DOI：10.11766/trxb202309060360 CSTR：32215.14.trxb202309060360
黄广志，黄立华，刘伯顺，蒋小曈，杨璨，梁燕萍，蔡婧晖. 基于 Meta 分析的苏打盐碱土改良效果评估[J]. 土壤学报，2025，62（2）：388–399.
HUANG Guangzhi，HUANG Lihua，LIU Baishun，JIANG Xiaotong，YANG Can，LIANG Yanping，CAI Jinghui. Evaluation of Improvement Effect and Analysis of Influencing Factors of Different Amendments on Saline-sodic Soils Based on A Meta-analysis[J]. Acta Pedologica Sinica，2025，62（2）：388–399.

基于 Meta 分析的苏打盐碱土改良效果评估*

黄广志[1, 2]，黄立华[1, 3†]，刘伯顺[1, 2]，蒋小曈[1]，杨 璨[1]，梁燕萍[1, 2]，蔡婧晖[1, 2]

（1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所，长春 130102；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 吉林大安农田生态系统国家野外科学观测研究站，吉林大安 131317）

摘 要：苏打盐碱土集中分布于我国东北松嫩平原西部，长期以来人们在苏打盐碱地治理中采用了多种物料或措施进行土壤改良，也取得了较好的改良效果。然而，这些改良措施多是定点的单一评估，缺少不同改良剂多点位的综合比较。为此本研究利用 Meta 分析，从近 30 年有关苏打盐碱土改良报道的 589 篇文献中遴选出符合条件的 854 组相关数据，综合量化评估了石膏类改良剂、生物炭和混合改良剂（2 种及 2 种以上改良物料配施）对苏打盐碱土的改良效果，采用随机森林方法解析了影响不同改良剂改良效果的因素。结果表明，石膏类改良剂、生物炭和混合改良剂在稻田上施用后土壤碱度分别降低 21.5%、19.6%和 37.0%，改良效果显著，改良剂之间差异不显著；生物炭对土壤养分含量提升效果最佳（47.8%），石膏类改良剂相对最低（26.4%）。三种改良剂多用于中、重度苏打盐碱土表层（0～20 cm）土壤改良，其施用量和施用年限对土壤改良效果存在差异。改良剂施用量是影响石膏类改良剂、生物炭和混合改良剂降低土壤碱度和盐分效果的主要因素。石膏类改良剂主要作用原理是降低土壤碱度，进而间接提升土壤养分和促进作物生长，生物炭和混合改良剂兼具降低土壤碱度和直接提供土壤养分的作用。土壤改良剂在选择使用上不仅要考虑用量，种植作物类型、改良剂成本、作用效果持久性以及环境安全性问题也是重要的参考因素。

关键词：苏打盐碱土；化学改良剂；Meta 分析；石膏；生物炭；混合改良剂
中图分类号：S158.5 **文献标志码：**A

Evaluation of Improvement Effect and Analysis of Influencing Factors of Different Amendments on Saline-sodic Soils Based on A Meta-analysis

HUANG Guangzhi[1, 2], HUANG Lihua[1, 3†], LIU Baishun[1, 2], JIANG Xiaotong[1], YANG Can[1], LIANG Yanping[1, 2], CAI Jinghui[1, 2]

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130102, *China*; 2. *University of Chinese*

* 国家重点研发计划项目（2022YFD1500502-7）、国家自然科学基金面上项目（41977148）和吉林省重大科技专项项目（20230302009NC）资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China（No. 2022YFD1500502-7），the National Natural Science Foundation of China（No. 41977148），and the Jilin Province Major Scientific and Technological Projects（No. 20230302009NC）
† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：huanglihua@iga.ac.cn
作者简介：黄广志（1998—），男，广西贺州人，硕士研究生，主要研究方向为苏打盐碱土改良与利用。E-mail：huangguangzhi@iga.ac.cn
收稿日期：2023–09–06；收到修改稿日期：2024–04–09；网络首发日期（www.cnki.net）：2024–06–24

Academy of Sciences, *Beijing* 100049, *China*; 3. *Jilin Da'an National Field Observation and Research Station of Agroecosystem*, *Da'an*, *Jilin* 131317, *China*)

Abstract: 【Objective】 Saline-sodic soils are widely distributed in the western part of the Songnen Plain. A variety of materials or measures have been used to improve soils in the process of long-term saline-sodic land management, and get great improvement effect. However, the improvement effect of these amendments on saline-sodic soils is mostly an assessment of individual factors, thus, the quantitative assessments for the impacts on multiple soil functions of different amendments are still lacking. 【Method】Based on this, Our study used a meta-analysis to obtain 854 sets of relevant data from 589 papers on the improvement of saline-sodic soils in the past 30 years. The improvement effects of gypsum type amendment, biochar, and mixed amendments (combined application of 2 or more amendments)on saline-sodic soil and the factors influencing the improvement effect were quantitatively evaluated and analyzed with a meta-analysis and the Random Forest method.【Result】The results showed that the effects in saline sodic paddy fields of the three amendments on decreasing alkalinity were –29.1%, –38.6%, and –41.1%, respectively, and the effect of improvement was significant, however, the difference in improvement effectiveness between amendments was not significant. Furthermore, biochar (47.7%) had the best effects on improving soil nutrient content, while gypsum-type amendments (26.3%) were relatively the lowest. The three amendments were mostly used for soil amendment at the top soil layer (0～20 cm) of moderate and heavy saline-sodic soils, and there were differences in the application amount and application duration on the effect of soil improvement. Amendment application amount was a significant factor affecting the effectiveness in reducing soil salt/alkali of gypsum type amendments.【Conclusion】The main working principle of gypsum-type amendments is to reduce soil alkali, indirectly enhance soil nutrients and promote crop growth, whereas biochar and mixed amendments have the combined effect of reducing soil alkali and directly promoting soil nutrients. The selection of soil amendments should take into account not only the amount, but also the crop types, the cost of the amendments, the durability of the effect, and environmental safety issues.

Key words: Saline-sodic soils; Chemical amendments; Meta-analysis; Gypsum; Biochar; Mixed amendments

东北松嫩平原西部是我国苏打盐碱土集中分布区，面积高达 342 万 hm^2，约占松嫩平原总面积的 19%，且每年仍以 1.4%的速度扩展[1]。土地盐碱化不同程度影响了植物的生长，常造成植被退化，降低了土地生产力，同时极大危害着区域生态环境[2]。苏打盐碱地大规模开发是贯彻国家"藏粮于地、藏粮于技"战略的重要举措，对改善区域生态环境、振兴乡村经济和保障国家粮食安全均具有重要意义[3]。

苏打盐碱土的盐分含量高、碱度强、物理性质差，单纯依靠以水洗盐短期内难以收到理想效果，不得不通过施用各类改良剂增加降碱的效果，实现表土的快速脱盐。常用的改良剂如脱硫石膏、磷石膏、硫酸铝、粉煤灰、硫酸亚铁、生物炭、各种有机物料和生物菌剂等[4]。通常，石膏、粉煤灰和各种硫酸盐等钙硫基物质可归为无机盐类，改良原理主要是通过离子置换作用，解离胶体吸附的交换性钠离子，降低土壤碱化度。如王楠等[5]报道了硫酸铝改良可显著降低土壤的碱化度，Liu 等[6]指出施用风沙土和磷石膏对苏打盐碱土具有较好的改良效果。生物炭和各种有机物料可归为碳基改良剂，施用后通过吸附或络合作用降低土壤盐离子含量，并可提高土壤 C/N 比，增加碳库对氮素和其他养分的蓄存能力，提高土壤养分含量。Huang 等[7]报道了有机肥改良后种稻与不改良直接种稻相比，可显著降低盐分和碱度，增加养分含量，并且对土壤安全。Yao 等[8]指出，施用生物炭不仅有利于盐碱土降碱脱盐，还对土壤有机质和速效养分具有显著的提升作用。生物菌剂同各种耐碱植物一样属于生物类改良剂，生物菌剂施用后可有效提升土壤微生物基因丰度，改善微生物群落结构，提高微生物参与养分循环能力，增加土壤养分营养水平。Ji 等[9]指出，苏打盐碱土施用生物菌剂提高了真菌和细菌的丰度和多样性，显著提高土壤速效养分含量。也有研究报道，在盐碱地施加生物菌剂不仅能降低盐分含量和 pH，也增加了土壤有机质的含量[10]。然而，上述对土壤改良剂的分类虽然充分考虑到物质的成分，但

在改良原理上存在着很大差异，如生物类改良剂也是一种碳基物质，同为碳基物质的生物炭和有机酸对盐碱土的改良作用机理是完全不同的。因此，从作用原理角度对不同类型改良剂的效果进行比较，科学判定其应用的可行性，具有重要意义。

随着苏打盐碱地大规模开发，大量的不同类型改良剂投入使用，其中许多物料是化工和矿产加工业的副产品，不仅改良效果参差不齐，也增加了环境污染的隐患。由于土壤改良剂的质量标准、施用规程以及效果评估等规范性文件的长期缺乏，大多研究者对其采用的改良剂的研究报道都称之为有效，导致社会公众很难判定各种改良剂孰优孰劣。部分的改良剂虽对土壤降碱脱盐具有一定效果，但由于自身高昂的价格，根本不适用于农业生产，也无法被列入盐碱土改良有效产品的序列。各种改良剂的改良效果又常常受到多种因素的影响，包括改良剂施用量、种类、施用年限、种植作物类型和土壤本底值等[11]。在各个试验区域，为了得到最佳改良效果而采用的改良剂施用方法和田间管理措施也有所不同。例如，有研究认为石膏用量达到 120 $t \cdot hm^{-2}$ 时，提高土壤养分效果最显著[12]，但石膏过量施用其自身对作物的危害也不容小觑。也有研究发现苏打盐碱土添加生物炭后，土壤 pH 不仅未降低，反而有所升高[13]。因此，现阶段开展区域内主要改良剂对苏打盐碱土改良效果定量的、综合性评估非常必要，对于指导具体的生产实践也具有重要价值。

基于此，本研究搜集了最近 30 年公开发表的有关苏打盐碱土改良的相关文献进行 Meta 分析，系统地分析和科学判定了区域内使用最多的石膏类改良剂、生物炭以及混合改良剂（即不同改良剂的配施）对苏打盐碱土的改良效果，以期为苏打盐碱地开发过程中土壤改良剂的合理选择和科学施用提供参考与指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源与筛选

本研究基于中国知网、Web of science 和谷歌学术等检索平台，以“改良剂（amendment）、改良（improve、ameliorate）、盐碱土（saline soil、saline-alkali soil）、盐渍土（salt-affected soil）、石膏（gypsum）、有机（organic）、生物炭（biochar）等”为检索关键词，检索式包括以上关键词及相互组合，共检索了截至 2023 年 4 月 30 日前公开发表的有关苏打盐碱土改良的中英文文献 589 篇。将检索得到的文献进一步筛选，标准如下：（1）试验区域位于中国东北地区（包括辽宁、吉林、黑龙江和内蒙古东部地区）；（2）土壤类型为苏打盐碱土；（3）试验为田间试验，不包括盆栽实验；（4）试验必须包括不施用改良剂的空白对照和施用改良剂的处理；（5）纳入的研究必须报道均值、标准差（标准误）和样本量[14]。本研究筛选出符合进行 Meta 分析的文献 21 篇，包含 854 组关于土壤性质和植物生产力的数据，上述选中文献的研究地点分布如图 1 所示。

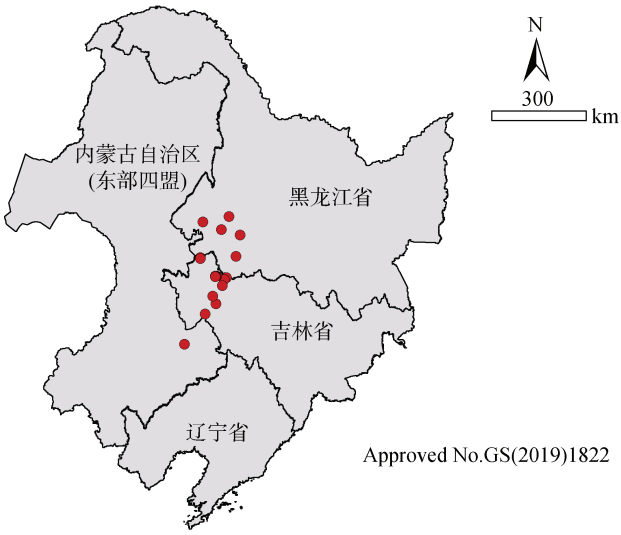


图 1 东北松嫩平原西部苏打盐碱土施用改良剂的相关文献研究地点分布

Fig. 1 Distribution of research sites involved in the relevant literature on the application of amendments to saline-sodic soils in the Western of the Songnen Plain in Northeast China

从纳入文献中的文字和图表中提取改良剂施用方式（如改良剂施用量、种类、施用年限）、土壤理化性质（如盐分、养分）和植物生产力（如出苗率、作物产量）等数据。同时，尽可能提取文献中每个变量的采样深度，以期研究改良剂对不同土层土壤的改良效果。对于标准差（标准误）和均值以图形式报道的文献，采用 Getdata graph digitizer 软件进行提取[15]。

1.2 数据处理与分析

不同改良剂的改良效果通常会受到改良剂类型、盐碱土性质和田间管理措施等的影响。为了量

化改良效果，基于土壤 pH、EC、ESP（碱化度）和含盐量，按照 Chhabra[16]的研究，将土壤根据盐碱化程度分为轻度、中度和重度盐碱土三类。受限于纳入的数据量，为了增大分析的可靠性，将土壤 pH 和 ESP 合并进行分析，意为对土壤碱度的改良效果；将土壤 EC、八大离子合并，意为对土壤盐分的改良效果；将土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质合并，意为对土壤养分的改良效果；将作物产量、生物量、出苗率等合并，意为对作物生长的改良效果。在 Meta 分析中，根据改良剂的作用原理将其分为 9 类（表 1），提取使用频率相对较高的 3 类改良剂，分别为石膏类改良剂、生物炭改良剂和混合改良剂，具体分析 3 类改良剂对苏打盐碱土的改良效果。

表 1　纳入 Meta 分析的改良剂的分类标准

Table 1　Classification standard of all amendments in the collected results of the Meta-analysis

改良剂类型 Amendment type	分类标准 Standard of classification
石膏类 Gypsum	包括磷石膏、脱硫石膏等
无机盐类 Inorganic compound	包括磷酸盐、硫酸盐和硫磺
粉煤灰类 Fly ash	包括粉煤灰和褐煤
有机物料 Organic matter	包括有机肥、有机酸和糖醛渣
生物炭 Biochar	生物炭是一种富含碳（C）的材料，由生物质在无氧条件和较低温（< 700℃）下热解产生的
聚合物 Polymer	高分子聚合物，例如聚丙烯酰胺（PAM）
生物菌 Biological agents	包括菌糠和生物菌剂
复合调理剂 Compound conditioner	商业改良剂，例如禾康
混合改良剂 Mixed amendments	2 种或 2 种以上改良剂的混合施用或配合施用

本研究选取了 8 个可能影响改良效果的因素，重要性大于 0.8 的因素被认为是重要因素，使用模型选择分析确定了 8 个重要的影响因素，分别为被研究土壤的盐碱化程度、土层深度、改良剂施用年限（意为连续施用的年限）、种类、施用量、种植作物类型、年均降雨和年均温度。基于此，将土壤盐碱化程度、土层深度、改良剂施用年限、改良剂种类、改良剂施用量和种植作物类型这几个因素纳入 Meta 分析，定量评测这几个因素对改良效果的影响，采用随机森林模型评估这 8 个因素的相对重要性。

1.3　Meta 分析

本研究使用 R4.1.1 的 Metafor 函数包进行 Meta 分析，选择 lnR 作为效应值，以此来评估改良剂的改良效果。因为纳入的文献研究区域各不相同，各地的田间管理措施和研究重点也有差异，各个研究之间存在显著的差异，采用随机效应模型进行评估。

$$\ln R = \ln(X_t) - \ln(X_c) \quad (1)$$

式中，lnR 为效应值，X_t 和 X_c 分别为处理组和对照组的均值。方差按下式计算。

$$v = \frac{SD_t^2}{N_t X t_c^2} + \frac{SD_c^2}{N_c X_c^2} \quad (2)$$

式中，v 为方差，SD_t 和 SD_c 分别为处理组和对照组的标准差，N_t 和 N_c 分别为处理组和对照组的重复数。

采用 R 语言 metafor 包中的“escalc”函数计算每组数据的效应值[17]，采用方差加权混合效应模型计算每个处理的平均效应值和 95%的置信区间。如果 95%置信区间的误差线没有跨越 0，则说明该处理显著。为方便分析，lnR 的值被转变为百分比，计算公式如下：

$$\text{Percentagechange}(\%) = (exp^{\ln R} - 1) \times 100\% \quad (3)$$

此外，为确定采用的模型能解释大部分的异质性，使用 Q 检验评估效应值的异质性。为评估多种

因素对改良的重要性，使用 Akaike's information criterion（AIC）进行模型选择，这种方法可以拟合所有可能结果来选择最适合的模型。因为在计算过程中考虑效应值的方差以及随机效应模型，这种方法被广泛用于 Meta 分析中[18]。

1.4 随机森林分析

随机森林是一种基于机器学习的集成学习算法，可用于线性、非线性及非参数数据的分类和拟合。本研究采用 R 4.1.1 软件 Random-forest 包，基于随机森林算法，以 lnR 为预测指标，构建变量重要性分析模型，变量重要性采用"精度平均减少值"即均方差增加值（Increase in Mean Square Error，IncMSE）进行评估[19]，为便于理解，笔者综合预测变量 IncMSE 计算得到各变量相对重要性（Relative importance，RI）百分比，计算公式如下：

$$\mathrm{RI}=\frac{\mathrm{IncMSE}}{\sum_{i=1}^{M}\mathrm{IncMSE_i}}\times 100\% \qquad (4)$$

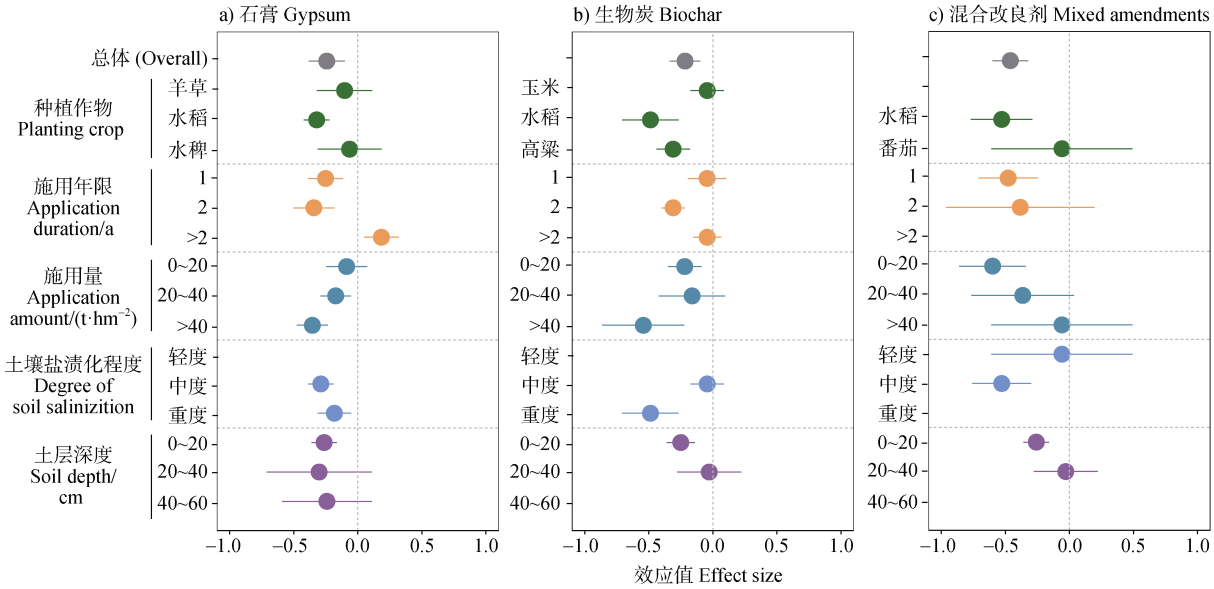
2 结 果

2.1 不同改良剂对苏打盐碱土碱度的影响

苏打盐碱土施用石膏类改良剂、生物炭和混合改良剂后，土壤碱度降低效果分别为–21.5%、–19.5%和–37.0%（图 2）。从种植作物种类来看，3 种改良剂施用后，种植水稻的土壤碱度依次降低了 27.5%、38.6%和 41.1%，效果显著好于种植其他作物。从改良剂施用年限上看，施用 1 年时，3 种改良剂的降碱效果分别为–22.2%、–4.4%和–38.0%，混合改良剂的降碱效果最好；连续施用 2 年时，三者的降碱效果依次为–29.1%、–26.7%和–31.9%，差异不显著；施用 2 年以上时，三者的降碱效果显著下降，石膏类改良剂甚至出现碱度升高（20.1%），混合改良剂则未见报道。从改良剂施用量来看，石膏类改良剂和生物炭随着用量的提高，降低碱度的效果增强，施用量为> 40 t·hm^{-2}时，降低碱度效果（依次为–29.9%和–41.9%）最显著。而随着混合改良剂用量的提高，降低碱度的效果变差，当施用量为 0～20 t·hm^{-2}时，降低碱度效果最好（–45.1%）。从土壤盐渍化程度来看，随着土壤盐渍化程度加重，石膏类改良剂的碱度降低效果下降，生物炭和混合改良剂的降碱效果增强。从土层深度来看，石膏类改良剂对不同土层的盐碱降低效果差异不大，而生物炭和混合改良剂对表层土壤（0～20 cm）的改良效果显著高于更深层土壤（20～40 cm）。

2.2 不同改良剂对苏打盐碱土盐分的影响

总体而言，3 种不同改良剂施用后的盐分降低效果均不显著，生物炭施用后盐分降低 3.9%，石膏



注：误差棒代表 95%置信区间，下同。Note：Error bars are the 95% confidence intervals. The same below.

图 2 三类不同改良剂施用对苏打盐碱土碱度的影响

Fig. 2 The effect size of three types of amendments application on soil alkalinity in saline-sodic soils

类和混合改良剂施用后盐分提高了 2.9%和 3.4%（图 3）。从种植作物上看，水稻田施用 3 种改良剂后盐分均呈增加趋势，玉米田和高粱田施用生物炭后盐分略有下降，效果不显著，种植水稗地块土壤盐分降低效果显著（–47.5%）。从施用年限上看，石膏类改良剂施用超过 2 年盐分可降低 40.7%，施用 1 年或 2 年盐分均呈增加趋势；生物炭和混合改良剂对土壤降盐效果受施用年限影响较小，效果不显著。从改良剂施用量来看，石膏类降低盐分作用受施用量影响较大，施用量为 0～20 t·hm^{-2} 时，降盐效果为–52.3%；施用量为 20～40 t·hm^{-2} 时，降盐效果–24.4%；施用量> 40 t·hm^{-2} 时，土壤盐分不降反升（30.3%）。生物炭和混合改良剂降盐效果受施用量影响较小，但效果不显著。从土壤盐渍化程度上看，重度苏打盐碱土施用石膏类改良剂后盐分可降低 62.4%，中度苏打盐碱土施用石膏类改良剂后土壤盐分反而增加了 17.4%。从土层深度上看，3 种改良剂对表层 0～20 cm 土壤降低盐分效果均不显著，石膏类改良剂对 20～40 cm 和 40～60 cm 土壤降盐效果分别达–34.0%和–45.7%。

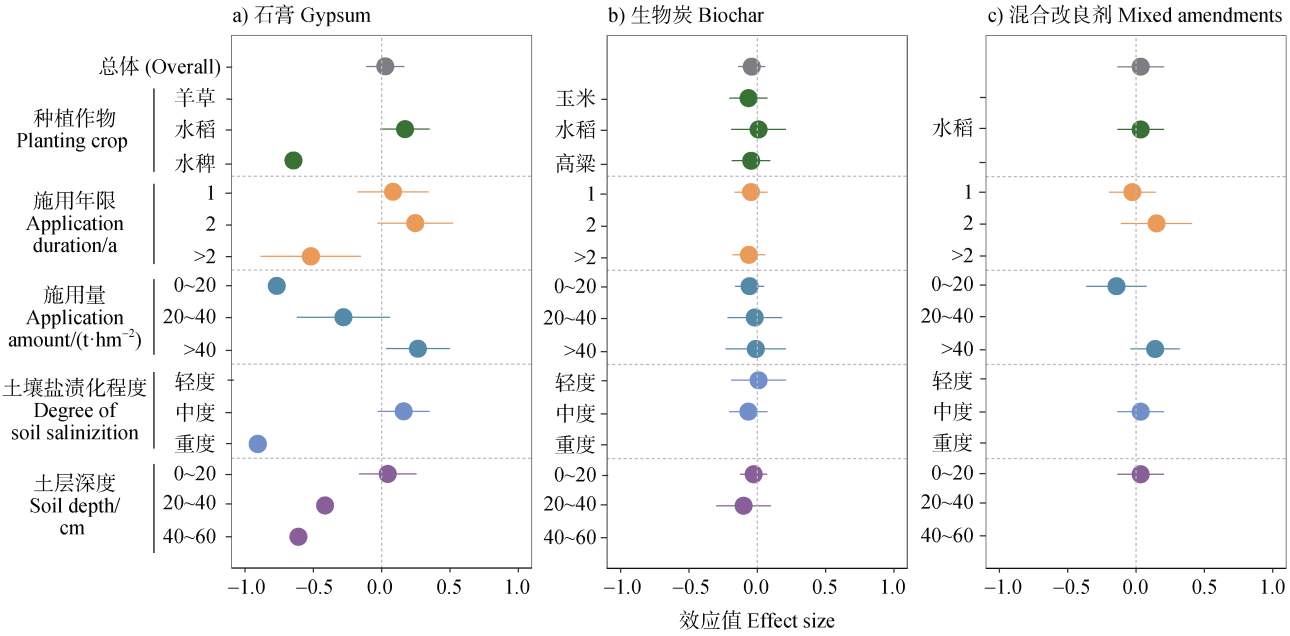


图 3　三类不同改良剂施用对苏打盐碱土盐分的影响

Fig. 3　The effect size of three types of amendments application on soil salinity in saline-sodic soils

2.3　不同改良剂对苏打盐碱土养分的影响

石膏类、生物炭和混合改良剂施用对土壤养分含量的提升作用分别为 26.3%、47.7%和 39.0%，效果显著（图 4）。石膏类改良剂施用后种植羊草、水稻和水稗，养分依次提高了 66.5%、20.9%和 5.0%；生物炭施用后种植玉米、水稻和高粱，养分依次提高了 31.2%、73.9%和 63.9%；混合改良剂施用后种植水稻，土壤养分可提高 39.0%。从施用年限上看，3 种改良剂随着施用年限增加，提升土壤养分的效果逐渐增加。石膏类改良剂施用 1 年、2 年和 2 年以上，土壤养分分别提高 10.5%、31.1%和 46.4%；生物炭施用 1 年、2 年和 2 年以上，土壤养分分别提高 47.5%、68.2%和 33.0%；混合改良剂施用 1 年和 2 年，土壤养分分别提高 68.2%和 55.5%。从改良剂施用量来看，石膏类几乎不受施用量的影响；生物炭在施用量> 40 t·hm^{-2} 时对养分的提高效果最佳，达 99.9%；混合改良剂施用量为 0～20 t·hm^{-2} 和> 40 t·hm^{-2} 时，土壤养分分别提高 43.7%和 24.2%。从土壤的盐渍化程度上看，重度苏打盐碱土施用石膏类改良剂和生物炭后养分分别提升 45.7%和 73.8%，显著高于在中度上对养分的提升效果。从土层深度上看，3 种改良剂对土壤养分的提升主要为 0～20 cm 的表层，对深层土壤养分的提升效果相比较差。

2.4　不同改良剂对苏打盐碱土上作物生长的影响

不同改良剂施用后对作物生长均具有促进作用。石膏类、生物炭和混合改良剂总体上对作物促生作用分别为 38.8%、44.6%和 16.1%，效果显

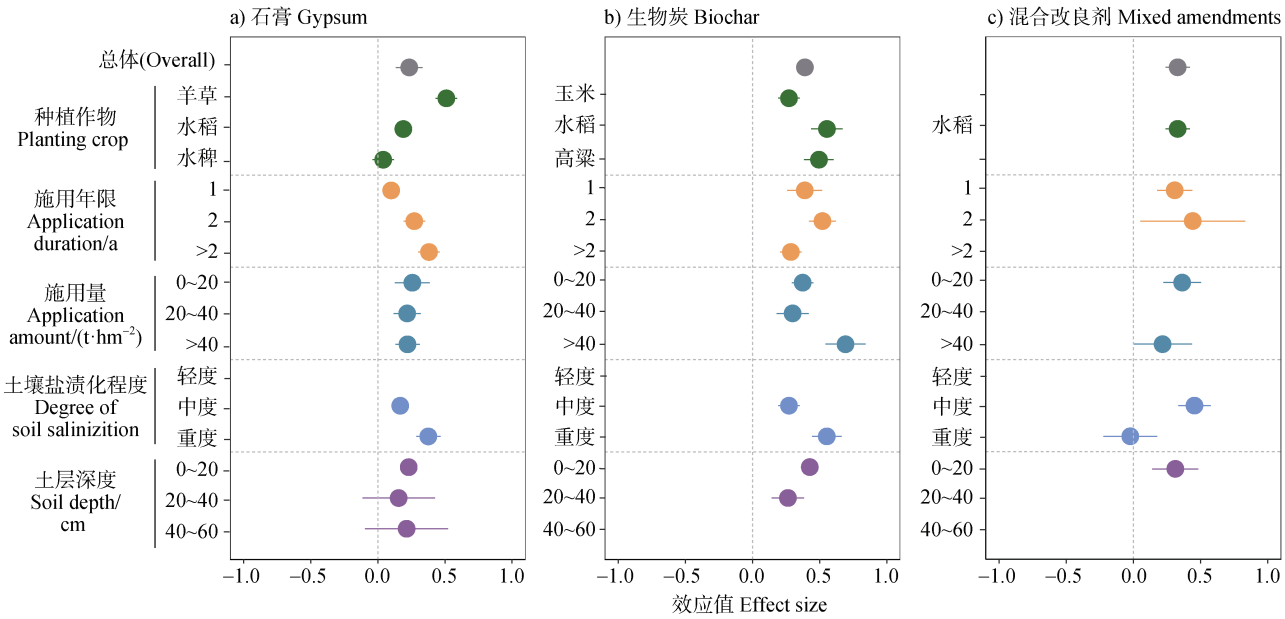


图 4 三类不同改良施用剂对苏打盐碱土养分的影响

Fig. 4 The effect size of three types of amendments application on soil nutrients in saline-sodic soils

著（图 5）。从种植作物上看，石膏类施用后对水稗和羊草的促生作用分别为 39.9%和 33.3%；生物炭施用后对水稻和玉米的促生作用分别为 69.0%和 16.1%；混合改良剂施用后对水稻和番茄的促生作用为 19.1%和 13.7%。从施用年限上看，改良剂对作物的促生作用受其施用年限的直接影响较小，石膏类改良剂施用 1 年和 2 年以上对作物的促生效果为 39.9% 和 33.3%；生物炭施用 1 年、连续 2 年和 2 年以上对作物促生作用分别为 45.5%、59.6%和 25.6%；混合改良剂施用 1 年的促生作用为 16.1%。从改良剂施用量来看，石膏类改良剂和生物炭对作物促生效果随着施用量增加而提高，石膏类改良剂施用量为 20～40 t·hm^{-2} 时对作物的促生效果达 46.8%，生物炭施用量为>40 t·hm^{-2}时对作物促生作

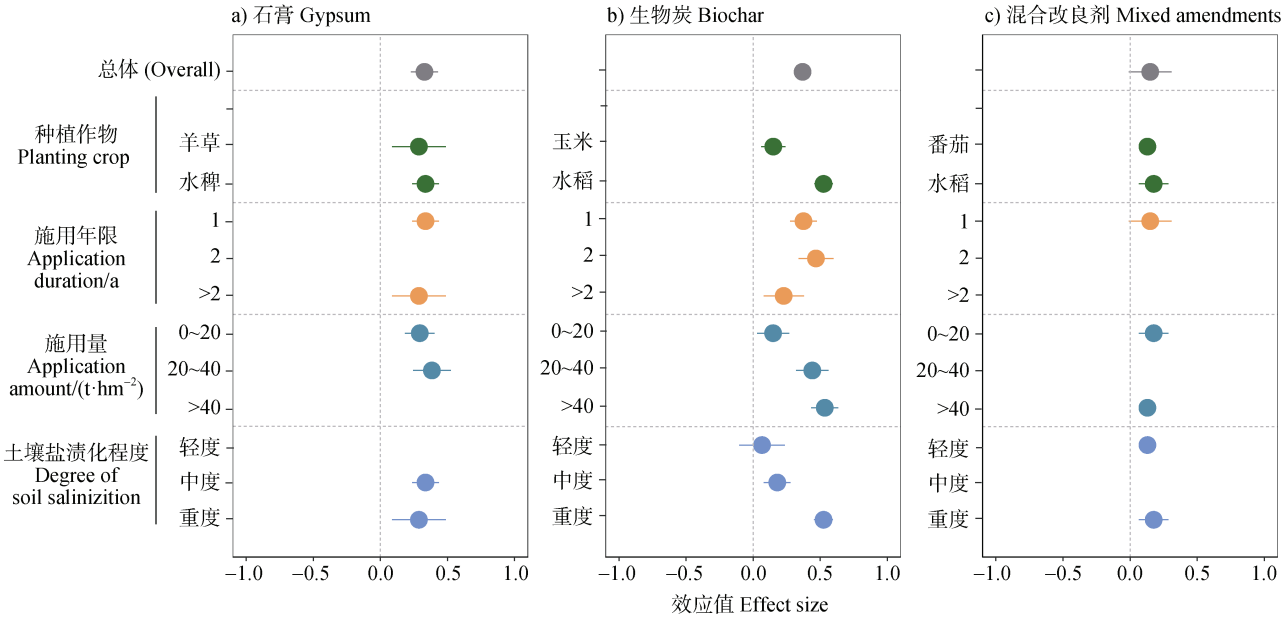


图 5 三类不同改良剂施用对苏打盐碱土上作物生长的影响

Fig. 5 The effect size of three types of amendments application on the growth of crops in saline-sodic soils

用为 70.4%；混合改良剂施用量为 0～20 t·hm^{-2} 和 >40 t·hm^{-2} 时促生作用分别为 19.1% 和 13.7%。从土壤的盐渍化程度看，石膏类和混合改良剂对作物的促生效果在不同盐渍化程度土壤上差异不显著；生物炭施用对重度苏打盐碱土上作物的促生作用达 69.0%，显著优于在中度（19.6%）和轻度（6.9%）苏打盐碱土上的促生作用。

2.5　不同改良剂影响土壤改良效果的因素解析

随机森林模型分析表明，石膏类、生物炭和混合改良剂降低碱度效果的影响因素主要为改良剂施用量，占比分别达 40.0%、48.0%和 45.0%（图 6）。此外，影响石膏类改良剂的因素还有土层深度和作物类型，二者占比均为 15.0%；影响生物炭的因素还有降雨和作物类型，二者占比分别为 17.0%和 16.0%；影响混合改良剂的次要因素是温度，占比 38.0%。同理，改良剂施用量也是影响生物炭和混合改良剂降低盐分的最重要因素，占比分别为 76.0%和 52.0%；作物类型和降雨是影响石膏类改良剂降低盐分的重要因素。对于土壤养分提升，改良剂施用年限、作物类型和温度是影响石膏类改良剂的主要因素，重要性占比依次为 25.0%、20.0%和 18.0%；改良剂施用量、作物类型和降雨是影响生物炭的主要因素，重要性占比分别为 53.0%、14.0%和 14.0%；改良剂施用量（33.0%）、温度（24.0%）和降雨（23.0%）是影响混合改良剂的重要因素。从促进作物生长上看，改良剂施用量是影响石膏类和混合改良剂最重要的因素，占比分别为 72.0%和 70.0%；降雨、土壤盐渍化程度和作物类型是影响生物炭改良效果的主要因素，重要性依次为 26.0%、24.0%和 22.0%。

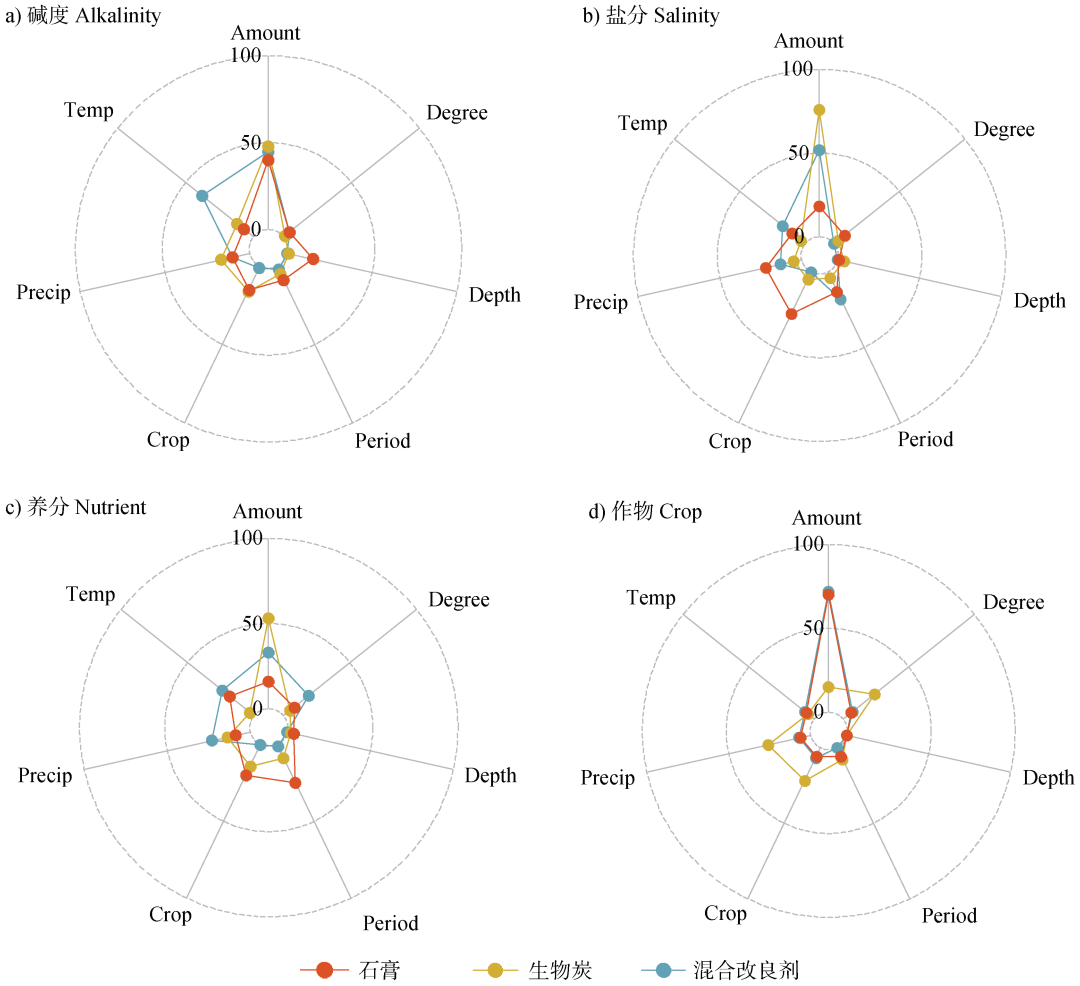


图 6　影响三类不同改良剂改良效果的因素相对重要性解析

Fig. 6　Analysis of the relative importance of different influencing factors on the effect size of different amendments

3 讨 论

3.1 不同改良剂对土壤碱度和盐分的降低效果

苏打盐碱土施用不同改良剂均具有显著降低土壤碱度的作用，但效果上存在着一定差异（图 2）。生物炭或混合改良剂的施用对稻田土壤碱度的降低效果更显著，石膏类改良剂次之。生物炭富含各种形态的碳元素，具有较好的吸附和缓冲功能[20]；混合改良剂多以有机物料配施其他无机改良剂，稻田中充足的水分会促进有机物料与土壤的结合[21]，更有利于改良剂与盐分间化学反应的发生，对土壤碱度的降低效果较好。石膏类改良剂由于溶解度低，钙离子释放缓慢，将交换性钠转变为可溶性钠，逐步通过淋洗或植株吸收而减少，因此其降低碱度的效果不如生物炭和混合改良剂，尤其在旱田上效果更弱。

改良剂的施用年限对土壤碱度的降低也存在差异。在一定时间范围内，石膏类改良剂的改良效果随着施用年限的增长而提高，Luo 等[22]研究指出连续施用脱硫石膏 8 年后仍可测得土壤 pH 和碱化度的显著降低，表明其具有长期的改良效果。也有研究指出，连续施用脱硫石膏多年后，土壤碱度呈现先降后升的趋势[23]，尤其旱田碱度变化相比施用年限较短的时候反而大幅提高[24]。这是由于脱硫石膏本身呈弱碱性，pH 多在 8.0 左右，溶解度又较低，连续多年施用自然造成碱性盐分的累积，导致土壤碱度升高，目前有关石膏类改良剂的最佳施用年限尚无报道，亟待研究。生物炭对苏打盐碱土的改良效果受施用年限影响也较大，Novak 等[25]在试验中发现生物炭对 pH 的影响不显著。本研究发现，生物炭施用 1 年时的降碱效果不显著，施用第 2 年的效果较显著，施用超过 2 年后效果又降低。这可能是因为生物炭本身偏碱性，主要作用是吸盐而不是降碱，施用后随着吸附点位逐渐被盐离子占据，降碱效果不断下降。混合改良剂施用的降碱效果 2 年内差异不显著，可能是因为有机物料对土壤降盐碱主要是通过降低容重，改土效果很难在短期内表现出来[26]。有机物料在降低土壤碱度的同时，更重要的作用是培肥地力，Huang 等[7]研究显示农家肥施用 10 年后苏打盐碱地稻田盐碱显著下降，养分显著升高。因此，混合改良剂更适宜长期改良和利用。

同理，改良剂施用量不同程度地影响了土壤碱度的降低效果。石膏类改良剂和生物炭降碱效果随着用量增加而增大。一方面，石膏类降低碱度主要是通过 Ca^{2+}与 Na^{+}置换，施用量越大则易溶性 Ca^{2+}含量越高，效果也就越好，但降碱效果也不是无限量增大的，石膏对土壤的脱钠率不取决于施用量，而取决于土壤原有的总交换性钠，增大石膏施用量不能无限提高脱钠率。另一方面，增大石膏用量会提高盐分，加重土壤盐碱化。不同用量下，生物炭的降碱效果与石膏类改良剂相似，在低施用量下对土壤容重、孔隙等物理性质的改良不明显，降碱效果不显著，施用量增大后，土壤中的比例提高，改良效果显著提升[27]。相反，混合改良剂降碱效果随施用量增大而降低，这可能是因为大量有机物料的施用使得团聚体分散，降低了稳定性，影响了盐碱的淋洗[28]。

不同改良剂多施用于中、重度盐碱土，在轻度盐碱土上很少有研究报道（图 2 和图 3）。改良剂的降碱效果经常受盐碱化程度的影响，如石膏在中度盐碱土上降碱效果优于重度盐碱土，生物炭在重度盐碱土的降碱效果显著优于中度盐碱土，混合改良剂在中度盐碱土降碱效果显著好于轻度盐碱土。有研究表明，石膏类改良剂能够提高土壤团聚体稳定性，有利于改善土壤的高容重[29]；生物炭有利于提高土壤孔隙度，可吸附一定量的盐分，降低碱化度[30]；混合改良剂多为中性或微酸性物质，可增加盐碱土的缓冲性能，发挥酸碱中和作用[31]。上述改良物料可适当弥补苏打盐碱土性质上的不足，发挥物理性稀释效应或化学中和反应，往往盐碱化越重的土壤具有愈加显著的改良效果。然而，针对特定改良剂的改良机制问题，迄今研究的不多，有待进行更加深入的探索。

关于改良剂对盐分的降低作用，本研究中涉及到的 3 种改良剂总体上均不具备降低盐分的作用（图 3）。这一结果也比较符合物质世界的客观规律，土壤盐分本身是一种物质，既不会凭空产生，也不会凭空消失，只能从一种形态转化为另一种形态。长期的盐碱土治理经验表明，对于苏打盐碱土改良首先是采用合适的改良物料将碱性盐转化为中性盐，再将中性盐利用灌排、耕作等方式有效地从耕作层中移走[32]。因此，苏打盐碱土的治理必须采取综合的措施，改良剂的合理选择是快速降低土壤高碱化度的有效手段，土壤改良后及时采用水利工程

或农艺措施将置换或转换下来的可溶盐迅速排走，才是苏打盐碱土可持续利用的关键。

3.2　不同改良剂提升土壤养分和促进作物生长的效果

大量研究表明，施用改良剂除具有降低盐碱的作用，还能部分提高土壤养分含量[33]。由于改良剂种类的不同，在提升养分方面的效果存在着一定的差异（图 2-图 4）。石膏类改良剂在种植羊草的地块对养分的提升显著，生物炭和混合改良剂对稻田土壤养分提升效果显著。这可能既与改良剂自身特性有关，也与不同作物对盐碱胁迫的适应能力存在差异有关。如羊草生长过程中对游离 Na^+具有适应或耐受能力，需要从土壤中吸收 Ca^{2+}、Mg^{2+}等高价离子，石膏恰恰为其提供了充分的钙源物质，增强了其抵抗 Na^+胁迫的能力，同时石膏施入可部分激活土壤中的磷素，促进了羊草对磷的间接吸收。生物炭和混合改良剂的投入相当于直接增加了有机营养，在土壤水分充沛的稻田条件下更易发挥作用，因此这些改良剂对稻田土壤养分的提升效果更显著。

同理，改良剂对于土壤养分的提升也与其施用年限具有密切关系。石膏类改良剂施用 1 年对养分的提高效果不显著，随着施用时间增加，土壤结构逐步改善，养分的提高越来越显著[34]。生物炭对养分的提高与降碱效果一致，因为生物炭本身含有大量营养元素，直接提高了养分含量[35]。生物炭养分的提高相比于降碱效果更显著，因为生物炭提高了土壤 C/N 比，增加了土壤碳库对氮素和其他养分的吸附能力，显著提高了各种养分含量[36]。混合改良剂通常可以提高土壤有机质，给作物生长提供必需的营养物质，改善土壤结构，提高土壤的透水性，还可以提高微生物活性，促进土壤中有利于养分转化的细菌活动，从而提高土壤养分的有效性[37]。

改良剂对盐碱土养分的提升效果受施用量影响较大。石膏对养分的提升效果受施用量影响较小，因为石膏溶解度较低，增大石膏施用量不能显著扩大其与土壤的接触，随着石膏的施用量的增多，置换反应会使土壤中的 Na_2SO_4 增多，进一步抑制石膏的溶解。生物炭在施用量较大的情况下提高养分最显著，因为生物炭可直接提高养分含量。生物炭不仅为微生物直接提供碳源，而且疏松多孔的结构为微生物提供了有利的生长环境，从而促进了土壤养分的活化，提高土壤养分供给能力。混合改良剂的用量过大会导致其中的颗粒有机物料未完全被土壤吸收而覆盖在表面，影响土壤呼吸。有机物料用量过大，会增加土壤盐分，还会对微生物产生不良影响，降低土壤养分有效性[38]。在促进作物生长方面，3 种不同改良剂施用分别具有显著的正效应，并且石膏类改良剂和生物炭对作物的促生效应总体上优于混合改良剂（图 5）。石膏对作物促生效应受种植作物种类、改良剂用量、施用年限以及土壤盐渍化程度影响较小，因为石膏类改良剂主要作用是降低土壤碱度和间接提升养分，进而促进作物生长。与之相比，生物炭在降低碱度的同时直接为土壤带来养分，其促生效果受上述因素影响则较大。有研究表明，改良剂对作物的促生效果表现为一方面缓解作物受到的胁迫，另一方面提高作物对养分的吸收[39]。生物炭和混合改良剂施用显著促进了水稻的生长，因为高碱度显著抑制了作物对养分的吸收，降低了土壤肥力，影响了作物生长，而生物炭和混合改良剂施用后既发挥着对水稻遭受盐碱胁迫的缓解作用[40]，又可以给作物生长直接提供必需的营养元素，生物炭对作物的促生效果随着施用量增加而显著提高也证明了这一点。

3.3　不同改良剂对盐碱土改良效果的影响因素解析

总体而言，石膏类改良剂、生物炭和混合改良剂对盐碱土的改土效果差异不显著，但在不同条件下的改土效果又表现出显著的差异（图 6）。随机森林模型分析结果表明，对于石膏类改良剂，施用量是影响其降低土壤碱度和促进作物生长的主要因素，种植作物种类是影响其降低盐分效果的主要因素、施用年限是影响提升养分效果的主要因素，但与其他各因素对石膏类改良剂的影响差异并不显著，这表明石膏类改良剂在改良苏打盐碱土过程中起到的主要作用就是降低土壤碱度，通过降低碱度进而促进作物生长，其对于土壤盐分降低和养分提升作用只是在碱度降低后的间接效应。因此，石膏类改良剂的应用必须配合后续的土壤培肥才能真正意义上实现对苏打盐碱土的成功治理。

对于生物炭和混合改良剂，影响其降低土壤碱度、盐分以及提升养分的主要因素均是施用量，表明生物炭和混合改良剂在改良盐碱土过程中不仅直接起到降盐碱的作用，还直接为土壤提供养分资源，兼具改土和培肥的双重作用（图 6）。但生物炭在促

进作物生长方面，受土壤盐渍化程度和降雨等因素影响较大，混合改良剂在提升土壤养分作用时也较多受到降雨的影响。因此，生物炭和混合改良剂的应用要考虑土壤具有充沛的水分条件（如水田），才能发挥其较好的改良效果。

4 结 论

苏打盐碱土的改良，石膏类、生物炭和混合改良剂均具有显著降低土壤碱度，提升养分含量和促进作物生长的作用。三者的区别在于石膏类改良剂主要作用是降低土壤碱度，间接提升土壤养分和促进作物生长，而生物炭和混合改良剂在降低碱度同时，兼具直接提供土壤养分的作用，改土与培肥同步。苏打盐碱土的改良是一项持久的系统工程，改良剂的选择不仅要考虑用量，种植作物类型、成本、作用效果持久性以及环境安全性问题也是重要的参考因素，绿色、高效应是未来苏打盐碱土改良的重要方向。

参考文献（References）

[1] Li X J. The alkili-saline land and agricultural sustainable development of the western Songnen Plain in China[J]. Scientia Geographica Sinica，2000，20（1）：51—55. [李秀军. 松嫩平原西部土地盐碱化与农业可持续发展[J]. 地理科学，2000，20（1）：51—55.]

[2] Li J G，Pu L J，Han M F，et al. Soil salinization research in China：Advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences，2014，24（5）：943—960.

[3] Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica，2008，45（5）：837—845. [杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报，2008，45（5）：837—845.]

[4] Yang J S，Yao R J，Wang X P，et al. Research on salt-affected soils in China：History，status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica，2022，59（1）：10—27. [杨劲松，姚荣江，王相平，等. 中国盐渍土研究：历程、现状与展望[J]. 土壤学报，2022，59（1）：10—27.]

[5] Wang N，Zhang X，Liu J H，et al. Effect of corn stover and aluminum sulfate on main salinization indexes of soda saline-alkaline soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2022（5）：134—140. [王楠，张鑫，刘金华，等. 玉米秸秆和 $Al_2(SO_4)_3$ 对苏打盐碱土主要盐碱化指标的影响[J]. 中国土壤与肥料，2022（5）：134—140.]

[6] Liu M，Liang Z W，Ma H Y，et al. Responses of rice（*Oryza sativa* L.）growth and yield to phosphogypsum amendment in saline-sodic soils of North-East China[J]. Journal of Food Agriculture and Environment，2010，8（2）：827—833.

[7] Huang L H，Liu Y，Ferreira J F S，et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts，minerals，and heavy metals of saline-sodic paddy fields in Northeast China[J]. Soil & Tillage Research，2022，215：105222.

[8] Yao T X，Zhang W T，Gulaqa A，et al. Effects of peanut shell biochar on soil nutrients，soil enzyme activity，and rice yield in heavily saline-sodic paddy field[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2021，21（1）：655—664.

[9] Ji C N，Huang J，Tian Y，et al. Feasibility study on the application of microbial agent modified water-jet loom sludge for the restoration of degraded soil in mining areas[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2021，18（13）：6797.

[10] Fu R M，Chang H P，Zhu M F，et al. Research，application demonstration of key technology for microbial remediation of saline-alkali soil[J]. International Journal of Agriculture and Biology，2018，20（11）：2556—2560.

[11] Zhang L，Ge A H，Tóth T，et al. Enrichment of keystone fungal taxa after flue gas desulphurization gypsum application drives reclamation of the saline-sodic soil[J]. Land Degradation & Development，2023，34（8）：2276—2287.

[12] Tian Y，Liu S J，Feng H J. Effect of applying the desulfurization gypsum combined with polymaleic anhydride on alkali soil improvement[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2018（1）：114—120. [田野，刘善江，冯浩杰. 脱硫石膏配施聚马来酸酐对碱化土壤的改良效果研究[J]. 中国土壤与肥料，2018（1）：114—120.]

[13] Li X B，Che W K，Piao J L，et al. Peanut shell biochar's effect on soil physicochemical properties and salt concentration in highly saline-sodic paddy fields in Northeast China[J]. BioResources，2022，17（4）：5936—5957.

[14] Zhang Z L，Sun D，Tang Y，et al. Plastic shed soil salinity in China：Current status and next steps[J]. Journal of Cleaner Production，2021，296：126453.

[15] Zhou M H，Butterbach-Bahl K，Vereecken H，et al. A meta-analysis of soil salinization effects on nitrogen pools，cycles and fluxes in coastal ecosystems[J]. Global Change Biology，2017，23（3）：1338—1352.

[16] Chhabra R. Classification of salt-affected soils[J]. Arid Land Research and Management，2004，19（1）：61—79.

[17] Luo Y Q，Hui D F，Zhang D Q. Elevated CO_2 stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems：A meta-analysis[J]. Ecology，2006，87（1）：53—63.

[18] Viechtbauer W. Conducting meta-analyses in R with the

metafor Package[J]. Journal of Statistical Software，2010，36（3）：1—48.

[19] Saifullah，Dahlawi S，Naeem A，et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils：Challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment，2018，625：320—335.

[20] Celik I，Gunal H，Budak M，et al. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions[J]. Geoderma，2010，160（2）：236—243.

[21] Basak N，Rai A K，Sundha P，et al. Assessing soil quality for rehabilitation of salt-affected agroecosystem：A comprehensive review[J]. Frontiers in Environmental Science，2022，10：935785.

[22] Luo S S，Wang S J，Tian L，et al. Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils[J]. Geoderma，2018，329：108—117.

[23] Chen H，Jiang T X，Ma R，et al. Evaluation of soil improvement effect and safety of desulfurized gypsum for different years[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2021，49（6）：208—212. [陈虹，姜同轩，马蕊，等. 脱硫石膏施用不同年限对土壤改良效果及安全性评价[J]. 江苏农业科学，2021，49（6）：208—212.]

[24] Chen L M，Ramsier C，Bigham J，et al. Oxidation of FGD-$CaSO_3$ and effect on soil chemical properties when applied to the soil surface[J]. Fuel，2009，88（7）：1167—1172.

[25] Novak J M，Busscher W J，Laird D L，et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science，2009，174（2）：105—112.

[26] Zhang J，Xu N T，Meng Q F，et al. Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component，its source and corn yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2019，35（2）：107—113. [张娟，徐宁彤，孟庆峰，等. 有机肥施用年限对土壤有机碳组分及其来源与玉米产量的影响[J]. 农业工程学报，2019，35（2）：107—113.]

[27] Zhao W B，Tang L，Wang S，et al. Improvement effect of two biochars on coastal saline-alkaline soil[J]. Ecology and Environmental Sciences，2023，32（4）：678—686. [赵维彬，唐丽，王松，等. 两种生物炭对滨海盐碱土的改良效果[J]. 生态环境学报，2023，32（4）：678—686.]

[28] Whalen J K，Chang C. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications[J]. Soil Science Society of America Journal，2002，66（5）：1637—1647.

[29] Zhao Y G，Wang S J，Li Y，et al. Prospects of using flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkaline soils[J]. Journal of Tsinghua University：Science & Technology，2022，62（4）：735—745. [赵永敢，王淑娟，李彦，等. 脱硫石膏改良盐碱土技术发展历程与展望[J]. 清华大学学报：自然科学版，2022，62（4）：735—745.]

[30] Zhao W，Zhou Q，Tian Z Z，et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land，improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. Science of the Total Environment，2020，722：137428.

[31] Sayara T，Basheer-Salimia R，Hawamde F，et al. Recycling of organic wastes through composting：Process performance and compost application in agriculture[J]. Agronomy，2020，10（11）：1838.

[32] Eynard A，Lal R，Wiebe K. Crop response in salt-affected soils[J]. Journal of Sustainable Agriculture，2005，27（1）：5—50.

[33] Leogrande R，Vitti C. Use of organic amendments to reclaim saline and sodic soils：A review[J]. Arid Land Research and Management，2019，33（1）：1—21.

[34] Alva A K，Prakash O，Paramasivam S. Transport of nitrogen forms in a sandy entisol with coal combustion by-product gypsum amendment[J]. Journal of Environmental Science and Health，Part A：Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering，1998，33（6）：1023—1039.

[35] Huang Z，Qu S H，Bai L，et al. Effects of different straw mixing biochar on nutrient and enzyme activity of saline soil[J]. Research of Soil and Water Conservation，2017，24（4）：290—295. [黄哲，曲世华，白岚，等. 不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持研究，2017，24（4）：290—295.]

[36] van Zwieten L，Kimber S，Morris S，et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil，2010，327（1）：235—246.

[37] de Lima A S，da Silva F L，da S Sousa C，et al. Growth and production of *Zea mays* fertigated with biofertilizer and water blade in semiarid regions，Brazil[J]. Water，Air，& Soil Pollution，2020，231（10）：520.

[38] Burger M，Jackson L E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems[J]. Soil Biology & Biochemistry，2003，35（1）：29—36.

[39] Hammer E C，Balogh-Brunstad Z，Jakobsen I，et al. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces[J]. Soil Biology & Biochemistry，2014，77：252—260.

[40] Thomas S C，Frye S，Gale N，et al. Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species[J]. Journal of Environmental Management，2013，129：62—68.

（责任编辑：卢　萍）