

网络出版时间:2014-10-16 11:51

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.11.072

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.11.072.html

种子库容与外源养分对苗期玉米同化物 积累与养分利用的影响

周 毅^{1,2}, 章 灿¹, 程昕昕², 蒋 德², 刘 正², 汪建飞¹

(1 安徽科技学院 城建与环境学院, 安徽 凤阳, 233100; 2 玉米育种安徽省工程技术研究中心, 安徽 凤阳, 233100)

[摘 要] **【目的】**研究种子库容及外源养分对苗期玉米同化物积累的影响及其对养分利用的贡献。**【方法】**采用育苗移栽和砂培模拟培养的方法, 研究种子粒质量(高、中和低)、1 叶 1 心期摘除残余种子终止种子营养(以下简称摘除种子)以及外源养分对苗期杂交玉米鲁单 9002 和郑单 958 不同部位生物量、氮、磷、钾含量及累积量的影响。**【结果】**种子粒质量、摘除种子及外源养分 3 个因素均明显影响玉米植株生物量的积累和养分含量。其中摘除种子的主效应最强, 是郑单 958 植株和根系生物量、叶氮含量以及鲁单 9002 根系生物量变化的主要诱因, 其次为外源养分。在无外源养分的条件下, 不摘除种子郑单 958 的植株生物量随粒质量的增加而呈递增趋势, 鲁单 9002 则以中粒质量种子育成苗的生物量最高; 供给外源养分后则明显提高了 2 个品种玉米的植株生物量, 也改变了同化物在玉米不同部位的分配比例, 使中粒质量种子育成苗的植株生物量达到最高(摘除种子郑单 958 除外)。种子粒质量对不摘除种子郑单 958 的高粒质量种子育成苗的生物量累积以及 2 个品种玉米不摘除种子的高粒质量种子育成苗的养分累积的贡献均高于中和低粒质量种子育成苗。此外, 种子对不摘除种子郑单 958 的生物量、氮和磷累积的贡献总体上高于不摘除种子鲁单 9002。**【结论】**郑单 958 能更充分地利用种子中贮存的养分, 降低苗期玉米对外源养分的依赖, 这是其和大库容种子具有生态广适性的主要原因之一。

[关键词] 玉米; 籽粒库容; 同化物积累; 养分利用

[中图分类号] S513.062; S330.2⁺9

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)11-0047-09

Effect of seed reserve and external nutrient supply on assimilate accumulation and nutrient utilization of maize (*Zea mays* L.) seedling

ZHOU Yi^{1,2}, ZHANG Can¹, CHENG Xin-xin², JIANG De², LIU Zheng², WANG Jian-fei¹

(1 College of Urban Construction and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China;

2 Institute of Anhui Engineering Technology on Maize Breeding, Fengyang, Anhui 233100, China)

Abstract: **【Objective】**The aim of this study was to evaluate the contribution of seed reserve and exogenous nutrient supply to assimilate accumulation and nutrients utilization of maize seedlings. **【Method】**Effects of seed weight (high-, middle-, and low-weight seeds), removal of both seed coat and endosperm (de-endosperm), and exogenous nutrient supply on biomass and contents and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium at different parts of transplanted seedlings of maize (*Zea mays* L.) Zhengdan 958 and Ludan 9002 were investigated using sand culturing experiment. **【Result】**The three factors exerted statistically significant impacts on total biomasses and nutrients contents of the two maize hybrids. De-endosperm showed the highest single main effect, which was the main reason for changes in total plant and

[收稿日期] 2014-05-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(31101598); 安徽省优秀青年科技基金项目(10040606Y02); 地方高校国家级大学生创新创业训练计划项目(201210879047); 安徽省省级质量工程项目(2012jyxm416)

[作者简介] 周 毅(1972—), 女, 新疆哈密人, 副教授, 博士, 主要从事高产、抗逆植物营养生理与调控研究。

E-mail: zhouyi_nwau@sohu.com

root biomasses and nitrogen content in leaves of Zhengdan 958 and root biomass of Ludan 9002, followed by exogenous nutrient supply. Total biomass of Zhengdan 958 supplied with distilled water increased with the increase of seed weight. Cultivars Ludan 9002 cultivated from middle-weight-seed showed the highest biomass. Exogenous nutrients supply significantly increased total biomasses of the two cultivars and changed assimilates distribution among different parts compared to the plants supplied with distilled water. Thus, seedlings cultivated from middle-weight-seed and supplied with nutrient solution showed the highest biomasses. Seedlings from high-weight-seed of the two keep-endosperm-cultivars utilized seed nitrogen and phosphorus reserves more sufficiently than seedlings from middle-weight-seed and low-weight-seed. Furthermore, biomass and accumulation of nitrogen and phosphorus in keep-endosperm-Ludan 9002 were more susceptible to exogenous nutrient supply than those in keep-endosperm-Zhengdan 958. 【Conclusion】 Zhengdan 958 utilized the nutrients in seed more sufficiently and reduced the nutrient requirement from exogenous sources, which was the main reason for wide ecological fitness of Zhengdan 958 and high-weight-seed seedlings.

Key words: maize; seed reserve; assimilates accumulation; nutrient utilization

种子粒质量不仅是农作物产量的重要构成因素之一,也是决定子代成苗素质的关键。多数研究认为,大粒种子易形成壮苗,并可确保苗期植物具有较强的适应弱光、干旱^[1]、养分缺乏^[1-6]等逆境条件的能力。在养分缺乏的条件下,植物也存在形成大粒种子的趋势^[1]。已有研究证实,玉米穗不同粒位的粒质量自下而上依次降低^[7-8],穗中部以下的籽粒育成苗,一般比全穗种子混播增产 10% 以上^[7]。也有研究认为,在种子营养阶段,幼苗生长受种子贮存物质的质量及其转换效率 2 个因素的控制^[9]。目前,种子大小等性状与植物萌发及成苗素质关系的相关研究大多以草、树木等非农作物作为供试材料^[10],这些作物的大田播种量一般相对较大,且管理精细,掩盖了种子生物学性状对成苗素质和产量形成的效

应。本研究以国审对照玉米品种郑单 958 及与其具有相同母本^[11-12]且百粒质量接近的玉米品种鲁单 9002 为供试材料,比较分析种子库容及外源养分对其成苗过程中同化物积累和氮、磷、钾养分利用的影响,以期从植物营养角度评价苗期玉米杂交种的营养生态广适性奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米品种为单交种鲁单 9002 和郑单 958,购于安徽省凤阳县种子公司,由玉米育种安徽省工程技术研究中心贮藏保存,其粒质量描述统计量见表 1。

表 1 玉米杂交种郑单 958 和鲁单 9002 的粒质量描述统计量

Table 1 Descriptive on seed weight of maize hybrids Zhengdan 958 and Ludan 9002

品种 Cultivars	平均值/g Means	最小值/g Minimum	最大值/g Maximum	极差/g Range	变异系数/% C. V.
郑单 958 Zhengdan 958	0.361 4±0.065 2	0.192 6	0.588 4	0.395 8	18.1
鲁单 9002 Ludan 9002	0.349 1±0.073 4	0.129 8	0.547 9	0.418 1	21.0

1.2 试验设计

试验设 4 个因素,分别为:玉米品种、种子粒质量、种子营养持续时间和外源养分供应水平。以上因素又分别设 2,3,2,2 个水平。对市售袋装玉米种子逐粒称质量(精确至 0.000 1 g),根据极差将粒质量分为 3 级:①高(H),粒质量≥0.46 g;②中(M),0.46 g>粒质量≥0.32 g;③低(L),0.32 g>粒质量≥0.19 g。种子营养持续时间:在玉米 1 叶 1 心期(在此时期之前处理幼苗成活率极低),摘除根、茎交接处残存的种子,以终止种子营养过程,以下简称

DS;同时,以不摘除种子的玉米作为对照,以下简称 KS。外源养分供应水平分别为蒸馏水和霍格兰完全营养液。试验采用完全组合设计,共计 24 个处理,每处理重复 4 次。

1.3 试验方法

用体积分数 10% 的双氧水浸泡玉米种子 30 min,洗净后摆放在垫有滤纸的直径 9 cm 的培养皿中,加入蒸馏水至种子的一半被浸没。置于 25 ℃培养箱中暗培养,当萌动明显、胚芽尖呈现黄色时,揭开皿盖进行光照培养(白天 10 h/夜晚 14 h)。待玉

米幼苗培养至 1 叶 1 心期,挑选长势一致的幼苗摘除其残存的种子,移栽至盛有砂粒的塑料杯(直径 7.1 cm,高 8.9 cm)中,每个塑料杯中移栽 1 棵苗。杯内砂粒高度为 8.4 cm,杯底部均匀钻孔,每 6 个塑料杯放置在 1 个长方形塑料盒(长×宽×高=21.4 cm×14.0 cm×8.2 cm)中,在饱和 CaSO₄ 溶液中缓苗 24 h 后,转入霍格兰完全营养液中,在人工光照培养室内培养。霍格兰完全营养液配方略作改进:氮素采用铵态氮和硝态氮混合的方式供应,供氮水平为 15 mmol/L,以 7.5 mmol/L(NH₄)₂SO₄ 和 7.5 mmol/L Ca(NO₃)₂ 按 1∶1 的体积比混合;营养液中其他养分组成与浓度分别为 2 mmol/L MgSO₄·7H₂O,3.75 mmol/L CaCl₂,微量元素组成与含量采用阿农营养液配方;铁(0.005 g/L)以 EDTA-Fe 的形式提供。营养液加入长方形塑料盒中,保持液面高度在距盒底 0.5 cm 处。培养时采用 400 W 高压钠灯(上海亚明)从 08:00 至 18:00 人工补光,培养室温度为(25±5)℃,空气相对湿度为 60%~70%。营养液的 pH 每 2 d 调节 1 次,维持在(6.00±0.05)。每 7 d 更换 1 次营养液。培养 30 d 后收获。

表 2 种子库容及外源养分对不同品种玉米苗期根、茎和叶干物质累积的影响

Table 2 Effects of seed reserve and external nutrient supply on roots,stem and leaves dry biomasses of maize seedlings														
品种 Cultivars	培养液 Culture Medium	粒质量 SW	生物量/(mg·株 ⁻¹) Dry weight of biomass								叶茎比 Leave : Stem		根冠比 Root : Shoot	
			根 Root		茎 Stem		叶 Leaves		植株 Total plant					
			KS	DS	KS	DS	KS	DS	KS	DS	KS	DS	KS	DS
郑单 958 Zhengdan 958	蒸馏水 Distilled water	低 L	59.2 c	34.0 gh	34.5 c	23.2 d	37.9 def	28.9 f	131.6 d	86.1 e	1.10 de	1.24 cde	0.82 bc	0.65 d
		中 M	75.2 b	57.3 cd	32.0 c	33.7 c	41.2 de	46.0 d	148.4 cd	137.0 cd	1.29 bcde	1.36 bcde	1.03 a	0.72 cd
		高 H	94.0 a	29.2 h	48.9 b	19.4 d	56.9 c	38.3 def	199.8 a	86.8 e	1.18 cde	1.97 a	0.89 b	0.51 e
	营养液 Nutrient solution	低 L	37.5 fgh	36.5 fgh	44.7 b	23.3 d	73.8 b	34.5 ef	155.9 bc	94.2 e	1.66 ab	1.48 bc	0.32 fg	0.63 d
		中 M	44.5 efg	35.8 gh	75.7 a	46.6 b	89.4 a	67.1 bc	209.5 a	149.5 cd	1.18 cde	1.44 bcd	0.27 g	0.31 fg
		高 H	47.2 def	51.6 cde	74.7 a	50.0 b	76.4 b	74.7 b	198.2 a	176.2 b	1.02 e	1.50 bc	0.31 fg	0.41 ef
鲁单 9002 Ludan 9002	蒸馏水 Distilled water	低 L	50.9 bcde	46.7 cdef	24.9 e	25.3 e	24.7 f	32.1 ef	100.5 ef	104.1 def	1.01 c	1.27 bc	1.02 a	0.81 b
		中 M	88.7 a	63.6 b	37.4 d	24.9 e	54.3 c	34.8 ef	180.4 bc	123.3 de	1.47 ab	1.42 abc	0.97 ab	1.07 a
		高 H	36.3 efg	32.9 fg	37.5 d	26.4 e	51.9 cd	35.1 ef	125.6 d	94.4 f	1.38 abc	1.33 abc	0.41 cd	0.54 c
	营养液 Nutrient solution	低 L	44.3 def	26.3 g	60.3 b	22.5 e	95.3 b	39.2 de	199.8 b	87.9 f	1.59 ab	1.74 a	0.28 d	0.43 cd
		中 M	96.2 a	60.1 bc	93.0 a	49.9 c	163.1 a	82.9 b	352.2 a	192.9 b	1.76 a	1.67 ab	0.38 cd	0.45 cd
		高 H	97.2 a	56.4 bcd	86.1 a	46.0 c	150.0 a	62.0 c	333.2 a	164.4 c	1.74 a	1.35 abc	0.41 cd	0.52 c

注:同一品种同一部位数据后标不同小写字母表示差异达 5%显著水平;KS 和 DS 分别表示在玉米 1 叶 1 心期不摘除种子和摘除种子处理。表 4、6、8 同。

Note:Different lowercase letters indicates significant difference in same parts of the cultivar at 5% level. KS and DS indicate keep endosperm and de-endosperm at seedling stage with 2 leaves,respectively. The same for Table 4,Table 6 and Table 8.

由表 3 可知,粒质量、1 叶 1 心期摘除种子(以下简称摘除种子)和外源养分 3 个因素对郑单 958 和鲁单 9002 的植株生物量累积的效应均达极显著水平($P<0.01$)。以上 3 个因素中,两两因素之间的交互作用对鲁单 9002 植株生物量积累的效应也达极显著水平,对郑单 958 的植株生物量累积效应

1.4 测定项目与方法

将植株取出,洗净根系的砂粒,分为根、茎和叶 3 部分收获。于 105~110℃杀青,30 min 后,再于 70~80℃烘至质量恒定,称量记录生物量。

粉碎后的植株样品采用 H₂SO₄—H₂O₂ 法消煮,待测液中的氮含量采用流动分析仪(AA3,美国 BRAN+LUEBBE 公司)测定;磷含量采用磷钼蓝比色法测定;钾含量采用火焰光度计法测定。

种子氮、磷或钾贮量=种子粒质量×种子氮、磷或钾含量;氮、磷或钾累积量=干物质质量×氮、磷或钾含量;种子粒质量、种子氮、磷或钾贮量的贡献=蒸馏水培养条件下的生物量、氮、磷或钾累积量/霍格兰完全营养液培养条件下的生物量、氮、磷或钾累积量×100%。

试验数据采用 SPSS 19.0 和 Excel 2003 进行多元方差分析,多重比较采用 LSD 法进行。

2 结果与分析

2.1 种子库容及外源养分对苗期玉米生长的影响

种子库容及外源养分对苗期玉米根、茎和叶干物质累积的影响见表 2,方差分析结果见表 3。

则是外源养分的主效应,其次为摘除种子的主效应,而摘除种子与外源养分的交互效应高于粒质量的主效应。2 个品种玉米根生物量变化的最大诱因均是摘除种子,而茎、叶生物量和根冠比变化的最大诱因

均是外源养分。除了粒质量与外源养分交互作用对郑单 958 的叶茎比影响显著外,3 个因素及因素间的交互作用对 2 个品种玉米叶茎比的影响均不显著。

表 3 种子库容及外源养分对不同品种玉米苗期根、茎和叶干物质累积影响的方差分析 *F* 值
Table 3 MANOVA *F* of the effects on roots,stem and leaves dry biomasses of maize seedlings

品种 Cultivars	因素 Factors	生物量/(mg·株 ⁻¹)Dry weight of biomass				叶茎比 Leave : Stem	根冠比 Root : Shoot
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaves	植株 Total plant		
郑单 958 Zhengdan 958	粒质量 Seed weight(SW)	3.03	13.25**	3.35	60.77**	0.85	2.50
	摘除种子 De-endosperm(DS)	6.88*	60.06**	11.20**	173.70**	0.38	0.04
	外源养分 Nutrient supply(N)	0.05	94.77**	23.26**	66.43**	2.40	44.80**
	粒质量×摘除种子 SW×DS	0.62	0.29	0.12	5.39*	0.42	0.54
	粒质量×外源养分 SW×N	1.52	7.70**	0.45	4.39*	4.99*	5.39*
	摘除种子×外源养分 DS×N	0.01	21.54**	5.05*	1.20	0.09	3.51
	粒质量×摘除种子×外源养分 SW×DS×N	0.09	1.87	0.21	28.32**	1.12	0.08
鲁单 9002 Ludan 9002	粒质量 Seed weight(SW)	2.26	16.69**	2.87	132.50**	0.05	1.90
	摘除种子 De-endosperm(DS)	4.83*	53.73**	7.40*	374.30**	1.70	0.01
	外源养分 Nutrient supply(N)	0.20	65.62**	20.57**	492.80**	2.48	33.72**
	粒质量×摘除种子 SW×DS	0.09	1.76	0.05	13.84**	0.54	0.07
	粒质量×外源养分 SW×N	0.95	5.84*	0.93	43.64**	0.68	2.60
	摘除种子×外源养分 DS×N	0.81	10.50**	3.83	171.70**	0.85	5.39*
	粒质量×摘除种子×外源养分 SW×DS×N	0.11	0.33	0.06	1.30	0.09	0.67

注: * 和 ** 分别表示多元方差分析达 5% 和 1% 显著差异。表 5、7、9 同。
Note: * and ** indicate significantly different at 5% level and 1% level by MANOVA method, respectively. The same for Table 5, Table 7 and Table 9.

2.2 种子库容及外源养分对苗期玉米氮营养特性的影响

茎和叶氮含量的影响结果见表 4, 方差分析结果见表 5。

种子库容及外源养分对苗期不同品种玉米根、

表 4 种子库容及外源养分对苗期不同品种玉米根、茎和叶氮含量的影响

Table 4 Effects of seed reserve and external nutrient supply on roots,stem and leaves nitrogen contents of maize seedlings

品种 Cultivars	培养液 Culture Medium	粒质量 SW	氮含量/(mg·g ⁻¹) Nitrogen content								叶茎氮含量比		根冠氮含量比	
			根 Root		茎 Stem		叶 Leaves		植株 Total plant		Leaves N content : Stem N content		Root N content : Shoot N content	
			KS	DS	KS	DS	KS	DS	KS	DS	KS	DS	KS	DS
郑单 958 Zhengdan 958	蒸馏水 Distilled water	低 L	15.60 f	16.10 f	14.9 d	17.2 d	24.6 e	30.8 bcde	18.1 f	21.3 ef	1.65 ab	1.79 a	0.78 def	0.65 fgh
		中 M	17.20 f	18.10 f	19.0 d	17.3 d	25.2 de	30.9 bcde	19.9 ef	22.2 e	1.37 bc	1.80 a	0.76 def	0.72 efg
		高 H	22.70 e	24.90 de	32.9 c	41.7 ab	30.2 bcde	45.8 a	27.3 d	38.1 a	0.92 def	1.11 cd	0.73 defg	0.56 h
	营养液 Nutrient solution	低 L	27.20 cd	28.80 c	40.3 ab	44.7 a	26.7 bcde	48.1 a	30.7 c	39.8 a	0.66 ef	1.08 cd	0.86 bcd	0.62 gh
		中 M	30.50 bc	35.50 a	41.3 ab	44.1 a	26.2 cde	32.1 bcd	32.6 c	36.6 ab	0.64 f	0.73 def	0.92 abc	0.96 ab
		高 H	33.90 ab	28.80 c	32.5 c	38.1 b	34.0 b	33.4 bc	33.4 bc	33.4 bc	1.05 cde	0.88 def	1.02 a	0.82 cde
鲁单 9002 Ludan 9002	蒸馏水 Distilled water	低 L	16.57 g	15.10 g	18.0 e	20.7 de	25.6 def	19.5 g	19.1 f	17.9 f	1.42 a	0.95 b	0.76 cd	0.76 cd
		中 M	16.27 g	21.64 f	20.0 de	34.0 c	25.1 def	38.0 b	20.1 f	28.8 cd	1.15 ab	1.12 b	0.68 d	0.60 d
		高 H	34.19 bcd	37.23 bc	36.4 bc	40.5 b	37.8 b	33.2 bc	36.2 b	36.6 b	1.05 b	0.82 cd	0.92 bc	1.02 b
	营养液 Nutrient solution	低 L	38.49 b	44.23 a	38.4 bc	48.9 a	24.3 efg	46.2 a	31.7 c	46.4 a	0.63 d	0.95 bc	1.29 a	0.94 bc
		中 M	33.80 cd	29.26 e	22.2 de	37.1 bc	25.0 def	29.7 cd	26.7 c	31.6 c	1.13 b	0.81 cd	1.41 a	0.90 bc
		高 H	29.98 de	27.34 e	23.0 de	26.4 d	20.7 fg	25.9 de	24.0 e	26.5 de	0.90 bc	0.98 bc	1.40 a	1.05 b

由表 5 可知,3 个因素对 2 个品种玉米植株氮含量的主效应均达极显著水平。两两因素之间的交互作用对鲁单 9002 植株氮含量的影响也达极显著水平;但对郑单 958 而言,只有粒质量与外源养分的交互效应达极显著水平。3 个因素间交互作用对 2 个品种玉米植株氮含量的影响也达极显著水平。由

F 值的大小可知,摘除种子和外源养分对郑单 958 植株氮含量的主效应均明显大于因素间的交互效应,且以外源养分的主效应最高;对鲁单 9002 植株氮含量影响最大的是粒质量与外源养分的交互效应,其次为摘除种子和外源养分的主效应。外源养分是郑单 958 植株、根、茎氮含量,鲁单 9002 根氮含

量以及 2 个品种叶茎氮含量比和根冠氮含量比变化的最大诱因,而粒质量与外源养分的交互效应则是

表 5 种子库容及外源养分对不同品种玉米苗期根、茎和叶氮含量影响的方差分析 F 值
Table 5 MANOVA F of the effects on roots,stem and leaves nitrogen contents of maize seedlings

品种 Cultivars	因素 Factors	氮含量/(mg·g ⁻¹)Nitrogen content				叶茎氮 含量比 Leaves N content : Stem N content	根冠氮 含量比 Root N content : Shoot N content
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaves	植株 Total plant		
郑单 958 Zhengdan 958	粒质量 Seed weight(SW)	21.05**	24.03**	8.76**	33.34**	5.27*	6.76*
	摘除种子 De-endosperm(DS)	1.43	17.20**	40.83**	61.08**	5.54*	22.72**
	外源养分 Nutrient supply(N)	266.70**	338.60**	2.27	252.60**	60.91**	41.77**
	粒质量×摘除种子 SW×DS	3.17	4.85*	3.15	2.08	1.28	5.91*
	粒质量×外源养分 SW×N	9.86**	107.10**	8.48**	55.09**	12.88**	8.48**
	摘除种子×外源养分 DS×N	0.24	0.43	0	0.80	0.92	0.17
	粒质量×摘除种子×外源养分 SW×DS×N	5.72*	1.65	10.43**	16.01**	1.86	1.22
鲁单 9002 Ludan 9002	粒质量 Seed weight(SW)	24.62**	2.62	0.13	16.23**	1.75	12.45**
	摘除种子 De-endosperm(DS)	1.29	50.17**	37.06**	73.48**	4.93*	32.55**
	外源养分 Nutrient supply(N)	164.10**	13.18**	1.81	65.52**	13.66**	112.50**
	粒质量×摘除种子 SW×DS	0.57	6.67*	8.48**	9.50**	0.41	2.17
	粒质量×外源养分 SW×N	137.30**	97.76**	62.83**	249.60**	5.58*	4.57*
	摘除种子×外源养分 DS×N	2.97	2.24	28.32**	16.91**	7.38*	33.53**
	粒质量×摘除种子×外源养分 SW×DS×N	10.15**	1.27	31.66**	25.35**	9.53**	0.19

2.3 种子库容及外源养分对苗期玉米磷营养特性的影响

种子库容及外源养分对苗期不同品种玉米根、茎和叶磷含量的影响见表 6,方差分析结果见表 7。表 7 表明,引起郑单 958 植株、茎、叶磷含量和叶茎磷含量比及鲁单 9002 植株和叶磷含量变化的最大

诱因均为外源养分,引起鲁单 9002 根和茎磷含量变化的最大诱因均是粒质量与外源养分的交互效应。郑单 958 根磷含量和根冠磷含量比、鲁单 9002 叶茎磷含量比、根冠磷含量比变化的最大诱因分别是粒质量、粒质量、摘除种子及摘除种子与外源养分的交互效应。

表 6 种子库容及外源养分对不同品种玉米苗期根、茎和叶磷含量的影响

Table 6 Effects of seed reserve and external nutrient supply on roots,stem and leaves phosphorus contents of maize seedlings

品种 Cultivars	培养液 Culture Medium	粒质量 SW	磷含量/(mg·g ⁻¹) Phosphorus content								叶茎磷含量比 Leaves P content : Stem P content		根冠磷含量比 Root P content : Shoot P content	
			根 Root		茎 Stem		叶 Leaves		植株 Total plant		KS	DS	KS	DS
			KS	DS	KS	DS	KS	DS	KS	DS				
郑单 958 Zhengdan 958	蒸馏水 Distilled water	低 L	0.77 h	2.18 fg	3.97 e	4.78 e	4.13 g	5.30 fg	2.58 f	3.92 e	1.04 bc	1.11 ab	0.19 i	0.43 fgh
		中 M	1.76 g	2.48 f	6.06 d	4.60 e	5.54 def	5.75 def	3.74 e	4.11 e	0.91 bcde	1.25 a	0.30 hi	0.47 fg
		高 H	7.83 b	5.66 c	6.81 d	8.87 c	5.36 efg	7.03 c	6.85 d	7.02 d	0.79 ef	0.80 def	1.31 a	0.74 cd
	营养液 Nutrient solution	低 L	5.35 cd	3.80 e	10.51 a	10.22 ab	10.43 a	9.44 ab	9.23 a	7.45 cd	0.99 bcd	0.93 bcde	0.51 fg	0.39 gh
		中 M	4.90 d	5.46 cd	11.07 a	10.14 ab	6.62 cd	6.60 cde	7.86 bc	7.43 cd	0.60 f	0.65 f	0.57 ef	0.68 de
		高 H	7.88 b	9.10 a	10.13 ab	9.26 bc	8.85 b	7.01 c	9.09 a	8.26 b	0.8 cde	0.76 ef	0.83 c	1.16 b
鲁单 9002 Ludan 9002	蒸馏水 Distilled water	低 L	1.14 f	1.45 f	4.46 f	3.74 f	3.53 e	2.78 e	2.57 e	2.41 e	0.80 c	0.77 c	0.28 h	0.46 g
		中 M	3.41 e	7.13 bc	8.10 de	10.36 b	5.19 cd	3.79 de	4.91 d	6.80 c	0.64 cd	0.38 d	0.53 fg	1.10 a
		高 H	7.94 ab	8.69 a	9.39 bcde	10.14 bc	8.04 b	7.95 b	8.44 b	8.77 b	0.86 bc	0.78 c	0.92 bc	0.99 ab
	营养液 Nutrient solution	低 L	7.42 b	6.37 c	12.12 a	13.50 a	9.77 a	9.78 a	9.96 a	9.72 a	0.81 c	0.73 c	0.70 de	0.57 efg
		中 M	8.44 a	5.06 d	7.98 e	8.80 cde	10.23 a	7.76 b	9.15 ab	7.21 c	1.28 a	0.89 bc	0.90 bc	0.62 ef
		高 H	7.85 ab	4.19 de	9.07 bcde	9.45 bcd	10.00 a	5.93 c	9.1 ab	6.34 c	1.10 ab	0.63 cd	0.81 cd	0.56 efg

2.4 种子库容及外源养分对苗期玉米钾营养特性的影响

种子库容及外源养分对苗期不同品种玉米根、茎和叶钾含量的影响见表 8,方差分析结果见表 9。表 9 表明,引起 2 个品种玉米植株及其不同部位钾含量、叶茎钾含量比以及根冠钾含量比变化的最大

诱因均是外源养分。由表 8 可知,在蒸馏水培养条件下,1 叶 1 心期未摘除种子郑单 958 不同粒质量育成苗的植株钾含量均无显著差异,但随着粒质量的增加,鲁单 9002 的植株钾含量显著升高。因此,2 个供试玉米品种的钾营养特性可能存在较大差异。外源养分明显提高了不同粒质量育成苗的植株钾含

量,且与蒸馏水培养条件下相比,均以粒质量低(L)的植株钾含量升高幅度最大。在供应外源养分条件下,粒质量高处理(H)的植株钾含量总体均明显高于粒质量中等处理(M)和粒质量低处理(L)(鲁单 9002 摘除种子处理除外)。

表 7 种子库容及外源养分对不同品种玉米苗期根、茎和叶磷含量影响的方差分析 F 值
Table 7 MANOVA F of the effects on roots,stem and leaves phosphorus contents of maize seedlings

品种 Cultivars	因素 Factors	磷含量/(mg·g ⁻¹) Phosphorus content				叶茎磷 含量比 Leaves P content : Stem P content	根冠磷 含量比 Root P content : Shoot P content
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaves	植株 Total plant		
郑单 958 Zhengdan 958	粒质量 Seed weight(SW)	687.8**	12.63**	9.49**	117.0**	11.03**	190.20**
	摘除种子 De-endosperm(DS)	0.09	0.23	0.02	2.47	1.49	0.82
	外源养分 Nutrient supply(N)	578.10**	370.40**	125.80**	801.80**	22.52**	17.36**
	粒质量×摘除种子 SW×DS	8.80**	5.86*	0.06	0.49	3.85	7.83*
	粒质量×外源养分 SW×N	16.80**	31.52**	30.73**	61.01**	13.74**	7.59*
	摘除种子×外源养分 DS×N	0.16	6.51*	17.43**	43.41**	5.96*	8.35*
	粒质量×摘除种子×外源养分 SW×DS×N	70.11**	4.82*	4.08*	8.90**	0.40	46.54**
鲁单 9002 Ludan 9002	粒质量 Seed weight(SW)	101.70**	5.07*	10.71**	49.79**	0.57	59.02**
	摘除种子 De-endosperm(DS)	9.69**	8.71*	26.34**	8.75*	18.10**	0.95
	外源养分 Nutrient supply(N)	80.86**	79.38**	169.50**	317.80**	14.91**	0.64
	粒质量×摘除种子 SW×DS	7.24**	1.80	3.71	5.16*	2.63	6.75*
	粒质量×外源养分 SW×N	165.10**	128.40**	47.64**	211.50**	13.36**	34.28**
	摘除种子×外源养分 DS×N	145.80**	0.03	6.36*	50.85**	3.54	84.40**
	粒质量×摘除种子×外源养分 SW×DS×N	21.71**	3.60	5.92*	12.25**	1.05	11.63**

表 8 种子库容及外源养分对不同品种玉米苗期根、茎和叶钾含量的影响

Table 8 Effects of seed reserve and external nutrient supply on roots,stem and leaves potassium contents of maize seedlings

品种 Cultivars	培养液 Culture Medium	粒质量 SW	钾含量/(mg·g ⁻¹) Potassium content								叶茎比 Leave : Stem		根冠比 Root : Shoot	
			根 Root		茎 Stem		叶 Leaves		植株 Total plant		KS	DS	KS	DS
			KS	DS	KS	DS	KS	DS	KS	DS				
郑单 958 Zhengdan 958	蒸馏水 Distilled water	低 L	1.01 f	1.58 f	2.98 e	10.73 d	8.98 ef	10.09 e	3.83 h	6.91 g	3.02 a	0.97 cd	0.17 ef	0.15 f
		中 M	2.95 ef	2.73 ef	4.73 e	34.78 b	8.69 ef	26.58 cd	4.95 gh	18.70 f	1.98 b	0.76 d	0.43 cd	0.09 f
		高 H	4.14 e	6.79 d	5.03 e	24.78 c	5.19 f	36.09 a	4.66 gh	23.46 e	1.03 cd	1.52 bc	0.81 a	0.21 ef
	营养液 Nutrient solution	低 L	18.56 b	10.91 c	50.07 a	46.13 a	32.37 ab	30.95 bc	34.12 bc	26.95 d	0.65 d	0.67 d	0.48 c	0.29 de
		中 M	28.51 a	28.77 a	50.48 a	49.68 a	24.49 d	23.24 d	34.76 bc	32.82 c	0.48 d	0.47 d	0.79 ab	0.84 a
		高 H	29.23 a	29.33 a	50.63 a	51.10 a	35.89 a	33.09 ab	39.89 a	37.10 ab	0.71 d	0.65 d	0.68 b	0.73 ab
鲁单 9002 Ludan 9002	蒸馏水 Distilled water	低 L	2.20 fg	2.80 fg	6.68 f	8.17 f	11.57 d	10.28 d	5.65 f	6.54 ef	1.74 b	1.28 c	0.24 e	0.30 e
		中 M	10.97 e	1.45 g	27.48 d	6.15 f	21.31 c	24.17 c	17.47 c	8.80 e	0.78 d	3.93 a	0.46 d	0.09 f
		高 H	21.30 d	4.90 fg	38.61 c	15.64 e	31.69 b	22.27 c	30.64 b	14.43 d	0.83 d	1.43 c	0.62 c	0.25 e
	营养液 Nutrient solution	低 L	23.69 cd	26.63 bc	51.40 b	57.54 a	34.89 ab	36.19 ab	37.41 a	38.81 a	0.68 d	0.63 d	0.57 c	0.61 c
		中 M	29.36 ab	23.57 cd	48.52 b	47.02 b	35.89 ab	31.62 b	37.44 a	33.08 b	0.74 d	0.67 d	0.73 ab	0.63 bc
		高 H	32.12 a	5.72 f	48.51 b	28.15 d	38.91 a	23.43 c	39.32 a	18.75 c	0.80 d	0.83 d	0.76 a	0.22 e

2.5 种子库容对苗期玉米生物量及氮、磷和钾累积量的贡献

由表 10 可知,除高粒质量郑单 958 外,粒质量对 2 个品种玉米摘除种子处理生物量累积的贡献均大于其不摘除种子处理,这可能是摘除种子显著抑制了该阶段玉米生长的结果。在同一品种中,高粒质量种子对苗期玉米生物量累积的贡献(除郑单 958 的不摘除种子处理外)均小于中粒质量和低粒质量种子。

不论摘除种子与否,种子氮贮量对低粒质量郑单 958 苗期氮累积量的贡献影响不大;摘除中粒质

量种子后,明显提高了郑单 958 种子氮贮量的贡献,但摘除高粒质量种子后则明显降低了郑单 958 种子氮贮量的贡献。种子氮贮量对苗期鲁单 9002 氮累积的贡献均以摘除种子处理相对较大。2 个品种种子的磷、钾贮量对苗期植株磷、钾累积的贡献总体上也均以摘除种子处理相对较大(郑单 958 的高粒质量种子磷贮量的贡献和鲁单 9002 的中粒质量种子钾贮量的贡献除外)。此外,在不摘除种子条件下,高粒质量种子氮贮量的贡献大于低和中粒质量种子,且种子磷和钾贮量的贡献总体上均随粒质量的增加而增大,说明高粒质量种子育成苗对种子中贮

存的氮、磷和钾的利用比例可能相对较高。

表 9 种子库容及外源养分对不同品种玉米苗期根、茎和叶钾含量影响的方差分析 *F* 值

Table 9 MANOVA *F* of the effects on roots,stem and leaves potassium contents of maize seedlings

品种 Cultivars	因素 Factors	钾含量/(mg·g ⁻¹) Potassium content				叶茎钾 含量比 Leave K content : Stem K content ratio	根冠钾 含量比 Root K content : Shoot K content
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaves	植株 Total plant		
郑单 958 Zhengdan 958	粒质量 Seed weight(SW)	154.7**	20.58**	0.22	74.02**	0.24	66.10**
	摘除种子 De-endosperm(DS)	2.37	82.24**	0.43	49.65**	3.64	45.41**
	外源养分 Nutrient supply(N)	2 050.00**	1 341.00**	2.48	1 806.00**	10.13**	168.60**
	粒质量×摘除种子 SW×DS	9.96**	14.46**	0.12	29.71**	0.76	4.48*
	粒质量×外源养分 SW×N	68.19**	10.36**	0.25	2.99	0.12	21.70**
	摘除种子×外源养分 DS×N	13.61**	110.80**	0.73	199.10**	3.54	33.50**
	粒质量×摘除种子×外源养分 SW×DS×N	7.54**	8.09**	0.29	8.52**	0.95	23.05**
鲁单 9002 Ludan 9002	粒质量 Seed weight(SW)	5.19*	1.13	16.38**	19.12**	37.45**	1.84
	摘除种子 De-endosperm(DS)	173.20**	94.00**	23.64**	260.30**	91.79**	114.80**
	外源养分 Nutrient supply(N)	552.60**	873.00**	216.50**	1 691.00**	285.80**	170.90**
	粒质量×摘除种子 SW×DS	94.76**	54.08**	20.05**	132.60**	91.25**	52.57**
	粒质量×外源养分 SW×N	57.89**	106.10**	44.25**	228.80**	48.39**	27.37**
	摘除种子×外源养分 DS×N	0.90	20.14**	3.83	0.04	102.40**	0.52
	粒质量×摘除种子×外源养分 SW×DS×N	9.99**	7.29**	2.91	6.54*	95.17**	11.08**

表 10 种子粒质量及其氮、磷和钾贮量对不同品种玉米苗期植株生物量、氮、磷和钾累积量的贡献

Table 10 Contributions of seed weight,nitrogen,phosphorus and potassium reserves to biomass,nitrogen,phosphorus and potassium accumulation of maize seedlings

指标 Index	处理 Treatments	郑单 958 Zhengdan 958			鲁单 9002 Ludan 9002		
		低粒质量 L	中粒质量 M	高粒质量 H	低粒质量 L	中粒质量 M	高粒质量 H
种子粒质量对生物量累积的贡献 Seed weight contribution	KS	84.4	70.8	≈100*	50.3	51.2	37.7
	DS	91.4	91.6	49.3	≈100	63.9	57.4
种子氮贮量对植株氮累积的贡献 Nitrogen reserve contribution	KS	49.7	43.1	82.6	30.2	38.5	56.8
	DS	49.0	55.5	56.5	45.6	58.1	78.6
种子磷贮量对植株磷累积的贡献 Phosphorus reserve contribution	KS	23.6	33.7	76.3	12.9	27.4	34.9
	DS	48.1	50.5	41.8	29.4	60.4	80.0
种子钾贮量对植株钾累积贡献 Potassium reserve contribution	KS	9.4	10.1	13.3	7.5	23.8	29.4
	DS	23.4	51.9	31.3	19.7	17.0	43.9

注：* 表示籽粒中的贮存物质已经基本消耗完全。

Note: * Indicates that seed reserve was completely exhausted.

种子氮、磷和钾贮量对苗期玉米氮、磷和钾累积量的贡献总体上均小于粒质量对生物量干物质累积的贡献。在不摘除种子的条件下,这可能是其氮、磷和钾素吸收速率大于干物质累积速率的结果;而在摘除种子处理条件下,则可能是在 1 叶 1 心期以前,籽粒氮、磷和钾的转化速率相对低于淀粉等物质,或幼苗的养分吸收速率受摘除种子的影响相对小于生物量累积所致。总体而言,种子磷贮量对苗期玉米磷累积的贡献小于种子氮贮量对氮累积的贡献,且在不摘除种子时,二者的差异相对较大。种子钾贮量对苗期玉米钾累积的贡献总体小于种子氮和磷贮量对苗期玉米氮、磷累积的贡献。这可能是在成苗过程中,玉米对种子中钾的利用速率低于氮和磷,也可能是植株对外源钾的吸收速率相对高于氮和磷的

结果,这有待进一步的研究。在不摘除种子条件下,与鲁单 9002 相比,郑单 958 的种子粒质量和氮、磷贮量对其苗期生物量和氮、磷累积的贡献总体上较大,这表明在该阶段,郑单 958 的生物量和氮、磷累积对外源养分不敏感。

3 讨 论

3.1 粒质量与成苗素质关系的基因型差异

现有研究认为,与小粒种子相比,大粒种子含有更多的贮藏物质,具有萌发优势^[1-8,13-14],并能够在种苗转化过程中为幼苗的发育提供更多的营养物质,促进壮苗的形成^[13-14]。对于植物,特别是野生植物^[2,4]或树木^[1,5-6]而言,籽粒大小与其萌发或成苗素质密切相关。大粒种子植物对外源养分的依赖程度

相对低于小粒种子植物^[3]。本试验中,蒸馏水培养条件下不摘除种子郑单 958 的植株、根和叶的生物量均随种子粒质量的增加而递增。证实增大种子库容可促进苗期玉米的生物量累积,这与笔者之前的研究结果^[10]相似。也有研究表明,以不同品种和种类植物种子的大小作为评价其是否具有萌发优势的依据不足^[4,14]。这是因为,苗期植物生长的种间差异既可能与外界的营养条件有关,也可能与种子自身的养分含量及其转化为生物量的能力等因素有关^[3,11],其综合作用的结果可能掩盖了籽粒大小对苗期植物生长的效应。本试验粒质量和在 1 叶 1 心期摘除种子均可改变种子库容,其对玉米植株生物量累积的主效应均达极显著水平,证实种子库容的变化是影响玉米成苗素质的重要因素。由 *F* 值的大小可以进一步看出,摘除种子处理对郑单 958 植株生物量的影响最大,而粒质量和外源养分的效应大小相近。外源养分对鲁单 9002 植株生物量的影响最大,且其效应远大于种子库容。由此可见,郑单 958 对种子库容的依赖性相对高于鲁单 9002。

目前,郑单 958 是我国种植面积最大的玉米品种^[15],它与鲁单 9002 的母本均是以掖 478 作为选系基础材料育成的郑 58^[12]。值得注意的是,在多数对比性研究中,这 2 个品种对逆境的抗性接近^[16-17],但在实际生产中,鲁单 9002 的推广面积小于郑单 958。在本试验中,无论有无外源养分,中粒质量鲁单 9002 的植株生物量均最高,其中在蒸馏水培养条件下,随着粒质量的增加,不摘除种子鲁单 9002 叶茎比呈现先升高再降低的趋势,而根冠比则始终呈降低趋势,与不摘除种子郑单 958 的叶茎比和根冠比均呈先升高再降低的趋势存在明显差异,这可能是种子库容变化对以上 2 个玉米品种同化物分配主效应影响均不显著的原因。而 2 个品种对种子粒质量变化响应的基因型差异则可能是造成二者生态适应性差异的原因,这有待进一步研究。

3.2 种子养分含量与玉米成苗素质的关系

一般认为,在养分缺乏条件下,植物可通过增加粒质量提高种子的养分贮量,降低子代幼苗对外源养分的依赖^[1-3,6]。因此,在种苗转化过程中,种子养分含量^[18]及其转化特性^[14]可能明显影响幼苗的生长。已有研究表明,种子含氮量高不仅可降低低氮胁迫条件对幼苗叶片发育的抑制效应,也可快速诱导硝酸转运蛋白的合成,加快幼苗对外源氮素的吸收,增强其适应能力^[18]。在供应外源磷的条件下,玉米早期生长所需的磷也主要来自其对种子中贮存

磷的活化。增加种子的磷含量可显著提高子代幼苗叶片和根系的含磷量^[19]。但提高种子钾含量却可明显降低种子的萌发率^[20]。本试验所用材料郑单 958 和鲁单 9002 的种子养分含量相近^[10],在无外源养分供应条件下,摘除种子郑单 958 植株、根和叶的生物量均随种子粒质量的增加而递增,这与 Naegle 等^[18]的研究结果基本相同;但摘除种子鲁单 9002 的植株、根和叶的生物量及在供应外源养分条件下 2 个品种玉米的植株生物量均以中粒质量育成苗最高,说明种子粒质量和外源养分可能均不是该阶段玉米生长的最小限制因子。有研究表明,在种子吸涨过程中,来自穗中下部的种子,其胚乳贮藏物的外渗相对较多,会造成种子本身的生理失调,可能导致种子更易于被周围的病菌侵染,降低田间出苗率和幼苗生长势,而玉米的高粒质量种子均来自穗的中下部^[7]。在本试验中,由于要进行 1 叶 1 心期摘除种子处理,所有的处理均采用了育苗移栽的方式,故在整个过程中,有可能造成移栽前已经外渗至介质的胚乳贮藏物或其他养分的损失。已有研究证实,在种子贮存的养分中,钾的消耗速率最快^[10],这可能是本试验条件下供应外源养分时,郑单 958 的根冠比明显下降,以及无外源养分供应且摘除种子时,2 个品种高粒质量育成苗植株生物量较低的主要原因之一。由于低粒质量种子的发芽势、发芽指数都极显著高于高粒质量种子,低粒质量种子育成苗早期的生长速度也大于高粒质量种子育成苗^[14]。因此可以认为,高粒质量种子胚乳中贮存物质的转化率可能相对较低,在 1 叶 1 心期摘除种子时,转移至胚芽和胚根的干物质质量也相对较少,故其成苗素质受到的影响相对较大。在种子的萌发过程中,关于种子中钾的转化特性及其与成苗素质的关系,尚待进一步研究。在本试验中,同一品种高粒质量种子对苗期玉米生物量累积的贡献总体上均小于低粒质量和中粒质量种子(不摘除种子郑单 958 除外),但其对种子中贮存的氮、磷和钾的利用比例总体却相对较高。同时,种子对苗期不同粒质量郑单 958 生物量、氮和磷累积量的贡献均大于鲁单 9002。因此,推测郑单 958 能够更充分地利用种子中贮存的养分,降低苗期玉米对外源养分的依赖,这可能是其具有较强推广潜力的主要原因之一,也进一步证实了郑单 958 在萌发阶段对外源养分较其他品种不敏感^[14]的结论。在郑单 958 的成苗过程中,为了更好地研究籽粒中贮存物质转化和调控的生理机制,有必要同步测定其种子中的淀粉、蛋白质、脂类、植酸

物质含量及其降解酶活性、代谢底物含量变化的规律,以及氮、磷和钾作为结构和功能性组分在其中所起的作用,为高抗逆玉米的选育及评价提供植物营养生理方面的依据和参考。这也是本课题组今后需要继续深入研究的主要方向之一。

[参考文献]

- [1] Vaughton G, Mike R. Relationships between seed mass, seed nutrients, and seedling growth in *Banksia cunninghamii* (Proteaceae) [J]. Int J Plant Sci, 2004, 162(3): 599-606.
- [2] Milberg P, Lamont B B. Seed/cotyledon size and nutrient content play a major role in early performance of species on nutrient-poor soils [J]. New Phytologist, 1997, 137: 665-672.
- [3] Hanley M E, Cordier P K, May O, et al. Seed size and seedling growth: differential response of Australian and British *Fabaceae* to nutrient limitation [J]. New Phytologist, 2007, 174: 381-388.
- [4] Münzbergová Z, Plačková I. Seed mass and population characteristics interact to determine performance of *Scorzonera hispanica* under common garden conditions [J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2010, 205(8): 552-559.
- [5] Landergotta U, Gugerlia F, Hoebee S E, et al. Effects of seed mass on seedling height and competition in European white oaks [J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2012, 207(10): 721-725.
- [6] Soriano D, Orozco-Segovia A, Márquez-Guzmán J, et al. Seed reserve composition in 19 tree species of a tropical deciduous forest in Mexico and its relationship to seed germination and seedling growth [J]. Annals of Botany, 2011, 107(6): 939-951.
- [7] 李玉玲, 台国琴. 玉米子粒灌浆及种子萌发特性的粒位效应研究 [J]. 玉米科学, 2005, 13(1): 60-63.
- Li Y L, Tai G Q. Study on the kernel position effects of grain filling and seed germination characteristics in maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2005, 13(1): 60-63. (in Chinese)
- [8] 张海艳, 董树亨, 高荣岐. 不同类型玉米子粒灌浆特性分析 [J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 67-70.
- Zhang H Y, Dong S T, Gao R Q. Analysis on kernel filling characteristics for different maize types [J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 67-70. (in Chinese)
- [9] Mohammadi H, Soltani A, Sadeghipour H R, et al. Effects of seed aging on subsequent seed reserve utilization and seedling growth in soybean [J]. Int J Plant Prod, 2011, 5: 65-70.
- [10] 周 毅, 孙美玲, 程娟娟, 等. 籽粒大小、养分含量对苗期玉米的养分敏感性及其生长的影响 [J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 108-116.
- Zhou Y, Sun M L, Cheng J J, et al. Effect of seed size and nutrient reserve on growth and susceptibility of maize (*Zea mays* L.) hybrids to nutrient supply at seedling stage [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 29(1): 108-116. (in Chinese)
- [11] 孟昭东, 张发军, 丁照华, 等. 紧凑型玉米杂交种鲁单 9002 的选育 [J]. 山东农业科学, 2004(5): 21-22.
- Meng Z D, Zhang F J, Ding Z H, et al. The breeding of compact maize hybrid Ludan 9002 [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2004(5): 21-22. (in Chinese)
- [12] 堵纯信, 曹春景, 曹 青, 等. 玉米杂交种郑单 958 的选育与应用 [J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 43-45, 49.
- Du C X, Cao C J, Cao Q, et al. The breeding and application of maize hybrid Zhengdan 958 [J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(6): 43-45, 49. (in Chinese)
- [13] Vange V, Heuch I, Vandvik V. Larger seeds are generally superior to smaller seeds by having a higher probability of emergence [J]. Acta Oecologica, 2004, 25(3): 169-178.
- [14] 冯 波, 刘延忠, 高荣岐, 等. 不同籽粒大小玉米种苗转化过程中生理特性研究 [J]. 华北农学报, 2006, 21(4): 35-38.
- Feng B, Liu Y Z, Gao R Q, et al. Study on physical characteristic of different size seed during maize seed-seedling transformation [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 21(4): 35-38. (in Chinese)
- [15] 白彩云, 李少昆, 张厚宝, 等. 郑单 958 在东北春玉米区生态适应性研究 [J]. 作物学报, 2010, 36(2): 296-302.
- Bai C Y, Li S K, Zhang H B, et al. Ecological adaptability of Zhengdan 958 hybrid in northeast of China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(2): 296-302. (in Chinese)
- [16] 袁虹霞, 邢小萍, 李朝海, 等. 不同玉米品种对南方锈病的抗性比较 [J]. 玉米科学, 2010, 18(2): 107-109.
- Yuan H X, Xing X P, Li C H, et al. Resistance comparisons to southern corn rust in different corn varieties [J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(2): 107-109. (in Chinese)
- [17] 付 景, 李潮海, 赵久然, 等. 玉米品种耐阴性指标的筛选与评价 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2705-2709.
- Fu J, Li C H, Zhao J R, et al. Shade-tolerance indices of maize: Selection and evaluation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2705-2709. (in Chinese)
- [18] Naegle E R, Burton J W, Carter T E, et al. Influence of seed nitrogen content on seedling growth and recovery from nitrogen stress [J]. Plant and Soil, 2005, 271: 329-340.
- [19] Nadeem M, Mollier A, Morel C, et al. Relative contribution of seed phosphorus reserves and exogenous phosphorus uptake to maize (*Zea mays* L.) nutrition during early growth stages [J]. Plant and Soil, 2010, 346: 231-244.
- [20] Zercher S, Ewald A. Seed potassium concentration decline during maturation is inversely related to subsequent germination of primrose [J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 28: 573-603.