

不同改良剂对盐渍土西瓜耐盐性和生长的影响

许世奇, 何彦臻, 李瑞, 户可欣, 高钦遥, 王旭东

引用本文:

许世奇, 何彦臻, 李瑞, 户可欣, 高钦遥, 王旭东. 不同改良剂对盐渍土西瓜耐盐性和生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2301-2312.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1302>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响

冀拯宇, 周吉祥, 张贺, 郭康莉, 刘晓, 姜慧敏, 杨俊诚, 李桂花, 张建峰

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1759-1767 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0426>

基于土壤质量的改良剂修复镉污染稻田综合评价

李义纯, 王艳红, 陈勇, 唐明灯, 李奇, 李林峰, 林晓扬, 尹贻龙, 艾绍英

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1219-1228 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1397>

外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 郑阳霞

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1650-1658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0145>

改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响

李松, 孙向阳, 李素艳, 马其雪, 刘源鑫, 周文洁

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1229-1235 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1182>

Cd污染农田的炭基修复方案设计和效果评价

魏岚, 黄连喜, 刘晓文, 李翔, 张建文, 涂新红, 黄庆, 吴颖欣, 刘忠珍

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2277-2287 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0739>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

许世奇, 何彦臻, 李瑞, 等. 不同改良剂对盐渍土西瓜耐盐性和生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2301-2312.

XU S Q, HE Y Z, LI R, et al. Effects of different amendments on salt tolerance and growth of watermelon in saline soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2301-2312.

不同改良剂对盐渍土西瓜耐盐性和生长的影响

许世奇¹, 何彦臻¹, 李瑞², 户可欣¹, 高铨遥¹, 王旭东^{1*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 神木市农业技术推广中心, 陕西 神木 719300)

摘要:为缓解土壤盐渍化对西瓜的胁迫,以“纯品8424”西瓜为试材进行田间试验,设置单施化肥(CF)、CF+胡敏酸钙(CFR1)、CF+水溶性硅肥(CFR2)、CF+鼠李糖脂(CFR3)、CF+胡敏酸钙+水溶性硅肥(CFR4)和CF+胡敏酸钙+水溶性硅肥+鼠李糖脂(CFR5)6个处理,研究了不同改良剂单独或配合施用对土壤pH、盐基离子、西瓜耐盐性及生长的影响,并采用隶属函数法对西瓜耐盐性指标进行综合评价,筛选出适宜盐渍土西瓜生长的最佳改良剂及其组合。结果表明:施用改良剂降低了土壤pH,其中CFR3、CFR4、CFR5的效果显著,较CF分别降低了0.3、0.4、0.4($P<0.05$);改良剂单施或混施增加了土壤Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺含量,CFR1、CFR4、CFR5显著降低了土壤Na⁺含量,单一改良剂处理中以CFR1效果最好,与CF相比,土壤Na⁺含量降低了6.56%,土壤K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的含量则分别增加了16.13%、31.96%和20.85%,且均达到显著水平($P<0.05$);此外,单施或混施改良剂促进了西瓜光合作用与提质增产,其中净光合速率、可溶性固形物含量、产量较CF分别提高了15.22%~43.76%、8.57%~20.45%、14.41%~40.83%,单一改良剂处理中以CFR2的效果最好;施加改良剂显著降低了西瓜植株中的Na⁺含量,使西瓜耐盐性增强,丙二醛含量、叶片O₂产生速率较CF分别降低了12.14%~30.97%、18.97%~47.59%,而过氧化物酶活性、脯氨酸含量则分别增加了31.72%~74.73%、26.56%~48.95%。研究表明,胡敏酸钙、水溶性硅肥、鼠李糖脂3种改良剂单独或混合施用不仅在一定程度上缓解土壤盐分胁迫对西瓜植株的伤害,而且可显著增强西瓜的耐盐性并促进其生长。单一改良剂处理中以胡敏酸钙的效果较好,3种改良剂配合施用较单一改良剂处理能进一步提高西瓜的耐盐性,综合作用效果达到最佳。

关键词:盐渍土;土壤改良剂;盐基离子;西瓜;耐盐性;品质

中图分类号:S651;S156.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)10-2301-12 doi:10.11654/jaes.2022-1302

Effects of different amendments on salt tolerance and growth of watermelon in saline soils

XU Shiqi¹, HE Yanzhen¹, LI Rui², HU Kexin¹, GAO Yiyao¹, WANG Xudong^{1*}

(1. College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China; 2. Agricultural Technology Extension Center of Shenmu City, Shenmu 719300, China)

Abstract: To alleviate the stress of soil salinization on watermelon, “Pure 8424” watermelon was used as the experimental material in the field trial. Six treatments were designed as follows: chemical fertilizer only (CF), CF + calcium huminate (CFR1), CF + water-soluble silicon fertilizer (CFR2), CF + rhamnolipid (CFR3), CF + calcium huminate + water-soluble silicon fertilizer (CFR4) and CF + calcium huminate + water-soluble silicon fertilizer + rhamnolipid (CFR5). The effects of different amendments alone and in combination on soil pH, salt-based ions, watermelon salt tolerance, and growth were examined. Furthermore, a comprehensive evaluation of watermelon salt

收稿日期:2022-12-28 录用日期:2023-02-23

作者简介:许世奇(1999—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事土壤质量提升研究。E-mail:xs673321619@126.com

*通信作者:王旭东 E-mail:wangxudong01@126.com

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2022ZDLNY0205);内蒙古鄂尔多斯市重大项目(TG20220520)

Project supported: The Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (2022ZDLNY0205); The Major Project of Inner Mongolia Ordos City, China (TG20220520)

tolerance indexes was performed using the membership function method to screen for the best amendments and their combinations suitable for watermelon growth in saline soils. The following results were obtained. Application of the amendments reduced soil pH; the CFR3, CFR4, CFR5 treatments effectively decreased pH by 0.3, 0.4, and 0.4, respectively, compared with the CF treatment ($P<0.05$). The single or mixed application of amendments increased soil Ca^{2+} , K^+ , and Mg^{2+} concentrations. The CFR1, CFR4, and CFR5 treatments significantly reduced soil Na^+ concentration. Compared with the CF treatment, the application of CFR1 treatment, which had the most pronounced effect among the single amendment treatments, decreased soil Na^+ concentration by 6.56% and increased K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} concentrations by 16.13%, 31.96%, and 20.85%, respectively, in each case reaching a significance level of $P<0.05$. Furthermore, the single or mixed application of amendments promoted watermelon photosynthesis, quality, and yield. Compared with the CF treatment, the net photosynthetic rate, soluble solids content, and yield increased by 15.22%–43.76%, 8.57%–20.45%, and 14.41%–40.83%, respectively. The CFR2 treatment had the most significant effect among the single amendment treatments. The application of amendments significantly reduced the Na^+ concentration in watermelon plants, which enhanced the salt tolerance of watermelons. Compared with the CF treatment, the malondialdehyde content and $\text{O}_2^{\cdot-}$ production rate in leaves decreased by 12.14%–30.97% and 18.97%–47.59%, respectively, while the peroxidase activity and proline content increased by 31.72%–74.73% and 26.56%–48.95%, respectively. Calcium huminate, water-soluble silicon fertilizer, and rhamnolipid applied alone or in combination not only alleviated the damage caused by soil salinity stress in watermelon plants to a certain extent, but also significantly enhanced the salt tolerance of watermelon and promoted its growth. The calcium huminate treatment had the best effect among the single amendment treatments. Compared with the single amendment treatments, the combined application of three amendments further improved the salt tolerance of watermelon and achieved the best comprehensive effect overall.

Keywords: saline soil; soil amendment; salt-based ion; watermelon; salt tolerance; quality

土壤盐渍化是制约全球农业可持续发展的因素之一^[1],特别是在干旱、半干旱地区,其主要通过渗透胁迫、氧化胁迫和离子毒害等作用影响作物生长^[2]。在盐渍环境中,大量盐类在土壤表层积聚导致土壤渗透压增高并引发植物生理性干旱。另外,植物在渗透胁迫和离子胁迫下会积累大量活性氧等有毒化合物而造成膜脂过氧化,最终影响到代谢活动与光合作用^[3]。我国的盐碱土分布十分广泛,总面积已达到 $9.9\times 10^7\text{ hm}^2$,其中,西北地区盐渍土分布较广,严重制约着当地的农业生产^[4]。因此,为提高盐碱土生产力,需要开发并应用有效技术来改善土壤环境,同时提高盐碱环境下作物耐盐性。

西瓜是我国重要的园艺作物之一,我国西瓜总产量稳居世界首位,我国西北地区是其主要产地之一。然而,随着近年来西瓜栽培面积的连年扩张与不合理灌溉,土壤盐渍化进程加剧,当地西瓜产业的可持续发展受到严重制约^[5]。在盐渍化土壤中,西瓜体内的活性氧增加,细胞膜结构被破坏,细胞的正常代谢功能被扰乱,最终使果实质量与产量降低^[4]。为此,亟需提出有效方案来缓解土壤盐渍化并提高盐渍土上西瓜耐盐性。施用土壤改良剂作为缓解土壤盐渍化并提高作物耐盐性的有效方法之一,具有高效低量、见效快、操作性强等优势,被广泛应用于农业领域^[6]。有研究表明,腐植酸含有多种活性官能团,不仅可增强西瓜光合酶活性,提高PS II 运作效率,还能增强植

株的抗氧化酶活性^[7]。而 Ca^{2+} 作为一种二价阳离子,不仅能够阳离子交换位点使植物减少对 Na^+ 的吸收,还能通过调节气孔的关闭来提高光合性能,缓解盐碱胁迫对植物的不利影响,增加植物地上部生物量与导水率^[8-9]。在盐碱环境中,硅可通过调节植物的抗氧化防御系统,增强超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性以提高植物抗氧化能力^[10]。研究表明,硅可促进盐碱胁迫下植物的光合作用,如净光合速率^[11-12]、叶绿素含量^[13]与气孔导度等。作为一种表面活性剂,鼠李糖脂较低的表面张力能够促进植物对养分的吸收,其不仅具有较好的耐盐、耐温性,还能够改良土壤盐碱环境且对环境安全^[14],因此在农业领域有着极大的应用潜力,但其目前应用仍较少^[15]。现阶段,在利用改良剂来改善土壤盐碱状况、缓解植物盐碱胁迫等方面已有较多研究结果^[6,16],但大多数研究侧重单一应用改良剂,而鲜有将改良剂组合施用进行研究。此外,对作物耐盐性研究多集中于番茄^[10]、黄瓜^[17]、小麦^[13,18]、玉米^[7,19]等作物,而对西瓜耐盐性方面的报道较少。因此,开发应用高效土壤改良剂来提高西瓜在盐碱胁迫下的抗性,对实现西瓜的优质高产具有重要意义。本研究以胡敏酸钙、水溶性硅肥和鼠李糖脂为试验材料,以盐渍土上种植的“纯品8424”西瓜为研究对象,在施用等量化肥基础上,通过田间试验系统研究胡敏酸钙、水溶性硅肥、鼠李糖脂单独施用或组合施用对土壤理化性质、西瓜耐盐性及生长的影响,综合评估各种改良

剂的施用效果,以期为盐渍土区改良剂筛选、应用以及西瓜栽培的健康管理提供理论与技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于陕西省大荔县,地处陕西关中平原东部(34°36'~35°02'N,109°43'~110°19'E)。该地属暖温带半湿润、半干旱季风气候,年平均气温14.4℃,降水量400~515 mm,无霜期210 d左右。大荔县处于洛河、渭河、黄河的三河交汇处,次生盐渍化现象严重。试验地位于沙苑农场,农场土壤类型为风沙土,耕层0~20 cm土壤有机质含量1.67 g·kg⁻¹,全氮含量0.18 g·kg⁻¹,铵态氮含量2.38 mg·kg⁻¹,硝态氮含量6.52 mg·kg⁻¹,全磷含量0.26 g·kg⁻¹,速效磷含量6.16 mg·kg⁻¹,全钾含量21.14 g·kg⁻¹,速效钾含量85.00 mg·kg⁻¹,有效铁含量2.95 mg·kg⁻¹,有效锰含量2.79 mg·kg⁻¹,有效铜含量0.13 mg·kg⁻¹,有效锌含量0.27 mg·kg⁻¹,有效硼含量0.94 mg·kg⁻¹,pH 8.3,总含盐量0.26%。

1.2 试验材料

供试西瓜品种为纯品8424。

供试改良剂:胡敏酸钙(胡敏酸≥80%,钙含量≥15%,其他灰分元素含量≥5%)为实验室自行合成,由胡敏酸溶液(购于陕西鼎天济农腐殖酸制品有限公司)加入饱和硝酸钙沉淀得到,本研究用量依据目前农业生产中腐植酸肥料推荐用量确定;水溶性硅肥(有效硅含量≥50%)购于郑州科源化工产品有限公司(水溶性物质≥90%),用量为产品说明中建议施用量;鼠李糖脂(粉剂,含量≥20%)购于陕西德冠生物科技有限公司,是由假单胞菌以糖和植物油为碳源,经过一定的发酵工艺,由菌体合成并代谢的一种糖脂类生物表面活性剂,目前国内外研究中的施用量范围为15~30 mg·L⁻¹[20],本研究中鼠李糖脂灌溉浓度为20

mg·L⁻¹,依据每公顷的灌水量为750 m³,计算出每次用量为15 kg·hm⁻²。

1.3 试验设计

试验于2021年5—8月在大荔县沙苑农场进行,试验共设置化肥(CF)、化肥+胡敏酸钙(CFR1)、化肥+水溶性硅肥(CFR2)、化肥+鼠李糖脂(CFR3)、化肥+胡敏酸钙+水溶性硅肥(CFR4)、化肥+胡敏酸钙+水溶性硅肥+鼠李糖脂(CFR5)6个处理。每个处理设置3次重复,随机区组排列,共18个小区,每个小区的面积为60 m²(6 m×10 m),西瓜株距0.5 m,行距2 m。在种瓜整地前15 d,将基肥施用于耕层土壤(0~20 cm),第一次追肥在西瓜坐瓜期穴施,第二次追肥在膨大期穴施,具体处理见表1。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤理化性质测定

西瓜成熟期,于每小区中取0~20 cm土层的土样(S型5点取土),并将土样分别均匀混合后装袋(共18个混合土样)。土壤pH采用pH计测定(水土比为2.5:1);土壤含盐量采用5:1水土比浸提-烘干称质量测定;土壤水溶性Ca²⁺、Mg²⁺采用EDTA滴定法测定;K⁺和Na⁺采用火焰光度计法测定[21]。

1.4.2 西瓜产量及品质测定

果实成熟后,从每小区中随机选取代表性西瓜10颗,测定瓜皮厚和单瓜质量,计算单瓜质量均值,结合小区面积与平均单瓜质量折算每公顷产量;可溶性固形物含量采用WYT型手持折射仪测定。

1.4.3 西瓜秧根系构型测定

西瓜成熟期,随机选取各小区植株5棵,缓慢挖出根系,标号后装袋带回实验室,用蒸馏水洗净根系表面附着物,并用吸水纸吸干表面水分,然后将根部与地上部沿茎基切除,采用Win-RHIZO系统对根系进行扫描测定。

表1 不同试验处理基肥与追肥的施用量

Table 1 Amount of base and topdressing fertilizer for different experimental treatments

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer	第一次追肥 First topdressing fertilizer	第二次追肥 Second topdressing fertilizer
CF	化肥(尿素75 kg·hm ⁻² +磷酸二铵525 kg·hm ⁻²)	化肥(尿素225 kg·hm ⁻² +硫酸钾150 kg·hm ⁻²)	化肥(尿素75 kg·hm ⁻² +硫酸钾225 kg·hm ⁻²)
CFR1	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻²	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻²	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻²
CFR2	化肥+水溶性硅肥100 kg·hm ⁻²	化肥+水溶性硅肥100 kg·hm ⁻²	化肥+水溶性硅肥100 kg·hm ⁻²
CFR3	化肥+鼠李糖脂15 kg·hm ⁻²	化肥+鼠李糖脂15 kg·hm ⁻²	化肥+鼠李糖脂15 kg·hm ⁻²
CFR4	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻² +水溶性硅肥100 kg·hm ⁻²	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻² +水溶性硅肥100 kg·hm ⁻²	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻² +水溶性硅肥100 kg·hm ⁻²
CFR5	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻² +水溶性硅肥100 kg·hm ⁻² +鼠李糖脂15 kg·hm ⁻²	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻² +水溶性硅肥100 kg·hm ⁻² +鼠李糖脂15 kg·hm ⁻²	化肥+胡敏酸钙50 kg·hm ⁻² +水溶性硅肥100 kg·hm ⁻² +鼠李糖脂15 kg·hm ⁻²

1.4.4 西瓜叶片光合参数测定

西瓜果实膨大期,于8:30—11:00从每小区中随机选取5片大小形态相似的叶片,采用LI-6400XT光合仪测定西瓜叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率与细胞间CO₂浓度。

1.4.5 西瓜叶片生理指标测定

西瓜果实膨大期,在各小区选取相同位置的5片叶片,用于测定与抗盐性相关的酶活性指标。丙二醛(MDA)含量按照Madhava的硫代巴比妥酸法测定^[22];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚显色法测定^[23];叶片脯氨酸(Pro)含量参照李合生^[24]的磺基水杨酸法测定;叶片O₂·产生速率采用羟胺氧化法测定^[25]。

1.4.6 西瓜根系、茎秆和叶片矿质元素含量的测定

西瓜成熟后,选取不同小区长势一致的植株5棵,将根系、茎秆和叶片分别用去离子水洗净,冷冻干燥18 h,在研钵中研磨粉碎混匀,称取粉碎后的样品0.5 g于消煮管内,加入2 mL高氯酸和10 mL硝酸,于240 ℃下消煮至溶液呈黄色,然后用去离子水定容至50 mL,同时设置只加高氯酸和硝酸的对照。用ICP-OES-Optima 8x00等离子光谱仪测定西瓜根系、茎秆和叶片中的Ca²⁺、K⁺、Na⁺的含量^[26],并计算各组织中的Na⁺/K⁺、Na⁺/Ca²⁺。

1.5 数据分析

所有试验数据采用Excel 2019处理,Origin 2021制图。统计分析采用SPSS 26.0, LSD法进行多重比较,差异显著水平为0.05。

用隶属函数分析法对不同改良剂处理后的西瓜耐盐性指标及植株Ca²⁺、K⁺、Na⁺含量进行综合分析,将所得的隶属函数值进行累加后取均值。所测指标与西瓜耐盐性成反比的代入反隶属函数值,反之代入隶属函数值。均值越大,则该改良剂处理的耐盐性越好。计算公式:

$$D_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

$$D_i' = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

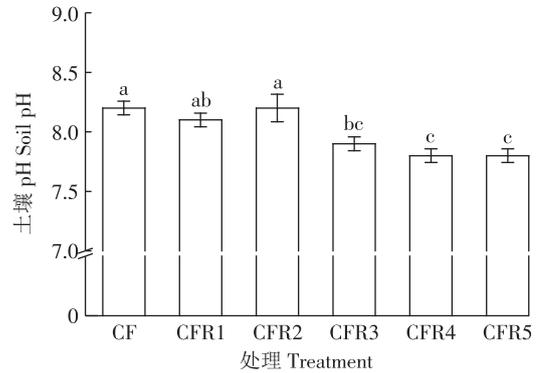
式中: D_i 为隶属函数值; D_i' 为反隶属函数值; X_i 代表不同改良剂处理下单个指标测定值; X_{\max} 与 X_{\min} 分别为不同改良剂处理下该指标的最大值与最小值。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对土壤理化性质的影响

2.1.1 对土壤pH的影响

由图1可知,与CF相比,CFR3、CFR4、CFR5均能显著降低土壤pH($P < 0.05$),其中以CFR5降幅最



方柱上不同字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。
Different letters above the square bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同改良剂对土壤pH的影响

Figure 1 Effects of different amendments on soil pH

大,表明胡敏酸钙、水溶性硅肥与鼠李糖脂混合施用能够在一定程度上调节土壤pH,改善土壤酸碱状况。

2.1.2 对土壤盐基离子的影响

与CF相比,施用改良剂能够显著增加土壤Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺含量,CFR1、CFR4、CFR5显著降低了土壤Na⁺含量($P < 0.05$),其中以CFR5效果最佳(图2)。较CF处理,各改良剂处理的Ca²⁺含量增幅为19.85%~42.62%(图2a)。单一改良剂处理中CFR1较CFR3显著增加了10.10%,但与CFR2无显著差异;CFR4较CFR2显著增加了7.78%,而与CFR1无显著差异,说明在水溶性硅肥中配施胡敏酸钙能够显著提高土壤Ca²⁺含量,反之,在胡敏酸钙基础上,继续增施水溶性硅肥的效果不显著。CFR1、CFR4、CFR5的土壤Na⁺含量较CF显著降低了6.56%~11.48%(图2b),单一改良剂处理中仅胡敏酸钙能显著降低土壤Na⁺含量。配施改良剂处理的K⁺含量较CF均有不同程度的增加,增幅为3.23%~48.39%(图2c),其中CFR1较CFR2、CFR3分别增高了12.50%、5.88%,CFR4较CFR1、CFR2分别增加了5.56%、18.75%。土壤Mg²⁺含量变化显示(图2d),和CF相比,改良剂处理的Mg²⁺含量增幅为11.37%~37.91%,大小顺序依次为CFR5>CFR4>CFR1>CFR3>CFR2,其中CFR5较CFR4显著增加了8.18%,而CFR4较CFR1、CFR2分别显著增加了5.49%、23.83%。由此可知,单一改良剂处理中以胡敏酸钙的改良效果较好,而在胡敏酸钙和水溶性硅肥的基础上继续增施鼠李糖脂能够显著提高土壤水溶性K⁺、Mg²⁺含量。

2.2 不同改良剂对西瓜品质与产量的影响

由图3可知,改良剂处理较CF能显著增加单瓜质量与边缘可溶性固形物含量($P < 0.05$),其中以

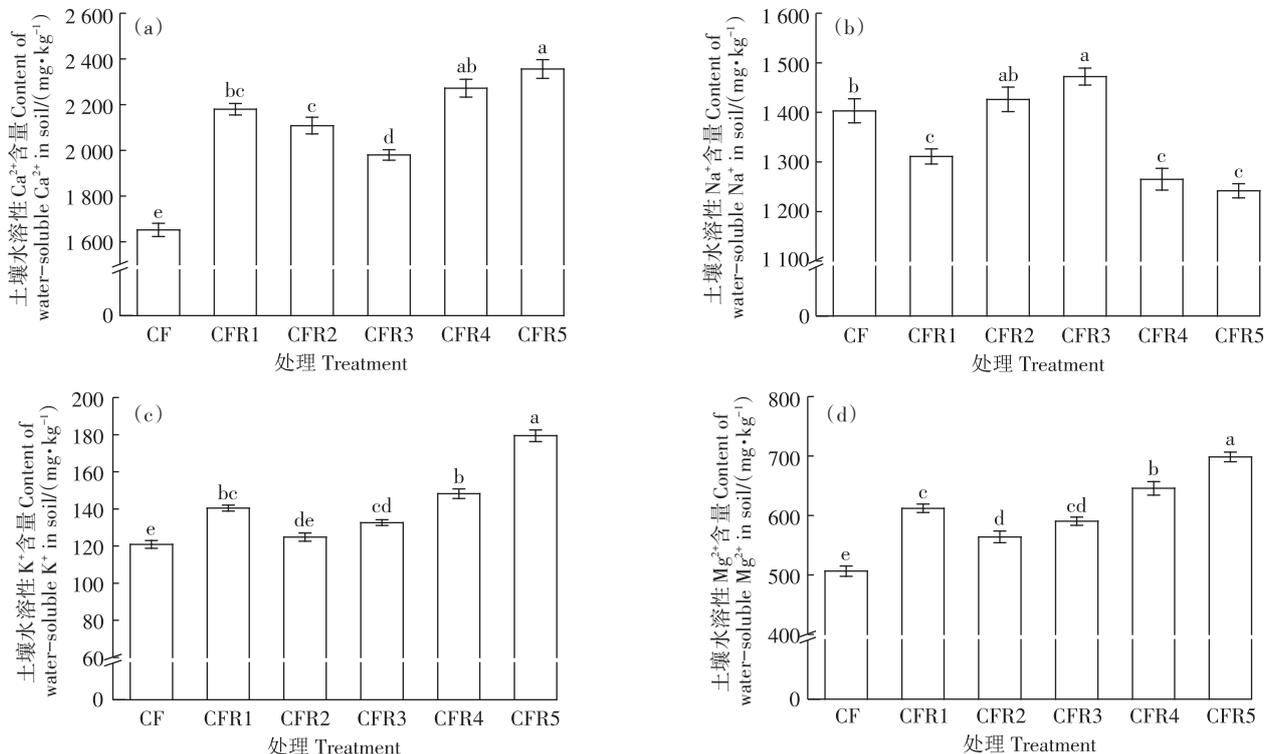


图2 不同改良剂对土壤盐基离子含量的影响

Figure 2 Effects of different amendments on content of soil base ions

CFR5效果最佳。CFR1、CFR2、CFR3的平均单瓜质量较CF分别提高了14.41%、17.03%、15.50%；CFR4较CFR1、CFR2增加了17.37%、14.74% (图3a)。各处理的西瓜皮厚差异均不显著 (图3b)。不同改良剂处理西瓜的中心可溶性固形物含量较CF均有增加 (图3c), 增幅为8.57%~11.77%。西瓜的边缘可溶性固形物含量变化显示 (图3d), 与CF相比, 不同处理增幅大小顺序依次为CFR5 (20.45%) > CFR4 (19.15%) > CFR2 (9.64%) > CFR3 (9.05%) > CFR1 (8.70%)。以上结果表明, 单一改良剂处理中以水溶性硅肥的提质增产效果最好, 并且胡敏酸钙与水溶性硅肥配合施用能够进一步提升西瓜品质, 但继续增施鼠李糖脂后的效果不显著。

不同处理西瓜产量顺序依次为CFR5 > CFR4 > CFR2 > CFR3 > CFR1 > CF (表2)。添加改良剂能够显著提高西瓜产量 ($P < 0.05$), 其中以CFR5增产效果最佳, 较CF增加了40.82%, CFR4处理较CFR1、CFR2处理分别增加了17.38%、14.74%。

2.3 不同改良剂对西瓜秧根系构型的影响

与CF相比, 各改良剂处理均能显著增加西瓜根表面积 ($P < 0.05$, 图4a), 增幅从大到小依次为CFR5、CFR4、CFR2、CFR3、CFR1。单一改良剂处理中以

表2 不同改良剂对西瓜产量的影响

Table 2 Effects of different amendments on yield of watermelon

处理 Treatment	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	增幅 Increase/%
CFR1	48.68b	14.41
CFR2	49.80b	17.04
CFR3	49.15b	15.51
CFR4	57.14a	34.29
CFR5	59.92a	40.82
CF	42.55c	—

注: 同一列数字后不同字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters after the numbers in the same column indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

CFR2根表面积最大, CFR4较CFR1、CFR2分别增加了25.00%、19.88%, 说明水溶性硅肥对根表面积的提升作用大于胡敏酸钙。CFR5较CFR4的根表面积显著增加了8.78%, 表明增施鼠李糖脂能够使根表面积得到进一步增加。与CF相比, 施用改良剂能够使总根长增长 (图4b)。不同改良剂处理较CF的总根长增幅为3.23%~12.86%, 其中以CFR5增幅最大, 其次为CFR3、CFR4, 单一改良剂处理中以CFR3对总根长的影响最大, 较CF增加了8.70%; 与单一改良剂处理相比, CFR4能够进一步促进西瓜根系生长, 且增施鼠

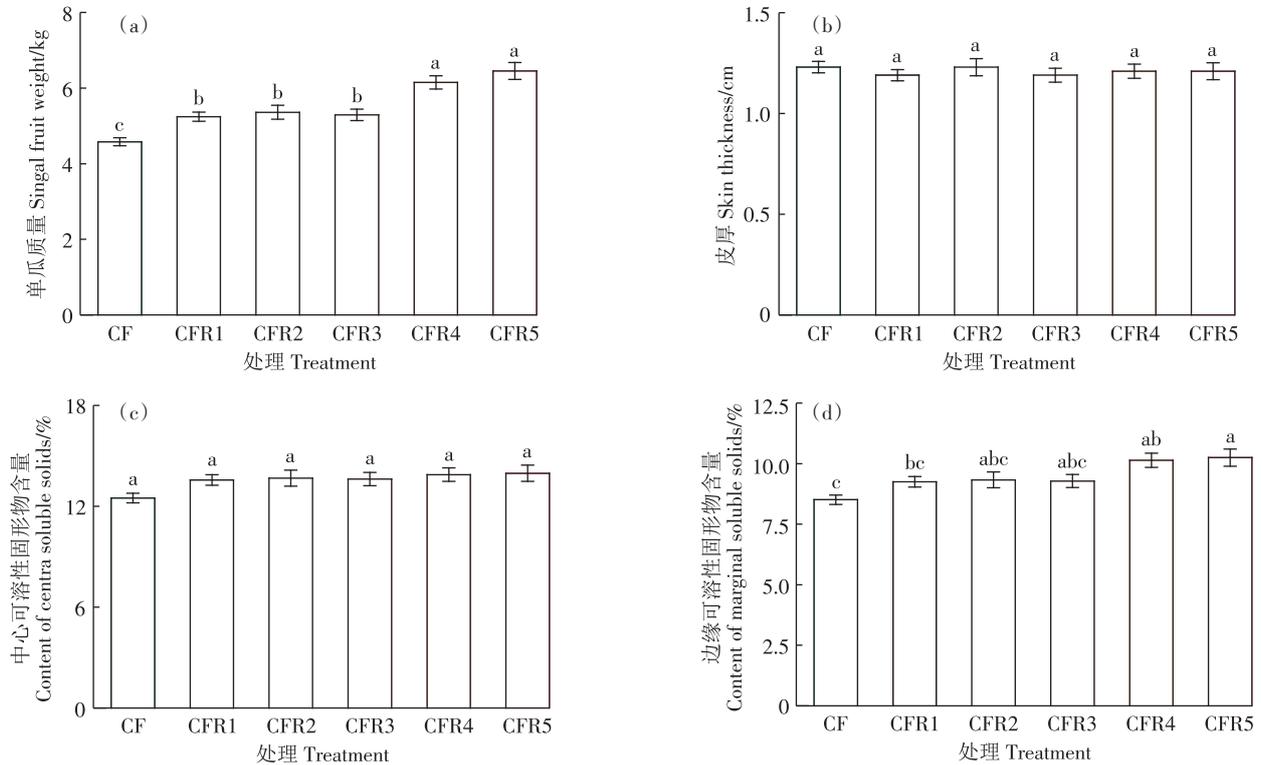


图3 不同改良剂对西瓜品质指标的影响

Figure 3 Effects of different amendments on quality indicators of watermelon

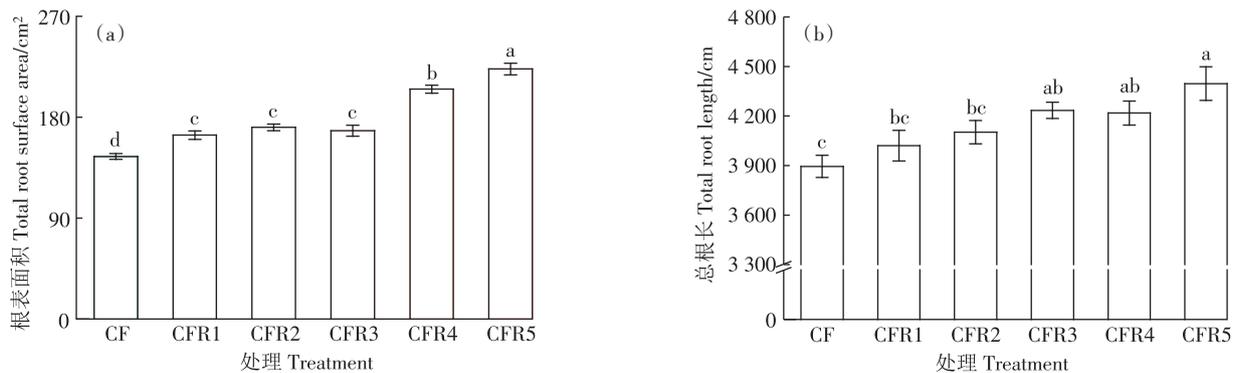


图4 不同改良剂对西瓜秧根系构型的影响

Figure 4 Effects of different amendments on root architecture of watermelon

李糖脂的CFR5效果达到最佳。

2.4 不同改良剂对西瓜光合作用的影响

施用改良剂较CF能够显著增加西瓜净光合速率、气孔导度、细胞间CO₂浓度与蒸腾速率,且差异均达显著水平($P < 0.05$,图5)。与CF相比,施用改良剂处理的净光合速率增幅为15.22%~43.76%(图5a),大小顺序为CFR5>CFR4>CFR2>CFR3>CFR1,其中CFR5较CFR4显著增加了9.38%,CFR4较CFR1、CFR2分别显著增加了14.07%、10.35%。气孔导度增

幅由高到低依次为CFR5(69.95%)、CFR4(51.41%)、CFR2(38.26%)、CFR3(37.79%)、CFR1(27.00%),CFR5较CFR4显著增加了12.25%,CFR4较CFR1、CFR2分别增加了19.22%、9.51%,但增幅不显著(图5b)。与CF相比,CFR1、CFR2、CFR3、CFR4、CFR5的蒸腾速率分别增长了20.34%、32.06%、28.73%、52.88%、64.18%(图5c),其中CFR4较CFR1、CFR2分别显著增加了27.03%、15.76%。与CF相比,改良剂配施化肥处理的细胞间CO₂浓度增幅在9.41%~

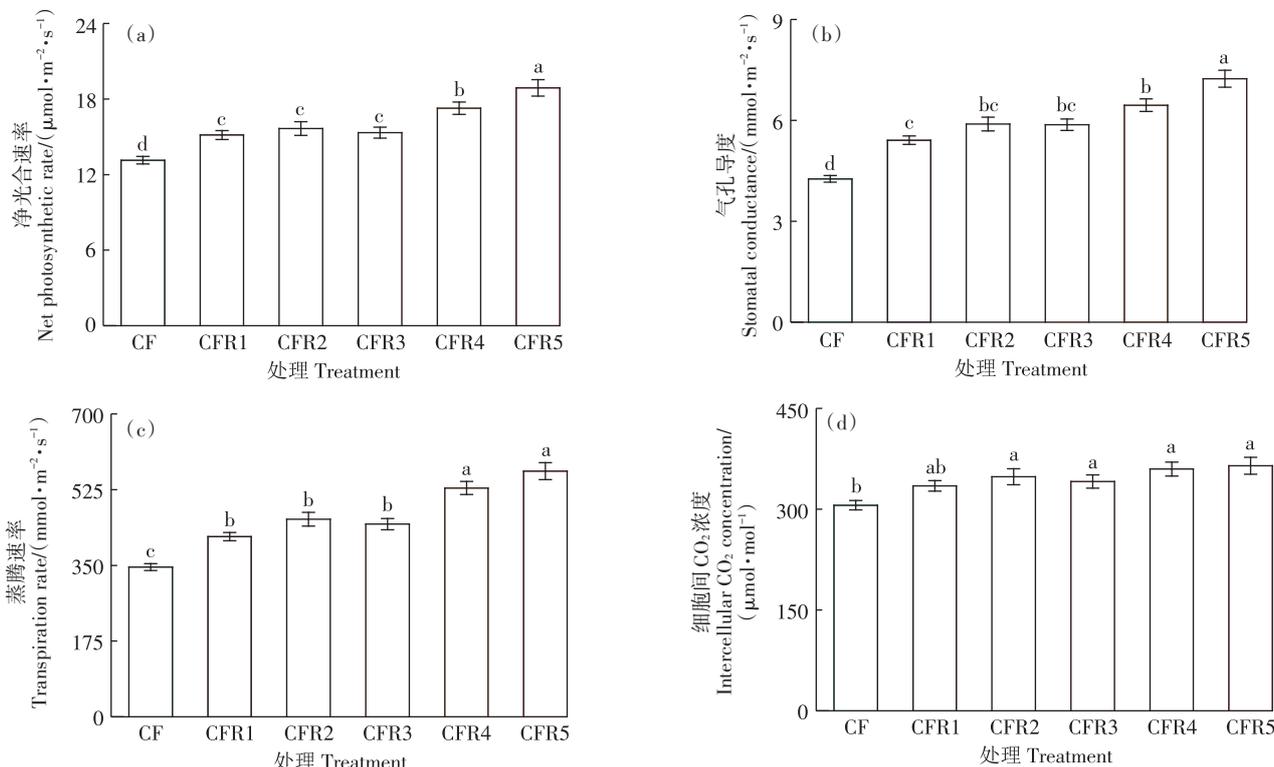


图5 不同改良剂对西瓜光合参数的影响

Figure 5 Effects of different amendments on photosynthetic parameters of watermelon

19.16% (图 5d), 其中以 CFR5 浓度最高, 为 $364.5 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 各改良剂处理间差异不显著。以上结果表明, 单一改良剂处理中以水溶性硅肥对西瓜光合作用的促进效果最好, 水溶性硅肥与胡敏酸钙配施较单一处理可进一步提升叶片净光合速率、气孔导度与蒸腾速率, 在此基础上增施鼠李糖脂可使提升效果得到显著增强。

2.5 不同改良剂对西瓜耐盐性的影响

2.5.1 对西瓜生理指标的影响

施用改良剂能显著增加西瓜叶片过氧化物酶活性和脯氨酸含量, 降低丙二醛含量与叶片 $\text{O}_2\cdot$ 产生速率 ($P<0.05$, 图 6), 其中以 CFR5 效果最佳。与 CF 相比, 不同改良剂配施化肥处理的叶片过氧化物酶活性增幅为 31.72%~74.73% (图 6a), 单一改良剂处理中, CFR2 较 CFR1、CFR3 显著增加了 16.73%、13.94%; CFR4 较 CFR1 显著增长了 24.08%, 但与 CFR2 无显著差异, 表明在胡敏酸钙中增施硅肥能够显著提高叶片过氧化物酶活性, 反之, 在水溶性硅肥基础上继续增施胡敏酸钙的效果不显著。施用改良剂处理的脯氨酸含量较 CF 显著提高了 26.56%~48.95% (图 6b), 其中 CFR2 较 CFR1 提高了 9.24%, 与 CFR3 间差异不显著; 另外, CFR4 较 CFR1 显著提高了 14.25%,

而与 CFR2 间无显著差异, 表明水溶性硅肥在增加过氧化物酶活性和脯氨酸含量方面有着更大的贡献。改良剂配施化肥处理的西瓜叶片丙二醛含量较 CF 均有不同程度的降低 (图 6c), 降幅为 15.01%~30.97%, 单一改良剂处理间差异不显著, 但以 CFR3 降幅最大; CFR4 较 CFR1、CFR2 分别显著降低了 19.10%、16.37%。与 CF 相比, 施用改良剂处理的叶片 $\text{O}_2\cdot$ 产生速率的降低幅度为 18.97%~47.59% (图 6d), CFR4 较 CFR1、CFR2 分别显著降低了 27.78%、21.89%。相对而言, 在单一改良剂处理中以鼠李糖脂对叶片丙二醛含量与 $\text{O}_2\cdot$ 产生速率的影响最大。较单一改良剂处理, 胡敏酸钙配施水溶性硅肥能进一步影响西瓜各项生理指标, 但继续增施鼠李糖脂的效果不显著。

2.5.2 对西瓜根、茎、叶中盐基离子的影响

由表 3 可以看出, 各改良剂处理中, 叶片 Ca^{2+} 和 K^+ 含量均显著高于根系与茎秆, 茎秆中 Na^+ 、 Na^+/K^+ 均高于根系与叶片, 除 CF 外, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 在根系中最高。与 CF 相比, 不同改良剂配施化肥均能显著增加西瓜植株 Ca^{2+} 含量, 同时显著降低 Na^+ 含量 ($P<0.05$)。在单一改良剂处理中, 西瓜植株 K^+ 含量以 CFR2 提升幅度最大, 而 CFR1 对 Ca^{2+} 、 Na^+ 含量的影响相对较明显。

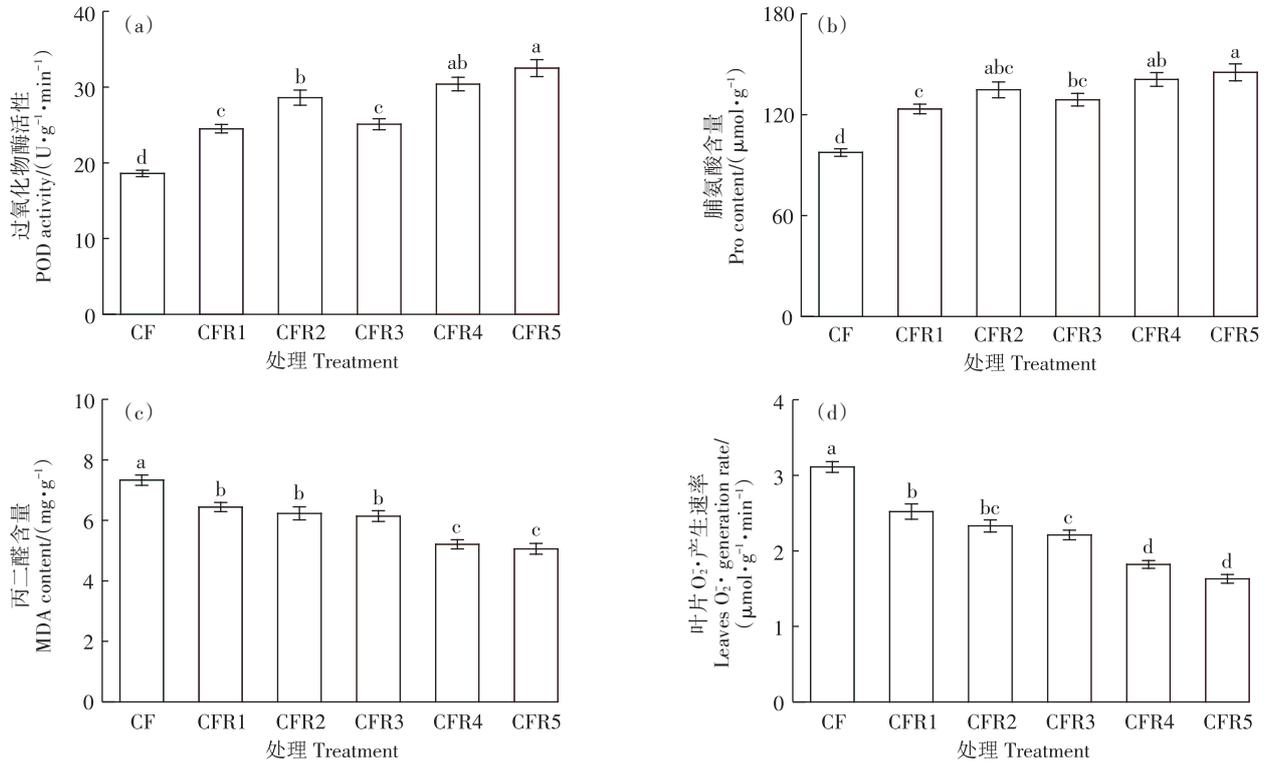


图6 不同改良剂对西瓜生理指标的影响

Figure 6 Effects of different amendments on physiological indicators of watermelon

表3 不同改良剂对西瓜根系、茎秆和叶片中 Ca²⁺、K⁺和 Na⁺含量的影响

Table 3 Effects of different amendments on the content of Ca²⁺, K⁺, and Na⁺ in roots, stems, and leaves of watermelon

处理 Treatment		CF	CFR1	CFR2	CFR3	CFR4	CFR5
根系 Root	Ca ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	1.20dC	1.50cC	1.40cC	1.40cC	1.90bC	2.10aC
	Na ⁺ /(g·kg ⁻¹)	2.50aC	1.80cdB	2.10bB	1.90bcB	1.70cdB	1.60dB
	K ⁺ /(g·kg ⁻¹)	4.50cB	4.80cC	5.90bB	4.80cB	6.20abB	6.50aB
	Na ⁺ /K ⁺	0.56aB	0.38bcB	0.36cB	0.40bB	0.27dB	0.25dB
	Na ⁺ /Ca ²⁺	2.08aB	1.20cA	1.50bA	1.36bcA	0.89dA	0.76dA
茎秆 Stem	Ca ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	2.30eB	3.80bcB	3.60cdB	3.40dB	4.10bB	4.50aB
	Na ⁺ /(g·kg ⁻¹)	5.90aA	3.80cA	4.60bA	4.20bcA	2.90dA	2.10eA
	K ⁺ /(g·kg ⁻¹)	5.10bB	5.50bB	5.60bB	5.40bB	6.50aB	6.90aB
	Na ⁺ /K ⁺	1.16aA	0.69cA	0.82bA	0.78bA	0.45dA	0.30eA
	Na ⁺ /Ca ²⁺	2.57aA	1.00cB	1.28bB	1.24bA	0.71dB	0.47eB
叶片 Leaf	Ca ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	7.50eA	12.80cA	12.60cdA	11.50dA	14.50bA	15.90aA
	Na ⁺ /(g·kg ⁻¹)	3.10aB	1.50cB	1.90bB	1.80bB	1.20dC	1.00dC
	K ⁺ /(g·kg ⁻¹)	8.50bA	8.90bA	9.30bA	9.10bA	11.30aA	12.40aA
	Na ⁺ /K ⁺	0.36aC	0.17cC	0.20bC	0.20bC	0.11dC	0.08eC
	Na ⁺ /Ca ²⁺	0.41aC	0.12cC	0.15bC	0.16bB	0.08dC	0.06dC

注:同一行不同小写字母表示各处理间差异显著,同一列不同大写字母表示相同元素不同部位间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in the same row of the table indicate significant differences among different treatments. Different capital letters after the same element numbers in the same column indicate significant differences among different parts (P<0.05).

各处理中以 CFR5 效果最佳,表明 3 种改良剂配施处理的效果达到最佳。

2.6 不同改良剂对西瓜耐盐性影响的综合评价

由于单一指标不能综合体现出不同改良剂对西

瓜耐盐性的影响效果,而隶属函数分析法能够以多个指标为基础,综合分析各处理的应用效果。因此,本试验采用隶属函数分析法,对不同改良剂处理的西瓜耐盐性指标(土壤pH、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、西瓜叶片过氧化物酶活性、丙二醛含量、 $O_2\cdot$ 产生速率、脯氨酸含量等)进行了综合评价,平均值越大,代表耐盐性越好(表4)。各改良剂处理的隶属函数均值都高于CF处理,且不同改良剂处理对西瓜耐盐性影响的综合效果为CFR5>CFR4>CFR1>CFR2>CFR3。单一改良剂处理中以CFR1增强西瓜耐盐性的效果最好,而3种改良剂配施对缓解西瓜盐害的效果最佳。

3 讨论

3.1 不同改良剂对西瓜耐盐性及土壤盐基离子的影响

盐碱胁迫下,植物产生过量的氧自由基并损伤质膜,同时产生丙二醛造成脂质过氧化,而植物则会通过抗氧化酶系统来维持体内活性氧的动态平衡,从而缓解胁迫作用^[4]。本试验表明,单施或配施改良剂均能显著提高西瓜耐盐性,隶属函数分析结果显示不同处理对西瓜耐盐性影响的综合效果为CFR5>CFR4>CFR1>CFR2>CFR3>CF。这说明胡敏酸钙、水溶性硅肥、鼠李糖脂3种改良剂配合施用进一步提升了其单

施的作用效果,减轻了土壤盐渍化给西瓜带来的伤害。本研究发现,单一改良剂处理中以胡敏酸钙对西瓜耐盐性与土壤盐基离子的影响效果最明显,可能是胡敏酸作为土壤有机质的重要组分,施入后通过促进团粒结构的形成改善了土壤环境,从而降低了盐危害。也有研究发现,胡敏酸钙有助于增强植物体内的抗氧化酶活性,缓解因盐胁迫导致的缺钙所引起的矿质营养胁迫,增强质膜的稳定性^[27],抑制 Na^+ 的选择运输^[28]。Tattini等^[29]认为适宜浓度的 Ca^{2+} 能够增加植物气孔导度与蒸腾速率,对植物耐盐性有积极的影响。本研究表明,各处理中均以CFR5对西瓜耐盐性的提升效果最佳,一方面可能是硅元素本身能够通过调节植物体内的抗氧化防御系统来提高植株的抗逆性,从而减小植物因盐分胁迫而造成的细胞伤害^[30],另一方面,硅肥能够促进植物根系对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等矿质元素的吸收^[31],并通过提高植物体内 H^+ -ATPase酶的活性来促进 Na^+ 反转运至液泡,减少对 Na^+ 的吸收以维持离子稳态^[17,32];而鼠李糖脂作为一种生物表面活性剂,与其他改良材料配合施用能够降低植物叶片的表面张力,促进植株对养分的吸收。

土壤中过量的 Na^+ 会扰乱植物细胞内的离子稳态,影响植物对 K^+ 、 Ca^{2+} 的吸收,如植物缺钾会改变蛋

表4 不同改良剂下西瓜耐盐性指标的隶属函数值及排序

Table 4 Subordinative function values and ranking of salt tolerance indexes of watermelon treated with different amendments

项目 Item	CF	CFR1	CFR2	CFR3	CFR4	CFR5
土壤pH Soil pH	0.200	0.400	0.200	0.800	1.000	1.000
叶片 $O_2\cdot$ 产生速率 $O_2\cdot$ production rate in leaves	0.026	0.414	0.539	0.618	0.875	1.000
丙二醛含量 MDA content	0.085	0.444	0.528	0.565	0.940	1.000
脯氨酸含量 Pro content	<0.001	0.543	0.781	0.658	0.911	1.000
过氧化物酶活性 POD activity	0.073	0.467	0.740	0.507	0.860	1.000
叶片 K^+ 含量 K^+ content in leaves	0.152	0.239	0.326	0.283	0.761	1.000
叶片 Na^+ 含量 Na^+ content in leaves	0.125	0.792	0.625	0.667	0.917	1.000
叶片 Ca^{2+} 含量 Ca^{2+} content in leaves	0.023	0.640	0.616	0.488	0.837	1.000
茎秆 K^+ 含量 K^+ content in stems	0.100	0.300	0.350	0.250	0.800	1.000
茎秆 Na^+ 含量 Na^+ content in stems	0.136	0.614	0.432	0.523	0.818	1.000
茎秆 Ca^{2+} 含量 Ca^{2+} content in stems	0.083	0.708	0.625	0.542	0.833	1.000
根系 Ca^{2+} 含量 Ca^{2+} content in roots	0.100	0.400	0.300	0.300	0.800	1.000
根系 Na^+ 含量 Na^+ content in roots	0.250	0.835	0.583	0.750	0.917	1.000
根系 K^+ 含量 K^+ content in roots	0.130	0.261	0.739	0.261	0.870	1.000
土壤 K^+ 含量 K^+ content in soil	0.375	0.583	0.417	0.500	0.667	1.000
土壤 Ca^{2+} 含量 Ca^{2+} content in soil	0.059	0.765	0.668	0.497	0.888	1.000
土壤 Na^+ 含量 Na^+ content in soil	0.364	0.727	0.273	0.091	0.909	1.000
土壤 Mg^{2+} 含量 Mg^{2+} content in soil	0.036	0.566	0.325	0.458	0.735	1.000
均值 Average	0.129	0.539	0.504	0.486	0.852	1.000
排序 Rank	6	3	4	5	2	1

白质构型,抑制代谢所需酶的合成,缺钙则会影响细胞膜的选择透过性^[2]。同时, Na^+/K^+ 、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 也能在一定程度上反映出植株的营养及代谢状况,与植物抗盐性有着密切关系^[33]。本研究表明,施用不同改良剂能显著影响土壤中盐基离子含量,降低西瓜植株 Na^+ 含量并促进 K^+ 、 Ca^{2+} 的积累,这说明单施或配施改良剂处理均能在一定程度上缓解盐胁迫带来的离子毒害效应。单一改良剂处理中以胡敏酸钙处理的植株 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 最低,这与周涛等^[34]的研究结果相一致。另外,单一改良剂处理中仅胡敏酸钙显著降低了土壤 Na^+ 含量。一方面可能是因为施用胡敏酸钙直接增加了植物可利用 Ca^{2+} 含量,使西瓜植株中 Ca^{2+} 含量增加;另一方面,胡敏酸中的羧基、羟基等酸性基团能够在一定程度上降低土壤pH,同时增加土壤中 Ca^{2+} 的溶解度,使 Ca^{2+} 与 Na^+ 代换以限制植株对 Na^+ 的吸收^[27]。于彦琳等^[35]发现,施用硅肥能够降低土壤pH并提高营养元素的有效性,一定程度上缓解盐碱环境给植物带来的负面效应。本试验结果表明,虽然单施胡敏酸钙和水溶性硅肥对土壤pH均无显著影响,但两者配施却能够降低土壤pH,这可能是由于单一改良剂施用量较少所致。而在两者配施处理下,硅的施入促进了根系对 Ca^{2+} 的吸收,增强了根系向外分泌 H^+ 的作用,同时腐植酸中的羧基、羟基等酸性基团也能够与土壤中的盐基离子结合以降低土壤pH^[36]。另外,鼠李糖脂可在碱溶液中电离出 H^+ 以中和 OH^- ,从而改善土壤碱性^[14],这与本研究中单施鼠李糖脂较CF处理能够降低土壤pH的结果相一致。因此,无论是胡敏酸钙和水溶性硅肥两者混合施用,还是3种改良剂混合施用,都能够一定程度上降低土壤pH。

本研究还发现,单一改良剂处理中以水溶性硅肥处理的西瓜植株 K^+ 含量最高。这可能是由于硅元素影响了植株木质部导管细胞壁的亲水性,从而增强了吸水性能。另外,Tuna等^[13]发现,外源硅的加入能够减少盐胁迫下植物对 Na^+ 的吸收,减弱 Na^+ 与 K^+ 之间的竞争关系,从而增加了对 K^+ 的吸收。本研究中,盐胁迫下西瓜 Na^+ 含量表现为茎>叶>根,这与魏翠果等^[28]在马铃薯上的试验结果一致,可能是因为茎的代谢能力较弱,植物将大量的 Na^+ 贮藏于茎秆中,从而减轻对植株叶片与根系的伤害。

3.2 不同改良剂对西瓜生长的影响

本研究表明,化肥配施胡敏酸钙、水溶性硅肥、鼠李糖脂及其组合均可显著增强西瓜的光合作用并促进根系生长。单一改良剂处理中以水溶性硅肥的改

良效果最好。研究表明,硅可以增强根系活力,改善根系氧化条件,提高根系对养分的吸收量^[37]。另外,植物叶片吸收硅元素后,其表面形成的一层硅化细胞可增强叶片的透光性,从而促进叶片对光照的利用^[38]。张国芹等^[39]研究发现,硅可提高叶绿体偶联因子 Mg^{2+} -ATPase与 Ca^{2+} -ATPase的活性,以加快光合磷酸化反应进程。而光合作用的增强,为西瓜各项品质与产量的提高奠定了基础。试验结果还表明,施用单一改良剂时,西瓜品质与产量同样以单施水溶性硅肥处理效果最好,这与上述水溶性硅肥对光合作用较好的促进作用相呼应。

根系是植物从土壤中吸收养分的主要器官,能最先感受到盐碱胁迫,并会通过调整根系结构、改变根系形态等措施来适应并缓解逆境^[40]。本试验结果表明,改良剂单施或配施均能显著促进西瓜根系生长。单一改良剂处理间以鼠李糖脂对总根长的提升效果相对更好。这可能是由于鼠李糖脂中的菌体,在释放到土壤后被分解为蛋白,增强了微生物活性并刺激了根系生长。刘菊^[41]研究发现,喷施鼠李糖脂能够降低叶片表面张力,促进对养分的吸收。另外,根系结构的改变也减弱了植株对 Na^+ 的吸收,增加其对 K^+ 的吸收,从而缓解了 Na^+ 毒害作用^[42]。在多种改良剂配施的处理中,增施鼠李糖脂的效果均达最佳,表明增施鼠李糖脂能够进一步促进根系的生长,减缓盐分对植物根系的伤害。

西北地区作为我国西瓜的主要产地之一,改良盐碱地并提高西瓜的耐盐性对该地区农业发展具有重要意义。胡敏酸钙施入土壤后,不仅能够提供养分,改善土壤理化性质并增强植株抗氧化酶活性,而且其生产成本较低,来源也较广泛^[7];水溶性硅肥的施入不仅能够促进植物根系对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等矿质元素的吸收,维持离子稳态,还能提高植株的活性氧清除能力^[10];而鼠李糖脂作为一种生物表面活性剂,能够降低西瓜叶片的表面张力,辅助植株对养分的吸收,从而提升改良剂的作用效果^[14]。因此,本试验应用以上3种改良剂的结果显示,施用改良剂能够有效增强盐碱地西瓜耐盐性,改良土壤盐碱环境,提高西瓜产量与单果质量。综上,以3种改良剂联合配施提质增产的效果达到最佳,可与化肥配合施用,作为当地西瓜种植的重要肥料。

4 结论

(1)在盐渍化土壤中,胡敏酸钙、水溶性硅肥、鼠

李糖脂3种改良剂单施或混施能够显著促进西瓜的光合作用,提高品质与产量。

(2)单施或混施改良剂能够在一定程度上缓解高pH环境和盐分给西瓜植株带来的伤害,显著增强西瓜耐盐性,显著提高西瓜过氧化物酶活性和脯氨酸含量,并明显降低丙二醛含量与叶片 $O_2\cdot$ 产生速率等抗逆性指标。隶属函数分析结果表明:单一改良剂处理中以胡敏酸钙对西瓜耐盐性的提升效果最为显著,而3种改良剂配施的效果达到最佳。

(3)不同成分改良剂对土壤理化性质、西瓜耐盐性及生长的影响有所差异。单一改良剂处理中以胡敏酸钙在调节土壤水溶性离子与植株体内离子方面效果最佳,水溶性硅肥在促进西瓜光合作用、增强过氧化物酶活性、脯氨酸含量和根表面积等方面效果较好,而鼠李糖脂在降低丙二醛含量、叶片 $O_2\cdot$ 产生速率、土壤pH和增加总根长等方面效果较为显著。

参考文献:

- [1] DING Z L, KHEIR A M S, ALI O A M, et al. A vermicompost and deep tillage system to improve saline-sodic soil quality and wheat productivity[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111388.
- [2] HASEGAWA P M. Sodium (Na^+) homeostasis and salt tolerance of plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 92: 19-31.
- [3] YANG Y Q, GUO Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses[J]. *New Phytologist*, 2018, 217(2): 523-539.
- [4] 毛恋, 芦建国, 江海燕. 植物响应盐碱胁迫的机制[J]. *分子植物育种*, 2020, 18(10): 3441-3448. MAO L, LU J G, JIANG H Y. Mechanisms of plant responses to salt-alkali stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(10): 3441-3448.
- [5] 朱士农, 郭世荣. 嫁接对盐胁迫下西瓜植株体内 Na^+ 和 K^+ 含量及其分布的影响[J]. *园艺学报*, 2009, 36(6): 814-820. ZHU S N, GUO S R. Effects of grafting on K^+ , Na^+ contents and distribution of watermelon (*Citrullus vulgaris* Schrad.) seedlings under NaCl stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36(6): 814-820.
- [6] KIM Y H, KHAN A L, WAQAS M, et al. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 510.
- [7] ANJUM S A, WANG L, FAROOQ M, et al. Fulvic acid application improves the maize performance under well-watered and drought conditions[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2011, 197(6): 409-417.
- [8] MAHMOODABADI M, YAZDANPANA N, RODRÍGUEZ S L, et al. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): redistribution of soluble cations within the soil profile[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 30-38.
- [9] 张振兴, 孙锦, 郭世荣, 等. 钙对盐胁迫下西瓜光合特性和果实品质的影响[J]. *园艺学报*, 2011, 38(10): 1929-1938. ZHANG Z X, SUN J, GUO S R, et al. Effects of supplemental calcium on the photosynthetic characteristics and fruit quality of watermelon under salt stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(10): 1929-1938.
- [10] 朱永兴, 李换丽, 胡彦宏, 等. 硅酸盐提高番茄抗盐性的效应与生理机制[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2): 213-220. ZHU Y X, LI H L, HU Y H, et al. Effect of silicate on salt resistance in tomato and underlying physiological mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 213-220.
- [11] WANG S W, LIU P, CHEN D Q, et al. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 759.
- [12] 邢钰媛, 姜运生, 王坤, 等. 施用生物炭和硅肥对增温水稻叶片光合及荧光特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(2): 451-463. XING Y Y, LOU Y S, WANG K, et al. Effects of biochar and silicate supply on photosynthetic and fluorescence characteristics of rice leaves under nighttime warming[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 451-463.
- [13] TUNA A L, KAYA C, HIGGS D, et al. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(1): 10-16.
- [14] 吴虹, 汪薇, 韩双艳. 鼠李糖脂生物表面活性剂的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2007, 34(1): 148-152. WU H, WANG W, HAN S Y. Recent progress on rhamnolipid biosurfactant[J]. *Microbiology China*, 2007, 34(1): 148-152.
- [15] LIU H J, SHAO B, LONG X W, et al. Foliar penetration enhanced by biosurfactant rhamnolipid[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2016, 145: 548-554.
- [16] 冀拯宇, 周吉祥, 张贺, 等. 不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1759-1767. JI Z Y, ZHOU J X, ZHANG H, et al. Effect of soil conditioners on the soil chemical properties and organic carbon pool of saline-sodic soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1759-1767.
- [17] 朱永兴. 硅对黄瓜幼苗盐胁迫损伤的缓解效应及机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 22-40. ZHU Y X. Alleviative effects and mechanisms of silicon on salt stress-induced damage in cucumber seedlings[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016: 22-40.
- [18] 郭伟, 王庆祥. 腐植酸浸种对盐碱胁迫下小麦幼苗抗氧化系统的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2539-2545. GUO W, WANG Q X. Effects of seed soaking with humic acid on wheat seedlings antioxidant system under salt-alkali stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2539-2545.
- [19] LATEF ARAFAT A A, TRAN L S P. Impacts of priming with silicon on the growth and tolerance of maize plants to alkaline stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 243.
- [20] ZHU L Z, ZHANG M. Effect of rhamnolipids on the uptake of PAHs by ryegrass[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(1): 46-52.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-139. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3th Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 25-139.

- [22] MADHAVA R K V, SRESTY T V S. Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh] in response to Zn and Ni stresses[J]. *Plant Science*, 2000, 157(1):113-128.
- [23] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 164-165. WANG X K, HUANG J L. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. 3th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2015: 164-165.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 145-157. LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 145-157.
- [25] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. 植物生理学通讯, 1990(6): 55-57. WANG A G, LUO G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1990(6): 55-57.
- [26] 王小平, 项苏留. 微波消解-ICP-OES, AAS和AFS测定大蒜不同部位20种元素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(10): 1907-1911. WANG X P, XIANG S L. Studies on the contents of twenty elements in different parts of garlic by using ICP-OES, AAS and AFS combined with microwave decomposition method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(10): 1907-1911.
- [27] BAYAT H, SHAFIE F, AMINIFARD M H, et al. Comparative effects of humic and fulvic acids as biostimulants on growth, antioxidant activity and nutrient content of yarrow (*Achillea millefolium* L.)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 279: 109912.
- [28] 魏翠果, 陈有君, 蒙美莲, 等. 钙对NaCl胁迫下马铃薯脱毒苗离子吸收、分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 993-1005. WEI C G, CHEN Y J, MENG M L, et al. Effects of calcium on ion absorption and distribution of virus-free potato seedlings under NaCl stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 993-1005.
- [29] TATTINI M, TRAVERSI M L. On the mechanism of salt tolerance in olive (*Olea europaea* L.) under low- or high-Ca²⁺ supply[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 65(1): 72-81.
- [30] LIANG Y C, SUN W C, ZHU Y G, et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2): 422-428.
- [31] 马青娜, 卢文凯, 甄梅楠, 等. 硅对高硼高盐胁迫下小麦生长及离子吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1479-1484. MA Q N, LU W K, ZHEN M N, et al. Effects of silicon on growth and ion uptake of wheat under combined stresses of excessive boron and high salinity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1479-1484.
- [32] LIANG Y C, ZHANG W H, CHEN Q, et al. Effects of silicon on H⁺-ATPase and H⁺-PPase activity, fatty acid composition and fluidity of tonoplast vesicles from roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 53(1): 29-37.
- [33] 赵振杰, 张海龙, 王明晶, 等. 植物耐盐性相关细胞内pH和离子稳态的调控机制[J]. 植物生理学报, 2020, 56(3): 337-344. ZHAO Z J, ZHANG H L, WANG M J, et al. Salt stress-related regulation mechanism of intracellular pH and ion homeostasis in plants[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(3): 337-344.
- [34] 周涛, 萨如拉, 郭永青, 等. 腐植酸水溶肥料对盐胁迫下燕麦阳离子含量及产量的影响[J]. 腐植酸, 2015(4): 15-20. ZHOU T, SA R L, GUO Y Q, et al. Effect of humic acid water soluble fertilizer on oat positive ion and yield under salt stress[J]. *Humic Acid*, 2015(4): 15-20.
- [35] 于彦琳, 师桂英, 张立彭, 等. 硅肥和微生物菌剂配施对连作兰州百合 (*Lilium davidli* var. *unicolor*) 生长及土壤生化性质的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 157-165. YU Y L, SHI G Y, ZHANG L P, et al. Effects of silicon fertilizer and microbial inoculants on the growth and soil biochemical properties of continuous cropping in Lanzhou lily[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(5): 157-165.
- [36] 范联连, 贾阳杰, 范远, 等. 盐碱土施用硅钙渣对披碱草生长的影响及机制[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 93-101. FAN Z L, JIA Y J, FAN Y, et al. Growth of *Elymus nutans* in saline saline-alkali soil amended with calcium silicate slag: performance and mechanism[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(2): 93-101.
- [37] 刘景凯, 刘世琦, 冯磊, 等. 硅对青蒜苗生长、光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 989-997. LIU J K, LIU S Q, FENG L, et al. Effects of silicon on growth, photosynthetic characteristics and quality of garlic seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 989-997.
- [38] 何念祖, 孟赐福. 植物营养学原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 315-317. HE N Z, MENG C F. Principles of plant nutrition[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 315-317.
- [39] 张国芹, 徐坤, 王兴翠, 等. 硅对生姜叶片水、二氧化碳交换特性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1702-1707. ZHANG G Q, XU K, WANG X C, et al. Effects of silicon on exchange characteristics of H₂O and CO₂ in ginger leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1702-1707.
- [40] 束红梅, 郭书巧, 巩元勇, 等. 盐胁迫对作物根系的影响及基因工程改良[J]. 分子植物育种, 2013, 11(5): 657-662. SHU H M, GUO S Q, GONG Y Y, et al. The influence of salt stress on crop root and its genetic improvement[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2013, 11(5): 657-662.
- [41] 刘菊. 鼠李糖脂对西瓜枯萎病防治作用的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 26-41. LIU J. The preventive effects of rhamnolipid treatments on fusarium wilt of watermelon[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 26-41.
- [42] 杨莹攀. 鼠李糖脂对盐渍化棉田土壤理化特性及棉花生长的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021: 10-12. YANG Y P. Effects of rhamnolipids on the physical and chemical properties of salted cotton field soil and cotton growth[D]. Aral: Tarim University, 2021: 10-12.

(责任编辑: 李丹)