

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.008 CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.008

王晋峰,王紫超,李嘉,等.施肥对我国盐碱土壤基础理化性质的影响[J].水土保持学报,2026,40(1):198-207.

WANG Jinfeng, WANG Zichao, LI Jia, et al. Effect of fertilization on basic physicochemical properties of saline-alkali soil in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):198-207.

施肥对我国盐碱土壤基础理化性质的影响

王晋峰,王紫超,李嘉,咎亚玲,谭炯锐,王霞,孙元琳

(运城学院生命科学系,山西省特优农产品梯次高值利用技术创新中心,山西 运城 044000)

摘要: [目的] 为探讨不同施肥条件下盐碱土壤基础理化性质变化特征及关键驱动因素,为我国盐碱地培肥策略提供科学依据。[方法] 共收集2002—2024年发表的49篇文献(190组相对独立的涉及土壤理化性质数据),采用整合分析(Meta-analysis)方法定量分析施肥对我国盐碱土壤理化性质的影响。[结果] 1)整体上,施肥可显著降低盐碱土壤体积质量和pH,降幅分别为5.01%和3.41%,显著提升土壤有机质、全氮磷钾和速效氮磷钾质量分数,提升幅度为9.71%~29.06%。2)相比化肥和秸秆还田,有机肥可明显提高土壤全磷、全钾和速效氮质量分数,有效降低土壤体积质量和pH。有机肥施用量 $<3\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$,秸秆还田量为6 000~9 000、 $<6\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,可显著提高土壤全量和速效养分质量分数。3)所有年平均气温和年降水量范围内施肥均可有效提高土壤有机质、全氮和速效钾质量分数。年平均气温 $<9\sim 12\ ^\circ\text{C}$ 和年降水量 $<200\ \text{mm}$ 时,可有效提升全磷、全钾质量分数,降低土壤pH。所有土壤初始pH和有机质条件下施肥均可有效提高土壤有机质、速效磷和速效钾质量分数,降低土壤pH。初始pH <8.5 、 $8.5\sim 8.7$ 时,施肥可有效提高全量养分和速效钾质量分数,降低土壤体积质量。初始有机质 $<9\sim 15\ \text{g}/\text{kg}$ 时,可有效降低土壤体积质量和pH, $>15\ \text{g}/\text{kg}$ 时可提高土壤全磷和全钾质量分数。4)种植制度和年降水量是影响盐碱土壤有机质和pH的主要因素,而土壤初始pH和有机质质量分数是速效氮的关键驱动因素。[结论] 3种施肥均可有效改善盐碱土壤理化性质,低量有机肥施用和秸秆还田在低温少雨地区对盐碱地土壤改良效果最佳,年降水量、土壤初始pH和有机质是盐碱土壤基础性质的关键驱动因素。研究结果可为盐碱地的合理施肥及耕地质量提升提供理论参考。

关键词: 盐碱土壤;施肥;秸秆还田;Meta分析;基础理化性质

中图分类号:S156.4 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2026)01-0198-10

Effect of Fertilization on Basic Physicochemical Properties of Saline-Alkali Soil in China

WANG Jinfeng, WANG Zichao, LI Jia, ZAN Yaling, TAN Jiongrui, WANG Xia, SUN Yuanlin

(Life Sciences Department, Yuncheng University, Shanxi Technology Innovation Center of High Value-Added Echelon Utilization of Premium Agro-Products, Yuncheng, Shanxi 044000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the variation characteristics of basic physicochemical properties of saline-alkali soil under different fertilization conditions and key driving factors, providing a scientific basis for the fertilization strategies of saline-alkali land in China. [Methods] A total of 49 studies published from 2002 to 2024 (190 sets of relatively independent data related to soil physicochemical properties) were collected, and the Meta-analysis method was adopted to quantitatively analyze the effects of fertilization on the physicochemical properties of saline-alkali soil in China. [Results] 1) Overall, fertilization significantly reduced the bulk density and pH of saline-alkali soil by 5.01% and 3.41%, respectively, and significantly increased the mass fractions of soil organic matter, total nitrogen, phosphorus, and potassium, and available nitrogen, phosphorus, and potassium, with the

收稿日期:2025-06-04 修回日期:2025-07-02 录用日期:2025-07-31 网络首发日期(www.cnki.net):2025-10-17

资助项目:山西省自然科学基金基础研究计划项目(202403021222302);山西省优秀博士来晋科研专项(QZX-2023041);山西省技术创新中心基地项目(202404010920021);运城学院博士科研启动项目(YQ-2024001;YQ-2024028);运城学院应用研究项目(YJ-202402)

第一作者:王晋峰(1992—),男,讲师,博士,主要从事土壤培肥与改良研究。E-mail:wjf202107@163.com

通信作者:李嘉(1994—),女,讲师,博士,主要从事施肥管理与环境研究。E-mail:jia_lichn@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

increases ranging from 9.71% to 29.06%. 2) Compared with chemical fertilizers and straw returning, organic fertilizers could significantly increase the mass fractions of total phosphorus, total potassium, and available nitrogen in the soil, and effectively reduce soil bulk density and pH. When the application rate of organic fertilizer was $< 3\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ and the amount of straw returning was 6 000–9 000, $< 6\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$, the mass fractions of total and available nutrients in the soil could be significantly increased. 3) Under all ranges of annual average temperature and precipitation, fertilization effectively increased the mass fractions of soil organic matter, total nitrogen, and available potassium. When the average annual temperature was < 9 , $9 - 12\ ^\circ\text{C}$ and the average annual precipitation was $< 200\ \text{mm}$, the mass fractions of total phosphorus and total potassium could be effectively increased and the soil pH could be reduced. Fertilization under all initial soil pH levels and organic matter conditions could effectively increase the mass fractions of soil organic matter, available phosphorus, and available potassium, and reduce soil pH. When the initial pH was < 8.5 , $8.5 - 8.7$, fertilization could effectively increase the mass fractions of total nutrients and available potassium, and reduce soil bulk density. When the initial organic matter was < 9 , $9 - 15\ \text{g}/\text{kg}$, the soil bulk density and pH could be effectively reduced. When it was $> 15\ \text{g}/\text{kg}$, the mass fractions of total phosphorus and total potassium in the soil could be increased. 4) Planting system and annual precipitation were the main factors influencing the organic matter and pH of saline-alkali soil, while the initial pH and organic matter mass fraction of the soil were the key driving factors of available nitrogen. [Conclusion] All three types of fertilization can effectively improve the physicochemical properties of saline-alkali soil. The application of low amounts of organic fertilizer and straw returning, especially in regions with low temperature and low precipitation, has better effects on soil improvement in saline-alkali land. Annual precipitation, initial soil pH, and organic matter are the key driving factors of the basic properties of saline-alkali soil. The findings can provide a theoretical reference for the rational fertilization and the improvement of cultivated land quality in saline-alkali land.

Keywords: saline-alkali soil; fertilization; straw returning; Meta-analysis; basic physicochemical properties

Received: 2025-06-04

Revised: 2025-07-02

Accepted: 2025-07-31

Online(www.cnki.net): 2025-10-17

随着全球气候变化和人口增长,土地资源的可持续利用成为一个热门话题。盐碱地是一种由于土壤中盐分和碱性物质较高而不适宜农业生产的土地类型,具有土壤物理性质差、肥力低、生态环境脆弱等特点^[1]。据统计^[2],全球盐碱地面积约 9.54 亿 hm^2 ,广泛分布于干旱和半干旱地区,主要集中在亚洲、中东、非洲、澳大利亚和美洲的部分地区,其中我国盐碱地面积已达 3 600 万 hm^2 ,约占全国耕地面积的 6.60%^[3]。盐碱地由于其特殊的土壤性质严重制约农业和生态环境可持续发展,威胁粮食安全生产与生态环境。

针对盐碱化土壤制约农业生产与生态环境质量问题,目前已有盐碱地改良技术包括化学、工程、生物及综合措施。科学合理施肥是改善盐碱地土壤理化性质和提升作物产量的关键,其中有机肥、灰土粪、秸秆等有机物料的施用是最经济、有效的生物化学措施,能够增加土壤孔隙度,减少盐分积累,缓解盐害。大量研究^[4-5]表明,施肥可有效促进盐碱地农作物产量提升;WU 等^[4]研究表明,优化施肥模式下

盐碱地 5 种作物产量提高 2.23%~16.99%;也有研究^[5]发现,控释氮肥一次性施用可显著提升滨海盐碱地小麦产量,其中聚氨酯包膜尿素处理效果最佳;混施有机肥和微生物菌肥能有效促进盐碱地大豆生长,产量可提高 74.51%^[6]。基于黄河三角洲试验^[7]发现,生物炭基调理剂可提高盐碱地菊芋产量。此外,施肥也可有效改善盐碱地土壤理化性质,提升土壤肥力和质量。有研究^[8]表明,施用化肥或有机肥均能显著提高土壤有机质、全量养分和速效养分,降低土壤 pH。有机肥施用不仅能调节改善土壤的物理结构性状,而且能提高盐渍土的脱盐和抑盐能力,降低盐分在土壤中的活性,缓解其对植物生长的影响^[9]。陆海玲^[10]研究发现,连续 3 a 有机肥的施用显著降低盐碱土壤体积质量,提升土壤有机质质量分数、pH、电导率和含盐量。有机肥替代部分氮肥处理对耕层土壤含盐量降低效果显著,较不施肥处理降低 19.56%^[11]。与不施肥相比,有机无机肥配施对盐碱地 0~40 cm 土层土壤硝态氮质量分数平均提高 32.95%^[12]。同时,秸秆还田也是盐碱土壤培肥改良

的有效措施之一,秸秆还田可有效改善土壤物理结构,增加盐碱土水分和土壤养分质量分数^[13]。目前,尽管众多研究针对盐碱土壤的培肥改良已取得一定成效,然而相关研究仍在很大程度上存在一定的局限性。大部分研究仅侧重于单一指标或单一试验点位,试验条件差别较大,系统性与综合性的定量评价不足,施肥对盐碱土壤理化性质的影响效果难以统一。施肥类型、施肥量、环境和土壤属性等对施肥条件下盐碱土壤基础理化性质的定量影响或贡献大小还不明确。

基于以上问题,本研究采用Meta分析方法定量分析不同施肥管理措施对盐碱土壤基础理化性质的影响,阐明不同施肥条件下盐碱土壤基础理化性质的差异机制及关键驱动因素,为我国乃至全球盐碱地科学合理的施肥策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 文献收集及数据库建立

本研究的数据从中国知网、维普、万方数据等文献数据库进行检索。通过设置检索时间为2002年1月—2024年12月,关键词为“中国农田(croplands in China)”“盐碱地/土(saline-alkali land/soil)”“施肥(fertilization)”“有机肥(organic fertilizer)”“秸秆还田(straw returning)”“土壤理化性质(soil physicochemical properties)”和“土壤养分(soil nutrients)”进行文献筛选。筛选标准为:1)施肥类型(秸秆还田、化肥、有机肥等)、施肥量(秸秆还田量、有机肥施用量)、地区、年平均气温(MAT)、年降水量(MAP)等相关信息;2)文章中包含明确严格的处理和对照,且试验重复数不少于3次;3)数据要有平均值、样本数量和标准误差或标准差。通过使用数据统计软件建立盐碱土壤基础理化性质的数据库,其中主要信息有作者、文献标题、地理信息(经度和纬度)和所属区域,气象信息(年平均气温和年降水)、土壤初始基本理化信息(初始pH、有机质质量分数等)、施肥措施、施肥类型、年

施用量。本研究收集2002—2024年发表符合要求文献共49篇,其中包含190组有效数据样本。数据提取过程中,如果文献中的数据以图形式表示,则用GetData Graph Digitizer 2.24软件识别并转化数据。对每篇文献中基础理化性质包括土壤体积质量(bulk density, BD)、pH、土壤有机质(soil organic matter, SOM)、全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)、全钾(total potassium, TK)和速效氮(available nitrogen, AN)、速效磷(available phosphorus, AP)、速效钾(available potassium, AK)等数据进行记录,包括对照和处理的平均值、标准差(SD)或标准误(SE)及样本量(n)。当文献中数据为标准误形式时,需要根据公式转换为标准差。

$$SD = SE \sqrt{n} \quad (1)$$

本研究首先对不同施肥条件下土壤基础理化性质的响应比进行正态分布检验表明,本研究所搜集的数据符合整合分析要求(图1)。为比较不同因素对土壤理化性质的影响,根据收集文献数据中气候条件、施肥条件及土壤性质对所有变量进行分组(表1)。

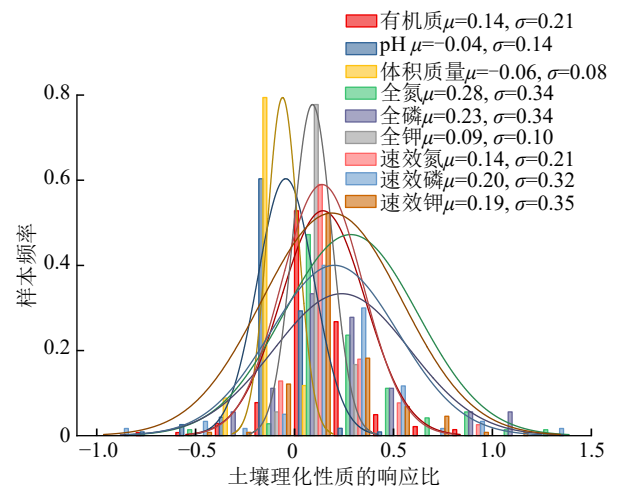


图1 施肥条件下土壤基础理化性质响应比的正态分布
Fig.1 Normal distribution of response ratios of soil basic physicochemical properties under fertilization conditions

表1 研究变量分组

Table 1 Grouping of study variables

分类	分组	单位	数据量/组	文献数
施肥类型	化肥、秸秆还田、有机肥	—	36~35~119	21~10~40
秸秆还田量	<6 000, 6 000~9 000, >9 000	kg/hm ²	12~12~12	4~5~6
有机肥施用量	<3 000, 3 000~15 000, >15 000	kg/hm ²	42~34~43	15~13~16
地区	东北、华北、华东、西北	—	22~54~50~64	4~13~15~16
年平均气温	<9, 9~12, >12	°C	69~65~56	19~13~17
年降水	<200, 200~500, >500	mm	75~48~67	20~10~19
初始土壤pH	<8.5, 8.5~8.7, >8.7	—	74~44~55	18~13~13
初始有机质	<9, 9~15, >15	g/kg	64~48~52	15~13~14

1.2 数据分析

采用整合分析的方法比较施肥对盐碱土壤基础理化性质影响的效应大小。因此需要引入效应值指标,量化试验数据。本研究中,土壤基础理化性质利用自然对数的响应比(response ratio, RR)作为效应值,并计算95%置信区间(95% CI)。如果纳入的研究结果没有异质性,即 $p \geq 0.1, I^2 < 50\%$,选用固定效应模型(fixed effects model, FEM),反之采用随机效应模型(random effects model, REM)^[14]。其中,lnRR可通过公式(2)进行计算^[15]。

$$\ln RR = \ln \left(\frac{B}{CK} \right) = \ln B - \ln CK \quad (2)$$

式中: B 为处理组的土壤基础理化性质平均值; CK 为对照组的平均值。平均值的变异系数(CV)、权重(W)、权重响应比(RR_{++})、 RR_{++} 的标准误(S)及其95%CI可按公式(3~7)计算^[16]:

$$V_{\ln RR} = \frac{SD_B^2}{n_B B^2} + \frac{SD_{CK}^2}{n_{CK} CK^2} \quad (3)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{CV} \quad (4)$$

$$RR_{++} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} (W_{ij} R_{ij}) / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij} \quad (5)$$

$$S(RR_{++}) = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}} \quad (6)$$

$$95\% CI = RR_{++} \pm 1.96S(R_{++}) \quad (7)$$

式中: SD_B 和 SD_{CK} 分别为处理组和对照组的标准差; n_B 和 n_{CK} 分别为处理组和对照组的样本数。权重响应比(处理相对于对照增减的百分数)及其95%CI可以通过公式 $(e^{RR_{++}} - 1) \times 100\%$ 进行转化^[17]。若95%的置信区间包含0,表明施肥对土壤基础理化性质无显著影响($p > 0.05$)。

1.3 数据处理与分析

前期利用Microsoft Excel 2020软件建立数据库,利用SPSS 22软件进行数据统计分析、正态性检验(K-S检验法)和相关性分析。使用MetaWin 2.1软件整合分析数据,并使用Origin 2024软件完成图片的制作。各因素对土壤基础性变化影响的重要度用R语言中的软件包Random Forest进行计算。

2 结果与分析

2.1 施肥对盐碱土壤体积质量、pH和有机质质量分数的影响

施肥整体上显著降低盐碱土壤体积质量,降幅5.01%(表2)。相比化肥,有机肥显著降低土壤体积质量;在华北和华东地区、年平均气温 < 9 、

> 12 °C、年降水量 > 500 mm、土壤初始pH < 8.5 、 $8.5 \sim 8.5$,初始有机质质量分数 < 9 g/kg时,施肥均显著降低土壤体积质量;当有机肥施用量 $< 3\ 000$ 、 $> 15\ 000$ kg/hm²时,施肥对土壤体积质量的降幅分别为9.25%、5.81%。同时,施肥对盐碱土壤pH的整体降低幅度为3.41%,仅有机肥施用下可显著降低土壤pH;在华北地区,且年平均气温在 < 9 和 $9 \sim 12$ °C、年降水量 < 200 mm和 > 500 mm时,施肥显著降低土壤pH。无论土壤初始pH,施肥均可有效降低土壤pH,且在不同初始pH间差异不显著;当土壤初始质量分数 $9 \sim 15$ g/kg时施肥显著降低土壤pH。秸秆还田量对土壤体积质量无显著影响,而有机肥施用量在 $< 3\ 000$ 、 $> 15\ 000$ kg/hm²时显著降低土壤pH。施肥对盐碱土壤有机质质量分数整体提升幅度为14.18%,达显著水平。不同施肥类型均有效提高土壤有机质质量分数,不同类型间差异不显著;不同地区、不同年平均气温和年降水量水平下施肥均可显著提高土壤有机质;土壤初始pH在 $8.5 \sim 8.7$ 和 > 8.7 条件下,施肥对土壤有机质的提升幅度显著高于pH < 8.5 时;不同初始土壤有机质水平下施肥也可显著提升土壤有机质,且不同水平间无显著差异;秸秆还田量在 $< 6\ 000$ 、 $6\ 000 \sim 9\ 000$ kg/hm²时,可显著提高土壤有机质质量分数,提升幅度分别为16.24%和19.96%;有机肥施用量在 $> 15\ 000$ kg/hm²时对有机质的提升幅度显著高于在 $3\ 000 \sim 15\ 000$ kg/hm²时。

2.2 施肥对盐碱土壤全量养分质量分数的影响

由表3可知,施肥对盐碱土壤全氮质量分数的整体提升幅度为29.06%,其中3种施肥类型均可显著提升土壤全氮,提升幅度分别为24.71%、26.60%、31.44%,且在3种施肥类型间差异不显著;西北和华北地区施肥可显著提升土壤全氮质量分数,3种施肥也显著提高土壤全氮质量分数;当初始pH为 $8.5 \sim 8.8$ 、 < 8.5 时,施肥显著提高全氮质量分数,提升幅度分别为36.66%、38.59%;3种土壤初始有机质范围均可提高全氮质量分数,而2种秸秆还田量并未显著提升土壤全氮;有机肥施用量在 $< 3\ 000$ 、 $> 15\ 000$ kg/hm²时,可显著提升全氮质量分数。同时,施肥对盐碱土壤全磷质量分数的整体提升幅度为23.83%,仅有机肥施用可显著提高土壤全磷;仅西北地区、年平均气温 $9 \sim 12$ 、 < 9 °C、年降水量 < 200 mm时,施肥可显著提高土壤全磷质量分数;土壤初始pH为 $8.5 \sim 8.7$ 、 < 8.5 时,对土壤全磷提升幅度分别为28.95%、19.95%;土壤初

始有机质 >15 g/kg时,可显著提高全磷质量分数;有机肥施用量 $<3\ 000$ kg/hm²时,全磷提升幅度为43.34%。施肥对盐碱土壤全钾质量分数的整体提升幅度为9.71%,且仅有机肥、西北地区、年平均气温为9~12、 <9 °C、年降水量 <200 mm时,施肥可显著提高

土壤全钾质量分数;土壤初始pH为8.5~8.7、 <8.5 时,对土壤全钾的提升幅度分别为10.11%、9.20%;土壤初始有机质 >15 g/kg时,可显著提高全钾质量分数;有机肥施用量 $<3\ 000$ kg/hm²时,全钾提升幅度为14.58%。

表 2 施肥条件下盐碱土壤体积质量、pH和有机质质量分数的变化幅度

Table 2 Variation range of bulk density, pH, and organic matter mass fraction of saline-alkali soil under fertilization conditions

分类	分组	土壤体积质量				土壤pH				土壤有机质			
		变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数	变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数	变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数
	总计	-5.01	2.38	2.37	34	-3.41	1.97	1.97	116	14.18	2.70	2.70	133
施肥类型	化肥	-1.17	5.28	5.28	9	0.04	4.94	4.93	21	10.06	6.08	6.08	23
	秸秆还田	-	-	-	-	-1.30	5.97	5.97	14	12.79	5.56	5.57	27
	有机肥	-6.44	2.87	2.87	25	-4.76	2.42	2.41	80	19.65	3.30	3.30	78
地区	东北	-	-	-	-	-2.61	6.52	6.52	12	21.50	6.76	6.77	22
	华北	-6.47	3.91	3.91	14	-5.38	3.60	3.60	36	15.00	6.73	6.80	25
	华东	-4.24	3.90	3.90	15	-2.16	4.27	4.27	30	10.58	5.43	5.42	34
	西北	-3.35	7.83	7.84	5	-2.71	3.43	3.42	38	12.94	4.37	4.38	52
年平均气温/°C	>12	-5.43	3.17	3.16	21	-1.40	3.78	3.79	36	10.40	4.43	4.42	40
	9~12	-	-	-	-	-3.99	3.79	3.80	31	13.27	4.52	4.51	40
	<9	-5.40	4.71	4.71	11	-4.35	3.04	3.03	49	17.79	3.89	3.89	53
年降水量/mm	>500	-5.80	3.56	3.55	17	-3.87	3.75	3.74	37	9.84	4.99	4.99	37
	200~500	-5.38	5.88	5.87	8	-1.33	3.64	3.64	33	19.81	5.22	5.22	35
	<200	-3.35	5.10	5.11	9	-4.64	3.11	3.11	46	13.65	3.90	3.91	61
初始pH	>8.7	-4.25	6.80	6.80	6	-2.08	1.40	1.39	34	19.66	3.87	3.79	39
	8.5~8.7	-4.92	4.01	4.02	12	-4.39	1.56	1.55	30	22.02	3.62	3.62	44
	<8.5	-6.43	5.01	5.01	12	-2.59	1.37	1.38	41	6.60	3.84	3.84	39
初始有机质/(g·kg ⁻¹)	>15	-4.92	5.01	5.01	10	-0.98	1.10	1.10	36	17.63	4.64	4.64	38
	9~15	-6.03	8.89	8.89	7	-5.15	1.33	1.32	32	12.57	5.55	5.55	27
	<9	-4.87	3.57	3.56	17	-0.63	1.15	1.15	32	17.12	3.83	3.82	57
秸秆还田量/(kg·hm ⁻²)	$>9\ 000$	-	-	-	-	-2.06	19.51	19.50	8	5.90	9.75	9.75	9
	6 000~9 000	-	-	-	-	-0.09	28.97	28.97	5	19.96	8.59	8.58	11
	$<6\ 000$	-	-	-	-	-	-	-	-	16.24	8.41	8.41	11
有机肥施用量/(kg·hm ⁻²)	$>15\ 000$	-5.81	3.96	3.96	14	-4.36	1.83	1.83	33	25.10	4.13	4.14	33
	3 000~15 000	-5.26	9.65	9.64	4	-2.05	2.93	2.92	12	10.45	4.47	4.47	26
	$<3\ 000$	-9.25	7.31	7.30	7	-4.24	1.61	1.61	35	18.90	4.83	4.83	23

2.3 施肥对盐碱土壤速效养分质量分数的影响

由表4可知,施肥对盐碱土壤速效氮质量分数的整体提升幅度为13.88%,其中仅有机肥和东北地区可显著提升土壤速效氮;年平均气温 <9 °C、年降水为200~500 mm时,施肥可显著提升土壤速效氮质量分数;当初始pH >8.7 ,初始有机质 <9 g/kg时,施肥显著提高速效氮质量分数;3种秸秆还田量均未显著提高土壤速效氮,而有机肥施用量为3 000~15 000、

$>15\ 000$ kg/hm²时,施肥可显著提高土壤速效氮。同时,施肥对盐碱土壤速效磷质量分数的整体提升幅度为20.89%,仅有机肥施用和秸秆还田可显著提高土壤速效磷;除华东地区、年平均气温 >12 °C、年降水量 >500 mm外,其他条件下施肥均可显著提高土壤速效磷;3种土壤初始pH范围和初始有机质范围内,施肥均可显著提高土壤速效磷;秸秆还田量为6 000~9 000、 $<6\ 000$ kg/hm²时,施肥对土壤速效磷的提升幅度分别

为 24.73%、16.64%；有机肥施用量在 <3 000、>15 000 kg/hm²时,可显著提高土壤速效磷。施肥对盐碱土壤全钾质量分数的整体提升幅度为 18.75%；且在 3 种施肥类型、不同地区、年平均气温和年降水量条件下均可

显著提升土壤速效钾；初始 pH 为 8.5~8.7、<8.5,3 种初始有机质下,施肥均可显著提高速效钾；仅秸秆还田量为 6 000~9 000 kg/hm²、有机肥施用量 >15 000、<3 000 kg/hm²时,施肥可显著提高土壤速效钾质量分数。

表 3 施肥条件下盐碱土壤全氮、全磷、全钾质量分数的变化幅度

Table 3 Variation range of total nitrogen, total phosphorus, and total potassium mass fractions of saline-alkali soil under fertilization conditions

分类	分组	土壤全氮				土壤全磷				土壤全钾			
		变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数	变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数	变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数
	总计	29.06	7.60	7.60	72	23.83	5.58	5.59	18	9.71	3.15	3.15	18
施肥类型	化肥	24.71	19.53	19.53	14	16.56	21.50	21.51	4	8.14	11.54	11.55	4
	秸秆还田	26.60	18.94	18.94	15	—	—	—	—	—	—	—	—
	有机肥	31.44	10.73	10.74	41	25.88	7.82	7.81	14	9.92	3.90	3.89	14
地区	东北	17.86	26.85	26.86	8	—	—	—	—	—	—	—	—
	华北	15.04	16.07	16.08	18	—	—	—	—	—	—	—	—
	华东	40.03	14.12	14.13	22	4.17	18.06	18.06	4	3.84	12.15	12.15	4
	西北	33.13	13.96	13.97	22	33.96	7.14	7.14	12	12.05	3.86	3.87	12
年平均气温/℃	>12	37.20	13.84	13.83	24	3.80	9.88	9.88	6	3.61	7.06	7.07	6
	9~12	48.56	34.16	34.17	6	79.14	24.83	24.84	3	20.86	13.68	13.67	3
	<9	21.14	10.52	10.53	40	21.01	7.14	7.13	9	8.64	4.63	4.63	9
年降水量/mm	>500	37.20	13.89	13.88	24	3.71	11.67	11.68	6	3.65	7.24	7.23	6
	200~500	21.41	18.03	18.03	16	—	—	—	—	—	—	—	—
	<200	26.45	12.15	12.16	30	33.96	7.09	7.09	12	12.06	3.84	3.85	12
初始 pH	>8.7	14.30	15.32	15.32	20	—	—	—	—	—	—	—	—
	8.5~8.7	36.66	13.23	13.24	25	28.95	12.21	12.21	8	10.11	5.69	5.68	8
	<8.5	38.59	16.60	16.60	17	19.95	10.09	10.09	10	9.20	4.78	4.78	10
初始有机质/(g·kg ⁻¹)	>15	44.65	21.34	21.34	13	48.78	38.35	38.35	5	14.08	11.79	11.78	5
	9~15	27.97	22.39	22.38	12	4.65	38.36	38.36	5	3.24	13.59	13.60	5
	<9	23.62	12.79	12.80	32	-1.16	76.82	76.82	3	1.28	25.50	25.50	3
秸秆还田量/(kg·hm ⁻²)	>9 000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6 000~9 000	32.24	32.49	32.50	7	—	—	—	—	—	—	—	—
	<6 000	18.80	32.52	32.51	7	—	—	—	—	—	—	—	—
有机肥施用量/(kg·hm ⁻²)	>15 000	37.70	17.55	17.55	23	1.32	16.92	16.92	5	0.82	9.28	9.28	5
	3 000~15 000	11.66	28.88	28.88	10	—	—	—	—	—	—	—	—
	<3 000	38.27	33.53	33.53	8	43.34	11.11	11.10	8	14.58	5.01	5.02	8

2.4 盐碱土壤性质的相关性及其主要影响因素

由表 5 可知,施肥条件下盐碱土壤有机质与全氮、全磷、速效磷和速效钾质量分数均呈显著正相关($r=0.266\sim 0.820, p<0.01$),全氮与速效氮呈显著正相关($r=0.807, p<0.05$);全磷质量分数与 pH 呈显著负相关($r=-0.505, p<0.05$),与全钾和速效磷质量分数均呈正相关($r=0.770; r=0.941, p<0.01$);速效磷与全钾、速效氮和速效钾呈正相关($r=0.977; r=0.668; r=0.596, p<0.01$)。

为探究不同环境因素对施肥条件下盐碱土壤

基础理化性质影响的贡献大小,根据相关分析结果筛选出土壤有机质、pH 和速效氮 3 个非共线指标,用于随机森林模型的相对重要性分析。结果显示,种植制度和年降水量是盐碱土壤有机质的关键驱动因素,贡献率分别为 18.30%、14.84%;种植制度、地区和年降水量是土壤 pH 的主要影响因素,贡献率分别为 22.02%、14.59%、13.66%;而土壤初始 pH 和有机质是影响土壤速效氮质量分数的主要因素,贡献率分别为 20.48%、17.04%(图 2)。

表 4 施肥条件下盐碱土壤速效氮、速效磷、速效钾质量分数的变化幅度

Table 4 Variation range of available nitrogen, available phosphorus, and available potassium mass fractions of saline-alkali soil under fertilization conditions

分类	分组	土壤速效氮			土壤速效磷			土壤速效钾					
		变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数	变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数	变化率/%	95%置信区间(左)	95%置信区间(右)	样本数
	总计	13.88	7.07	7.06	39	20.89	4.54	4.53	60	18.75	4.78	4.77	132
施肥类型	化肥	10.57	16.31	16.32	9	—	—	—	—	29.93	9.85	9.85	28
	秸秆还田	7.84	10.29	10.28	19	17.75	9.22	9.22	16	14.99	9.79	9.79	28
	有机肥	26.91	14.44	14.44	11	31.24	5.83	5.82	37	17.54	5.95	5.96	72
地区	东北	33.10	16.56	16.56	9	19.75	8.35	8.34	20	17.90	14.23	14.24	17
	华北	4.93	26.15	26.15	5	19.92	11.37	11.38	11	30.41	10.89	10.90	27
	华东	—	—	—	—	28.42	16.10	16.09	7	19.23	9.90	9.90	33
	西北	8.60	9.12	9.11	24	38.68	7.85	7.85	22	12.91	7.51	7.50	55
年平均气温/°C	>12	—	—	—	—	28.45	16.00	16.01	7	18.89	9.19	9.18	35
	9~12	6.39	7.45	7.45	22	38.29	9.59	9.59	16	19.86	7.63	7.63	49
	<9	23.56	8.80	8.81	16	23.26	5.76	5.76	37	17.48	7.68	7.69	48
年降水量/mm	>500	—	—	—	—	23.91	14.49	14.50	8	25.05	8.21	8.22	46
	200~500	24.90	12.51	12.50	13	20.38	6.79	6.79	29	17.51	11.17	11.16	26
	<200	8.60	8.82	8.82	24	36.96	7.47	7.47	23	14.48	7.11	7.12	60
初始pH	>8.7	23.91	11.82	11.81	17	20.86	7.47	7.47	23	10.49	10.94	10.94	37
	8.5~8.7	—	—	—	—	36.16	9.14	9.14	16	17.87	12.65	12.65	28
	<8.5	4.94	12.32	12.32	16	28.64	12.65	12.64	10	24.38	9.03	9.03	53
初始有机质/(g·kg ⁻¹)	>15	7.15	12.70	12.71	10	36.03	12.73	12.73	15	22.95	9.77	9.77	39
	9~15	11.21	45.03	45.02	3	40.86	36.35	36.36	4	20.78	15.53	15.53	17
	<9	18.27	7.92	7.91	22	20.22	10.73	10.72	21	14.79	7.75	7.76	61
秸秆还田量/(kg·hm ⁻²)	>9 000	10.45	19.41	19.40	7	8.06	11.68	11.68	4	6.85	24.31	24.32	7
	6 000~9 000	7.45	17.40	17.39	8	24.73	7.66	7.66	6	21.82	18.60	18.60	10
	<6 000	3.97	33.82	33.83	4	16.64	8.31	8.31	6	13.83	17.49	17.49	11
有机肥施用量/(kg·hm ⁻²)	>15 000	56.87	29.49	29.49	3	30.82	10.34	10.34	13	25.28	8.16	8.15	25
	3 000~15 000	17.42	11.1	11.09	7	11.31	17.80	17.79	7	6.96	8.62	8.63	23
	<3 000	—	—	—	—	38.16	8.88	8.88	17	18.97	8.31	8.30	24

表 5 盐碱土壤基础理化性质的相关性

Table 5 Correlation of basic physicochemical properties of saline-alkali soil

指标	有机质	体积质量	pH	全氮	全磷	全钾	速效氮	速效磷
体积质量	0.171							
pH	0.022	0.052						
全氮	0.808**	0.178	-0.024					
全磷	0.820**	0.393	-0.505*	0.396				
全钾	0.074	-0.052	0.109	0.071	0.770**			
速效氮	0.212	0.992	-0.431	0.807*	0.988	0.997		
速效磷	0.350**	0.101	-0.211	0.345	0.941**	0.977**	0.668**	
速效钾	0.266**	-0.080	-0.112	0.149	0.232	0.236	-0.171	0.596**

注:*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

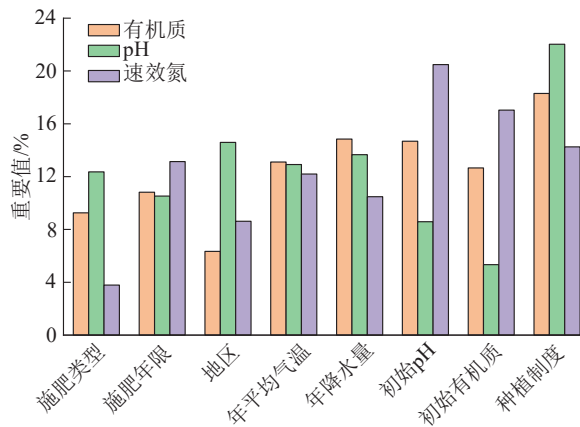


图2 环境因子对盐碱地土壤有机质、pH和速效氮影响的相对重要性

Fig.2 Relative importance of environmental factors on soil organic matter, pH, and available nitrogen in saline-alkali land

3 讨论

整体看来,施肥可有效改善盐碱土壤基础理化性质,提高盐碱土壤有机质、全氮、全磷、全钾及速效氮磷钾质量分数,降低土壤体积质量和pH。从施肥类型来看,3种施肥类型均可有效提高土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾质量分数。以往研究^[18-20]表明,施用化肥、有机肥和秸秆还田均可有效改善土壤基础性质,提升土壤全量和速效养分质量分数,且秸秆还田不仅可增加土壤有机碳质量分数,还可增加土壤通气孔隙,改善土壤结构,抑制土壤板结。相比于施用化肥和秸秆还田,有机肥施用可明显提高土壤全磷、全钾和速效氮质量分数,有效降低土壤体积质量和pH。黄星瑜等^[21]研究发现,与单施化肥相比,有机肥施用可有效提高速效氮(6.70%~34.27%)、速效磷(9.25%~17.00%)和速效钾质量分数(32.45%~83.78%),并有效降低土壤体积质量(5.79%~16.30%);郭军成等^[22]研究发现,有机肥施用条件下盐碱土壤碱解氮、有效磷和速效钾质量分数显著高于秸秆还田。有机肥施用量在<3 000 kg/hm²时,不仅可有效降低土壤体积质量和pH,而且可提高土壤全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾质量分数,表明施用低量有机肥对改善盐碱土壤基础性质更加显著。已有研究^[21,23]发现,随着有机肥施用量的增加,土壤基础养分质量分数也随之增加。此差异可能由于盐碱地本身较低的土壤肥力,过高的有机肥施用量可能抑制微生物对有机肥的分解作用,降低有机肥养分释放效果。因此,适量的有机肥施用是盐碱地土壤改良的关键。秸秆还田量为6 000~9 000、<6 000 kg/hm²时,可显著提升土壤有机质和速效磷质量分数,表明中低量秸秆还田可有效提高土壤养分。然而,以往研究^[24]表明,随着秸秆还田量增加,

土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾质量分数随之增加,该差异可能由于试验地点的气候条件不同,本研究中气候条件对盐碱土壤性质的影响也证明此观点。秸秆还田量对土壤pH无显著作用,该结果与贾瑞峰等^[25]研究结果相似。总之,低量的有机肥施用和秸秆还田可有效改善盐碱土壤基础性质。

从气候条件来看,所有地区施肥均可有效提高盐碱土壤有机质和速效钾质量分数,仅华北地区施肥可有效降低土壤体积质量和pH,西北地区可显著提高全量养分质量分数,西北和东北可显著提升土壤速效氮和速效磷。年平均气温和年降水量在所有范围内均可有效提高土壤有机质、全氮和速效钾质量分数;年平均气温<9.9~12℃和年降水量<200 mm时,可有效提升全磷、全钾质量分数,降低土壤pH。综合而言,在低温少雨地区(较低年平均气温和年降水量),施肥可有效改善盐碱土壤基础性质。可能由于低温少雨地区土壤微生物活性较低,随施肥直接或间接进入土壤的养分不易被微生物分解或利用,更多的养分富集在土壤中。已有研究^[26]表明,降水减少降低土壤微生物多样性和与养分供应和易流失有机物分解有关的土壤功能,且低温限制土壤氮磷养分的矿化速率和微生物活性;郭慧婷等^[27]研究也表明,低温少雨地区有机肥的施用可有效降低土壤pH,导致在低温少雨地区施肥对盐碱土壤性质的改良效果更佳。本研究发现,种植制度和年降水量是影响盐碱土壤有机质质量分数和pH的主要影响因素。以往研究^[27]也表明,由于不同地区降水量差异较大,且无论酸性还是碱性土壤降水量很大程度上影响着土壤pH。不同地区种植制度差异导致土壤有机碳投入不同,对土壤有机碳质量分数存在较大影响,且降水量也决定着土壤有机碳的固存与分解过程。

从土壤初始性质来看,在所有土壤初始pH范围内施肥均可有效提高土壤有机质、速效磷和速效钾质量分数,降低土壤pH。以往研究^[8,28]也发现,施肥不仅可显著提升不同酸碱度土壤有机质质量分数,而且可降低土壤pH。本研究也发现,初始pH<8.5、8.5~8.7时,施肥可有效提高全量养分和速效钾质量分数,降低土壤体积质量。在所有土壤初始有机质范围内施肥均可有效提高土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾质量分数。已有研究^[29]也表明,施肥通过携带有机质或养分进入土壤,可有效改善土壤基础性质。初始有机质<9.9~15 g/kg时,可有效降低土壤体积质量和pH;>15 g/kg时提高土壤全磷和全钾质量分数,表明土壤初始有机质质量分数处于中低水平时,施肥可有效降低盐碱土壤体积质量和pH,而初始有机质质量分数较高时,可有效提高土壤全磷

和全钾质量分数。此外,初始土壤有机质和pH是盐碱土壤速效氮质量分数的关键驱动因素。综上,不同的土壤初始pH和初始有机质条件下,施肥可有效改善盐碱土壤性质,但其对不同性质的影响也不同。

4 结论

1)3种施肥类型均可有效提高土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾质量分数,其中有机肥可明显提高土壤全磷、全钾和速效氮质量分数,有效降低土壤体积质量和pH。施用低量有机肥对改善盐碱土壤基础性质更加显著。中低量秸秆还田可有效提高土壤养分质量分数,还田量对土壤pH无显著作用。

2)施肥在不同气候条件下均可有效提高土壤有机质、全氮和速效钾质量分数;年平均气温 $<9.9\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和年降水量 $<200\text{ mm}$ 时,可有效提升全磷、全钾质量分数,降低土壤pH。在低温少雨地区施肥可有效改善盐碱土壤基础性质。

3)在不同初始土壤条件下,施肥均可有效提高速效磷和速效钾质量分数。初始 $\text{pH}<8.5$ 、 $8.5\sim 8.7$ 时,施肥可有效提高全量养分和速效钾质量分数,降低土壤体积质量。初始有机质 $<9.9\sim 15\text{ g/kg}$ 时,可有效降低土壤体积质量和pH; $>15\text{ g/kg}$ 时可提高土壤全磷和全钾质量分数,土壤初始有机质处于中低水平时,施肥可有效降低盐碱土壤体积质量和pH,而初始有机质较高时,可有效提高土壤全磷和全钾质量分数。

4)种植制度和年降水量是影响施肥条件下土壤有机质和pH主要环境因素,而土壤初始性质是土壤速效氮的关键驱动因素。

综上,低量有机肥施用和秸秆还田、低温少雨地区可有效改善盐碱土壤基础性质,不同土壤初始条件下施肥均可有效改善盐碱土壤性质,但其对不同性质的影响也不同。气候类型和土壤初始性质是影响盐碱土壤性质的主要因素。

参考文献:

- [1] 周思怡,李晓佳,张恂,等.不同物料对海滨沙性盐碱地改良效果研究[J].土壤,2023,55(2):356-362.
ZHOU S Y, LI X J, ZHANG X, et al. Study on improvement effects of different materials on sandy saline-alkali land[J].Soils,2023,55(2):356-362.
- [2] WICKE B, SMEETS E, DORNBURG V, et al. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils[J].Energy and Environmental Science, 2011,4(8):2669-2681.
- [3] 王本龙.西辽河平原盐碱地土壤改良策略研究[D].呼和浩特:内蒙古财经大学,2024.
WANG B L. Study on soil improvement strategy of saline-alkali land in west Liaohe Plain[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Finance and Economics, 2024.
- [4] WU Y P, LI Y F, ZHENG C Y, et al. Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil[J].European Journal of Soil Biology, 2013,54:32-40.
- [5] 朱咏莉,刘军,王益权.国内外土壤结构改良剂的研究利用综述[J].水土保持学报,2001,15(6):140-142.
ZHU Y L, LIU J, WANG Y Q. Summary of soil structure conditioners utilization[J].Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(6):140-142.
- [6] 张密.不同施肥措施对盐碱地大豆生长及产量的影响[J].南方农业,2024,18(8):29-31.
ZHANG M. The effect of different fertilization measures on the growth and yield of soybean in saline alkali soil[J].South China Agriculture,2024,18(8):29-31.
- [7] 管西林,郭洪海,贾曦,等.不同有机改良剂对盐碱地菊芋产量及土壤理化性质的影响[J].山东农业科学,2024,56(3):70-77.
GUAN X L, GUO H H, JIA X, et al. Effects of different organic amendments on yield of *Helianthus tuberosus* L. and soil physical and chemical properties in saline-alkali land[J].Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(3):70-77.
- [8] 王帅,杨阳,郑伟,等.不同培肥方式对盐碱土壤肥力改良效果的研究[J].中国农学通报,2012,28(33):172-176.
WANG S, YANG Y, ZHENG W, et al. The study of different fertilization system on the effect of improved fertility of saline-alkali soil[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2012,28(33):172-176.
- [9] 王菊英,李振华,乔仁桂,等.盐碱地利用农艺措施研究及应用进展[J].农业与技术,2025,45(9):106-108.
WANG J Y, LI Z H, QIAO R G, et al. Research and application progress of agronomic measures for saline-alkali land utilization[J].Agriculture and Technology, 2025,45(9):106-108.
- [10] 陆海玲.有机肥配施盐碱土壤改良剂对盐碱地土壤性状及甜菜产量和品质的影响[J].寒旱农业科学,2024,3(10):944-948.
LU H L. Effects of organic fertilizer combined with saline-alkaline soil amendments on soil properties, sugar beet yields, and quality in saline-alkaline land[J].Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences,2024,3(10):944-948.
- [11] 兴安,邢海峰,赵巴音那木拉,等.不同改良措施对西辽河流域盐碱土土壤性质及作物产量的影响[J].灌溉排水学报,2025,44(6):80-88.
XING A, XING H F, ZHAO B, et al. Effects of different improvement measures on soil properties and crop yield of saline-alkali soil in west Liaohe River basin[J].Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(6):80-88.
- [12] 邝雨欣,张体彬,程煜,等.有机无机肥配施对盐渍化农田无机态氮迁移和玉米生长的影响[J].干旱地区农业研究,2025,43(2):105-115.

- KUANG Y X, ZHANG T B, CHENG Y, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on inorganic nitrogen movement and maize growth in salinity soils[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(2):105-115.
- [13] 孙云云, 窦金刚, 刘方明, 等. 秸秆还田方式对盐碱旱作农田土壤理化性质的影响[J]. *玉米科学*, 2024, 32(10):84-93.
- SUN Y Y, DOU J G, LIU F M, et al. Effects of straw return methods on the physicochemical properties of soils in saline-alkaline drylands[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(10):84-93.
- [14] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 等. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(15):2995-3004.
- CAI A D, ZHANG W J, YANG P P, et al. Effect degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in China: Based on meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15):2995-3004.
- [15] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4):1150-1156.
- [16] LUO Y Q, HUI D F, ZHANG D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis[J]. *Ecology*, 2006, 87(1):53-63.
- [17] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5):1366-1381.
- [18] 严君, 韩晓增, 邹文秀, 等. 长期秸秆还田和施肥对黑土肥力及玉米产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2022, 11(2):139-149.
- YAN J, HAN X Z, ZOU W X, et al. Effects of long-term straw returning and fertilization on soil fertility and maize yield in black soil[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(2):139-149.
- [19] 尹春梅, 谢小立, 钟石仑. 长期不同养分投入对土壤养分和水稻生产持续性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(6):3059-3065.
- YIN C M, XIE X L, ZHONG S L. Effect of different fertilizer applications on sustainable soil fertility and rice production in red soil paddy ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6):3059-3065.
- [20] 刘禹池, 冯文强, 秦鱼生, 等. 长期秸秆还田与施肥对成都平原稻-麦轮作下作物产量和土壤肥力的影响[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(1):240-247.
- LIU Y C, FENG W Q, QIN Y S, et al. Effects of long-term fertilization and straw mulch on crop yields and soil fertility under rice-wheat rotation in Chengdu Plain[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(1):240-247.
- [21] 黄星瑜, 朱安繁, 姚锋先, 等. 有机肥替代部分化肥对油菜产量和品质、肥料利用率及土壤性质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(1):141-148.
- HUANG X Y, ZHU A F, YAO F X, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer on rapeseed yield, quality and fertilizer utilization rate as well as soil properties[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024, (1):141-148.
- [22] 郭军成, 王明国, 耿荣, 等. 秸秆还田和有机肥对宁夏银北盐碱地改良效果研究[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(24):73-78.
- GUO J C, WANG M G, GENG R, et al. Effect of straw returning and organic fertilizer measures on remediation of soil in Ningxia saline-alkali land[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(24):73-78.
- [23] 许剑锋, 金羽清, 朱潇婷, 等. 不同有机肥替代对柑橘土壤及品质的影响[J]. *浙江农业科学*, 2024, 65(5):1097-1101.
- XU J F, JIN Y Q, ZHU X T, et al. Effect of different organic fertilizer substitutions on soil property and quality of citrus[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2024, 65(5):1097-1101.
- [24] WANG X, ZHANG Q, ZHANG Z J, et al. Decreased soil multifunctionality is associated with altered microbial network properties under precipitation reduction in a semi-arid grassland[J]. *International Military Education and Training*, 2023, 2(2):e106.
- [25] 贾瑞峰, 丛日环, 徐志宇, 等. 秸秆还田技术改善土壤理化性质提高作物产量的 Meta 分析[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4):80-89.
- JIA R F, CONG R H, XU Z Y, et al. Meta analysis of straw returning technology to improve soil physicochemical properties and increase the yield of main cereal and oil crop[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(4):80-89.
- [26] ZHANG D Y, WANG L, QIN S Q, et al. Microbial nitrogen and phosphorus co-limitation across permafrost region[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(14):3910-3923.
- [27] 郭慧婷, 高静, 张强, 等. 有机肥对我国酸性和碱性土壤 pH 的影响差异及原因[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(3):496-503.
- GUO H T, GAO J, ZHANG Q, et al. Effects of organic fertilizer on pH of acidic and alkaline soils in China: Differences and causes[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(3):496-503.
- [28] 徐明岗, 张文菊, 杨学云, 等. 农田土壤有机质提升理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- XU M G, ZHANG W J, YANG X Y, et al. Theory and practice of improving organic matter in farmland soil[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [29] 黄东风, 王利民, 李卫华, 等. 培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(2):127-135.
- HUANG D F, WANG L M, LI W H, et al. Research progress on the effect and mechanism of fertilization measure on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2):127-135.