

毛久庚,毛欣宇,杨华金,等. 增施磷石膏对苏北地区轻度盐碱土改良及小白菜生长的影响[J].江苏农业学报,2023,39(3):699-706.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.03.010

增施磷石膏对苏北地区轻度盐碱土改良及小白菜生长的影响

毛久庚¹, 毛欣宇², 杨华金¹, 刘光成¹, 翟森茂²

(1.南京磷冶农业科技研究院有限公司,江苏 南京 210000; 2.河海大学农业科学与工程学院,江苏 南京 210000)

摘要: 为探明苏北地区盐碱土种植蔬菜时磷石膏的最适施用量,本研究以江苏省盐城市大丰区轻度盐碱土为供试土壤,小白菜为供试品种,采用云天化集团有限责任公司提供的磷石膏,设置4个施用量(0 g/kg、10 g/kg、20 g/kg、30 g/kg)进行盆栽试验,探究不同施用量的磷石膏对盐碱土化学性质及小白菜生长的影响。结果表明:在盐碱土中增施磷石膏,可以调节盐碱土的化学性质。随着磷石膏施用量的增加,土壤pH值逐渐降低,有机质、碱解氮含量总体呈增加趋势,但较对照差异并不显著;速效磷含量较对照极显著提高;土壤电导率、含盐量也逐渐提高。适宜的磷石膏施用量利于盐碱土改良,过高的磷石膏施用量会加重盐害。在盐碱土中适量增施磷石膏,能促进小白菜生长,提高其生物量。在磷石膏低施用量(10 g/kg)处理中,小白菜发芽率、株高、叶片数、叶面积、叶绿素含量、根长、根系活力、生物量等各项指标均最优,随着磷石膏施用量的继续增加(20 g/kg、30 g/kg),小白菜的发芽率降低,生长受到抑制,施用量越高,抑制作用越明显。在本研究中,磷石膏施用量以10 g/kg为佳,田间施用量可确定在7 500~11 250 kg/hm²范围内,具体施用量还需结合田间试验进一步验证。

关键词: 盐碱土; 磷石膏; 土壤性质; 小白菜生长

中图分类号: S156.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)03-0699-08

Effects of phosphogypsum application on improvement of mild saline-alkali soil and growth of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) in Northern Jiangsu province

MAO Jiu-geng¹, MAO Xin-yu², YANG Hua-jing¹, LIU Guang-cheng¹, ZHAI Sen-mao²

(1.Nanjing Linzhi Agricultural Science and Technology Research Institute Co.,Ltd., Nanjing 210000, China; 2.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210000, China)

Abstract: To find out the optimum dosage of phosphogypsum for growing vegetable in saline-alkali soil in northern areas of Jiangsu province, this study took mild saline-alkali soil in Dafeng District of Yancheng City, Jiangsu province as the test soil and pakchoi (*Brassica chinensis* L.) as the test variety, and used the phosphogypsum provided by Yuntianhua Group. Four dosages of application amount (0 g/kg, 10 g/kg, 20 g/kg, and 30 g/kg) were set up for pot experiments to

收稿日期:2022-07-13

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51809076);中央高校基本科研业务费项目(2019B08514);泰州市科技支撑计划(农业)项目(SNY20208551、SNY20208534)

作者简介:毛久庚(1962-),男,江苏丹阳人,推广研究员,主要从事测土配方施肥、土壤生态环境修复研究。(E-mail)Nj62@163.com

通讯作者:毛欣宇,(E-mail)mxy880731@163.com

explore effects of different dosages of phosphogypsum on saline-alkali soil chemical properties and effects on the growth of Chinese cabbage. The results showed that adding phosphogypsum into saline-alkali soil can regulate the chemical properties of the soil. With the increase of phosphogypsum application amount, soil pH value gradually decreased, organic matter and alkali-hydrolyzed nitrogen content showed an increasing trend as a whole, but the

difference was not significant compared with the data of CK. The content of available phosphorus was extremely significantly higher than that of the CK. Soil conductivity, salt content also gradually increased. Suitable dosage of phosphogypsum was conducive to the improvement of saline-alkali soil, while excessive dosage of phosphogypsum might aggravate the salt damage. Adding appropriate amount of phosphogypsum into saline-alkali soil could promote the growth and biomass of pakchoi. The germination rate, plant height, leaf number, leaf area, chlorophyll content, root length, root activity, biomass and other indices of pakchoi were the best in the treatment with low dosage of phosphogypsum (10 g/kg). With the continued increase of the application amount of phosphogypsum (20 g/kg, 30 g/kg), the germination rate of pakchoi was reduced and the growth was inhibited. The higher the application amount, the more obvious the inhibition effect was. In this study, 10 g/kg phosphogypsum is the best dosage, and the field application amount can be determined within the range of 7 500–11 250 kg/hm². The specific application amount needs to be further verified by field experiments.

Key words: saline-alkali soil; phosphogypsum; soil properties; growth of pakchoi

苏北滨海地区受成土母质的影响,土壤电导率、含盐量及 pH 较高,致使土壤结构差,易板结,通气性差,土壤养分有效性降低,肥力差,在农作物生长中极易造成盐碱障碍。江苏盐城、连云港、南通等部分区域土壤的 pH 为 8.6~9.3,含盐量为 1.52~2.66 g/kg,达到轻度至中度盐碱化,已严重影响蔬菜种子发芽及幼苗生长。

磷石膏是磷铵工业副产品,pH 为 3.0~5.0,呈酸性,主要成分为 CaSO₄·2H₂O,含有较高的磷、镁、铁、硅等营养元素,它可以中和盐碱土中的碱性物质,同时 Ca²⁺对盐碱土胶体上的 Na⁺进行替换,提高土壤阳离子交换量和盐基饱和度,减轻单盐毒害,并为作物提供所需的营养元素,从而达到改善盐碱障碍的目的^[1],是目前应用较多的盐碱土改良剂。大量研究表明,磷石膏可降低盐碱地的 pH,减轻盐毒害,改善土壤结构^[2-4],提高土壤养分的有效性,特别是磷的有效性^[5],促进作物生长,提高产量^[3-4,6-9]。但不同来源的磷石膏酸度、成分含量有所不同,因土壤盐碱化程度及种植农作物种类的不同,磷石膏的施用量也存在较大差异,如:张瑜等^[3]在重度盐碱土(pH 8.93,含盐量 4.90 g/kg)上种植牧草,采用的磷石膏(pH 3.5)施用量为 30 t/hm²;陈玉琦^[4]在轻度盐碱土(pH 8.80,含盐量 1.64 g/kg)上种植水稻、大豆、玉米等,采用的磷石膏(pH 5.00)施用量为 3 750 kg/hm²,在轻度盐碱土(pH 8.40,含盐量 1.54 g/kg)上种植大白菜及茄果类蔬菜,采用的磷石膏(pH 5.00)施用量为 5 250 kg/hm²;舒晓晓^[6]在盐碱土上种植玉米,采用的磷石膏施用量为 40 g/kg;展争艳等^[7]在重度盐碱地(pH 9.30,含盐量 7.20 g/kg)上种植玉米,采用的磷石膏(pH 4.50)施用量为 6 t/hm²;孙玉霞^[8]在轻度

盐碱地(pH 8.15,含盐量 1.48 g/kg)上种植玉米,采用的磷石膏施用量为 3 000 kg/hm²;王伟等^[9]在轻度盐碱地(pH 8.73,含盐量 1.07 g/kg)上种植芸豆,采用的磷石膏施用量为 60 t/hm²。基于此,本研究拟通过盆栽试验,对江苏苏北地区轻度盐碱土磷石膏不同施用量条件下土壤理化性质及小白菜生长关系进行相关研究,探索磷石膏的适宜用量,以期对磷石膏的合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本研究的试验地点为南京市浦口区汤泉农场,位于南京市西北部,扬子江西北岸,东经 118°21′~118°46′,北纬 30°51′~32°15′。

1.2 供试材料

1.2.1 试验土壤 试验土壤取自于江苏省盐城市大丰区,土壤质地为粉沙土,化学性质:pH 8.80,有机质含量 11.14 g/kg,碱解氮含量 10.81 mg/kg,速效磷含量 12.54 mg/kg,速效钾含量 50.80 mg/kg,电导率 0.82 mS/cm,含盐量 2.28 g/kg。

1.2.2 供试磷石膏 磷石膏由云天化集团有限责任公司提供,为黄白色细粉状固体,含水量 24.63%,pH 3.11,电导率 22.68 mS/cm,有机质含量 1.923 0 g/kg,全氮含量 0.021 4 g/kg,全磷含量 40.600 0 g/kg,全钾含量 0.500 0 g/kg, SiO₂ 含量 3.400 0 g/kg, Fe₂O₃ 含量 5.400 0 g/kg, MgO 含量 1.800 0 g/kg, CaO 含量 23.800 0 g/kg。

1.2.3 供试品种 本研究所用小白菜品种为南京矮脚黄。

1.3 试验方案

采用顶部避雨盆栽试验,磷石膏施用量设 4 个

水平,分别为 CK (0 g/kg)、L1 (10 g/kg)、L2 (20 g/kg)、L3 (30 g/kg),每个处理设置 4 次重复。试验所用容器为 1.5 L 的塑料盆,每盆用 1 kg 土与磷石膏拌匀后上盆,与土壤反应(如土壤的酸碱中和、土壤盐类型的转变)5~7 d 后播种。选择粒径大小一致的小白菜种子,每盆播 10 粒,长至 1 叶 1 心期时定苗,每盆留 3 株,盆钵摆放在栽培架上,架上方盖透光膜避雨,四周通风,该区域 9 月、10 月、11 月的平均气温分别约为 22 ℃、17 ℃、10 ℃,每盆定量施肥(尿素)、定量浇水,并进行统一管理。

1.4 测定指标与测定方法

1.4.1 土壤化学性质 在小白菜播种前、收获后分别采集土壤,采集方法是将各处理 4 个重复的土样混合均匀后用四分法取样,样品进行土壤去杂,阴凉处风干、磨细,过 1.00 mm、0.25 mm 筛,用于土壤化学性质测定^[10]。土壤 pH 与土壤电导率(EC)分别采用 1:5 土水质量比电极法和电导法进行测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠法测定;土壤速效钾含量采用 NH₄OAC 浸提火焰光度法测定;土壤含盐量的测定参照文献[4]。

1.4.2 小白菜生长情况及生理指标 小白菜于 2021 年 9 月 25 日播种,播后 10 d 进行发芽率调查,发芽率=实际发芽株数/实际播种数×100%。分别于 10 月 15 日、10 月 25 日、11 月 5 日、11 月 15 日、11 月 25 日测定株高、叶片数、叶面积。株高为自然高度,叶片数为完全展开的叶片数量,叶面积为叶长×叶宽。11 月 25 日测定地上部生物量、根长、根

质量、根系活力、SPAD 值。SPAD 值采用叶绿素仪测定;地上部、根质量使用电子天平称量;根长为最长根长与最短根长之和的平均值;根系活力用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定。

1.5 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件进行数据分析,用 Origin 2018 软件作图分析,处理之间的显著差异采用单因素方差分析(*F* 值测验)评价,平均值多重比较采用新复极差(SSR)法。图中或是表中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,不同大写字母表示在 0.01 水平上差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同处理对盐碱土化学性质的影响

2.1.1 盐碱土 pH 值、电导率、含盐量 结果(表 1)表明,在对照(CK)中,小白菜收获后盐碱土 pH 值、电导率、含盐量均比播种前高,脱盐率为-3.51%;增施磷石膏处理(L1、L2、L3)中,小白菜收获后盐碱土 pH 值、电导率、含盐量均比播种前低,脱盐率达到 28.12%~31.26%。增施磷石膏处理,播种前、收获后盐碱土 pH 值均低于对照,且 pH 值随着磷石膏施用量的增加而降低,但各处理间 pH 值差异不显著;增施磷石膏处理,盐碱土的电导率、含盐量较对照提高,且随着磷石膏施用量的增加而增加,磷石膏施用量越大,较对照差异越大,播种前电导率、含盐量各处理间差异极显著,L1 处理下收获后盐碱土电导率、含盐量较对照差异不显著,L2、L3 处理较对照和 L1 处理差异极显著,L3 处理较 L2 处理差异显著。

表 1 不同处理小白菜种植前后盐碱土 pH 值、电导率和含盐量变化情况

Table 1 Changes of pH, conductivity and salt content in saline-alkali soil before and after planting pakchoi under different treatments

处理	pH 值		电导率(mS/cm)		含盐量(g/kg)		脱盐率(%)
	播种前	收获后	播种前	收获后	播种前	收获后	
CK	8.80a	8.92a	0.82Aa	0.85Aa	2.28Aa	2.36Aa	-3.51
L1	8.53a	8.38a	1.32Bb	0.92Aa	3.52Bb	2.53Aa	28.12
L2	8.33a	8.26a	1.85Cc	1.24Bb	4.83Cc	3.32Bb	31.26
L3	8.20a	8.14a	2.12Dd	1.44Bc	5.50Dd	3.82Bc	30.55

CK:磷石膏施用量为 0 g/kg;L1:磷石膏施用量为 10 g/kg;L2:磷石膏施用量为 20 g/kg;L3:磷石膏施用量为 30 g/kg。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示不同处理间差异极显著($P<0.01$)。

2.1.2 盐碱土养分含量 本研究采用的土壤种植前有机质含量为 11.14 g/kg,碱解氮含量为 10.81 mg/kg,速效磷含量为 12.54 mg/kg,速效钾含量为

50.80 mg/kg,统一称为背景值。

表 2 显示,增施磷石膏处理中小白菜收获后盐碱土壤中的有机质含量和速效磷含量均高于对照,并且

随着磷石膏用量的增加逐步提高,磷石膏施用量达到 30 g/kg 时有机质含量略超背景值,速效磷含量较背景值提高 477.9%;各处理间的有机质含量差异不显著,速效磷含量差异极显著,与对照比增幅达 179.6%~569.8%。增施磷石膏处理中小白菜收获后盐碱土壤中的碱解氮含量表现为:L1 处理低于对照,L2、L3 处理略高于对照,各处理碱解氮含量均低于背景值,这与小白菜对氮的需求量较大,会从土壤中带走大量的氮,且生长势越好从土中带走的氮越多有关,但各处理间的差异不显著。增施磷石膏处理中,小白菜收获后盐碱土壤中的速效钾含量略低于对照和背景值,可能与本茬未施入钾肥,土壤中的钾被作物带走有关,但各处理间差异不显著。

表 2 不同处理收获后盐碱土养分变化情况

Table 2 Nutrient changes in saline-alkali soil after harvest under different treatments

处理	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
CK	10.96a	8.82a	10.82Aa	50.25a
L1	11.05a	8.55a	30.25Bb	46.83a
L2	11.10a	9.87a	60.31Cc	49.32a
L3	11.19a	9.84a	72.47Dd	47.40a

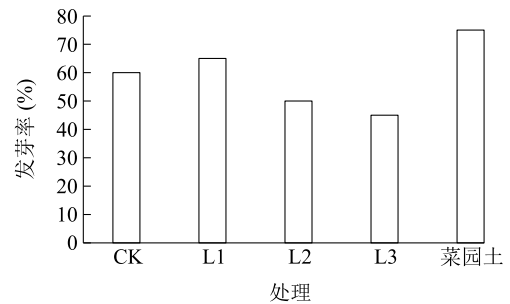
CK:磷石膏施用量为 0 g/kg;L1:磷石膏施用量为 10 g/kg;L2:磷石膏施用量为 20 g/kg;L3:磷石膏施用量为 30 g/kg。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示不同处理间差异极显著($P<0.01$)。

2.2 不同处理对小白菜发芽率的影响

图 1 显示,以菜园土播种作参照,其小白菜的正常发芽率达到 75%,在磷石膏施用量为 0 g/kg 的盐碱土中小白菜的发芽率为 60%,比在菜园土中的发芽率降低 15 个百分点。在盐碱土中增施磷石膏,与 CK 比,L1 处理小白菜发芽率有所提高,达到 65%,L2、L3 处理小白菜发芽率明显降低,仅 45%~50%,小白菜发芽率随着磷石膏施用量的增加而降低,这可能是因为大量增施磷石膏,导致土壤电导率的进一步提高,抑制了种子的发芽。

2.3 不同处理对小白菜生物学性状的影响

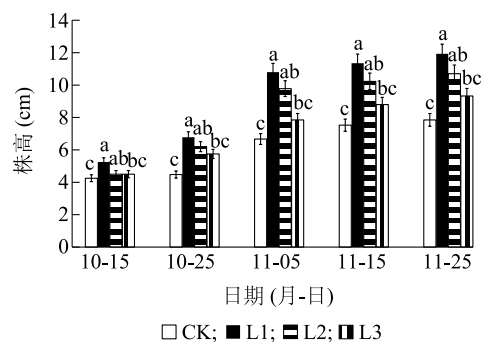
结果(图 2~图 4)表明,不同处理对小白菜株高、叶片数、叶面积生长速率的影响表现为 10 月 15 日至 10 月 25 日变化比较平稳,各处理间差异较小;10 月 25 日至 11 月 5 日,生长迅速,各处理间的差异明显拉开,CK 的株高、叶片数、叶面积的生长量分别占总生长量的 27.9%、35.3%、58.1%,L1 处理的



CK:磷石膏施用量为 0 g/kg;L1:磷石膏施用量为 10 g/kg;L2:磷石膏施用量为 20 g/kg;L3:磷石膏施用量为 30 g/kg。

图 1 不同处理对小白菜发芽率的影响

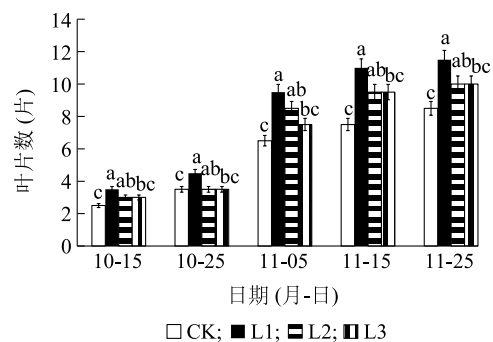
Fig.1 Effects of different treatments on the germination rate of pakchoi



CK:磷石膏施用量为 0 g/kg;L1:磷石膏施用量为 10 g/kg;L2:磷石膏施用量为 20 g/kg;L3:磷石膏施用量为 30 g/kg。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同处理对小白菜株高的影响

Fig.2 Effects of different treatments on plant height of pakchoi



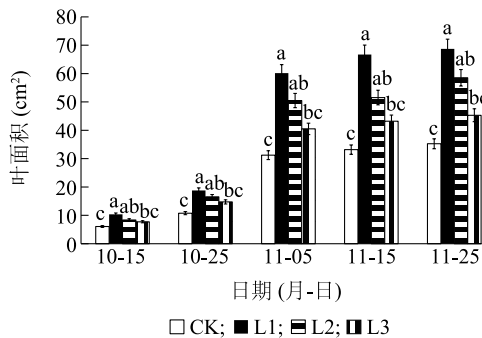
CK:磷石膏施用量为 0 g/kg;L1:磷石膏施用量为 10 g/kg;L2:磷石膏施用量为 20 g/kg;L3:磷石膏施用量为 30 g/kg。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 3 不同处理对小白菜叶片数的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the number of leaves of pakchoi

株高、叶片数、叶面积生长量分别占总生长量的 33.7%、43.5%、60.3%,L2 处理的株高、叶片数、叶

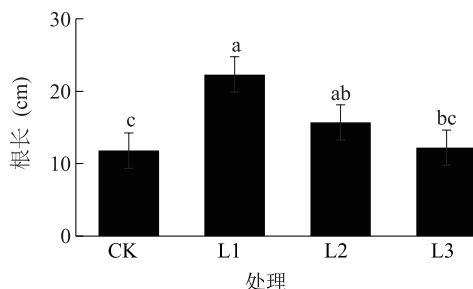
面积生长量分别占总生长量的 33.4%、50.0%、58.1%, L3 处理的株高、叶片数、叶面积生长量分别占总生长量的 22.5%、40.0%、56.8%; 11 月 5 日至 11 月 25 日, 小白菜的生长又趋于平稳。在整个生育期的不同阶段, 不同处理小白菜生长各项指标(株高、叶片数、叶面积)排序均为 L1 处理>L2 处理>L3 处理>CK, 且 L1 处理、L2 处理与 CK 差异显著, L3 处理与 CK 差异不显著; L1 处理与 L2 处理间差异不显著, L1 处理与 L3 处理间差异显著, L2 处理与 L3 处理间差异不显著。说明在盐碱土中增施磷石膏, 能有效促进小白菜生长, 以 L1 处理最佳, 磷石膏施用量继续增加时, 小白菜生长量反而下降, 且随着磷石膏施用量的增加, 抑制作用逐渐加大。



CK: 磷石膏施用量为 0 g/kg; L1: 磷石膏施用量为 10 g/kg; L2: 磷石膏施用量为 20 g/kg; L3: 磷石膏施用量为 30 g/kg。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同处理对小白菜叶面积的影响

Fig.4 Effects of different treatments on leaf area of pakchoi



CK: 磷石膏施用量为 0 g/kg; L1: 磷石膏施用量为 10 g/kg; L2: 磷石膏施用量为 20 g/kg; L3: 磷石膏施用量为 30 g/kg。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同处理对小白菜根系生长的影响

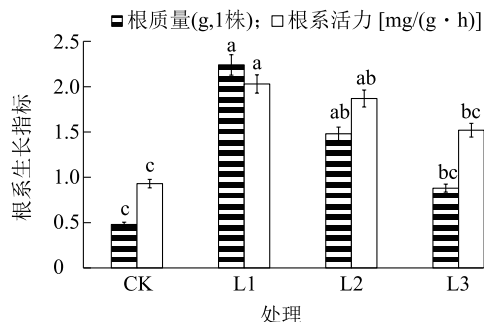
Fig.5 Effects of different treatments on root growth of pakchoi

2.4 不同处理对小白菜根系生长的影响

图 5 显示, 施用磷石膏处理的小白菜根长、根质量、根系活力较对照均增加, 但是随着磷石膏施用量的增加, 根系生长受抑制, 根系活力下降, 不同处理促根系生长排序为: L1 处理>L2 处理>L3 处理>CK。L1 处理、L2 处理的小白菜根长、根质量、根系活力与 CK 之间差异显著, L3 处理与 CK 之间差异不显著, L1 处理与 L2 处理之间差异不显著, L1 处理与 L3 处理之间差异显著, L2 处理与 L3 处理之间差异不显著。说明在盐碱土中增施磷石膏, 能有效促进小白菜的根系生长, 提高根系活力, 以 L1 处理最佳, 磷石膏施用量继续增加, 小白菜根系生长受抑制, 且随着施用量的增加, 抑制作用明显。

2.5 不同处理对小白菜叶绿素含量 (SPAD 值) 的影响

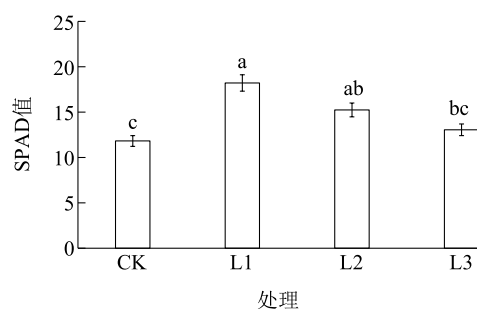
图 6 显示, 施用磷石膏处理的小白菜叶绿素含量 (SPAD 值) 较对照均增加, 但随着磷石膏施用量的增加, 叶绿素含量逐渐减少, 不同处理小白菜叶绿素含量排序为: L1 处理>L2 处理>L3 处理>CK。L1 处理、L2 处理的小白菜叶绿素含量与 CK 之间差异显著, L3 处理与 CK 之间差异不显著, L1 处理与 L2 处理之间差异不显著, L1 处理与 L3 处理之间差异显著, L2 处理与 L3 处理之间差异不显著。说明在盐碱土中增施磷石膏, 能提高小白菜叶绿素含量, 以 L1 处理最佳, 随着磷石膏施用量的继续增加, 叶绿素含量呈下降趋势。



2.6 不同处理对小白菜生物量 (可食部分) 的影响

图 7 显示, 施用磷石膏处理的小白菜生物量较对照均增加, 但随着磷石膏施用量的增加, 生物量逐

渐减少, 不同处理小白菜生物量排序为: L1 处理>L2 处理>L3 处理>CK。L1 处理、L2 处理、L3 处理较 CK 差异极显著, L1 处理与 L2 处理间差异不显著,

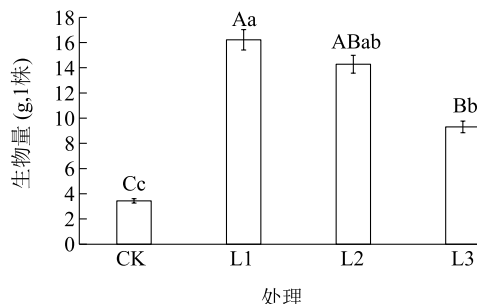


CK:磷石膏施用量为 0 g/kg;L1:磷石膏施用量为 10 g/kg;L2:磷石膏施用量为 20 g/kg;L3:磷石膏施用量为 30 g/kg。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 6 不同处理对小白菜叶绿素含量的影响

Fig.6 Effects of different treatments on chlorophyll content of pakchoi

L1 处理与 L3 处理间差异极显著, L2 处理与 L3 处理间差异不显著。说明在盐碱土中增施磷石膏能显著提高小白菜生物量, 以 L1 处理最佳, 随着磷石膏施用量的继续增加, 小白菜生物量逐步降低, 磷石膏施用量越大, 小白菜生物量降低的趋势越明显。



CK:磷石膏施用量为 0 g/kg;L1:磷石膏施用量为 10 g/kg;L2:磷石膏施用量为 20 g/kg;L3:磷石膏施用量为 30 g/kg。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示不同处理间差异极显著 ($P<0.01$)。

图 7 不同处理对小白菜生物量的影响

Fig.7 Effects of different treatments on biomass of pakchoi

3 讨论

3.1 不同处理对盐碱土化学性质的影响

盐碱土上作物生长受限, 产量低, 重要的原因在于土壤 pH 值、EC、含盐量过高, 养分有效性低, 肥力低下。磷石膏可有效降低盐碱地的 pH 值, 减轻盐害, 增加养分的有效性, 提高地力^[1-9], 但磷石膏不同施用量对土壤化学性质的影响存在差异。本研究中心磷石膏设置 4 个施用量, 分别为 0 g/kg、10 g/kg、20

g/kg、30 g/kg, 结果表明, 不施磷石膏处理, 小白菜收获后土壤 pH 值、EC、含盐量均高于播种前, 有机质、碱解氮、速效磷含量均低于播种前, 说明盐碱土不改良继续种植, 会进一步加重盐碱化, 降低土壤肥力。增施磷石膏, 小白菜收获后土壤的 pH 值随着磷石膏用量的增加逐渐降低, L1、L2、L3 处理分别较对照组播种前土壤的 pH 值 (8.80) 降低 0.42、0.54、0.66, 主要是因为磷石膏呈酸性, 可以中和盐碱土中的碱性物质, 这一结果与张瑜等^[3]、展争艳等^[7]学者的研究结果一致。增施磷石膏处理, 小白菜收获后土壤有机质、速效磷含量随着磷石膏施用量的增加而增加, 均高于对照, 这一结果与张瑜等^[3]、李旭霖等^[11]学者的研究结果一致。当磷石膏施用量达到 30 g/kg 时, 有机质含量 (11.19 g/kg) 略高于背景值 (11.14 g/kg), 碱解氮含量 (9.84 mg/kg) 与背景值 (10.81 mg/kg) 接近, 速效磷含量较背景值提高 477.9%。其原因一方面磷石膏中含少量有机质 (磷石膏基础原材料磷酸盐矿石本身含有少量有机质, 在磷矿酸解时未能完全分解而残留在磷石膏中)、氮和大量的磷; 另一方面是磷石膏中的 Ca^{2+} 可改善土壤结构, 利于土壤中部分微生物残体及植物根系残体转化的有机质积累, 减少施入氮的损失。因此, 单从降低土壤酸碱度和提高土壤肥力的角度, 磷石膏的高施用量是比较有利的。但本研究结果还表明, 播种前, 随着磷石膏施用量的增加, 电导率、含盐量逐渐增加, 电导率从 0.82 mS/cm 增至 2.12 mS/cm, 含盐量从 2.28 g/kg 增至 5.50 g/kg, 王伟等^[9]、许敬敬等^[12]、张盼盼等^[13]的研究结果也表明, 土壤电导率随着磷石膏施用量的增加而提高。这是因为磷石膏本身的电导率较高, 大量增施会引起土壤电导率、含盐量增加。尽管磷石膏中大量的 Ca^{2+} 与土壤中的 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 作用生成 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 CaSO_4 , 施入土壤一段时间后, 有害盐转变成无害盐, 并快速脱盐, 减轻盐害^[14], 收获后土壤的 EC、含盐量与种植前相比明显降低, 但在磷石膏高施用量 (20 g/kg 或 30 g/kg) 处理下, 收获后土壤 EC (1.24 mS/cm 或 1.44 mS/cm)、含盐量 (3.32 g/kg 或 3.82 g/kg) 还是极显著高于对照 (EC 值 0.85 mS/cm、含盐量 2.36 g/kg), 增加了盐害风险; 而在磷石膏低施用量 (10 g/kg) 处理下, 收获后土壤 EC (0.92 mS/cm)、含盐量 (2.53 g/kg) 接近对照, 差异不显著, 而且大部分盐为无害盐, 降低了盐害风险。因此

从土壤 EC 和含盐量角度考虑,还是应该控制磷石膏施用量,以低施用量 (10 g/kg) 为宜。

3.2 不同处理对小白菜生长的影响

蔬菜种类繁多,对土壤的 pH 、 EC 有一定的要求。适宜蔬菜生长的土壤为中性偏酸 (pH 值为 $5.5\sim 7.5$)。根据耐盐程度可分为盐敏感蔬菜、中等耐盐蔬菜、较耐盐蔬菜。曹玲等^[15]对百合科(葱、韭菜等)、十字花科(白菜、花椰菜、甘蓝、萝卜、芥菜等)、茄科(茄子、番茄、辣椒等)、葫芦科(黄瓜、西瓜、南瓜、甜瓜等)、豆科(豇豆、菜豆等)、伞形科(胡萝卜、芹菜等)共 27 种蔬菜进行了耐盐性比较,发现百合科、十字花科蔬菜耐盐性较强,葫芦科、豆科、伞形科蔬菜耐盐性中等,茄科蔬菜耐盐性较弱。大量研究结果表明,大部分蔬菜生长最适的土壤 EC 为 $0.25\sim 0.60\text{ mS/cm}$,当土壤 EC 高于 0.82 mS/cm 时,各类蔬菜均会发生不同程度的盐害。本研究的供试土壤 $pH\ 8.80$,偏碱,电导率 0.82 mS/cm ,含盐量 2.28 g/kg ,大多数蔬菜均不能正常生长,因此本研究选择了耐盐性较强的小白菜为供试品种,并研究不同处理下小白菜发芽率、生物学性状、根系生长、叶绿素含量、生物量的变化。

从种子发芽率来看,在正常的菜园土上,小白菜的正常发芽率为 75% ,在盐碱土上小白菜的发芽率为 60% ,比在菜园土中的发芽率降低 15 个百分点,少量增施磷石膏 (10 g/kg) 后,由于磷石膏成分及性质,施入土壤后,经 7 d 的平衡后,土壤 pH 值有所降低,并将土中的有害盐转化成无害盐,减轻了盐害^[14],小白菜发芽率为 65% ,较对照 (60%) 提高 5 个百分点,但当磷石膏施用量增至 20 g/kg 、 30 g/kg 时,由于施用量偏高,短短的 7 d,虽然土中的有害盐转化成无害盐,但无法快速脱盐,土壤含盐量增加,致使小白菜发芽率下降,分别为 50% 、 45% ,较对照 (60%) 分别下降 10 个百分点、15 个百分点。也就是说,磷石膏低施用量 (10 g/kg) 处理,优化了土壤性质,降低了有害盐的危害,提高了小白菜种子的发芽率,磷石膏高施用量 (20 g/kg 、 30 g/kg) 处理,土壤性质优化的同时,也会增加土壤含盐量,从而抑制种子发芽,降低小白菜种子发芽率。

从小白菜生物学性状、根系生长、叶绿素含量、生物量来看,有大量研究结果表明,在盐碱土上增施适量磷石膏,能促进农作物生长,提高农作物产量。例如,张瑜等^[3]在盐碱土上增施磷石膏,促进水稗

生长,提高水稗鲜草产量;朱研^[16]研究盐碱地改良对玉米产量的影响时发现,磷石膏施用量为 $1\ 500\sim 6\ 000\text{ kg/hm}^2$ 时均可增加玉米的株高、穗粒数、千粒质量、单穗质量,提高产量,施用量以 $3\ 000\text{ kg/hm}^2$ 为佳,较对照增产达 25% ;张盼盼等^[13]在增施磷石膏对盐碱地糜子叶片光合特性影响的研究中,发现增施适量磷石膏,其叶片净光合速度率、株高、穗数、千粒质量及产量均提高。本研究结果也表明,增施适量磷石膏,小白菜的株高、叶片数、叶面积、根长、根质量、根系活力、叶绿素含量、生物量均优于对照,从生长势看,前期小白菜生长速率慢,各处理间差异不大,中后期土壤中的有害盐转变成无害盐,并快速脱盐,盐害减轻,生长速率加快,各处理间的差异快速拉开。当磷石膏施用量为 10 g/kg 时,虽然土壤的含盐量、 EC 均高于对照,但经过短期的化学反应,能将土壤中的有害盐转化成无害盐,且中后期快速脱盐,加上土壤 pH 值的下降,结构的优化,肥力水平的提高,使得小白菜的生长环境有所优化,促进小白菜生长,使小白菜株高、叶片数、叶面积、根长、根质量、根系活力、叶绿素含量、生物量等指标均为最优,较对照增幅最大。但随着磷石膏施用量的继续增加 (20 g/kg 、 30 g/kg),大部分盐以无害盐的形式存在,中后期快速脱盐,加上土壤酸碱度、土壤肥力均优于对照,使得小白菜各项指标优于对照,但相对于磷石膏低施用量 (10 g/kg) 处理,含盐量提高,使得各项指标较对照的增幅下降,磷石膏施用量越大,下降越明显。也就是说, 10 g/kg 磷石膏处理,优化了土壤性质,降低了有害盐危害,利于小白菜生长,继续增加施用量 (20 g/kg 、 30 g/kg),在土壤性质优化的同时,也会增加土壤含盐量,抑制小白菜生长。

3.3 磷石膏田间施用量的确定

基于盆栽试验能严格控制水分、养分,甚至温度和光照等条件,有利于对各项因子的效应进行精密测定,便于开展单因子试验研究,是在田间条件下难以进行的探索性试验,作为配合田间试验的重要方法之一,经常被广大研究者采用^[17-20]。在肥料的用量上要充分考虑到田间试验时作物还可吸收底土的养分,而盆栽试验钵土土壤容量少,盆栽的施肥量要比田间试验大 $2\sim 3$ 倍,加上雨水的淋失、土壤打碎后物理性状的改变等因素,盆栽试验的施肥量与田间施肥量间不可以进行简单折算^[20]。但针对盆栽试验得出的结论,我们可以确定一个田间的基本范围值,即田间磷

石膏施用量可在7 500~11 250 kg/hm²,具体施用量还需结合田间试验进一步加以验证。

4 结 论

在盐碱土上增施磷石膏可以调节盐碱土的化学性质。随着磷石膏施用量的增加,土壤 pH 值逐渐降低;有机质、碱解氮含量总体呈逐渐增加的趋势,但变化不显著;速效磷含量极显著提高;土壤 EC、含盐量也逐渐提高,适宜的磷石膏施用量利于盐碱土改良,但过高的磷石膏施用量,会加重盐害。

在盐碱土上增施适量磷石膏,能促进小白菜生长,提高小白菜生物量。在磷石膏施用量为 10 g/kg 时,小白菜种子发芽率、株高、叶片数、叶面积、叶绿素含量、根长、根系活力、生物量等各项指标均最优,随着磷石膏施用量的继续增加(20 g/kg、30 g/kg),土壤中的 EC、含盐量也逐渐提高,抑制了小白菜的发芽与生长,施用量越高,抑制作用越明显。在苏北地区较为典型的轻度盐碱土上,施用本试验提供的磷石膏,用量以 10 g/kg 为佳。

本研究结论基于盆栽试验,田间用量可以确定一个基本范围,即7 500~11 250 kg/hm²,具体用量还需结合田间试验进一步加以验证。

参考文献:

- [1] 程镜润,陈小华,刘振鸿,等.脱硫石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究[J].中国环境科学,2014,34(6):1505-1513.
- [2] 王晓岑,李淑芹,许学钢.农业应用磷石膏前景展望[J].中国农学通报,2010,26(4):287-294.
- [3] 张 瑜,徐子棋,杨献坤.不同改良剂对吉林西部重度盐碱土的改良及牧草的增产[J].森林工程,2020,36(2):25-34.
- [4] 陈玉琦.工业固体废渣——磷石膏在农业上应用效果的研究[J].天津农学院学报,2005,12(3):49-52.
- [5] 高 珊,杨劲松,姚荣江,等.改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J].土壤学报,2020,57(5):1219-1229.
- [6] 舒晓晓.改良剂对盐碱土植株生长发育的影响[J].科技与创新,2020(4):147-148.
- [7] 展争艳,顾生芳,展成业.施用磷石膏对甘肃引黄灌区重度盐碱地改良效果研究[J].环境保护与循环经济,2021(3):61-64.
- [8] 孙玉霞.盐碱地施用磷石膏对玉米产量的影响[J].农村科技,2017(6):19-21.
- [9] 王 伟,李 明,张文慧,等.不同改良措施对盐碱地芸豆生长及产量的影响[J].黑龙江八一农垦大学学报,2018,30(1):1-7.
- [10] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000:13-14,87-88,107-108,150-152,180-195.
- [11] 李旭霖,刘庆花,柳新伟,等.不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J].水土保持通报,2015,35(2):219-224.
- [12] 许敬敬,包 立,赵 宏,等.磷石膏对红壤酸度及小白菜生长的影响[J].磷肥与复肥,2018,33(9):34-37.
- [13] 张盼盼,郭亚宁,王小林,等.磷石膏和有机肥对盐碱地糜子叶片光合特性的影响[J].山西农业科学,2019,47(6):1005-1010.
- [14] 陶 宇,杨 佳,杜长禹,等.盐碱地化学改良技术研究[J].磷肥与复肥,2016,31(8):50-52.
- [15] 曹 玲,王艳芳,陈宝悦,等.主要蔬菜作物耐盐性比较[J].华北农学报,2013,28(增刊):233-237.
- [16] 朱 研.吉林省西部地区盐碱地改良对玉米产量影响的研究[J].种子科技,2019(13):22,27.
- [17] 周子军,李方文,刘晓莉,等.施肥对盆栽木芙蓉生长及养分利用特性的影响[J].江苏农业科学,2021,49(14):137-142.
- [18] 李小飞,代 兵,何晓峰,等.施用生物有机肥可降低糙米 Cd 含量——盆栽试验与田间试验比较[J].江苏农业科学,2021,49(8):96-101.
- [19] 麦焕欣,王晗璇,胡云鹏,等.生长调节剂 ALA 对盆栽百合生长和生理的影响[J].江苏农业科学,2021,49(4):99-103.
- [20] 陈晓静,陶 红,沈会权,等.浅谈盆栽土培试验方法[J].大麦与谷类科学,2007(2):23-25.

(责任编辑:王 妮)