

不同改良剂配施对河套灌区碱化土壤理化性质及枸杞生长的影响

黄浦江^{1,2}, 方 昭³, 余海龙⁴, 张峰举², 黄菊莹²

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 宁夏大学地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要:为了评价脱硫石膏配施不同功能改良剂对宁夏河套灌区碱化土壤改良效果,进而筛选出适合河套地区碱化土壤改良的最佳方案,本研究以枸杞(*Lycium chinense*)为供试材料,在宁夏河套灌区设立碱化土壤改良田间试验,设对照(T_1)、单施脱硫石膏(T_2)、脱硫石膏+醋糟+菌肥(T_3)、脱硫石膏+菌肥(T_4)、脱硫石膏+醋糟+菌肥+保水剂(T_5)、脱硫石膏+微肥(T_6)、脱硫石膏+诱抗素(T_7)7个处理,于2013—2016年连续开展田间试验对比分析不同改良措施对土壤盐碱指标、养分状况以及枸杞农艺性状(成活率/保存率、株高和产量)的影响。结果表明:改良4年间 $T_2 \sim T_7$ 处理在提高0~20 cm土层土壤有机碳(5.4%~88.8%)、全氮(8.0%~31.3%)、碱解氮(11.4%~41.7%),降低pH值(4.8%~10.3%),钠吸附性比SAR(5.5%~51.6%)和全盐含量(5.5%~51.6%)方面的效果明显优于20~40 cm土层,且其影响程度随改良年限推移而逐渐增强;而对于土壤全磷、速效磷、速效钾含量促进作用整体较弱或不存在一致的规律性变化。不同改良剂型间以 T_5 处理在提高土壤有机质和养分含量、降低土壤pH值、缓解土壤盐胁迫方面的效果最为突出,同时该处理下枸杞具有较高的成活率/保存率(83.88%~92.22%)、株高(74.16~140.13 cm)和产量(0.70~2.31 kg·hm⁻²)。相关分析发现不同土层pH值、全盐、有机碳、碱解氮、速效钾含量以及年际间气候变异(年降水量和气温)是影响枸杞农艺性状的主要因素。对比不同改良剂组合在增加土壤有机质和养分含量、降碱抑盐和实现枸杞增产增收方面的效果,以脱硫石膏+醋糟+菌肥+保水剂组合最为突出,可在河套同类型盐碱地区进行推广验证。

关键词:土壤改良剂;配施;枸杞;土壤理化性质;河套灌区

中图分类号:S156,S567.1⁺9 **文献标志码:**A

Effects of combinations of modifiers on physical and chemical properties of alkaline soil and growth of *Lycium chinense* in Hetao irrigation area

HUANG Pujiang^{1,2}, FANG Zhao³, YU Hailong⁴, ZHANG Fengju², HUANG Juying²

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwestern A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Geography Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To evaluate the effects of desulfurization gypsum with different functional modifiers on the improvement of alkaline soils in Hetao irrigated area, and to identify the best solution for the improvement of alkaline soils in Hetao irrigated area, a field trial of alkaline soil improvement was established in Hetao irrigated area of Ningxia. The field trials used *Lycium chinense* as the test material with treatments of control (T_1), desulphurization gypsum alone (T_2), desulphurization gypsum + vinasse + bacterial fertilizer (T_3), desulphurization gypsum + bacterial fertilizer (T_4), desulphurization gypsum + vinasse + bacterial fertilizer + water retention agent (T_5), desulphurization gypsum + micronutrient fertilizer (T_6), and desulphurization gypsum + induced resistance (T_7) to compare and analyze the effects of different amendment measures on the soil salinity index, nutrient status and agronomic

收稿日期:2022-12-01

修回日期:2023-02-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900600);宁夏自然科学基金(2022AAC02012);国家自然科学基金(32160277)

作者简介:黄浦江(2000-),男,河南郑县人,硕士研究生,研究方向为草地生态。E-mail:huangpujiang2022@163.com

通信作者:黄菊莹(1980-),女,宁夏盐池人,研究员,主要从事全球变化生态研究。E-mail:juyinghuang@163.com

traits of *L. chinense* (survival rate/preservation rate, plant height and yield) for selecting the best improvement scheme for alkaline soil management in this area. The results indicated that treatments T₂ to T₇ exhibited greater effectiveness in enhancing soil organic carbon (5.4% to 88.8%), total nitrogen (8.0% to 31.3%), alkali-hydrolyzable nitrogen (11.4% to 41.7%), reducing pH (4.8% to 10.3%), sodium adsorption ratio (SAR) (5.5% to 51.6%), and total salt content (5.5% to 51.6%) in the top 20 cm of soil over the course of four years. These effects were significantly more pronounced than those observed at a depth of 20~40 cm, with the degree of influence progressively increasing with the duration of the improvement process. However, the overall impact on total phosphorus and fast-acting phosphorus and potassium content in the soil was weak or did not exhibit consistent patterns. Among the different amendments, the T₅ treatment proved to be the most efficacious in augmenting soil organic matter and nutrient content, reducing soil pH, mitigating soil salt stress, and yielding higher survival/preservation rates (83.88%~92.22%), plant height (74.16~140.13 cm), and crop yield (0.70~2.31 kg·hm⁻²) for *L. chinense*. Furthermore, correlation analysis revealed that pH, total salt, organic carbon, alkaline soluble nitrogen, fast-acting potassium content in different soil layers and interannual climatic variability (annual precipitation and temperature) were the main factors affecting the agronomic traits of *L. chinense*. Considering the effect of different functional modifiers agents in increasing soil organic matter and nutrient content, reducing alkali and suppressing salt, and achieving increased yield and income of *L. chinense*, the combination of desulfurized gypsum + vinasse + bacterial fertilizer + water retention agent was the most prominent, though its improvement effect still needs further extension verification in the same type of saline areas in the Hetao area.

Keywords: soil functional modifiers; combined application; *Lycium chinense*; soil physical and chemical properties; Hetao irrigation area

盐碱土是各种盐土和碱土以及不同程度盐化和碱化土壤的总称^[1],其分布广泛,是重要的后备土地资源^[2]。目前我国盐碱地面积约占世界盐碱地总面积的 10.4%,且主要分布在西北、华北、东北和沿海地区^[3-4]。在我国人口增加、耕地减少的情况下,最大限度地开发利用盐碱地资源对于实现我国农业可持续发展具有重要意义^[5]。

长期以来,国内外学者们一直致力于各种盐碱地改良措施的研究^[6-14],如采用明沟和暗沟排盐^[10-12]和深松改土等^[9]物理措施进行盐碱地改良;应用工、农业废弃物脱硫石膏^[13, 15-16]或磷石膏^[17]以及生物炭^[6]等化学措施改良盐碱土;以及通过种植或筛选耐盐碱植物进行生物降盐改土实践^[9, 18]。其中,化学改良措施以其经济、环保、快速高效等特点备受环境治理领域学者们的关注。以往大多数研究采用单一改良剂进行盐碱地治理会存在诸多弊端,难以实现理想的改良效果^[15-16, 19-21],如单施脱硫石膏虽然可以对土壤中盐基离子起到置换作用,但不能完全解决碱化土壤“粘、板、瘦”等理化性质所引起的作物生长不良问题^[15-16, 20, 22]。近年来,诸多学者也开始探究多种改良剂组合配施的改良方式,这样不仅可以解决大量废弃物(如脱硫石膏,醋糟,生物炭等)的资源化处置问题,同时还可以弥补施用单一改良剂的短板问题。

宁夏河套灌区盐碱地分布范围广,土壤 pH 值和碱化度高、质地粘重,土壤肥力低。近年来在人为因素和自然因素综合影响下,大量盐碱荒地和低产盐碱化面积不断扩大,致使生态环境恶化和可耕地面积减少,严重制约了该区农业可持续发展。枸杞(*Lycium chinense*)作为我国西北地区主要经济及生态树种之一,具有耐旱抗碱、耐沙荒贫瘠、综合经济效益高等特点,因此被大面积推广种植,在促进当地经济发展以及推动地区脱贫等方面发挥了重要作用^[23]。鉴于脱硫石膏和不同功能改良剂组合模式对碱化土壤的改良研究还相对较少,本研究以枸杞为供试材料,探讨了利用当地燃煤电厂废弃物脱硫石膏配施不同功能改良剂对土壤盐碱指标、养分状况以及枸杞农艺性状的影响,进而筛选最优改良组合方案,旨在为河套地区盐碱地治理和恢复提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验样地位于宁夏平罗西大滩盐碱地改良实验基地,地处河套灌区西南部(106°24'209"E, 38°50'289"N),平均海拔约 1 200 m,属于温带大陆性季风气候:平均气温 8.5℃;年平均降水量 180 mm,且大多集中在 7—9 月;多年平均蒸发量 1 755

mm,且在 4—5 月份时蒸发量最大。试验区地形平缓,坡度较小,常年地下水位 1.5~2.0 m;地下水矿化度平均为 3.25 g·L⁻¹。研究区主要土壤类型为龟裂碱土(俗称白僵土)。供试土壤为中度盐化碱土,其理化性质见表 1。

1.2 供试材料

本试验供试枸杞品种为‘宁杞九号’,由宁夏农林科学研究院提供。供试枸杞苗为两年生幼苗,地径约为 0.8~1.0 cm,株高约为 50~60 cm。改良剂(脱硫石膏、醋糟、菌肥、保水剂、微肥、诱抗素)来源及主要成分见表 2。

1.3 试验处理

试验小区采用随机区组排列,共包括 7 个处理: T₁(不施用改良剂,对照);T₂(脱硫石膏);T₃(脱硫石膏+醋糟+菌肥);T₄(脱硫石膏+菌肥);T₅(脱硫石膏+醋糟+菌肥+保水剂);T₆(脱硫石膏+微肥);T₇(脱硫石膏+诱抗素)。每个处理设置 4 次重复,共计 28 个小区,各小区面积为 40 m²(5 m×8 m)。各小区间按照宽 50 cm 和高 30 cm 的规格打埂。不同组合处理下改良剂的最佳施用量参考该地区同类

相关研究^[8, 20, 22, 24](表 3),其中微肥为硼肥、锌肥和铁肥各 45 kg·hm⁻²;诱抗素是将 0.10% S-诱抗素水剂稀释 1 000 倍后使用喷雾器对移栽后的枸杞植株茎叶进行均匀喷施。

2013 年 5 月 11 日进行枸杞移栽,株行距为 100 cm×200 cm,移栽前施入基肥:有机肥 22.5 t·hm⁻², N:P₂O₅:K₂O 配比为 30:15:18。此后 3 年未施入任何改良剂,仅按当地农民施肥习惯在春季和秋季施用化肥。将不同改良剂和有机肥在整地时均匀撒施在各小区垄下,用旋耕机将其与耕层(0~25 cm)土壤充分混合均匀,然后灌水洗盐,灌水量遵照当地生产习惯确定,枸杞生育期内不再进行灌水。

1.4 样品采集和测定方法

1.4.1 土壤指标的测定 于 2013—2016 年每年 8 月中旬在每个小区用土钻按“梅花形”采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤样品,重复 4 次。每层土样均匀混合后过 2 mm 网筛分为两部分:一部分直接用于 pH 值和电导率(EC)测定;另外一部分自然风干后过 1 mm 网筛用于土壤有机碳、全氮、全磷、全盐含量、碱解氮、速效磷和速效钾的测定。其中分别采

表 1 研究区供试土壤理化性质
Table 1 Soil properties of the test soils in the study area

土层 Soil layer/cm	pH (1:5)	电导率 Electrical conductivity /(dS·m ⁻¹)	有机碳 Organic carbon /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydro nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	质地 Texture	主要盐分类型 Main salt types
0~20	9.17	9.7	4.15	27.06	6.70	172.90	黏土 Clay	NaCl、Na ₂ SO ₄ 、Na ₂ CO ₃
20~40	9.35	5.9	2.02	28.19	5.50	146.28	黏壤土 Clay loam	NaCl、Na ₂ SO ₄ 、Na ₂ CO ₃

表 2 供试材料来源及成分特点
Table 2 Sources and composition characteristics of the tested materials

供试材料 Test material	主要成分特点 Characteristics of main components	来源 Source
脱硫石膏 Desulfurization gypsum	含有大量 CaO 和 SO ₃ 以及少量碱土元素 Containing large amounts of CaO and SO ₃ and small amounts of alkaline elements	中铝宁夏能源集团有限公司 Chinalco Ningxia Energy Group Co., Ltd.
醋糟 Vinasse	含有丰富微量元素以及有机副产物 Rich in trace elements and organic byproducts	宁夏强尔萨清真食品有限公司 Ningxia Qiangersa Halal Food Co., Ltd.
菌肥 Bacterial fertilizer	含大量有益微生物以及营养元素 Containing large amounts of beneficial microorganisms and nutrient elements	宁夏天鑫源生物化工有限公司 Topsol Biotechnology Co., Ltd.
保水剂 Water retention agent	高吸水性树脂材料 Superabsorbent resin material	宁夏绿高现代农业开发有限公司 Ningxia Lvgaο Modern Agricultural Development Co., Ltd.
微肥 Micro-fertilizer	硼、铁、锌元素微肥等量混合而成 Mixed by B, Fe, Zn micro-fertilizers in equal amount	宁夏润安微肥科技有限公司 Ningxia Run'an Microfertilizer Technology Co., Ltd.
诱抗素 Induced resistance	0.1% S-诱抗素水剂,植物生长调节剂 0.1% aqueous solution of S-abscisic acid and plant growth regulator	宁夏绿高现代农业开发有限公司 Ningxia Lvgaο Modern Agricultural Development Co., Ltd.

表 3 不同改良剂组合配施下对应的施用量
Table 3 Applied amount under different modifier combinations

处理 Treatment	脱硫石膏 Desulfurization gypsum /(t·hm ⁻²)	醋糟 Vinasse /(t·hm ⁻²)	菌肥 Bacterial fertilizer /(kg·hm ⁻²)	保水剂 Water retention agent /(kg·hm ⁻²)	微肥 Micronutrient fertilizer /(kg·hm ⁻²)	诱抗素 Induced resistance /(ml·hm ⁻²)
T ₁	0	0	0	0	0	0
T ₂	30	0	0	0	0	0
T ₃	30	15	150	0	0	0
T ₄	30	0	150	0	0	0
T ₅	30	15	150	250	0	0
T ₆	30	0	0	0	45	0
T ₇	30	0	0	0	0	400

用 pH 计法和电导率法测定土壤 pH、EC 和全盐含量;土壤有机碳、全氮和全磷含量分别采用重铬酸钾外加加热法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法测定;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 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 法测定;土壤盐基离子 Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 分别用火焰光度法和 EDTA 滴定法测定^[25]。钠吸附比(SAR)计算公式为:

$$SAR = [Na^+] / \sqrt{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]) / 2}$$
^[26]

1.4.2 枸杞生长性状指标测定 2013—2016 年,在每个试验小区统计枸杞成活数并计算成活率/保存率(2013 年为成活率,2014—2016 为保存率),然后在每个试验小区随机选取 3 行,每行连续选 5 株用于测定枸杞株高和产量。枸杞成活率(%)=成活数/栽植数×100;保存率(%)=保存数/栽植当年成活数×100;产量(kg·hm⁻²)=枸杞果实干质量/种植面积。

1.5 数据处理

运用 Excel 2010 对数据预处理后,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)比较不同处理间枸杞农艺性状和土壤理化性质指标的差异(显著性水平为 P<0.05),分析之前对各类数据进行正态分布和方差齐性检验;并用 Pearson 相关分析检验枸杞农艺性状与土壤理化指标之间的相关性,数据分析和绘图分别在 SPSS 22.0 和 Origin 2021 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤 pH 值、全盐及钠吸附性比(SAR)的影响

不同改良措施对枸杞地土壤 pH 值和全盐含量的影响如表 4 所示。4 年间不同改良处理在一定程度上降低了枸杞地 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤 pH

值和全盐含量,其中 2013 年不同处理对两个土层 pH 值和全盐含量无显著影响(P>0.05)。2014—2016 年,不同处理下两土层 pH 值和全盐含量下降比例均以 T₄ 和 T₅ 处理最为显著(2014 年全盐除外)。对于 SAR 而言,2013 年不同处理使表层 0~20 cm SAR 较对照显著下降,而对 20~40 cm SAR 影响较弱。经过 4 年改良后,T₂、T₃、T₄ 和 T₅ 处理下两土层 SAR 较对照处理均显著降低,其中下降比例以 T₅ 最多。

2.2 不同处理对土壤有机碳、全氮和全磷的影响

通过对枸杞试验地土壤理化性质分析显示(表 5),不同处理均提高了不同土层有机碳含量,并且随改良年限的延长,各处理下有机碳含量逐年增加,其中以 2016 年有机碳增加比例最大。与对照处理相比,2013—2016 年不同处理对土壤全氮含量有一定的提升作用,其中不同处理下 0~20 cm 土壤全氮含量平均增加比例高于 20~40 cm,T₄、T₅ 和 T₆ 处理在不同年份均表现出最高的增加比例。对于土壤全磷含量而言,除 2015 年 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤全磷含量较对照有所降低外,其余年份不同处理下两土层全磷含量均呈现微弱的增加趋势,其中 T₄ 处理显著高于对照处理(P<0.05)。

2.3 不同处理对土壤速效养分的影响

对于土壤速效养分而言(表 6),2013—2016 年中不同处理对不同土层碱解氮含量有显著提升作用,T₅ 处理对 0~20 cm(20~40 cm)土壤碱解氮含量提升作用最为明显,与对照相比分别增加了 23.43%(61.78%), 218.67%(3.94%), 23.70%(68.95%) 和 15.15%(33.97%)。不同处理对速效磷和速效钾的影响随配施功能改良剂种类不同而异,整体对表层 0~20 cm 速效磷和速效钾含量有一定的提升作用,而对 20~40 cm 土壤速效磷和速效钾含量影响较弱或不存在一致的规律性变化。

表 4 不同处理对土壤 pH、全盐和 SAR 的影响(平均值, $n=4$)

Table 4 Effects of different treatments on soil pH, total salt contents and sodium adsorption ratio (mean value, $n=4$)											
土层/cm	处理	pH				全盐 Total salt/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)				钠吸附性比 SAR	
Soil layer	Treatment	2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016	2013	2016
0~20	T ₁	8.90a	9.25a	9.46a	8.72a	2.99a	2.10a	2.88a	2.22a	1.65a	1.36a
	T ₂	8.62a	8.92ab	8.63ab	8.42ab	2.97a	1.93a	2.29ac	2.44a	1.03b	0.51c
	T ₃	8.59a	8.74ab	8.01b	8.18b	2.82a	1.57ab	1.13b	0.96b	0.86bc	0.32c
	T ₄	8.24a	8.16b	8.18b	8.16b	2.66a	1.74ab	1.01b	0.54c	0.71c	0.24c
	T ₅	8.29a	8.06b	8.13b	8.09b	2.50a	0.82b	1.10b	0.51c	0.67c	0.19c
	T ₆	8.53a	8.88ab	8.34b	8.28b	2.84a	1.66ab	1.19b	0.90b	0.82bc	1.13b
	T ₇	8.34a	8.74ab	8.46ab	8.02b	2.87a	1.71ab	1.48bc	2.44a	1.08b	1.20b
20~40	T ₁	9.36a	9.08a	9.56a	8.94a	3.69a	1.74c	2.84a	2.44a	3.21b	7.07a
	T ₂	9.17a	7.87b	9.58a	8.86a	4.48a	2.13bc	3.06a	2.69a	5.14a	2.04b
	T ₃	9.17a	8.42ab	8.03b	7.93b	2.69a	2.59bc	2.88a	3.50a	2.30bc	2.85b
	T ₄	9.15a	7.27b	8.34b	8.30ab	4.45a	4.46a	2.09ab	0.73c	1.63c	1.41b
	T ₅	8.71a	8.29b	8.76ab	8.42ab	3.56a	1.75c	0.77b	1.50b	3.24b	0.26c
	T ₆	8.89a	8.96ab	9.46a	7.96b	3.78a	3.98a	2.35ab	3.41a	1.93c	8.50a
	T ₇	8.56a	8.43ab	9.42a	9.06a	4.11a	2.85ab	1.90b	1.69b	5.88a	6.40a

注:同列不同小写字母表示同一土层不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments in the same soil layer ($P < 0.05$). Same as below.

表 5 不同处理对土壤有机碳、全氮和全磷含量的影响(平均值, $n=4$)/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 5 Effects of different treatments on soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus contents (mean value, $n=4$)													
土层/cm	处理	有机碳 Organic carbon				全氮 Total nitrogen				全磷 Total phosphorus			
Soil layer	Treatment	2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016
0~20	T ₁	3.66b	3.26c	5.37c	5.65d	0.45a	0.41b	0.35b	0.42b	0.57b	0.60ab	0.81a	0.53a
	T ₂	3.61b	3.69c	7.28b	4.33d	0.49a	0.44b	0.39b	0.47b	0.61b	0.53b	0.69b	0.58a
	T ₃	4.47ab	4.70ab	10.07a	19.03a	0.49a	0.46b	0.39b	0.42b	0.59b	0.69a	0.67b	0.58a
	T ₄	3.78b	4.26bc	8.88b	12.08b	0.50a	0.52ab	0.50a	0.62a	0.75a	0.90a	0.68b	0.62a
	T ₅	5.12a	5.88a	8.49b	14.38b	0.51a	0.58a	0.46a	0.55ab	0.60b	0.44b	0.47c	0.53a
	T ₆	4.63ab	4.54b	7.26b	5.45d	0.50a	0.57a	0.44ab	0.59ab	0.60b	0.51b	0.86a	0.58a
	T ₇	4.02b	5.31ab	7.26b	9.03c	0.49a	0.59a	0.48a	0.47b	0.61b	0.51b	0.66b	0.58a
20~40	T ₁	3.58a	2.63ab	6.06b	6.85c	0.54a	0.34c	0.46a	0.34bc	0.57a	0.62bc	0.87a	0.61a
	T ₂	2.23bc	1.57c	4.54c	3.38d	0.35b	0.36c	0.33b	0.25c	0.62a	0.50c	0.64b	0.65a
	T ₃	3.61a	2.83ab	3.96c	17.64a	0.34b	0.44bc	0.40ab	0.44b	0.59a	0.53c	0.67b	0.62a
	T ₄	2.28bc	3.38a	4.38c	5.84c	0.35b	0.36b	0.38ab	0.61a	0.57a	0.84a	0.34c	0.63a
	T ₅	2.76ab	2.63ab	8.58a	12.56b	0.41ab	0.38b	0.38ab	0.46b	0.61a	0.59c	0.25c	0.60a
	T ₆	2.41bc	3.28a	4.18c	6.77c	0.38b	0.41b	0.36b	0.48b	0.51a	0.45c	0.93a	0.53a
	T ₇	1.83c	3.17a	4.80c	7.64c	0.36b	0.54a	0.40ab	0.25c	0.56a	0.72ab	0.68b	0.65a

表 6 不同处理对土壤速效养分含量的影响(平均值, $n=4$)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

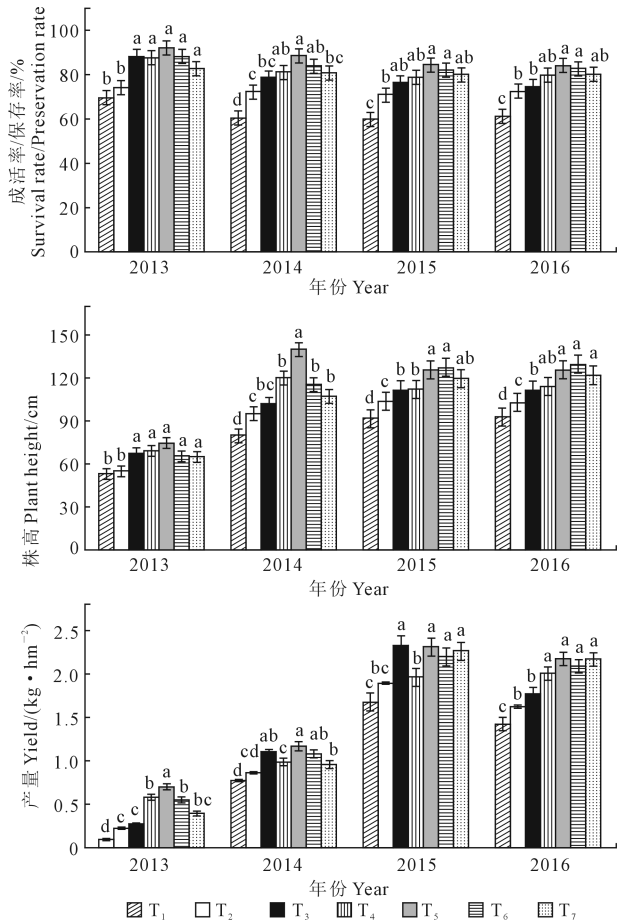
Table 6 Effects of different treatments on the content of available nutrients in soil (mean value, $n=4$)													
土层/cm	处理	碱解氮				速效磷				速效钾			
Soil layer	Treatment	Alkali-hydrolysable nitrogen				Available phosphorus				Available potassium			
		2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016
0~20	T ₁	26.42b	10.71e	27.13b	34.78b	3.05a	5.31b	5.78a	6.00b	66.60b	86.83e	105.01b	152.01b
	T ₂	28.20b	17.81d	31.42a	32.86b	3.42a	5.24b	3.69ab	7.21ab	81.38a	147.41b	108.23b	205.18a
	T ₃	29.40ab	21.52c	34.27a	34.26b	4.51a	6.14ab	3.99a	3.86c	78.01ab	135.46c	138.11a	139.00b
	T ₄	26.24b	25.97b	34.27a	46.14a	3.93a	5.33b	2.92b	4.48c	72.79ab	112.78d	110.78b	158.68b
	T ₅	32.61a	34.13a	33.56a	40.05ab	3.63a	8.63a	2.90b	5.85b	72.47ab	185.26a	108.78b	172.31ab
	T ₆	29.81ab	21.52c	33.56a	43.35a	4.08a	5.21b	2.31b	8.58a	72.10ab	90.82e	104.79b	133.73b
	T ₇	27.76b	23.74bc	30.35a	32.86b	3.93a	7.14a	3.09ab	7.21ab	77.52ab	141.72b	111.13b	205.18a
20~40	T ₁	12.14c	14.99c	20.71c	22.96b	3.95a	4.22c	5.61a	3.25b	69.52ab	146.11a	92.04b	150.70a
	T ₂	17.85b	22.26b	19.99c	21.08b	1.35b	5.12c	3.31ab	2.86b	76.37a	151.39a	90.12b	99.80c
	T ₃	19.28a	27.45a	19.28c	21.08b	2.81b	9.22ab	2.12b	2.88b	64.00ab	132.47b	146.21a	125.75b
	T ₄	18.21ab	15.71c	18.56bc	40.05a	1.55b	11.41a	1.70b	2.49b	61.94b	109.13c	82.03b	116.77b
	T ₅	19.64a	15.58c	34.99a	30.76ab	1.55b	8.12b	2.00b	5.10a	69.30ab	119.01c	82.24b	159.69a
	T ₆	19.64a	27.45a	17.85b	41.95a	2.41b	4.24c	1.72b	5.63a	63.87ab	117.53c	89.11b	120.76b
	T ₇	16.07b	27.15a	16.42b	21.08b	1.45b	11.13a	2.00b	2.86b	68.16ab	130.48b	83.32b	99.80c

2.4 不同处理对枸杞农艺性状的影响

从不同改良年限来看,2013—2016 年不同处理使枸杞成活率/保存率较对照分别提高了 6.8%~32.7%,19.9%~46.7%,18.71%~41.11%和 18.76%~37.31%(图 1)。随改良年限的延长,各处理下枸杞存活率/保存率有所降低;不同改良处理下枸杞株高较对照处理均有明显增加,并随改良时间的延长而逐年增大。2014、2015 和 2016 年枸杞株高分别比 2013 年平均增加 68.2%、76.3%和 77.6%。对于枸杞产量而言,不同处理下枸杞产量随改良年限呈现先增加后下降的变化趋势,其中以 2015 年枸杞产量增幅最大,相较对照平均增加 610.7%。另外,2013—2016 年改良过程中枸杞成活率/保存率、株高和产量均以 T₅ 处理(脱硫石膏+醋糟+菌肥+保水剂)最大。

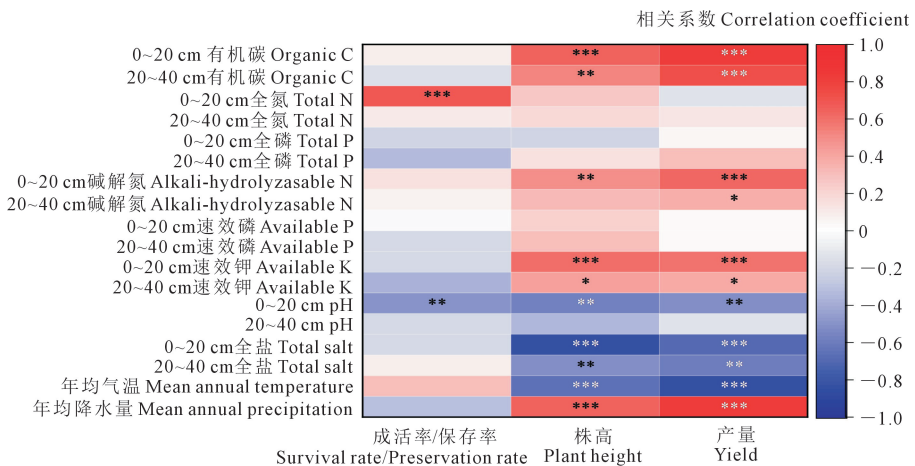
2.5 不同改良措施下枸杞农艺性状的影响因素分析

不同处理下枸杞农艺性状与土壤和气候因子间的相关分析结果表明(图 2),不同土壤理化性质指标对枸杞农艺性状(成活率、株高和产量)的影响不同。具体而言,枸杞成活率主要与 0~20 cm 土层全氮含量呈显著正相关关系,而与 0~20 cm 土层 pH 值呈显著负相关关系($P<0.05$)。对于株高和产量而言,二者与不同土层有机碳、碱解氮和速效钾含量呈较强正相关关系($P<0.05$),但与 0~20 cm 土层 pH 值以及两土层全盐含量呈显著负相关关系($P<0.05$)。相比之下,年均气温与枸杞株高和产量呈现显著负相关关系($P<0.05$),年均降水量与株高和产量呈显著正相关关系($P<0.05$),而二者对枸杞成活率/保存率的影响均未达到显著水平($P>0.05$)。



注:不同小写字母表示同一年份处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters mean significant differences between treatments in the same year ($P<0.05$).

图 1 不同处理对枸杞成活率/保存率、株高和产量的影响
Fig.1 Effects of different treatments on the survival rate/preservation rate, plant height and yield of *Lycium chinensis*



注 Note: * : $P\leq0.05$; ** : $P\leq0.01$; *** : $P\leq0.001$.
图 2 枸杞农艺性状与环境因子间的相关分析

Fig.2 Correlation analysis between agronomic traits of *Lycium chinense* and environmental factors

3 讨 论

与以往施用单一改良剂研究不同,本研究针对宁夏河套灌区碱化土壤特性,将脱硫石膏废弃物与不同功能改良剂组合配施,发现不同改良剂组合配施一定程度上降低了土壤 pH 值和全盐含量;改良初期,由于不同组合改良剂施入时间较短,2013 年各处理土壤 pH 值和全盐含量下降程度均未达到显著差异 ($P>0.05$);随着改良年限增加,改良后期(2014—2016 年)较对照处理均显著下降。分析认为,研究区土壤本身的碱化环境具有一定的酸缓冲能力;另一方面各组合处理中醋糟和脱硫石膏作为偏酸性废弃物,在中和土壤 pH 值和降低碱化度方面具有调节作用,而且醋糟和石膏配施也可能会增加石膏的溶解量,进而提升 Na^+ 置换能力,从而增加脱硫石膏降碱抑盐的效果。随着改良年限增加,土壤盐基组分逐渐被改变并减少了单盐毒害的发生。但对于降盐方面,脱硫石膏本身作为一种盐,长期施用或者管理不善都有可能导致土壤全盐含量增加^[22],因此不同碱化土壤改良也需要严格控制脱硫石膏的施用量。钠吸附性比是衡量土壤盐碱化程度的重要指标,经过 4 年改良试验发现,不同改良剂组合处理下土壤钠吸附比均有所降低,其中以 T_2 、 T_3 和 T_4 处理下降程度最为显著,而 T_6 和 T_7 处理较对照下降程度较小。这主要是一方面脱硫石膏本身含有大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 类化合物,土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子浓度的增加会引起 SAR 降低;另外醋糟和菌肥的配施不仅为土壤中提供了大量有机质和养分元素,同时也引入大量有益微生物,促进了养分释放速率^[21,24,27]以及团粒结构的形成,对于降盐改土也起到很好的效果;而微量元素和诱抗素与脱硫石膏的配施对于钠吸附比起到降低作用不太显著甚至可能有负面影响。

土壤有机质、全氮、全磷以及速效养分是评估耕地质量高低的重要指标。不同改良剂组合配施对 0~20 cm 土壤有机碳、全氮、碱解氮含量的提升作用优于 20~40 cm,且其影响程度随改良年限推移而逐渐增强;而对于土壤全磷、速效磷、速效钾含量促进作用整体较弱或不存在一致的规律性变化。一般而言,单施脱硫石膏对土壤肥力的改善作用有限,不能很好的解决碱化土壤“粘、板、瘦”等不良性质^[8]。本研究中发现脱硫石膏与不同功能改良剂配施一定程度上可以弥补上述缺陷。几种组合改良剂型间,以 T_5 处理对不同土层有机碳、全氮、碱解氮含量等肥力指标提升作用最为明显。这主要是

因为 T_5 处理中醋糟为养分贫瘠的土壤补充了大量的有机质和微量元素,同时微生物菌肥的施加增加了土壤微生物数量和相关代谢酶活性,使得盐碱土壤速效养分和有机碳等含量随改良年限增加而增加,这与大多数改良剂与菌肥配施试验结果较为一致^[28-29];此外,由于研究区常年干旱少雨、蒸发量大,保水剂的配施一定程度上可以降低水分蒸发和提高土壤含水量,这对于提高干旱地区作物抗旱保水能力和增产增收方面具有较为广阔的应用前景^[30-31]。

本研究相关分析结果显示,枸杞成活率主要与表层全氮含量呈显著正相关关系,与土壤 pH 值呈显著负相关关系 ($P<0.05$)。对于株高和产量而言,二者与不同土层有机碳、碱解氮和速效钾含量呈较强正相关关系 ($P<0.05$),但与 0~20 cm 土壤 pH 值以及两土层全盐含量呈显著负相关关系 ($P<0.05$)。几种改良剂组合配施对枸杞成活率、株高和产量的提升作用主要是通过增加土壤有机碳、速效钾、碱解氮含量以及营造适宜于枸杞正常生长发育的 pH 值和全盐环境实现的。此外,研究区的气候条件(温度和降水)对枸杞的植株生长和产量提高也存在重要影响,因而在枸杞生长发育期内保证适宜的温度和水分供应才能实现良好的经济效益。水分和微量元素对枸杞果实生长发育、外观、色泽也有重要影响,不同改良措施中保水剂、微肥和醋糟的配施一定程度上保证了枸杞对水分和微量元素的生长需求。盐碱地微量元素含量其实并不低,但大多都被土壤固定难以释放出来,因此适当地增加土壤微量元素对于盐碱地枸杞产量和品质也具有较大影响。大多数盐碱地由于灌溉、长期洗盐等措施导致土壤有机质普遍含量偏低,而醋糟作为有机副产物,与脱硫石膏配合添加一定程度上增加了土壤中有机质含量,从而提高了枸杞产量和品质^[1]。综合对比不同改良措施前后土壤盐碱指标、养分状况以及枸杞农艺性状,其中脱硫石膏+醋糟+菌肥+保水剂组合改良效果最佳。此外,鉴于本研究数据相对陈旧,因此还需进行长期的动态监测,深入探讨不同改良措施下的长期治理效果,以便为河套地区同类型盐碱地的生态治理提供更为精准的理论依据和推广示范效果。

4 结 论

2013—2016 年试验及综合数据分析表明,不同改良剂组合配施有助于提高土壤有机碳、全氮和速效养分,降低 pH 值、SAR 和全盐含量,促进了枸杞

生长发育,其组合配施效果整体优于单施脱硫石膏,并且影响程度随改良年限推移而逐渐增强;枸杞农艺性状指标主要与有机碳、碱解氮、速效钾含量和年均降水量呈显著正相关关系,而与 pH 值、全盐和年均气温呈显著负相关关系。不同改良剂组合型间,脱硫石膏+醋糟+菌肥+保水剂配施在增加土壤有机质和养分含量、降碱抑盐和实现枸杞增产增收方面效果显著,今后的实际推广应用中还需综合考虑其经济成本和应用效果,最终确定最佳的改良方案。

参 考 文 献:

[1] 李惠霞,何文寿. 盐碱地土壤肥力对宁夏枸杞产量和品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2571-2574, 2578.
LI H X, HE W S. Research progress in the effect of saline-alkali soil fertility on both yield and quality of *Lycium barbarum* L. in Ningxia[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(10): 2571-2574, 2578.

[2] XIE X F, PU L J, WANG Q Q, et al. Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal saline soil, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 1419-1427.

[3] 赵可夫,李法曾. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 7-10.
ZHAO K F, LI F Z. Halophytes in China[M]. Beijing: Science Press, 1999: 7-10.

[4] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
WANG J L, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 673-684.

[5] 张翼夫,李问盈,胡红,等. 盐碱地改良研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 7-10.
ZHANG Y F, LI W Y, HU H, et al. Research status and prospects of saline-alkali land amelioration in China[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(18): 7-10.

[6] ZHANG Y, YANG J S, YAO R J, et al. Short-term effects of biochar and gypsum on soil hydraulic properties and sodicity in a saline-alkali soil[J]. Pedosphere, 2020, 30(5): 694-702.

[7] 迪力努尔·阿布拉,黄建,祁通,等. 粉垄深松破障对新疆盐碱地土壤洗盐脱盐效果[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(9): 1754-1761.
Di Li Nu Er - A Bu La, HUANG J, QI T, et al. Study on the effect of washing and desalting of soil in saline-alkali land of Xinjiang by the breaking of the barrier by the deep pine ridge[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(9): 1754-1761.

[8] 杜雅仙,马凯博,康扬眉,等. 脱硫石膏与结构改良剂配合施用对盐碱地土壤的改良和枸杞生长的影响[J]. 北方园艺, 2018, (21): 129-135.
DU Y X, MA K B, KANG Y M, et al. Influence of adding structure kri-lium combined with desulfurized gypsum on takyric solonetz soil improvement and growth of *Lycium chinense* [J]. Northern Horticulture, 2018, (21): 129-135.

[9] 范倩玉,李晋,刘振华,等. 饲用油菜对盐碱地土壤改良效果探究[J]. 河南农业科学, 2020, 49(11): 71-78.
FAN Q Y, LI J, LIU Z H, et al. Improvement effect of feed rapeseed on saline-alkali soil[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49

(11): 71-78.

[10] 耿其明,闫慧慧,杨金泽,等. 明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 617-624.
GENG Q M, YAN H H, YANG J Z, et al. Evaluation for soil improvement effect of open ditch and concealed drainage engineering on saline alkali land development[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 617-624.

[11] 张震中,张金旭,黄佳盛,等. 不同排水措施对青海高寒区盐碱地改良效果的研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 78-85.
ZHANG Z Z, ZHANG J X, HUANG J S, et al. Efficacy of a drainage system in remediating saline-alkali soils in the alpine region of Qinghai Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 78-85.

[12] 赵彬玥,孙兆军,何俊,等. 暗沟对宁夏引黄灌区盐碱地改良及垂柳生长的影响[J]. 节水灌溉, 2019, (8): 1-4.
ZHAO B Y, SUN Z J, HE J, et al. Effects of blind ditch on saline-alkali soil and *Salix babylonica* growth in Yellow River irrigation districts of Ningxia[J]. Water Saving Irrigation, 2019, (8): 1-4.

[13] 郑普山,郝保平,冯悦晨,等. 不同盐碱地改良剂对土壤理化性质、紫花苜蓿生长及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1216-1221.

[14] ZHENG P S, HAO B P, FENG Y C, et al. Effects of different saline-alkali land amendments on soil physicochemical properties and alfalfa growth and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1216-1221.

[14] 朱光艳,刘国锋,徐增洪. 冲水洗盐对滨海盐碱地盐分变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(增刊2): 52-56.
ZHU G Y, LIU G F, XU Z H. Effects of washing salt by washing water on salinity variation in coastal saline and alkaline land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(S2): 52-56.

[15] 石婧,黄超,刘娟,等. 脱硫石膏不同施用量对新疆盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(6): 1800-1807.
SHI J, HUANG C, LIU J, et al. Effects of different application amount of flue gas desulfurization gypsum on amelioration of saline-alkali soil and crop yield in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(6): 1800-1807.

[16] 王彬,肖国举,杨涓,等. 燃煤烟气脱硫废弃物施用对碱化土壤种植甜高粱的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 206-211.
WANG B, XIAO G J, YANG J, et al. Effects of coal-fired flue gas desulfurated waste residue application on sweet sorghum cultivation on alkali soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 206-211.

[17] SMAOUI-JARDAK M, KRIAA W, MAALEJ M, et al. Effect of the phosphogypsum amendment of saline and agricultural soils on growth, productivity and antioxidant enzyme activities of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Ecotoxicology, 2017, 26(8): 1089-1104.

[18] 杨策,陈环宇,李劲松,等. 盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1578-1586.
YANG C, CHEN H Y, LI J S, et al. Soil improving effect of *Suaeda salsa* on heavy coastal saline-alkaline land[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English), 2019, 27(10): 1578-1586.

[19] 景鑫鑫. 改良剂对盐碱土壤修复的研究进展[J]. 河南农业, 2020, (1): 17-19.
JING X X. Progress of research on saline-alkali soil remediation made by amendments[J]. Agriculture of Henan, 2020, (1): 17-19.

[20] 张俊华,孙兆军,贾科利,等. 燃煤烟气脱硫废弃物及专用改良剂改良龟裂碱土的效果[J]. 西北农业学报, 2009, 18(5): 208-212.
ZHANG J H, SUN Z J, JIA K L, et al. Effect of desulfurization gypsum

- and specialsoil amendment for improvement of takyr solonchets[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(5): 208-212.
 - [21] 逢焕成, 李玉义, 严慧峻, 等. 微生物菌剂对盐碱土壤化和生物性状影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 951-955.
PANG H C, LI Y Y, YAN H J, et al. Effects of inoculating different microorganism agents on the improvement of salinized soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(5): 951-955.
 - [22] 黄菊莹, 余海龙, 张俊华, 等. 脱硫废弃物和专用改良剂在碱化土壤改良中的效果[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1467-1471.
HUANG J Y, YU H L, ZHANG J H, et al. Effects of flue gas desulfurization gypsum and kriliu application on alkali soil amelioration[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(6): 1467-1471.
 - [23] 王峰德. 枸杞在沙生植被恢复中的作用[J]. 防护林科技, 2015, (2): 62-63.
WANG F D. Barbary wolfberry role in the restoration of sandy vegetation[J]. Protection Forest Science and Technology, 2015, (2): 62-63.
 - [24] 张俊华, 贾科利. 盐化土壤微生物区系及理化性状对不同改良剂的响应研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1045-1049.
ZHANG J H, JIA K L. Response of microbial populations, soil physical and chemical properties to different amelioration agents in saline soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1045-1049.
 - [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 189-193.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 189-193.
 - [26] 孙在金, 黄占斌, 陆兆华. 不同环境材料对黄河三角洲滨海盐碱化土壤的改良效应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 186-190.
SUN Z J, HUANG Z B, LU Z H. Improvement effects of different environmental materials on coastal saline-alkali soil in Yellow River delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 186-190.
 - [27] 张辉, 李维炯, 倪永珍. 生物有机无机复合肥对土壤微生物活性的影响[J]. 农村生态环境, 2004, 20(1): 37-40.
ZHANG H, LI W J, NI Y Z. Effects of biological-organic-inorganic complex fertilizer on soil microorganism activity [J]. Rural Eco-Environment, 2004, 20(1): 37-40.
 - [28] 卢建男, 张琼, 刘铁军, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤及草地早熟禾生长的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(6): 1141-1148.
LU J N, ZHANG Q, LIU T J, et al. Effect of soil conditioners on saline-alkali soil and growth of Kentucky bluegrass [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(6): 1141-1148.
 - [29] 汪立梅, 桂丕, 李化山, 等. 改良剂与微生物菌剂联合施用对盐碱地土壤和耐盐植物的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 264-269.
WANG L M, GUI P, LI H S, et al. Effects of combined application of improver and microbial agents on saline-alkali soil and salt-tolerant plants[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(17): 264-269.
 - [30] 魏敏, 罗龙欣, 杨平华, 等. 微肥对核技术合成保水剂性能的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(24): 54-58.
WEI M, LUO L X, YANG P H, et al. Micro-fertilizers: effects on the properties of super absorbent polymer synthesized by nuclear technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(24): 54-58.
 - [31] 黄占斌, 张国桢, 李秧秧, 等. 保水剂特性测定及其在农业中的应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 22-26.
HUANG Z B, ZHANG G Z, LI Y Y, et al. Characteristics of aquasorb and its application in crop production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(1): 22-26.

(上接第 109 页)

 - [27] 吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等. 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5128-5137.
WU G L, GUO L Y, CUI Z Y, et al. Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5128-5137.
 - [28] 吕广德, 亓晓蕾, 张继波, 等. 中、高产型小麦干物质和氮素累积转运对水氮的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1534-1547.
LV G D, QI X L, ZHANG J B, et al. Response of nitrogen and dry matter accumulation in middle and high yield wheat cultivars to water and nitrogen supply[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(9): 1534-1547.
 - [29] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 氮素营养水平对冬小麦碳氮运转的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(8): 1605-1610.
GUO T C, SONG X, MA D Y, et al. Effects of nitrogen application rate on carbon and nitrogen transportation in winter wheat [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(8): 1605-1610.
 - [30] 牛巧龙, 曹高綦, 万鹏, 等. 氮肥施用量对强筋和弱筋小麦干物质积累及灌浆速率的影响[J]. 天津农学院学报, 2017, 24(3): 1-5.
NIU Q L, CAO G Y, WAN P, et al. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and grain filling rate of strong gluten and weak gluten wheat [J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2017, 24(3): 1-5.
 - [31] 魏艳丽, 王彬龙, 李瑞国, 等. 施氮对不同小麦品种干物质分配、氮素吸收和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1134-1138.
WEI Y L, WANG B L, LI R G, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on distribution of dry material, assimilation of nitrogen and yield of different wheat varieties [J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(6): 1134-1138.
 - [32] 王桂良, 叶优良, 李欢欢, 等. 施氮量对不同基因型小麦产量和干物质积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 116-122.
WANG G L, YE Y L, LI H H, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on grain yield and dry matter accumulation for different genotypes of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(1): 116-122.
 - [33] 蔡瑞国, 张迪, 张敏, 等. 雨养和灌溉条件下施氮量对小麦干物质积累和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 194-202.
CAI R G, ZHANG D, ZHANG M, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat under irrigated and rainfed conditions [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(2): 194-202.