势基本一致,本文以2014年数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 淹水胁迫下不同土壤类型速效养分的变化特征

2.1.1 淹水胁迫下不同土壤类型速效氮的变化特征

由表2可以看出,两种土壤类型速效氮含量均随土层深度的增加呈递减趋势,不同类型不同土层间速效氮含量差异显著,且砂姜黑土各土层速效氮

含量均高于潮土。淹水胁迫降低了两类土壤速效氮含量,随着淹水时间延长速效氮含量越低,其中,淹水1、3、5 d速效氮含量平均较对照降低14.30%、15.45%和25.18%。淹水胁迫下潮土速效氮降低幅度显著大于砂姜黑土,淹水1~5 d潮土速效氮含量降幅为20.23%~37.16%,砂姜黑土降幅为8.36%~13.19%。不同土层之间比较,潮土0~80 cm土层速效氮随淹水时间增加而递减,淹水1、3、5 d,0~60 cm土层速效氮含量分别比对照减少16.34%、20.79%、35.25%,以41~60 cm土层降幅最大,降幅为23.42%~45.29%;砂姜黑土表现为0~20 cm土层速效氮含量随着淹水天数延长明显呈递减趋势,淹水1、3、5 d分别比对照减少4.35%、8.95%、13.49%。可见两类土壤速效氮含量对淹水胁迫的响应以潮土较为敏感。

表2 淹水胁迫下不同土壤类型速效氮的变化特征
Table 2 Changes of available nitrogen in different soil types under waterlogging stress mg/kg

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	土层深度 Soil depth			
		0~20 cm	21~40 cm	41~60 cm	61~80 cm
潮 土	CK	32.61 d	27.48 d	26.91 b	20.96 a
	T1	28.01 e	24.17 e	20.61 cd	13.34 b
	T2	25.81 e	23.87 e	19.24 d	14.88 b
	T3	21.14 f	20.47 f	14.72 e	11.84 b
砂姜黑土	CK	45.87 a	37.54 b	32.39 a	24.5 a
	T1	43.87 ab	40.17 a	23.69 bc	21.14 a
	T2	41.76 bc	35.42 bc	27.05 b	24.42 a
	T3	39.68 c	34.85 c	24.68 b	22.87 a

注:同列中不同字母表示差异显著(P<0.05)。下表、下图同。
Note: Different letters in the same column meant significant difference(P<0.05). The same below.

2.1.2 淹水胁迫下不同土壤类型速效磷的变化特征

由表3可以看出,两种土壤类型速效磷含量均随土层深度的增加呈递减趋势,依次为61~80 cm<41~60 cm<21~40 cm<0~20 cm,其中砂姜黑土各土层速效磷含量显著高于潮土。淹水胁迫下两种土壤类型速效磷含量呈“升-降-升”的变化趋势,其中潮土淹水1 d比对照增加了23.42%,随后下降;淹水3 d降到最低值13.20 mg/kg,比对照降低了24.14%。砂姜黑土淹水1、3、5 d分别比对照增加了78.88%、4.34%、35.46%。不同土层间比较,淹水胁迫后两种类型土壤速效磷含量变化表现为61~80 cm<41~60 cm<21~40 cm<0~20 cm,且淹水胁迫对各土层速效磷含量的影响程度随土层由上至下依次递减。

2.1.3 淹水胁迫下不同土壤类型速效钾的变化特征

土壤速效钾含量随土层变化依次表现为61~80 cm<41~60 cm<21~40 cm<0~20 cm(表4),两类土壤砂姜黑土速效钾含量大于潮土,且差异显著。潮土速效钾含量随着淹水时间的增加呈“升-降-升”变化,淹水1 d速效钾含量比对照上升3.01%;淹水3 d时降到最低,为114.02 mg/kg,比对照降低12.98%,且差异显著。砂姜黑土速效钾含量则随着淹水时间增加呈递增趋势,淹水1、3、5 d分别增加了3.81%、23.45%、38.25%,且淹水3、5 d时与对照差异显著。淹水胁迫均增加了两种土壤类型0~20 cm土层速效钾含量,其中,潮土淹水1、3、5 d分别比对照增加47.68%、7.62%、44.70%;砂姜黑土增加26.72%、62.65%、82.81%,潮土速效钾含量对淹水反应较为敏感。

表3 淹水胁迫下不同土壤类型速效磷的变化特征

Table 3 Changes of available phosphorus in different soil types under waterlogging stress

mg/kg

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	土层深度 Soil depth			
		0 ~ 20 cm	21 ~ 40 cm	41 ~ 60 cm	61 ~ 80 cm
潮 土	CK	22.65 f	19.47 ef	14.40 d	13.08 c
	T1	34.35 d	21.09 de	16.67 c	13.78 bc
	T2	18.07 g	12.08 g	11.77 e	10.88 d
	T3	28.67 e	17.15 f	13.12 de	12.18 cd
砂姜黑土	CK	26.30 ef	22.73 c	20.83 b	10.98 d
	T1	50.87 a	42.74 a	33.65 a	17.35 a
	T2	42.44 c	17.07 f	12.15 e	12.68 c
	T3	47.02 b	32.67 b	14.76 d	15.05 b

表4 淹水胁迫下不同土壤类型速效钾的变化特征

Table 4 Changes of available potassium in different soil types under waterlogging stress

mg/kg

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	土层深度 Soil depth			
		0 ~ 20 cm	21 ~ 40 cm	41 ~ 60 cm	61 ~ 80 cm
潮 土	CK	149.27 e	119.91 e	110.67 d	144.29 b
	T1	220.44 c	147.95 d	94.91 e	76.63 e
	T2	160.65 de	107.89 f	92.78 e	94.76 d
	T3	216.01 c	105.40 f	100.12 de	86.86 de
砂姜黑土	CK	178.68 d	178.09 b	142.18 bc	132.42 c
	T1	226.44 c	160.26 c	138.45 c	130.27 c
	T2	290.62 b	177.91 b	152.76 b	158.13 a
	T3	326.65 a	225.18 a	172.13 a	148.90 ab

2.2 淹水胁迫对不同土壤类型玉米苗期养分累积与分配的影响

2.2.1 淹水胁迫对不同土壤类型玉米苗期养分累积量的影响

从图1可以看出,两种类型土壤玉米植株养分三元素累积量表现为氮>钾>磷,潮土玉米养分累积量小于砂姜黑土,平均少20.97%。淹水胁迫显著降低了玉米养分累积量,其中,氮累积量降低幅度最大,降低21.37%~72.22%,其次是磷和钾,降幅分别为22.00%~60.36%和11.71%~57.17%。淹水胁迫显著影响不同土壤类型玉米养分的累积量,潮土玉米氮、磷、钾累积量在淹水1 d下较对照下降21.37%、22.00%和11.71%;淹水3 d和5 d时累积量下降显著,氮累积量下降43.64%和58.68%,磷累积量下降36.75%和42.10%,钾累积量下降36.77%和47.25%。砂姜黑土上养分累积量在淹水1 d后下降显著,氮、磷、钾累积量分别下降34.47%、30.58%和24.88%;淹水3 d和5 d氮磷钾下降幅度分别为50.34%、72.22%、53.47%和60.36%、46.11%和57.17%,可见淹水对砂姜黑土上玉米氮、磷、钾累积

量的影响大于潮土。

2.2.2 淹水胁迫对不同土壤类型玉米苗期各器官养分分配的影响

淹水显著降低玉米各器官的养分累积(表5),其中叶片中的氮、磷、钾累积量分别降低24.97%~78.40%、26.49%~67.36%和17.03%~58.77%;茎秆中的氮磷钾累积量降低8.31%~54.35%、6.21%~44.01%和4.78%~55.10%,且随着淹水天数的延长降低幅度越大,淹水5 d时叶片和茎秆中的降幅达48.83%~78.40%和18.46%~55.10%,可见淹水对叶片养分累积的影响显著大于对茎秆的影响。不同土壤类型比较,砂姜黑土各器官的氮、磷、钾累积量大于潮土,且淹水胁迫对砂姜黑土各器官中养分累积量的影响大于潮土,淹水胁迫1~5 d砂姜黑土氮、磷、钾降幅分别为14.95%~78.40%、12.10%~67.36%和23.77%~58.77%;潮土氮、磷、钾降幅分别为8.31%~65.51%、6.21%~48.83%和4.78%~52.67%。两类土壤均表现出叶片对淹水胁迫的响应程度明显敏感于茎秆,淹水1~5 d砂姜黑土上的叶片和茎秆氮累积量降幅分别为41.22%~78.40%和14.95%~

54.35%；潮土上的叶片和茎秆中氮累积量降幅为24.97%~65.51%和8.31%~33.87%，磷、钾有类似的变化规律。

淹水胁迫影响着玉米茎叶中氮、磷、钾的分配比例,表现为叶片中氮、磷、钾累积量和分配比例大于茎秆,淹水胁迫后不同器官中的氮、磷、钾分配比例不同。茎秆中的分配比例平均增加25.95%,而叶片的分配比例下降9.67%,且淹水时间越长对其影响越显著,如淹水1~5 d叶片中氮的分配比例由70.62%降至61.33 %,降幅为13.15%,茎秆中的氮分

配比例由29.43%增至38.68%,增幅为24.63%;磷的分配比例在叶片由67.52%降至64.87%,降幅为3.92%,茎秆由32.49%升至36.77%,增幅为13.17%;钾的分配比例在叶片中由54.58%降至52.59%,降幅为3.65%,茎秆中由45.43%升至47.41%,增幅为4.36%。由此可见,淹水对叶片和茎秆中的氮、磷、钾分配比例的影响表现为氮>磷>钾。不同土壤类型比较,潮土叶片中氮、磷、钾的分配比例均大于砂姜黑土,茎秆中的氮、磷、钾分配比例表现为砂姜黑土大于潮土。

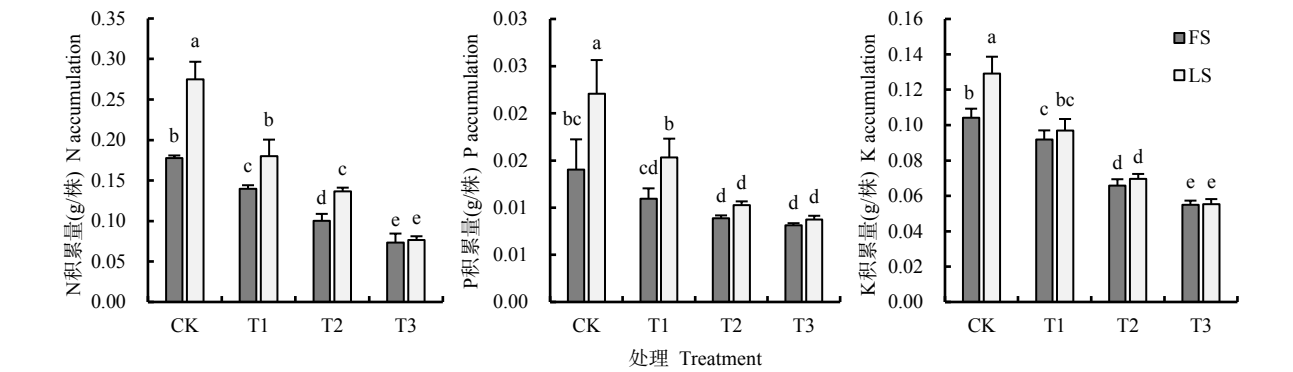


图1 淹水胁迫对不同土壤类型玉米苗期养分累积总量的影响

Fig.1 Effects of flooding stress on nutrient accumulation of maize in different soil types at seedling stage

表5 淹水胁迫对不同土壤类型玉米苗期养分累积与分配的影响

Table 5 Effects of waterlogging stress on nutrient accumulation and distribution of maize in different soil types at seedling stage

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	氮素 Nitrogen				磷素 Phosphorous				钾素 Potassium			
		茎 Stem		叶 Leaf		茎 Stem		叶 Leaf		茎 Stem		叶 Leaf	
		(g/株)	(%)	(g/株)	(%)	(g/株)	(%)	(g/株)	(%)	(g/株)	(%)	(g/株)	(%)
潮土	CK	0.038 4 d	21.63	0.139 3 b	78.37	0.003 1 bcd	21.98	0.010 9 b	78.02	0.045 1 b	43.11	0.059 0 b	56.89
	T1	0.035 2 d	25.25	0.104 5 cd	74.85	0.002 9 cd	26.58	0.008 0 cd	73.42	0.043 0 b	46.76	0.048 9 c	53.24
	T2	0.026 3 e	26.43	0.073 9 e	73.57	0.002 7 cd	30.69	0.006 1 de	69.31	0.031 1 cd	47.28	0.034 7 de	52.72
	T3	0.025 4 e	35.13	0.048 1 f	64.87	0.002 5 d	31.15	0.005 6 de	68.85	0.027 0 de	49.29	0.027 9 f	50.71
砂姜黑土	CK	0.070 6 a	25.68	0.204 2 a	74.32	0.006 6 a	30.28	0.015 5 a	69.72	0.056 2 a	43.5	0.073 0 a	56.5
	T1	0.060 1 b	33.61	0.120 0 bc	66.39	0.005 8 a	38.39	0.009 5 bc	61.61	0.042 8 b	44.09	0.054 2 bc	55.91
	T2	0.045 9 c	33.75	0.090 5 de	66.25	0.004 0 b	39.12	0.006 2 de	60.88	0.031 6 c	45.48	0.038 0 d	54.52
	T3	0.032 2 de	42.22	0.044 1 f	57.78	0.003 7 bc	42.38	0.005 0 e	57.62	0.025 2 e	45.53	0.030 1 ef	54.47

2.3 淹水胁迫对不同土壤类型玉米苗期干物质累积与分配的影响

淹水显著降低了不同土壤类型玉米的苗期干物质累积量(表6),平均降幅为38.42%~53.47%,处理间干物质累积量变化为CK>T1>T2>T3,且降幅随淹水时间延长而增大,淹水1 d和5 d分别比对照降低37.49%~39.35%和51.30%~55.63%,差异显著。不同土壤类型比较,潮土干物质累积量在淹水1、3、5 d较对照分别降低37.49%、45.75%、51.30%,砂姜黑土

较对照分别降低了39.35%、52.10%、55.63%,表现为淹水胁迫对砂姜黑土玉米干物质累积量的影响大于潮土。淹水也显著影响玉米各器官中干物质的累积与分配,叶片和茎秆中干物质累积量较对照分别降低44.97%~64.02%和15.37%~35.67%,随着淹水天数的延长降幅增大,淹水5 d时叶片和茎秆中干物质质量降幅达60.90%~64.02%和22.92%~35.67%,可见淹水对叶片干物质累积的影响显著大于对茎秆的影响。两类土壤以砂姜黑土玉米各器官的干物质

累积量及受淹水影响的程度大于潮土,淹水1~5 d砂姜黑土上玉米各器官干物质累积量降幅为25.34%~64.02%,潮土降幅为15.37%~60.90%,均表现出叶片对淹水胁迫的响应程度明显敏感于茎秆。淹水1~5 d砂姜黑土上叶片和茎秆的干物质累积量降幅分别为45.25%~64.02%和25.34%~35.67%,潮土上叶片和茎秆的干物质累积量降幅分别为44.97%~60.90%和15.37%~22.92%。

表6 淹水胁迫对不同土壤类型玉米苗期干物质累积与分配的影响
Table 6 Effects of waterlogging stress on dry matter accumulation and distribution of maize in different soil types at seedling stage

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	总干重(g/株) Total dry matter	茎 Stem		叶 Leaf	
			(g/株)	(%)	(g/株)	(%)
潮 土	CK	5.24 b	1.32 b	25.29	3.91 b	74.71
	T1	3.27 d	1.12 de	34.2	2.15 c	65.8
	T2	2.84 e	1.11 de	38.98	1.73 d	61.02
	T3	2.55 f	1.02 e	40.23	1.53 ef	59.77
砂姜黑土	CK	5.78 a	1.71 a	29.67	4.07 a	70.33
	T1	3.50 c	1.28 bc	36.44	2.23 c	63.56
	T2	2.76 e	1.18 cd	42.65	1.59 e	57.35
	T3	2.56 f	1.10 de	42.92	1.46 f	57.08

淹水胁迫影响玉米茎叶中物质分配比例,表现为增加了茎秆中的物质分配比例,降低叶片中的分配比例,苗期淹水后茎秆中的分配比例平均增加43.34%,叶片的分配比例下降16.19%,且淹水时间越长对其影响越显著。淹水1~5 d叶片中干物质的分配比例由64.68%降至58.43%,降幅为9.67%;茎秆中的干物质分配比例由35.32%增至41.58%,增幅为17.71%。不同土壤类型比较,潮土叶片中干物质的分配比例均大于砂姜黑土,砂姜黑土茎秆的干物质分配比例大于潮土。

2.4 淹水胁迫对不同土壤类型玉米产量的影响

从图2中可以看出,淹水显著降低不同土壤类型玉米产量,平均降幅为11.75%~27.37%,各处理间产量变化为CK>T1>T2>T3,且淹水胁迫时间越长,其产量降低幅度越大,淹水1 d和5 d分别比对照降低9.05%~14.44%和24.59%~30.15%,差异显著。不同类型土壤比较,淹水1、3、5 d下,潮土上玉米产量较对照分别降低9.05%、20.81%、24.59%,砂姜黑土上产量较对照分别降低14.44%、23.94%、30.15%,可见淹水胁迫对砂姜黑土上玉米产量的影响大于潮土。

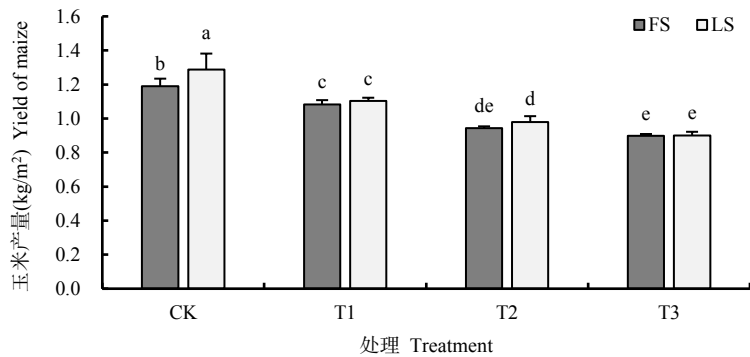


图2 淹水胁迫对不同土壤类型玉米产量的影响
Fig.2 Effect of flooding stress on maize yield in different soil types

3 结论与讨论

淹水胁迫显著影响土壤速效养分的有效性,以速效氮损失最为严重,速效磷呈曲线变化趋势,速效钾含量呈线性增加。两类土壤,潮土速效氮损失大

于砂姜黑土,潮土速效磷释放量显著低于砂姜黑土,速效钾含量砂姜黑土变幅大于潮土。淹水胁迫显著降低了玉米苗期植株养分及干物质累积量,减少了二者在叶片中的分配比例,增加了茎秆中的养分和干物质的分配比例,显著降低玉米产量。淹水胁迫

后土壤速效氮降低是造成玉米养分吸收量、干物质累积量和产量降低的主要原因,质地黏重是其另一个重要影响因素。

不同土壤类型由于其质地、机械组成、孔隙度不同,其养分含量存在明显差异^[30,31],土壤质地黏重的砂姜黑土氮含量大于潮土。淹水胁迫造成土壤速效氮的含量迅速下降,一方面是淹水使土壤处于还原状态,加剧反硝化作用造成铵态氮挥发损失;另一方面是淹水加剧了硝态氮随水分下渗淋失,造成土壤中以潜移态存在的有效氮大量损失,这与前人的研究结果一致^[32,33]。随着淹水天数的延长,土壤速效氮含量降幅增加,两类土壤潮土速效氮含量降幅显著大于砂姜黑土,表现为粘重的土壤氮损失程度较低,一方面土壤类型不同,其孔隙度不同,水分在土壤中下渗的影响不同^[34,35];另一方面与黏重土壤硝态氮淋失减少有关,这与 Beaudoin 等研究结论一致^[36]。

两种类型土壤速效磷的含量由上而下呈递减趋势,且砂姜黑土速效磷含量显著高于潮土。淹水胁迫下两类土壤上层的速效磷含量仍高于其下层,并没有表现出随着水分下移的变化趋势,说明磷素在土壤中极易被土壤颗粒所吸附,随水分移动性很小,与在水田土壤中的研究结果一致^[37,38]。本研究表明,淹水后土壤速效磷含量变化趋势为“升-降-升”,淹水初期速效磷含量上升,随后下降,继续淹水则含量升高,一方面与淹水处理后磷释放动力学特征为有关,前 25 h 为快反应阶段,磷释放速度较大,随后进入慢反应,逐渐达到最大释放量^[39],另一方面是淹水初期土壤磷素释放增强,当土壤速效磷含量达到较高浓度时,土壤吸附达到饱和,磷素在土壤中移动性增大,同时土壤磷素淋失的风险增加^[40~42],造成磷素的淋失。淹水 3 d 后速效磷含量下降,随着淹水持续到 5 d 时,由于淋失使土壤磷浓度的降低,进而刺激土壤磷的释放,速效磷含量进一步升高。尽管淹水 5 d 后速效磷含量上升,由于淋失部分速效磷使得淹水 5 d 的速效磷含量仍旧低于淹水 1 d,说明淹水不仅促进了土壤磷素的释放,也增大了土壤磷素的淋溶风险。不同类型土壤,速效磷含量升降幅度不同,可能由于土壤质地、机械组成不同导致不同类型土壤磷素淋溶阈值和磷素移动能力大小不同,表现出黏重的砂姜黑土淹水后土壤速效磷的变化幅度明显大于质地较轻的潮土,不同类型土壤磷素淋溶阈值和磷素移动能力大小仍需进一步量化。

土壤钾素在土壤中的垂直移动受地表温度、降水及土壤水分运动的影响,土壤含水量直接影响钾

素的固定和释放^[43,44]。本研究表明,淹水显著增加两类土壤的速效钾含量,尤其是 0~20 cm 土层速效钾含量,其原因是淹水促进速效钾的释放,交换性钾保持在较高的水平,促使缓效钾转化为速效钾,使速效钾含量升高。由于 0~20 cm 土层根系聚集,土壤钾素在运移过程中会与土壤及根系发生吸持反应,对其运移产生阻滞作用,造成 0~20 cm 土层速效钾含量显著升高,且阻滞作用的大小与土壤质地密切相关^[45]。本研究表明,淹水后砂姜黑土速效钾含量显著高于潮土,随淹水时间的延长砂姜黑土速效钾含量线性增加,潮土上呈“升-降-升”变化。由于淹水造成钾离子的淋失,因此淹水 3 d 后在 41~60 cm 土层出现速效钾含量小幅升高,并没有出现明显的富集层。

土壤质地类型不同对玉米养分吸收的影响不同。本研究表明,砂姜黑土玉米养分及干物质累积量显著高于潮土。淹水胁迫下两类土壤上玉米植株养分及干物质的累积量大幅下降,表现出砂姜黑土玉米养分及干物质累积量大于潮土。淹水对砂姜黑土玉米植株养分和干物质累积量的降幅显著高于潮土。淹水影响了氮、磷、钾及干物质在地上部茎叶中的分配比例,导致叶片中氮磷和干物质的分配比例下降,而茎秆中的比例上升,对钾在茎叶中的分配比例影响较小。养分吸收量及干物质累积量的减少,导致产量显著下降,砂姜黑土的减产幅度大于潮土。

参考文献:

- [1] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80-94.
Zhou G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2015, 38(1): 80-94. (in Chinese)
- [2] 社会石, 秦旭升, 陈智文. 中国农业气象灾害定量评估[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 442-446.
She H S, Qin X S, Chen Z W. Quantitative evaluation of agro-meteorological disasters in China[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(6): 442-446. (in Chinese)
- [3] 陈正洪. 中国气象灾害与应急体系探索[J]. 农业灾害研究, 2012, 2(4): 36-38.
Chen Z H. Study on china meteorological disaster and emergency response systems[J]. Journal Agricultural Catastrophology, 2012, 2(4): 36-38. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [5] 张 峭, 王 克. 我国农业自然灾害风险评估与区划[J]. 中国农业资源与区划, 2011, 32(3): 32-36.
Zhang X, Wang K. Assessment and regional planning of chinese agricultural natural disaster risks[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2011, 32(3): 32-36. (in Chinese)

- [6] 马玉平,孙琳丽,马晓群. 黄淮海地区夏玉米对干旱和涝渍的生理生态反应[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(4):85-93.
Ma Y P, Sun L L, Ma X Q. Ecophysiological responses of summer maize to drought and waterlogging in Huang-Huai-Hai plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 85-93. (in Chinese)
- [7] Przywara G, Stepniowski W. The influence of waterlogging at different temperatures on penetration depth and porosity of roots and on stomatal diffusive resistance of pea and maize seedlings[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 1999, 21(4): 405-411.
- [8] 魏 混. 玉米生态基础[M]. 中国农业出版社,2010.
- [9] 杨青华,高尔明,马新明. 干旱与渍涝对砂姜黑土玉米根系干重变化及其分布的影响[J]. 生态学杂志,2000,19(3):28-31.
Yang Q H, Gao E M, Ma X M. Effects of drought and waterlogging on root dry weight and its distribution of maize in shajiang black soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(3): 28-31. (in Chinese)
- [10] 李奕林,张亚丽,胡 江,等. 淹水条件下籼稻与粳稻苗期根际土壤硝化作用的时空变异[J]. 生态学报,2013,26(5):1461-1467.
Li Y L, Zhang Y L, Hu J, et al. Spatiotemporal variations of nitrification in rhizosphere soil for two different rice cultivars at the seedling stage growing under waterlogged conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1461-1467. (in Chinese)
- [11] 肖梦华,胡秀君,褚琳琳. 南方稻作区淹水稻田拔节期土壤微环境变化[J]. 节水灌溉,2015(10):30-33.
Xiao M H, Hu X J, Chu L L. Changes of soil micro environment of flooding paddy field at jointing- booting stage in south paddy area [J]. Water Saving Irrigation, 2015(10): 30-33. (in Chinese)
- [12] 张云贵,刘宏斌,李志宏,等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(6):711-716.
Zhang Y G, Liu H B, Li Z H, et al. Study of nitrate leaching potential from agricultural land in northern China under long-term fertilization conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 711-716. (in Chinese)
- [13] 沈雅飞,王 娜,刘泽彬,等. 三峡库区消落带土壤化学性质变化[J]. 水土保持学报,2016,30(3):190-195.
Shen Y F, Wang N, Liu Z B, et al. Changes of the soil chemical properties in hydro- fluctuation belt of three gorges reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 190-195. (in Chinese)
- [14] 程 丽,张志永,李春辉,等. 三峡库区消落带土壤淹水对氮素转化及酶活性的影响[J]. 华中农业大学学报,2016(5):33-38.
Cheng L, Zhang Z Y, Li C H et al. Effects of water-flooding in water-level-fluctuating zone of three gorges reservoir on transformation of soil nitrogen form and activities of related enzymes[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016(5): 33-38. (in Chinese)
- [15] 袁 辉,王里奥,胡 刚,等. 三峡库区消落带受淹土壤氮和磷释放的模拟实验[J]. 环境科学研究,2008,21(1):103-106.
Yuan H, Wang L A, Hu G, et al. Release of N, P from submerged soil in the shore-area of three gorges reservoir[J]. Research of Environmental Science, 2008, 21(1): 103-106. (in Chinese)
- [16] 胡 刚,王里奥,袁 辉,等. 三峡库区消落带下部区域土壤氮磷释放规律模拟实验研究[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(5):780-784.
Hu G, Wang L A, Yuan H, et al. Release of N,P from submerged soil in the bottom part of shore-area in three gorges reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 780-784. (in Chinese)
- [17] 梁嘉陵. 白浆土在淹水条件下磷素的组成形态及释放量的研究[J]. 黑龙江农业科学,1996(3):9-11.
Liang J L. Studies on the composed form and releasing amount of phosphorus in podzoluvisol under submerge condition[J]. Hei Long jiang Agricultural Science, 1996(3): 9-11. (in Chinese)
- [18] 高 超,张桃林,吴蔚东. 氧化还原条件对土壤磷素固定与释放的影响[J]. 土壤学报,2002,39(4):542-549.
Gao C, Zhang T L, Wu W D. Phosphorus sorption and release of paddy soils:effect of alternation of oxidized and reduced conditions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 542-549. (in Chinese)
- [19] Dobermann A, Cassman K G, Cruz P C S, et al. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. II: Effective soil K-supplying capacity[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1996, 46(1): 11-21.
- [20] Dobermann A, Cruz P S, Cassman K G. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. I. Potassium uptake and K balance[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1996, 46(1): 1-10.
- [21] 郭建华,韩宝文,邢 竹. 耗竭土壤钾素的固定及对棉花钾素营养的作用[J]. 华北农学报,2003,18(1):94-96.
Guo J H, Han B W, Xing Z. The potassium fixed and effect on cotton of depletion soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(1): 94-96. (in Chinese)
- [22] 僧珊珊,王 群,李潮海,等. 淹水胁迫下不同玉米品种根结构及呼吸代谢差异[J]. 中国农业科学,2012,45(20):4141-4148.
Zeng S S, Wang Q, Li C H et al. Difference in root structure and respiration metabolism between two maize cultivars under waterlogging stress[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2012, 45(20): 4141-4148. (in Chinese)
- [23] Ashraf M. 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.
- [24] Li C, Jiang D, Wollenweber B, et al. Waterlogging pretreatment during vegetative growth improves tolerance to waterlogging after anthesis in wheat[J]. Plant Science An International Journal of Experimental Plant Biology, 2011, 180(5): 672-678.
- [25] 李香颜,刘忠阳,李彤霄. 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.
Li X Y, Liu Z Y, Li T X. An impact test study of the flood disasters on summer corn's characters and yield[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2011, 31(1): 79-82. (in Chinese)
- [26] 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 differ-

- ent stages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 162–165. (in Chinese)
- [27] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米养分吸收与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 298–308.
- Ren B Z, Zhang J W, Li X, et al. Effect of waterlogging on nutrient uptake and transport of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 298–308. (in Chinese)
- [28] 姚军, 张有山. 土壤质地类型与其基础肥力相关性[J]. 北京农业科学, 1998, 16(4): 33–34.
- Yao J, Zhang Y S. Relationship between soil text type and its basic fertility[J]. Beijing Agricultural Science, 1998, 16(4): 33–34. (in Chinese)
- [29] 介晓磊, 韩燕来, 谭金芳, 等. 不同肥力和土壤质地条件下麦田氮肥利用率的研究[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 884–888.
- Jie X L, Han Y L, Tan J F, et al. Studies on use efficiency of N fertilizer in wheat field with different fertilities and soil textures[J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(6): 884–888. (in Chinese)
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] 王茹, 张凤荣, 王军艳, 等. 潮土区不同质地土壤的养分动态变化研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(6): 255–257.
- Wang R, Zhang F R, Wang J Y et al. Temporal changing of plant nutrients in different texture soils in the north china plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(6): 255–257. (in Chinese)
- [32] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 等. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 28–36.
- Wang J Y, Wang S J, Chen Y et al. Study on the nitrogen leaching in rice fields[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(1): 28–36. (in Chinese)
- [33] 邱泽东. 土壤氮素流失规律研究进展[J]. 绿色科技, 2016(20): 11–13.
- Qiu Z D. Advances in research on nitrogen loss law of soil[J]. Journal of Green Science and Technology, 2016(20): 11–13. (in Chinese)
- [34] G. Blicher–Mathiesen, H.E.Andersen, S.E.L. arsen. Nitrogen field balances and suction cup–measured N leaching in Danish catchments[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2014, 196(196): 69–75.
- [35] Zhao X, Wang S, Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw–based biochar: laboratory incubation and column leaching studies [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(3): 471–482.
- [36] Beaudoin N, Saad J K, Van Laethem C, et al. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations[J]. Agriculture Ecosystems and environment, 2005, 111(1): 292–310.
- [37] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. 土壤学报, 2013, 42(5): 799–804.
- Cao Z H, Lin X G, Yang L Z, et al. Ecological function of “Paddy Field Ring” to urban and rural environment I. Characteristics of soil P losses paddy fields to waterbodies with runoff[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 42(5): 799–804. (in Chinese)
- [38] 于向华, 王道涵, 梁成华. 水田土壤剖面磷素分布特征[J]. 辽宁农业科学, 2004 (5): 10–12.
- Yu X H, Wang D H, Liang C H. The characteristic of phosphorus distributed in profile of the paddy field[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2004(5): 10–12. (in Chinese)
- [39] 张晨光, 徐德星, 张乃明, 等. 大宁河回水区消落带土壤磷释放动力学研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1159–1164.
- Zhang C G, Xu D X, Zhang N M, et al. Phosphorus release kinetics of the soils from the backwater–fluctuating zones of Daning river[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1159–1164. (in Chinese)
- [40] 任文畅, 王沛芳, 钱进, 等. 干湿交替对土壤磷素迁移转化影响的研究综述[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 41–47.
- Ren W C, Wang P F, Qian J, et al. Review of the Effect of drying–rewetting alternaton on the transportation and transportation of soil phosphorus[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(5): 41–47. (in Chinese)
- [41] Fortune S, Lu J, Addiscott T M, et al. Assessment of phosphorus leaching losses from arable land[J]. Plant and Soil, 2005, 269(1–2): 99–108.
- [42] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性 and 肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906–918.
- Huang S W, Wang Y J, Jin J Y, et al. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 906–918. (in Chinese)
- [43] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 548–553.
- Zhan L P, Li X K, Lu J W, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement[J]. Soils, 2012, 44(4): 548–553. (in Chinese)
- [44] 史建文, 鲍士旦, 史瑞和. 耗竭条件下层间钾的释放及耗竭后土壤的固钾特性[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 42–49.
- Shi J W, Bao S D, Shi R H. Release of soil interlayer potassium under depletion condition and soil potassium fixation after depletion [J]. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 42–49. (in Chinese)
- [45] 冯建, 赵玉安, 丁晋丽. 壤土和黑土不同层次钾运移研究[J]. 甘肃农业科技, 2006(12): 6–8.
- Feng J, Zhao Y A, Ding J L. Study on K⁺ transport of loess soil and black soil at different soil level[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2006(12): 6–8. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)