



3种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响

王德领, 诸葛玉平, 杨全刚, 娄燕宏, 张行, 王会, 潘红

引用本文:

王德领, 诸葛玉平, 杨全刚, 等. 3种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 20–27.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响

周武先, 刘翠君, 何银生, 吴海棠, 段媛媛, 魏海英, 艾伦强, 张美德

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 43–52 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0201>

三种材料复合施用对盐碱土壤改良效果的研究

金梦野, 李小华, 黄占斌, 杨永安

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 719–726 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0447>

油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914–923 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566>

减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 张艺潇, 孟军

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 544–551 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0143>

施用生物质炭5年后夏玉米土壤呼吸研究

马雯琪, 蒋靖佰伦, 李典鹏, 唐光木, 徐万里, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 111–118 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0044>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王德领, 诸葛玉平, 杨全刚, 等. 3种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 20-27.

WANG De-ling, ZHUGE Yu-ping, YANG Quan-gang, et al. Effects of three amendments on the soil properties of and maize growth in coastal saline-alkali soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 20-27.



开放科学 OSID

3种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响

王德领¹, 诸葛玉平^{1*}, 杨全刚^{1*}, 姜燕宏¹, 张行², 王会¹, 潘红¹

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 邹城市良种繁育场, 邹城市农业局, 山东 济宁 273518)

摘要:为探讨不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果及其对玉米生长的影响,采用盆栽试验研究了钙制剂(GZJ)、糠醛渣(KQZ)和风化煤(FHM)对中度滨海盐碱地土壤理化性质及对玉米株高、叶绿素和产量的影响,试验处理(用量)分别为GZJ1(15 t·hm⁻²)、GZJ2(22.5 t·hm⁻²)、KQZ1(30 t·hm⁻²)、KQZ2(45 t·hm⁻²)、FHM1(30 t·hm⁻²)和FHM2(45 t·hm⁻²)。结果表明,与不添加改良剂(CK)相比较,3种改良剂均能提高盐碱土阳离子交换量(CEC),增幅为17.53%~49.45%,3种改良剂均能降低土壤容重和含盐量,两个用量的糠醛渣和较高量的风化煤均能降低土壤容重,降幅为7.80%~12.06%,降低土壤含盐量效果显著的是两个用量的风化煤和较低量的钙制剂,降幅为13.19%~19.33%;钙制剂和糠醛渣能显著提高水稳性团聚体(0.25~0.5 mm和0.5~1 mm)数量的百分比,分别提高了5.36~6.59个百分点和1.92~2.81个百分点,降低微团聚体(<0.25 mm)数量的百分比,降低了9.93~11.52个百分点。施用30 t·hm⁻²糠醛渣改善盐碱地土壤理化性质的综合效果最好。糠醛渣和风化煤明显增加玉米不同时期的株高和叶绿素含量(SPAD值),玉米成熟期株高增加了9.71%~13.09%,拔节期SPAD值提高了10.13%~16.44%。3种改良剂明显增加玉米穗粒数和单株产量,分别增加了15.97%~37.43%和25.86%~49.65%,30 t·hm⁻²糠醛渣增产效果最好。研究表明,钙制剂、糠醛渣和风化煤对中度滨海盐碱地均具有改良作用,均能提高玉米穗粒数和产量,3种改良剂不同用量间的改良效果无显著差异。糠醛渣的综合改良效果优于风化煤和钙制剂,30 t·hm⁻²糠醛渣综合改良效果最佳。

关键词:改良剂;滨海盐碱土;玉米产量;土壤盐分;水稳性团聚体

中图分类号:S156.42;S513 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)01-0020-08 doi: 10.13254/j.jare.2020.0143

Effects of three amendments on the soil properties of and maize growth in coastal saline-alkali soils

WANG De-ling¹, ZHUGE Yu-ping^{1*}, YANG Quan-gang^{1*}, LOU Yan-hong¹, ZHANG Hang², WANG Hui¹, PAN Hong¹

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Zoucheng Fine Seed Breeding Farm, Zoucheng Agricultural Bureau, Jining 273518, China)

Abstract: This study explored the effects of different soil amendments—a calcium preparation (GZJ), furfural residue (KQZ), and weathered coal (FHM) on the improvement of moderately saline-alkali coastal soil and maize growth therein. The effects of the treatments on the physicochemical properties of the soil and on maize plant height, chlorophyll content (SPAD), and yield were studied via pot

收稿日期:2020-03-24 录用日期:2020-05-20

作者简介:王德领(1990—),男,山东菏泽人,硕士研究生,从事土壤生态环境研究。E-mail: delingw@163.com

*通信作者:诸葛玉平 E-mail: zhugeyp@sdau.edu.cn; 杨全刚 E-mail: sttzy@sdau.edu.cn

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010723);山东省农业科技资金课题(林业科技创新2019LY009);山东省自主创新及成果转化专项(2014ZZCX07402)

Project supported: Major Science and Technology Innovation Projects of Shandong Province (2019JZZY010723); Agricultural Science and Technology Fund Project of Shandong Province (Forestry Science and Technology Innovation 2019LY009); Special Project for Independent Innovation and Achievement Transformation of Shandong Province (2014ZZCX07402)

experiments, and the experimental dosage of each treatment was as follows: GZJ1 ($15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), GZJ2 ($22.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), KQZ1 ($30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), KQZ2 ($45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), FHM1 ($30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), and FHM2 ($45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). The results showed that the three amendments significantly increased the cation exchange capacity (CEC) of saline-alkali soil by 17.53%~49.45%, compared to when no amendments were added. Three amendments reduced soil bulk density and salt content while two different doses of furfural slag and high levels of weathered coal reduced soil bulk density significantly by 7.80%~12.06%. Two different doses of weathered coal and a low dose of the calcium preparation reduced the soil salt content significantly by 13.19%~19.33%. In addition, the calcium preparation and furfural residue significantly increased the quantity of water-stable aggregates (0.25~0.5 mm and 0.5~1 mm, respectively), increasing these by 5.36~6.59 percentage points and 1.92~2.81 percentage points, respectively. The quantity of micro-aggregates (<0.25 mm) was decreased by 9.93~11.52 percentage points. The best treatment to improve the physicochemical properties of saline-alkali soil was KQZ1 ($30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of furfural residue). Furfural slag and weathered coal significantly increased the plant height and SPAD of maize at different stages. The height of the maize plant at maturity increased by 9.71%~13.09% and the SPAD at jointing stage increased by 10.13%~16.44%. The three amendments increased the number of grains per ear and yield per plant by 15.97%~37.43% and 25.86%~49.65%, respectively; Once again, treatment KQZ1 had the best effect. The calcium preparation, furfural slag, and weathered coal all improved the moderately saline-alkali coastal soil and the kernel number and yield of maize. However, there was no significant difference between the three kinds of amendments in different dosages. The comprehensive effect of improvement with the use of furfural slag was better than those with the use of weathered coal and the calcium preparation; and treatment KQZ1 ($30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) had the best comprehensive improvement effect among the furfural slag treatments.

Keywords: amendment; coastal saline soil; maize yield; soil salt; water-stable aggregate

玉米是我国第一大粮食作物,产量占我国粮食总产量的39.28%,约占世界玉米总产量的23.5%^[1-2],是重要食物来源,也是重要的饲料、工业和医药原料,其中,食用、饲用、工业消费占比高达93.19%^[3]。因此,提高我国玉米产量对保障粮食安全、促进畜牧业和工业发展至关重要。

盐碱土中含有大量盐分,破坏了土壤胶体的稳定结构,水稳性团粒结构减少,使土壤黏性增强,通气不良,容重增大,保肥能力下降,同时好气性微生物和酶种类减少,活性降低,导致养分转化过程受阻,有效养分释放速率降低^[4-5]。另一方面盐碱土盐分浓度过高导致作物生理干旱,同时抑制植物对氮和磷的吸收^[6-7]。过多的 Na^+ 也抑制植物对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等养分的吸收,破坏离子平衡,影响细胞正常生理功能,使株高变小,生物量降低^[8-10]。过多盐分损伤叶绿体结构,造成植物光合能力下降,光合效率降低^[11-13]。玉米在苗期、吐丝期和成熟期处于少雨的干旱季,盐害易加重,因此通过改良盐碱地,降低盐分危害,增加玉米产量是一个非常重要的课题。

盐碱土改良主要是调控水盐运动,改善土壤理化特性,培肥土壤,为作物生长创造良好的环境。向盐碱土中加入化学改良剂能够改善土壤结构,增加盐基代换,促进盐分淋洗,调节土壤酸碱度^[14]。有研究表明,石膏类改良剂主要有效成分为硫酸钙,能够降低内陆盐碱地土壤的碱化度和pH值,增加土壤通透性,促进盐分淋洗,提高油菜产量^[15-16];风化煤中有机质

和腐植酸含量高,作为改良剂能够降低苏打型盐土耕层的容重、pH值和碱化度,增加有机碳含量^[17-18];糠醛渣不仅pH值低,而且含有大量的有机质和植物生长所需的矿质元素,能够有效降低土壤容重和pH值,提高盐碱土有机碳含量、阳离子交换能力和孔隙度^[19-20]。不同改良剂具有不同的理化特性,改良盐碱土的机理和效果也不同。

滨海盐碱土具有含盐量高、养分贫乏、地下水位浅、矿化度高等特点,盐分易积聚于地表, Na^+ 含量相对较高,改良和开发利用难度大^[21]。前人的研究注重改良剂对盐碱土理化性质的影响,较少关注改良剂物料对中度滨海盐碱土的改良作用以及对玉米生长的影响,综合对比分析不同性质和功能的改良剂对中度滨海盐碱土理化性质的改良效果和对玉米生长、产量及构成因素影响的研究更加缺乏。因此,本研究针对中度滨海盐碱土的特点,探讨了不同用量钙制剂、糠醛渣和风化煤对滨海中度盐碱土的理化性质及玉米株高、叶绿素和产量的影响,筛选出适合滨海中度盐碱土的改良剂及用量,旨在为滨海盐碱地的改良利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验所用土壤采自山东省滨州市无棣县柳堡镇的“渤海粮仓”工程示范中心实验基地($117^{\circ}54'21''\sim 117^{\circ}56'40''\text{E}$, $37^{\circ}54'40''\sim 37^{\circ}57'38''\text{N}$),土壤质地为

粉质黏壤土,取耕层土壤(0~20 cm),室内风干,过2 mm筛。土壤基本理化性状:容重 $1.40\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机质 $14.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.72\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $57.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $16.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $158.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全盐量 $3.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH值8.31。

1.2 供试材料及试验设计

1.2.1 供试材料

供试作物:玉米(*Zea mays* L.),品种为郑单958。

改良剂:钙制剂(GZJ,颗粒直径小于2 mm,有效成分为硫酸钙)购自市场;糠醛渣(KQZ)和风化煤(FHM)由企业提供,化学性质见表1。室内风干,糠醛渣和风化煤过2 mm标准筛。

1.2.2 试验设计

试验地点位于山东农业大学资源与环境学院实验站(117°15'E,36°17'N)日光温室内。试验所用钵(封底)直径28 cm,深度19 cm,按容重为 $1.40\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 装盆,每盆装土3.5 kg。3种改良剂均设计2个施用量,以不施用改良剂的处理作为对照,共7个处理:CK,不施用改良剂;GZJ1, $5.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$);GZJ2, $8.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$);KQZ1, $10.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$);KQZ2, $16.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$);FHM1, $10.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$);FHM2, $16.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),重复4次。每盆施复合肥(N-P₂O₅-K₂O:15-15-15) 0.84 g ($0.67\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)作为基肥,将基肥和相应质量的改良剂与土壤混合均匀后装盆,调节含水量至田间持水量的70%。于2016年6月7日播种玉米,每盆播种3粒,于6月25日间苗,每盆定植1株,在大喇叭口期追施尿素($0.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和硫酸钾($0.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),利用土壤温湿度速测仪(TSC-IW,石家庄雷神电子仪器有限责任公司)监测土壤含水量,质量法调节含水量至田间持水量的70%。常规管理,分别在玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期和成熟期分析玉米生长状况,在成熟期测产并采集土壤样品(0~12 cm土层),测定土壤理化指标。

1.3 测定项目与方法

容重采用环刀法测定;水溶性盐利用烘干残渣法(土水比1:5)测定;阳离子交换量(CEC)采用EDTA-铵盐快速法测定;水稳性团聚体采用湿筛法测定。

平均质量直径(Weighted mean diameter, WMD)应用下列公式计算:

$$\text{WMD} = \left(\sum_{i=1}^n \bar{d}_i m_i \right) / m_{\text{总}} \quad (1)$$

式中: \bar{d}_i 为*i*团聚体组分的平均颗粒直径,在数值上等于两级筛孔的平均值,如,本试验中所用土筛孔径分别为5、3、1、0.5 mm和0.25 mm,获得>5 mm、5~3 mm、3~1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm和<0.25 mm六种水稳性团聚体组成,则 \bar{d}_i 分别等于6、4、2、0.75、0.375 mm和0.125 mm; m_i 为*i*土壤的干质量; $m_{\text{总}}$ 为六种土壤的总干质量。

株高用卷尺测量;在拔节期和吐丝期进行SPAD值测定,选取中间功能叶,使用SPAD-502叶绿素计(日本美能达公司制造)读取每片叶中间部位的值,每片叶测定5次,取平均值作为该叶片的SPAD值;成熟期收获玉米植株,称量鲜质量,记录穗粒数并测定质量,计算百粒重。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2007进行试验数据作图,运用SPSS 19.0统计软件进行试验数据方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对土壤理化性质的影响

施用钙制剂、糠醛渣和风化煤能显著改善盐碱土的理化性质(表2)。与CK相比较,KQZ1、KQZ2和FHM2处理的土壤容重显著降低,分别降低了9.22%、12.06%和7.80%,表明施用糠醛渣和较高量的风化煤可使土壤由紧实向疏松发展,有利于盐分淋洗;GZJ2、KQZ1、KQZ2、FHM1和FHM2处理的土壤CEC

表1 改良剂化学性质

Table 1 Chemical properties of three amendments

改良剂 Amendments	pH	有机质 Organic matter/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总腐植酸 Total humic acid/%	全氮 Total N/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total P/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾 Total K/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	钙 Ca/%	硫 S/%	水溶性盐 Water-soluble salt/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
糠醛渣(KQZ)	2.56	834.60	—	2.10	0.40	6.89	—	—	2.96
风化煤(FHM)	6.30	727.20	37.50	4.40	0.24	1.91	5.62	—	4.89
钙制剂(GZJ)	6.83	—	—	—	—	—	14.21	10.89	5.52

注:浸提液中改良剂与水的比例为1:5。

Note: The ratio of amendment to water in the extraction solution is 1:5.

表2 不同处理的土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soils under different treatments

处理 Treatments	容重 Soil density/ (g·cm ⁻³)	阳离子交换量 CEC/(cmol·kg ⁻¹)	全盐 Total salt/ (g·kg ⁻¹)
CK	1.41±0.025a	14.60±0.57c	3.26±0.08a
GZJ1	1.31±0.034ab	17.16±1.15bc	2.63±0.11c
GZJ2	1.32±0.034ab	19.98±1.19ab	2.93±0.13abc
KQZ1	1.28±0.033b	18.55±1.55ab	2.94±0.06abc
KQZ2	1.24±0.045b	20.57±1.36ab	3.01±0.08ab
FHM1	1.33±0.02ab	21.82±0.79a	2.66±0.10c
FHM2	1.30±0.02b	19.05±0.65ab	2.83±0.13bc

注:同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Values in a column followed by the different letter indicate significant difference at P<0.05. The same below.

显著增大,分别增加了36.85%、27.05%、40.89%、49.45%和30.48%,土壤CEC的大小反映土壤的缓冲能力以及保肥、供肥性能,说明施用改良剂能够提高盐碱土的保肥和供肥能力;GZJ1、FHM1和FHM2处理土壤的含盐量显著降低,分别减少了19.33%、18.40%和13.19%,这说明风化煤和较低用量的钙制剂能显著降低土壤含盐量。

2.2 不同改良剂对土壤水稳性团聚体的影响

3种改良剂主要影响0.25~0.5、0.5~1 mm水稳性团聚体和微团聚体(<0.25 mm)的含量(表3)。与CK相比,GZJ1、GZJ2、KQZ1和KQZ2处理0.25~0.5 mm、0.5~1 mm粒径的土壤水稳性团聚体含量百分比分别显著提高了6.59、5.71、5.36、5.63个百分点和2.23、1.92、2.81、2.63个百分点,同时土壤微团聚体含量百分比分别显著降低11.22、10.15、9.93、11.52个百分点。这说明钙制剂和糠醛渣能够有效增加土壤水稳性团聚体的含量,降低微团聚体的含量,从而改善土壤结构。

土壤团聚体的平均质量直径(WMD)可反映土壤团聚体的稳定性。通常情况下,WMD数值越大,土壤团聚体稳定性越强。不同改良剂处理对WMD影响不同,土壤团聚体WMD的范围为0.44~0.66 mm(表3)。由于不同团聚体颗粒组分的平均颗粒直径不同,因此,不同的土壤团聚体颗粒组分对WMD的影响程度不同,本试验中六种土壤团聚体组分的平均颗粒直径分别为6、4、2、0.75、0.375 mm和0.125 mm,>5 mm团聚体和微团聚体(<0.25 mm)的数量和比例对WMD的影响非常大,与WMD之间的相关系数分别为0.95

表3 不同处理土壤水稳性团聚体含量

Table 3 Soil water-stable aggregate contents of various treatments

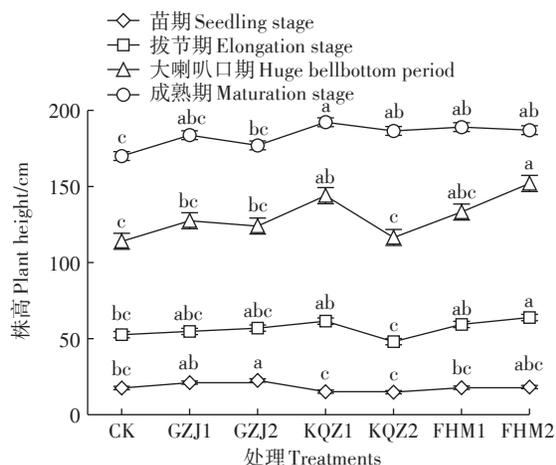
处理 Treatments	含量百分比 Percentage/%						平均质量 直径 WMD/mm
	>5 mm	3~5 mm	1~3 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	
CK	2.29a	3.87a	2.82a	3.05b	5.92c	82.05a	0.50bc
GZJ1	3.93a	4.00a	3.44a	5.28a	12.51a	70.83b	0.64a
GZJ2	3.85a	4.33a	3.32a	4.97a	11.63ab	71.90b	0.64a
KQZ1	2.89a	4.20a	3.66a	5.86a	11.28ab	72.12b	0.59ab
KQZ2	4.00a	4.02a	4.22a	5.68a	11.55ab	70.53b	0.66a
FHM1	2.13a	5.21a	4.33a	4.52ab	5.24c	78.58a	0.57ab
FHM2	1.09a	3.65a	3.17a	5.03a	6.16bc	80.91a	0.44c

和0.91,0.25~0.5 mm的数量和比例对WMD的影响较大,与WMD之间的相关系数为0.81,而其他三个组分的比例与WMD的相关系数分别为0.30、0.52和0.51,可见,WMD主要受>5 mm团聚体、微团聚体和0.25~0.5 mm团聚体的比例的影响。与CK相比,钙制剂和糠醛渣均能显著提高WMD值,KQZ2处理的WMD值提高幅度最大,增幅32.00%。

2.3 不同改良剂对玉米生长状况的影响

2.3.1 株高

3种改良剂对玉米不同生育时期的株高影响不同(图1)。与CK相比,在苗期和拔节期,GZJ2和FHM2处理的株高显著增大,增幅为28.24%和21.43%。在大喇叭口期,KQZ1、FHM2处理的株高显



同一生育时期不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同
Different letter at the same stage indicate significant difference among treatments(P<0.05). The same below

图1 不同处理玉米各生育时期株高

Figure 1 Plant height at different growth stages of different treatments

著增大,增幅分别为26.32%和21.43%;在成熟期,KQZ1、KQZ2、FHM1和FHM2处理的株高显著增大,增幅分别为13.09%、9.71%、11.18%和10.00%。这表明糠醛渣和风化煤增加玉米株高的效果优于钙制剂。

2.3.2 玉米叶绿素相对含量(SPAD值)

分析拔节期和吐丝期的SPAD值(图2)发现,在玉米拔节期,KQZ1、FHM1和FHM2处理的SPAD值显著高于CK,分别提高了15.68%、10.13%和16.44%;在吐丝期,KQZ1和FHM2处理的SPAD值显著高于CK,分别提高了23.76%和23.27%,这说明KQZ1和FHM2处理能显著提高玉米拔节期和吐丝期的SPAD值。

2.4 不同改良剂对玉米产量的影响

施用改良剂显著提高玉米单株穗粒数和产量(表4)。与CK比较,穗粒数提高了15.97%~37.43%,FHM1处理增幅最大,其次为KQZ1,分别提高了37.43%和35.33%。施用改良剂能够提高玉米百粒重,GZJ2处理的百粒重显著提高,其他处理百粒重与CK差异不显著。玉米单株产量提高了25.86%~49.65%,KQZ1处理增产最高,提高了49.65%。因此,改良剂提高单株玉米产量的主要原因是穗粒数的显著增加。

3 讨论

3.1 改良剂对土壤的综合改良效果

本研究表明,3种改良剂均能提高土壤CEC(表2),但机理不同。CEC受土壤胶体类型、质地和pH影响:土壤腐殖质含量越高,CEC越高;土壤团粒结构数量越多,保肥性能越好,CEC越高^[22]。本研究中,钙制剂的有效成分为硫酸钙,Ca²⁺可与土壤胶体上的Na⁺置换,促进Na⁺淋洗。同时Ca²⁺与土壤腐殖质以阳离子“桥”的方式形成有机-矿质复合体土壤复粒,有利

表4 不同处理玉米产量及产量构成因素

Table 4 Yield and yield components of maize in different treatments

处理 Treatments	百粒重 Hundred grain weight/g	穗粒数 Grain number per ear	单株产量 Yield per plant/g
CK	23.01±0.76b	250.50±18.2c	57.36±3.08c
GZJ1	24.86±0.62ab	290.50±3.62bc	72.19±1.35b
GZJ2	25.41±0.54a	306.25±9.03ab	77.82±2.69ab
KQZ1	25.25±0.39ab	339.00±21.4a	85.84±6.57a
KQZ2	24.40±0.53ab	313.75±12.7ab	76.65±3.37ab
FHM1	24.78±1.15ab	344.25±16.1a	84.88±5.66a
FHM2	24.16±0.64ab	327.25±13ab	79.27±5.02ab

于土壤团粒结构的形成,从而提高土壤CEC^[22]。糠醛渣含有大量有机质和矿质养分,能够增加土壤中腐殖质含量,促进土壤团粒结构形成,改善土壤结构,进而提高土壤CEC,这与付颖^[23]研究结果一致。风化煤中溶解性有机质可以与Na⁺形成络合物,土壤溶液中的Na⁺可置换固相风化煤中的Ca²⁺,增加土壤溶液中的Ca²⁺,促进土壤团粒结构的形成,降低钠吸附比(SAR)^[18]。因此,施用风化煤有利于提高土壤CEC。

试验中糠醛渣和较高量的风化煤显著降低土壤容重(表2)。糠醛渣和风化煤有机质含量相近,均能够降低土壤容重,但糠醛渣降低土壤容重的效果优于风化煤,原因可能是糠醛渣的酸性强于风化煤,可降低土壤的pH,使土壤胶粒表面的电位势降低,促进微凝聚体的形成,微凝聚体通过黏结作用形成微团聚体和团聚体,而团聚体具有多级孔性,使土壤容重下降。随糠醛渣和风化煤用量增加,容重进一步降低(表2)。但考虑到增加用量的同时不能显著增加土壤盐分含量,因此降低土壤容重与土壤盐分含量之间的平衡施用量需进一步探索。

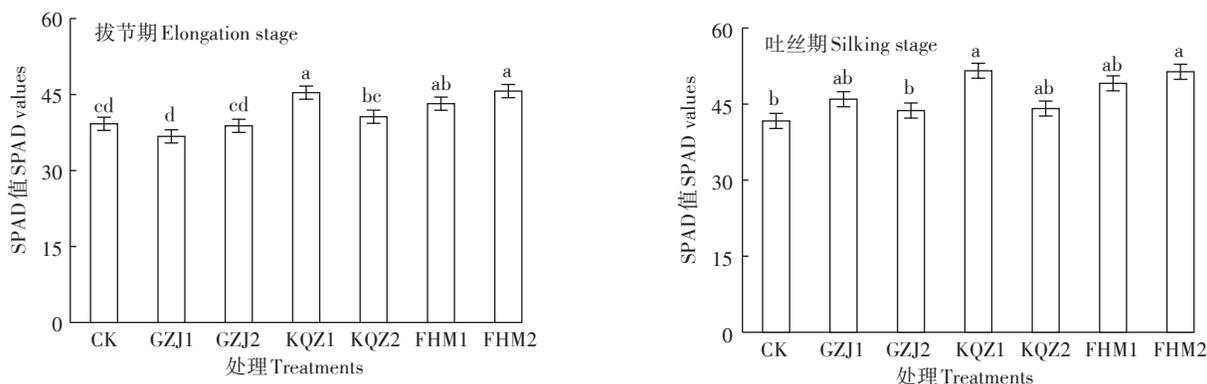


图2 玉米各生育时期SPAD值

Figure 2 SPAD values at different growth stages of maize

随3种改良剂用量的增加,盐碱土含盐量先降低后增加(表2),这说明施用较高量的钙制剂、糠醛渣和风化煤存在增加土壤盐分含量的风险,这与王旭等^[24]、何杰^[25]研究结果相符。但进一步研究发现,施用糠醛渣、石膏(有效成分为硫酸钙)和风化煤与淋洗相结合能使增加的盐分降低^[24-27],这证明施用改良剂增加的盐分中部分为可溶性盐,可被淋洗。本试验中浇水具有淋洗作用,因此,各改良剂处理土壤含盐量低于对照。但除改良剂本身含有的可溶盐分使土壤的含盐量增加之外,糠醛渣较强的酸性,使部分难溶的土壤盐分溶解,增加了土壤溶液中含盐量,因此糠醛渣处理土壤含盐量较高。而风化煤中大量腐植酸与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 络合,减少了土壤溶液中阳离子含量。因此,施用风化煤的处理土壤盐分含量较低。综合分析3种改良剂对降低土壤容重和盐分含量、提高CEC的改良作用发现,糠醛渣和风化煤改善中度滨海盐碱地土壤理化性质的效果优于钙制剂,KQZ1和FHM1处理的综合改良效果优于其他处理。

对土壤结构的改良效果,一般以直径在0.25~1 mm的水稳性团聚体的数量来判别,数量越多,土壤结构越好。直径偏小(0.25~0.5 mm)的水稳性团聚体含量增大,有利于增加盐碱土的保水性能,提高土壤含水量,从而降低盐分离子的浓度,减轻盐分胁迫。本研究中发现钙制剂和糠醛渣提高0.25~0.5、0.5~1 mm水稳性团聚体数量的效果优于风化煤,KQZ1和GZJ1处理的改良效果优于其他处理。钙制剂中 Ca^{2+} 促进较大土壤颗粒形成的途径主要有两个:一是土壤黏粒主要带负电荷,施加钙制剂后会有较多黏粒因 Ca^{2+} 的团聚作用而凝聚成大颗粒^[28];二是土壤胶体吸附的 Na^{+} 被 Ca^{2+} 置换后,由含 Na^{+} 的亲水胶体转变为含 Ca^{2+} 的疏水胶体,疏水胶体微粒相互靠近而聚团。糠醛渣促进0.25~0.5、0.5~1 mm水稳性团聚体数量增加,可能是由于较低的pH值使土壤微域pH低于土壤中腐殖质、氧化铁和铝等可变电荷胶体的等电点,从而带正电荷,与带负电荷的土壤胶体发生凝聚,形成微凝聚体,微凝聚体电荷不平衡,则进一步凝聚形成多级微团粒,微团粒在无机和有机物质的黏结、胶结和复合作用下形成团粒。

本试验中,风化煤不能显著提高水稳性土壤团聚体的含量,也不能显著降低微团聚体的含量,同时较高用量风化煤(FHM2)的WMD小于对照(表3)。这可能有两方面的原因:一是不同土壤含水量条件下风化煤对土壤水稳性团聚体的形成作用不同,武瑞平

等^[29]研究表明,种植紫花苜蓿和模拟自然冻融条件下,控制土壤含水量分别为5%、10%和15%时施用风化煤,土壤水稳性团聚体的含量不同,其中含水量为10%时,土壤水稳性团聚体含量最大。利用风化煤改良露天煤矿复垦土壤,当含水量在20%时,无法形成水稳性团聚体^[30]。这证明施用风化煤改良不同类型土壤时,存在一个水分临界值,当水分含量小于或等于临界值时,施用风化煤促进土壤团聚体的形成。二是风化煤对土壤团聚体的作用受时间的影响,孙层层^[31]研究发现盐碱土中施入风化煤2 d时土壤0.25~5 mm团聚体含量最高,在161 d显著降低,在338 d较高,但低于2 d时的含量,而且这三个时间点的土壤团聚体含量存在显著差异,与161 d相比,添加风化煤的土壤团聚体在338 d时增幅和含量均高于对照。这可能与风化煤同时含有微生物易分解的有机质和难分解的腐植酸有关,风化煤刚加入土壤中,有机质和腐植酸通过胶结作用,将微凝聚体团聚起来形成团粒,但随着易分解有机质被微生物分解,团粒结构体被破坏,土壤团聚体含量下降,随着时间延长,土壤中由有机质经微生物转化而来的腐植酸逐渐增多,新的稳定性团粒形成,团粒数量增加。而本试验持续时间为120 d左右,含水量控制在18%(田间最大持水量的70%)左右,因此,风化煤增加水稳性团聚体含量的作用不显著。

3.2 改良剂对玉米生长和产量的综合影响

玉米是盐敏感作物,盐胁迫下,玉米的株高、叶绿素含量均降低,而且对地上部的影响高于根系^[32]。本试验中施用改良剂可以增加株高和叶片SPAD值,提高玉米产量。说明施用3种改良剂能够降低盐分对玉米生长的抑制作用,主要原因在于3种改良剂可以降低盐碱土的盐分含量和容重,提高CEC,改善土壤结构,逐渐改善土壤理化性质,为玉米生长创造了较适宜的环境。本研究发现,KQZ1处理增加玉米大喇叭口期和成熟期株高的效果最好,株高与产量呈正相关。说明株高的增加有助于产量的提高,这与洪德峰等^[33]研究得出的适当增加株高是提高黄淮海玉米生态区产量的有效途径的结论相符合。株高增加,叶片数和叶面积随之增加,光合作用面积提高,光合产物增加,从而提高玉米产量。玉米叶片的叶绿素含量与产量呈正相关^[34]。KQZ1处理提高吐丝期叶片叶绿素含量的效果优于其他处理,有利于增强光合作用,提高光合效率,增加向籽粒转移的同化产物,满足籽粒早期发育的需要,提高结实率,减少籽粒的败育率,增

加穗粒数^[35]。因此,本试验中KQZ1处理的玉米单株产量最高。

综上所述,糠醛渣改善土壤理化性质效果优于钙制剂,提高水稳性团聚体数量的效果优于风化煤;同时,糠醛渣对玉米的增产效果最佳。因此,适合改良中度滨海盐碱地的改良剂为糠醛渣,最优用量为 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

4 结论

(1)3种改良剂均能提高中度滨海盐碱土CEC。糠醛渣能够显著降低中度滨海盐碱土的容重,显著提高 $0.5\sim 1\text{ mm}$ 和 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体的含量,显著降低土壤微团聚体($<0.25\text{ mm}$)含量。糠醛渣的综合改良效果优于风化煤和钙制剂,最佳施用量为 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(2)施用 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 糠醛渣处理能够显著提高玉米拔节期和吐丝期叶片的SPAD值,以及大喇叭口期和成熟期株高。3种改良剂能显著提高玉米单株产量,增产效果最好的处理为施用量 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的糠醛渣,可实现玉米单株产量增加49.65%。

参考文献:

- [1] 崔爱民,张久刚,张虎,等.我国玉米生产现状及发展变革[J].中国农业科技导报,2020,22(7):10-19. CUI Ai-min, ZHANG Jiugang, ZHANG Hu, et al. Preliminary exploration on current situation and development of maize production in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(7):10-19.
- [2] 2019年中国玉米产量、消费量、种植面积、库存量、进出口情况及价格走势分析[EB/OL]. (2020-04-10).[2020-04-21]. <http://www.chyxx.com/industry/202004/850654.html>. Analysis of China's corn output, consumption, planting area, inventory, import and export situation and price trend in 2019[EB/OL]. (2020-04-10).[2020-04-21]. <http://www.chyxx.com/industry/202004/850654.html>.
- [3] 国家统计局关于2019年粮食产量数据的公告[EB/OL]. (2019-12-07). [2020-04-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-12/07/content_5459250.htm. Bulletin on the national grain output in 2019[EB/OL]. (2019-12-09). [2020-04-21]. http://www.stats.gov.cn/english/Pressrelease/201912/t20191209_1716376.html.
- [4] 宋静茹,杨江,王艳明,等.黄河三角洲盐碱地形成的原因及改良措施探讨[J].安徽农业科学,2017,45(27):95-97,234. SONG Jingru, YANG Jiang, WANG Yan-ming, et al. Exploration of the reason and improvement measures of saline-alkali soil in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2017, 45(27):95-97, 234.
- [5] 张晓东,李兵,刘广明,等.复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(11):1744-1754. ZHANG Xiao-dong, LI Bing, LIU Guang-ming, et al. Effect of composite soil improvement agents on soil amendment and

- salt reduction in coastal saline soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(11):1744-1754.
- [6] Zhang J, Shi H. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance[J]. *Photosynthesis Research*, 2013, 115(1):1-22.
- [7] Song J, Ding X D, Feng G, et al. Nutritional and osmotic roles of nitrate in a euhalophyte and a xerophyte in saline conditions[J]. *Phytologist*, 2006, 171:357-366.
- [8] 陈光登,黎云祥,张浩,等.盐胁迫对两种淫羊藿属植物生长及各器官总黄酮含量的影响[J].西北植物学报,2009,28(10):2047-2054. CHEN Guang-deng, LI Yun-xiang, ZHANG Hao, et al. Effects of salt stress on growth and flavonoids content in different organs of two species of *Epimedium*[J]. *Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica*, 2009, 28(10):2047-2054.
- [9] 任红,唐琪,韩丛聪,等.盐胁迫对刺槐根系离子、根际土壤酶及微生物种群的影响[J].山东农业科学,2018,50(2):38-44. REN Hong, TANG Qi, HAN Cong-cong, et al. Effects of salt stress on root ions and enzymes and microbial population in rhizosphere soil of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.)[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(2):38-44.
- [10] 乌凤章,王贺新.盐胁迫对高丛越橘幼苗生长及离子平衡的影响[J].生态学杂志,2019,38(11):3335-3341. WU Feng-zhang, WANG He-xin. Effects of salt stress on growth and ion homeostasis of highbush blueberry seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11):3335-3341.
- [11] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(3):324-349.
- [12] 束胜,郭世荣,孙锦,等.盐胁迫下植物光合作用的研究进展[J].中国蔬菜,2012(18):53-61. SU Sheng, GUO Shi-rong, SUN Jin, et al. Research progress on photosynthesis under salt stress[J]. *China Vegetables*, 2012(18):53-61.
- [13] 张潭,唐达,李思思,等.盐碱胁迫对枸杞幼苗生物量积累和光合作用的影响[J].西北植物学报,2017,37(12):2474-2482. ZHANG Tan, TANG Da, LI Si-si, et al. Responses of growth and photosynthesis of *Lycium barbarum* L. seedling to salt stress and alkali-stress[J]. *Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica*, 2017, 37(12):2474-2482.
- [14] 马晨,马履一,刘太祥,等.盐碱地改良利用技术研究进展[J].世界林业研究,2010,23(2):28-32. MA Chen, MA Lü-yi, LIU Tai-xiang, et al. Research progress on saline land improvement technology [J]. *World Forestry Research*, 2010, 23(2):28-32.
- [15] 杨军,孙兆军,刘吉利,等.脱硫石膏糠醛渣对新垦龟裂碱土的改良洗盐效果[J].农业工程学报,2015,31(17):128-135. YANG Jun, SUN Zhao-jun, LIU Ji-li, et al. Effects of saline improvement and leaching of desulphurized gypsum combined with furfural residue in newly reclaimed farmland crack alkaline soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(17):128-135.
- [16] Frenkel H, Gerstl Z, Alperovitch N. Exchange-induced dissolution of gypsum and the reclamation of sodic soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1989, 40:599-611.
- [17] 贾丹莉.风化煤对苏打盐化土盐分离子及有机碳组分的影响[D].

- 太原:山西大学,2017:23-25. JIA Dan-li. The effect of weathered coal on the soil salinity and organic carbon fraction in saline-sodic soil[D]. Taiyuan:Shanxi University, 2017:23-25.
- [18] 王洁, 校亮, 毕冬雪, 等. 风化煤改变黄河三角洲盐渍化土壤溶液组分的过程[J]. 土壤学报, 2018, 55(6):1367-1376. WANG Jie, XIAO Liang, BI Dong-xue, et al. Processes of leonardite altering cation and anion composition of soil solution in salt-affected soil in the Yellow River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6):1367-1376.
- [19] Wu Y, Xu G, Shao H B, et al. Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil[J]. *Solid Earth*, 2014, 5(2):665-671.
- [20] 崔向超, 胡君利, 林先贵, 等. 造纸干粉和糠醛渣对滨海盐碱地玉米生长和土壤微生物性状的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(3):331-335. CUI Xiang-chao, HU Jun-li, LIN Xian-gui, et al. Effects of application of dry paper-making waste powder and furfural residue on maize growth and microbiological properties of coastal saline-alkaline soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(3):331-335.
- [21] 赵鹏. 不同水肥运筹模式对滨海盐碱土的控盐增产效应研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2017:3-4. ZHAO Peng. Effects of different water and fertilizer models on salinity control and yield-increasing of coastal saline alkali soil[D]. Tai'an:Shandong Agricultural University, 2017:3-4.
- [22] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:83-87, 165. HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000:83-87, 165.
- [23] 付颖. 天津滨海盐碱土盐动态及有机改良剂的改良效果研究[D]. 北京:北京林业大学, 2015:41-42. FU Ying. Dynamics of water and salt in the Tianjin Binhai saline soil and the effectiveness of organic modifier[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2015:41-42.
- [24] 王旭, 何俊, 孙兆军, 等. 脱硫石膏糠醛渣对碱化盐土入渗及盐分离子影响的研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(5):1210-1217. WANG Xu, HE Jun, SUN Zhao-jun, et al. Effects of desulfurized gypsum combined with furfural residue on permeability and salt ions in alkalinized solonchak[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(5):1210-1217.
- [25] 何杰. 风化煤改良苏打盐化土的机理研究[D]. 太原:山西大学, 2016:13-14. HE Jie. Study on the mechanism of weathered coal on the improvement of soda-saline soil[D]. Taiyuan:Shanxi University, 2016:13-14.
- [26] 何杰, 张强, 王斌, 等. 风化煤对苏打盐化土盐分运移的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3):84-89, 95. HE Jie, ZHANG Qiang, WANG Bin, et al. Effect of weathered coal on soda-saline soil salt transport[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3):84-89, 95.
- [27] 孙军娜, 董陆康, 徐刚, 等. 糠醛渣及其生物炭对盐渍土理化性质影响的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):532-538. SUN Jun-na, DONG Lu-kang, XU Gang, et al. Effects of furfural and its biochar additions on physical-chemical characteristics of a saline soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):532-538.
- [28] 张辉, 陈小华, 付融冰, 等. 脱硫石膏对不同质地滨海盐碱土性质的改良效果[J]. 环境工程学报, 2017, 11(7):4397-4403. ZHANG Hui, CHEN Xiao-hua, FU Rong-bing, et al. Effect to FGD (flue gas desulfurization)-gypsum as an improvement to different coastal saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(7):4397-4403.
- [29] 武瑞平, 李华, 曹鹏. 风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9):1855-1861. WU Rui-ping, LI Hua, CAO Peng. Amelioration of weathered coal on soil physical, chemical properties and enzyme activities with vegetation restoration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9):1855-1861.
- [30] 曹鹏. 冻融交替及水分对风化煤改良露天煤矿复垦土壤及植被恢复的影响研究[D]. 太原:山西大学, 2008:12-13. CAO Peng. Amelioration of weathered coal on soil and vegetation restoration in open-cast mine area with different freezing-thawing process and water content[D]. Taiyuan:Shanxi University, 2008:12-13.
- [31] 孙层层. 土壤改良剂对土壤孔隙结构及其水分过程影响的定位研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019:17-20. SUN Ceng-ceng. Positoining research on the effects of soil amendments addition on soil pore structure and water process[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2019:17-20.
- [32] 郭志顶, 李志洪, 李辛, 等. 施氮水平及方式对玉米冠层NDVI、氮含量、叶绿素和产量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(6):111-116, 121. GUO Zhi-ding, LI Zhi-hong, LI Xin, et al. Effects of nitrogen levels and the methods on the canopy NDVI nitrogen content, chlorophyll and yield of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(6):111-116, 121.
- [33] 洪德峰, 张学舜, 马毅, 等. 黄淮海部分优良玉米品种产量及主要农艺性状相关和通径分析[J]. 中国种业, 2010(1):48-50. HONG De-feng, ZHANG Xue-shun, MA Yi, et al. Correlation and path analysis of yield and main agronomic traits of some maize varieties in Huang-huai-hai region[J]. *China Seed Industry*, 2010(1):48-50.
- [34] Boyle M Q, Boyer J S, Morgan P W. Stem infusion of liquid culture medium prevents reproductive failure of maize at low water potential[J]. *Crop Science*, 1991, 31:1246-1252.
- [35] Schussler J R, Westgate M E. Maize kernel set at low water potential: II. Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth[J]. *Crop Science*, 1991, 31:1196-1203.