



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

施用有机肥对盐碱土的改良效果:Meta分析

刘国辉, 买文选, 田长彦

引用本文:

刘国辉, 买文选, 田长彦. 施用有机肥对盐碱土的改良效果:Meta分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 86–96.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0892>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期不同培肥对苏打盐碱地稻田土壤盐碱指标和养分含量的影响

肖扬, 黄立华, 杨易, 黄金鑫, 刘伯顺, 杨靖民

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 126–134 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0032>

有机肥配施对中国农田土壤容重影响的整合分析

刘丽媛, 徐艳, 朱书豪, 高艺, 郑向群

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 867–873 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0500>

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 143–150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

三种材料复合施用对盐碱土壤改良效果的研究

金梦野, 李小华, 黄占斌, 杨永安

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 719–726 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0447>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘国辉, 买文选, 田长彦. 施用有机肥对盐碱土的改良效果: Meta 分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 86–96.

LIU G H, MAI W X, TIAN C Y. Effects of organic fertilizer application on the improvement of saline soils: Meta analysis[J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(1): 86–96.



开放科学 OSID

施用有机肥对盐碱土的改良效果: Meta 分析

刘国辉^{1,2}, 买文选¹, 田长彦^{1*}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 施加有机肥是改良盐碱土的重要手段之一, 但不同地域、施用方法及盐渍化程度下的研究结果存在明显差异。为综合评估这一措施对盐碱土的改良效果, 本研究收集整合了 2021 年 11 月 30 日之前公开发表的文献数据, 建立了包含 790 组相对独立数据的数据库, 利用 Meta 分析方法就不同有机肥施加方式(有机肥单施、有机肥与无机肥配施)、施用年限(1 a 和 ≥ 2 a) 对不同盐渍化程度(轻度、中度、重度)盐碱土的改良效果进行了综合分析。结果表明, 施用有机肥对盐碱土有明显的改良效果, 具体表现在: (1) 土壤养分水平明显提高, 其有机质、碱解氮、速效钾、有效磷含量比不施肥处理分别提高了 33.41%、46.70%、19.65% 和 81.27%; (2) 土壤结构得到改善, 容重降低了 6.53%, 含水率提高了 15.52%; (3) 土壤盐渍化水平降低, 电导率、碱化度和 pH 值分别降低了 43.09%、20.34% 和 5.22%; (4) 作物的产量显著提高, 增幅为 41.78%。总体来看, 单施有机肥更有利于土壤养分的提高, 而有机肥与无机肥配施对土壤盐分的降低和土壤结构的改善作用更加明显, 施加有机肥对中度盐碱土的改良效果优于轻度和重度盐碱土。

关键词: 有机肥; Meta 分析; 土壤养分; 土壤盐分; 盐碱土

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)01-0086-11

doi: 10.13254/j.jare.2021.0892

Effects of organic fertilizer application on the improvement of saline soils: Meta analysis

LIU Guohui^{1,2}, MAI Wenxuan¹, TIAN Changyan^{1*}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The application of organic fertilizers is important for improving saline-alkali soils; however, there are significant differences in the results of studies investigating different regions, application methods, and salinity levels. To comprehensively assess the effect of fertilizer application on improving saline-alkali soils, this study collected and integrated data from the published literature until November 30, 2021, and established a database containing 790 sets of relatively independent data. Meta-analysis was used to analyze the effect of different organic fertilizer application methods (organic fertilizer alone, organic and inorganic fertilizer in combination) and application periods (1 a, and ≥ 2 a) on the improvement of saline-alkali soils with different degrees of salinity (mild, moderate, and severe). The results showed that the application of organic fertilizers had a substantial effect on the development of saline-alkali soils, as indicated by the following: (1) the nutrients in soil increased significantly, with the soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, available potassium, and available phosphorous contents increasing by 33.41%, 46.70%, 19.65%, and 81.27%, respectively, compared with those in treatments without fertilizers; (2) the soil structure improved, the soil bulk density decreased by 6.53%, and the soil moisture content increased by 15.52%; (3) the soil salinization level decreased, and its electrical conductivity, exchange sodium percentage, and pH decreased by 43.09%, 20.54%, and 5.22%, respectively; and (4) there was a significant increase in crop yield (41.78%). Overall, the application of

收稿日期: 2021-12-26 录用日期: 2022-03-04

作者简介: 刘国辉(1997—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 从事干旱区盐碱地修复技术研究。E-mail: lgh1639660027@163.com

*通信作者: 田长彦 E-mail: tianchy@ms.xjb.ac.cn

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2020A01003)

Project supported: The Special Fund for Key Program of Science and Technology of Xinjiang, China(2020A01003)

<http://www.aed.org.cn>

organic fertilizers alone was more beneficial for improving soil nutrients, while the combination of organic and inorganic fertilizers had a more marked effect on the reduction of soil salinity and enhancement of soil structure. The application of organic fertilizer was more effective at improving moderately saline-alkaline soils than mild and severe salinity soils.

Keywords: organic fertilizers; Meta-analysis; soil nutrients; soil salinity; saline soils

由于土地资源的不合理开发及利用,我国年平均减少耕地约40万 hm^2 ,耕地总量持续下降,逐渐接近18亿亩(1亩=1/15 hm^2)耕地总量的红线^[1]。与此同时,我国是世界上土壤盐渍化问题较为严重的国家之一,盐渍化土地面积达 $3.69 \times 10^7 \text{hm}^2$,其中盐渍化耕地面积 $9.21 \times 10^6 \text{hm}^2$,占总耕地面积的6.62%,并且呈逐年扩张的趋势^[2]。所以,盐渍化土地的治理和合理开发是有效扩增我国耕地资源、扩展农业发展空间、保证粮食安全的重要举措^[3]。

我国从20世纪50年代开始进行大规模的盐碱地改良工作,传统的改良方式主要包括工程措施、化学措施以及生物措施。但整体以水利改良为主,且取得了非常显著的效果^[4]。然而,当前这一措施面临重大的挑战,在干旱区尤其如此。以新疆为例,在淡水资源短缺和耕地面积扩大的双重影响下,农业生产已由“明灌明排”进入到“滴灌微排”阶段,传统单一的通过大水漫灌进行洗盐的改良方式已难以持续,盐碱地的改良和利用向着分类治理、综合治理的方向转变^[5]。向盐碱土中添加有机物料不仅能有效控制耕层土壤盐分,而且可提升地力,是成本低、增效快的改良措施之一^[6],已成为近年来盐碱土改良方面的研究热点。国内外众多学者对有机肥改良盐碱土的效果进行了研究:李大伟^[7]的研究表明,有机肥与无机肥配施对旱地盐渍化土壤的田间持水量和土壤容重等物理性状以及速效养分、阳离子交换量等化学性质具有明显的改善作用;李莹飞^[8]通过大田试验探究了单独施加牛粪或鸡粪对滨海盐碱土的改良效果,结果表明,单独施加牛粪或鸡粪均能够使盐碱土的pH明显降低,较大幅度地提高了滨海盐碱土中有机质和速效氮磷钾等养分的含量;Tejada等^[9]的研究表明,有机肥施加后,旱地盐碱土的生物学指标,如脲酶、过氧化氢酶、 β -葡萄糖苷酶等微生物酶的活性得到了明显提升。可见,利用有机肥改良盐碱地的方式得到了研究人员的普遍认同,但是,改良的效果受地域、试验地环境、土壤属性、栽培模式等的影响,其结果及机制存在复杂性,并且诸多研究仅对部分指标进行了分析,不具备多角度以及广义上的参考性,因此,为了综合评估有机肥施加对盐碱土的改良效果,需要对这些独立

的研究进行大样本尺度的全面分析。而Meta分析是利用统计学的方法对多个目的相同的研究结果进行系统性合并,通过一种量化的指标来进行效果评价的统计方法^[10],极为适用于较大尺度上的生态问题的研究。基于此,本研究利用Meta分析方法,定量分析了有机肥施加对不同盐渍化程度土壤的养分、物理、盐渍化、生物学及作物产量等指标的影响,为施用有机肥改良盐碱地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究选取了中国知网、万方、维普、谷歌学术、Web of Science等数据库^[11],设定的搜索关键词为有机肥(Organic fertilizer)、畜禽粪便(Manure)、堆肥(Compost)、生物炭(Biochar)、沼液(Biogas slurry)、沼渣(Biogas residue)与盐碱(Saline-alkali),检索时段设为2021年11月30日之前。共检索到各类文献431篇。使用如下标准对检索到的文献进行筛选^[12-15]:①试验地点必须位于中国境内;②试验必须进行了至少一年的大田试验,且必须包含对照组(不施肥);③所测定的样品中必须包括耕作层的土壤(0~20 cm);④结果中至少包含本研究中所涉及的13项指标中的一项;⑤试验中不同处理的重复次数不少于3次;⑥所涉及的结果分析中,必须包含平均值、样本数量和标准差/误差^[16]。基于以上标准,最后筛选得到符合标准的文献30篇。

1.2 数据提取

从选取的文献中提取试验地点、试验时长、样地土壤背景值、有机肥种类、施加方式,以及0~20 cm土层的土壤养分、物理、盐渍化、生物学指标和作物产量数据。其中物理指标包括:土壤容重(Soil Bulk Density, SBD)、土壤含水率(Soil Moisture Content, SMC);土壤盐渍化指标包括:pH、碱化度(Exchange Sodium Percentage, ESP)、阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC)、电导率(Electrical Conductance, EC);养分指标包括:有机质(Soil Organic Matter, SOM)、碱解氮(Alkali-hydrolysable N, AHN)、速效钾(Available K, AK)、有效磷(Available P, AP);生物学指标包括:过

氧化氢酶(Catalase, CAT)、脲酶(Urease, URE);作物产量(Crop Yield, CY)以单位(亩)产量记录。

对于部分以柱状图或折线图呈现相关数据的文献,采用 GetData Graph Digitizer 2.26 进行数据提取^[17]。

1.3 数据分析

1.3.1 效应值计算

采用响应比(Response Ratios, RR)^[18]来评估试验处理中施用有机肥对盐碱土相关指标的影响程度。对于研究中的某一指标而言,响应比(RR)为处理组的均值($\bar{x}_E$)与对照组的均值($\bar{x}_C$)之比^[19]。

$$\ln RR = \ln\left(\frac{\bar{x}_E}{\bar{x}_C}\right) = \ln(\bar{x}_E) - \ln(\bar{x}_C) \quad (1)$$

平均值的变异系数公式^[20]如下:

$$V_{\ln RR} = \frac{SD_E}{N_E(\bar{x}_E)^2} + \frac{SD_C}{N_C(\bar{x}_C)^2} \quad (2)$$

式中: N_E 和 N_C 分别代表处理组和对照组的样本数量; SD_E 和 SD_C 分别代表处理组和对照组对应的标准偏差。

随机效应模型基于 σ_{pooled}^2 的权重系数为:

$$W_{ij} = \frac{1}{\sigma_{\text{pooled}}^2 + V_{\ln RR}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{pooled}}^2 = \frac{Q_T - (N - 1)}{\sum_{i=1}^N W_i - \sum_{i=1}^N W_i^2 / \sum_{i=1}^N W_i} \quad (4)$$

式中: N 为该指标涉及的研究数; Q_T 为总异质性值。

对效应值加权得到权重响应比,公式如下:

$$\text{权重响应比: } RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij} \times RR_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}} \quad (5)$$

式中: m 为分组数; k_i 为第 i 分组的研究数。

$$\text{标准误: } S_{RR_{++}} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}}} \quad (6)$$

95%置信区间公式^[21]如下:

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

通过上述处理,本研究建立了有机肥施用对盐碱地影响程度的数据库,并进行基本的统计计算。Meta分析利用 MetaWin2.1 软件进行^[22],在效应值和95%置信区间(CI)^[23]的计算过程中,对于正态性较差的指标,采用重抽样(“拔靴法”)^[24-25]的方式计算其效应值和95%置信区间。计算得到的结果中,以横坐标零点为界,若95%置信区间中包含0($P > 0.05$),则

表示施加有机肥对盐碱土的该指标无显著影响;若95%置信区间均位于0的右侧,即95%CI均大于0($P < 0.05$),则施加有机肥对该指标呈现明显的促进作用;若95%置信区间均位于0的左侧,即95%CI均小于0($P < 0.05$),则施加有机肥对该指标呈现明显的抑制作用^[21],本研究采用 GraphPad Prism 9 作为绘图工具。

为了使绘图结果更加清晰,本研究利用 Excel 中的 exp 函数将计算结果转换为响应比 RR_{++} ^[14]。同时,为了便于对结果进行解释,依据下列公式计算其增长率^[26]:

$$E = (e^{\ln RR_{++}} - 1) \times 100\% \quad (8)$$

式中: E 表示处理组某项指标相较于对照组的变化百分率。

1.3.2 发表偏倚性检验

Rosenthal's 失安全系数(Fail-safe Number, Nfs)是 Meta 分析中常用来检验发表性偏倚的一种方法。本研究采用罗森博格法(Rosenberg's method)计算得到各项指标 Meta 分析的失安全系数,如果 $Nfs > 5n + 10$ (n 为样本量),则可以认为结果可信,其统计学意义为至少需要 $5n + 10$ 组具有发表偏倚性的研究数据才能改变本研究的结论。

2 结果与分析

2.1 数据基本信息

2.1.1 样本分布

本研究共收集了有机质等13项指标共计790条研究数据,来自于30篇文献。将收集到的数据进行统计分组,分组的标准主要为三类:①施加方式:即根据是否与无机肥配施分为配施和单施。②试验年限:根据试验的持续时间分为1 a和 ≥ 2 a。③盐渍化程度:参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中的土壤全盐量标准,将供试地块的初始盐渍化程度分为轻度(0~0.2%)、中度(0.2%~0.4%)和重度(>0.4%)盐渍化,分组后各组的研究样本数如表1所示。

2.1.2 施加有机肥的类别及性质

本研究所涉及到的790条研究数据中有机肥类别及占比如表2所示,包含商品有机肥(畜禽粪便与秸秆、生物炭等混合发酵而成)、沼肥、畜禽粪便、生物炭、腐植酸、糠醛渣。各商品有机肥之间营养指标的差别不大,其中有效活菌数 > 3.2 亿个 $\cdot g^{-1}$,有机质含量在20%~35%之间,总养分(NPK)含量处于4%~9.5%

表1 施加有机肥对盐碱土改良效果数据库样本分布

Table 1 Sample distribution of the database on the effect of organic fertilizer application on saline soil improvement

指标 Index	总数据 Total data	施加方式 Application mode		施用年限 Application duration		盐渍化程度 Degree of salinization		
		配施 Combined application	单施 Single application	1 a	≥2 a	轻度 Mild	中度 Moderate	重度 Severe
SOM	105	53	52	83	22	29	27	49
AHN	66	35	31	52	14	16	14	36
AK	76	43	33	58	18	21	18	37
AP	78	34	44	60	18	15	23	40
SBD	48	23	25	34	14	18	12	18
SMC	30	16	14	26	4	3	19	8
pH	80	51	29	68	12	13	39	28
ESP	88	56	32	61	27	24	26	38
CEC	45	37	8	36	9	12	15	18
EC	43	25	18	36	7	8	22	13
CAT	26	14	12	19	7	9	13	4
URE	36	22	14	29	7	9	15	12
CY	69	52	17	57	12	26	14	29

表2 施加的有机肥类别及占比

Table 2 Type and percentage of organic fertilizer applied

商品有机肥 Commercial organic fertilizer	沼肥 Biogas fertilizer	畜禽粪便 Manure	生物炭 Biochar	腐植酸 Humic acid	糠醛渣 Furfural slag
51.29%	14.29%	23.38%	3.25%	5.84%	1.95%

范围内,水分一般低于25%;沼肥和畜禽粪便相较于商品有机肥具有更高的有机质(>40%),但总养分(NPK)的含量更低(<2%);关于施加的生物炭、腐植酸、糠醛渣的性质,所收集的文献中并未给出具体介绍。

2.2 施加有机肥对盐碱土改良效果的异质性和发表偏倚性检验

针对各个目标变量的数据,分别计算其响应比及异质性,利用 Q 检验(Q 值代表效应值的标准平方和, Q 值越大,异质性越大)和 I^2 检验(I^2 值代表各部分效应值异质性在总效应值异质性中所占的比例, I^2 值越大,异质性越大)分别对有机肥施用下盐碱土改良效果的各个指标进行异质性分析(表3)。结果表明,有机肥施用与盐碱土各指标的异质性检验均达到显著水平($P_Q<0.05$)^[26],且 I^2 值均大于50%,根据异质性检验的结果,本研究选择随机效应模型^[27]进行Meta分析。

由表4中的失安全系数(Nfs)可知,各项指标总的数据的失安全数均远大于 $5n+10$,在分组后,除去95%CI包含0的4项外,另有13项的失安全数小于 $5n+10$,且均为分组后的数据,存在文献偏倚性的风险。其余各项均满足 $Nfs>5n+10$ 的标准,说明本研究的平均效应值结果可靠。

表3 有机肥施加对盐碱土改良效果的异质性检验

Table 3 Heterogeneity test of the effect of organic fertilizer application on saline soil improvement

指标 Index	Q	自由度(df) Degree of freedom	P_Q	I^2
SOM	5 507.00	104.00	<0.000 1	98.11%
AHN	4 280.00	65.00	<0.000 1	98.48%
AK	5 280.00	75.00	<0.000 1	98.58%
AP	5 402.00	77.00	<0.000 1	98.57%
SBD	591.00	47.00	<0.000 1	92.05%
SMC	476.00	28.00	<0.000 1	93.91%
pH	6 241.00	79.00	<0.000 1	98.73%
ESP	186.50	87.00	<0.000 1	53.35%
CEC	2 684.00	44.00	<0.000 1	98.36%
EC	123.77	42.00	<0.000 1	66.07%
CAT	3 394.00	25.00	<0.000 1	99.26%
URE	192.51	35.00	<0.000 1	81.82%
CY	1 738.20	68.00	<0.000 1	96.09%

2.3 有机肥施用对盐碱土相关指标的影响

2.3.1 有机肥施用对盐碱土养分指标的影响

由图1可知,施加有机肥后,盐碱土养分指标权重响应比及其95%CI均不包含0($P<0.05$),且全部位于横坐标0的右侧,说明施加有机肥能明显增加盐碱

表4 有机肥施加对盐碱土改良效果的偏倚性检验失安全系数(Nfs)Table 4 Bias test of the effect of organic fertilizer application on saline soils improvement with loss of safety factor(Nfs)

指标 Index	总数据 Total data		施加方式 Application mode				施用年限 Application duration				盐渍化程度 Degree of salinization					
			配施 Combined application		单施 Single application		1 a		≥ 2 a		轻度 Mild		中度 Moderate		重度 Severe	
	n	Nfs	n	Nfs	n	Nfs	n	Nfs	n	Nfs	n	Nfs	n	Nfs	n	Nfs
SOM	105	11 986	53	1 739	52	2 679	83	7 711	22	2 220	29	582	27	1 530	49	2 236
AHN	66	2 869	35	1 169	31	895	52	1 726	14	293	16	218	14	117	36	532
AK	76	1 987	43	1 574	33	269	58	971	18	178	21	630	18	61 ^b	37	879
AP	78	3 632	34	665	44	1 404	60	1 231	18	744	15	366	23	523	40	672
SBD	48	1 184	23	254	25	442	34	565	14	244	18	24 ^b	12	375	18	402
SMC	30	243	16	22 ^b	14	82	26	208	4	0	3	17 ^b	19	63 ^b	8	55
pH	80	3 551	51	698	29	1 851	68	2 105	12	67 ^b	13	222	39	1 663	28	439
ESP	88	5 079	56	720	32	648	61	2 309	27	188	24	42 ^b	26	997	38	689
CEC	45	949	37	726	8	108	36	423	9	184	12	77	15	250	18	158
EC	43	1 362	25	92 ^b	18	674	36	1 033	7	38 ^b	8	3 ^b	22	424	13	237
CAT	26	549	14	403	12	69 ^b	19	643	7	0	9	223	13	44 ^b	4	833
URE	36	523	22	441	14	0	29	287	7	55	9	287	15	0	12	63 ^b
CY	69	1 414	52	608	17	473	57	1 053	12	132	26	122	14	175	29	428

注:数据后标号b表示该数据的 $Nfs < 5n + 10$ 。

Note: The data mark b indicates that the $Nfs < 5n + 10$ of this data.

土中各养分指标的含量。对比对照组(不施肥,仅常规耕作)和处理组的相对变化率,施加有机肥后,有机质(SOM)、碱解氮(AHN)、速效钾(AK)、有效磷(AP)含量的增幅分别达到33.41%、46.70%、19.65%和81.27%。有机肥的不同施加方式对土壤养分指标的影响具有明显差异,在单独施用有机肥的情况下,SOM、AHN、AK和AP的增幅分别为33.02%、58.42%、28.13%、108.65%,均明显高于有机肥与无机肥配施条件下的21.42%、37.29%、13.70%和50.07%。不同的施用年限下,AK在施加有机肥 ≥ 2 a情况下增幅为32.28%,明显大于施加1 a的处理(16.01%),而SOM、AHN以及AP变化率的差异不大。此外,试验地的盐渍化程度对上述4项养分指标的影响程度基本相同,均表现为在中度盐渍化程度下的增幅明显高于轻度和重度,轻度和重度相比则无明显差异。

2.3.2 有机肥施用对盐碱土物理指标的影响

本研究选取了土壤容重(SBD)和土壤含水率(SMC)作为评价有机肥施用效果的物理指标。其中SBD的权重响应比及95%CI位于横坐标0的左侧,呈负效应;而SMC则与之相反,表现为正效应(图2)。

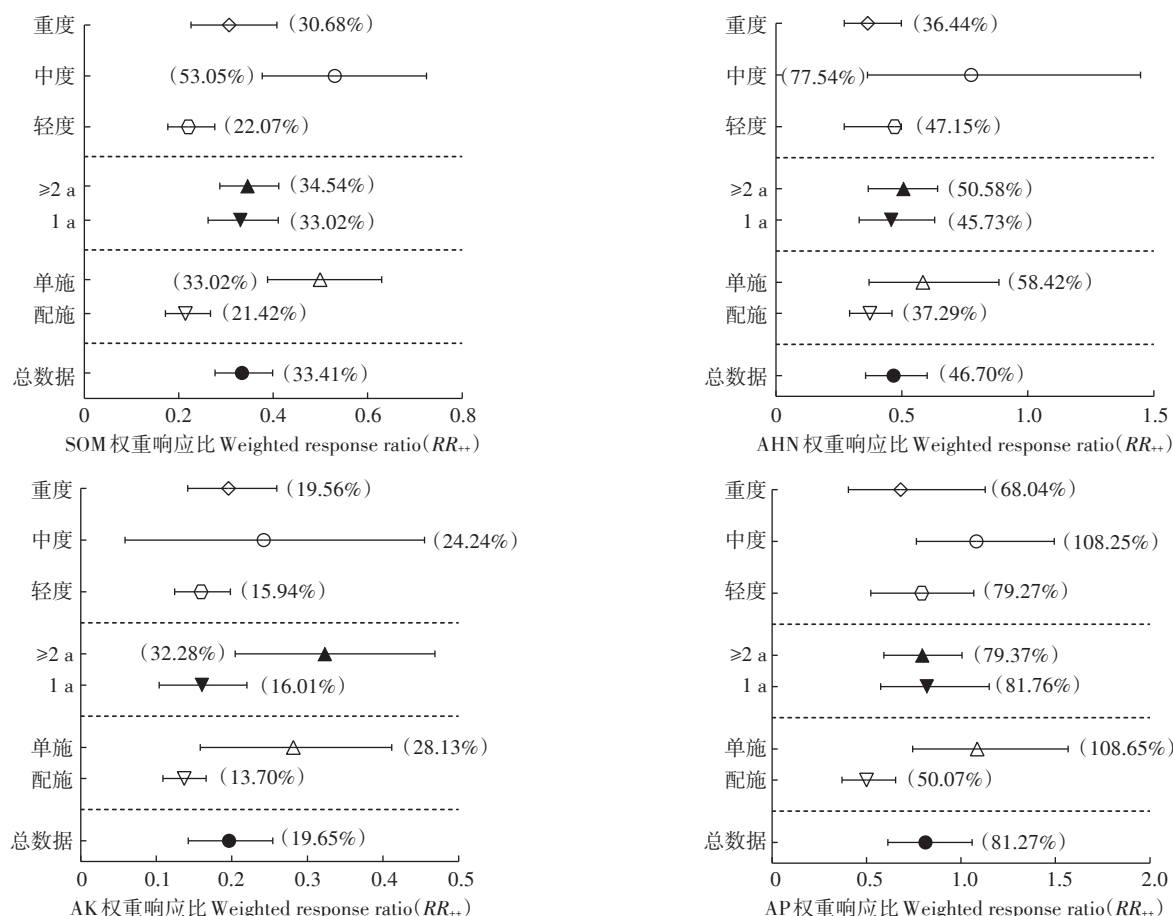
SBD处理组相较于对照组的降幅为6.53%,而SMC的增幅达到15.52%。在不同的施加方式下,SBD在配施时的降幅(7.56%)较单施时(5.29%)更大;SMC在配施时的增幅(11.55%)明显低于单施时

(20.32%)。不同的施加年限下,SMC在施加年限 ≥ 2 a的组别中,其95%CI包含0($P > 0.05$),此分组无统计学意义;SBD在施加年限 ≥ 2 a时降幅(9.13%)较仅施加1 a时(5.70%)明显增大。当样地盐渍化程度不同时,有机肥施加情况下轻度盐渍化样地SMC的增幅(6.86%)明显低于中度(19.33%)和重度(17.40%)。而有机肥施加后,SBD在中度(7.10%)和重度(7.11%)盐渍化样地上的降幅大于轻度盐渍化样地(5.08%)。

2.3.3 有机肥施用对土壤盐渍化指标的影响

由图3可知,有机肥的施加对盐碱土的碱化度(ESP)、电导率(EC)均呈负效应,具有抑制作用,降幅分别为20.34%、43.09%。施加有机肥同样能对盐碱土的pH起到调节作用,总体表现为负效应,降幅为5.22%。施加方式的改变对上述三项指标的影响趋势相同,均为有机和无机肥配施时的降幅明显高于单施。与此同时,不同施用年限下上述三项指标的变化趋势也基本一致,即施加有机肥 ≥ 2 a的降幅明显大于仅施加1 a的处理。在不同的盐渍化程度下,施加有机肥后,ESP、pH的降幅表现出相同的趋势,即中度>轻度>重度。而施加有机肥情况下EC的降幅则表现为中度最高(52.58%)、重度次之(40.84%)、轻度最低(13.58%)。

对于盐碱土的阳离子交换量(CEC)而言,施加有

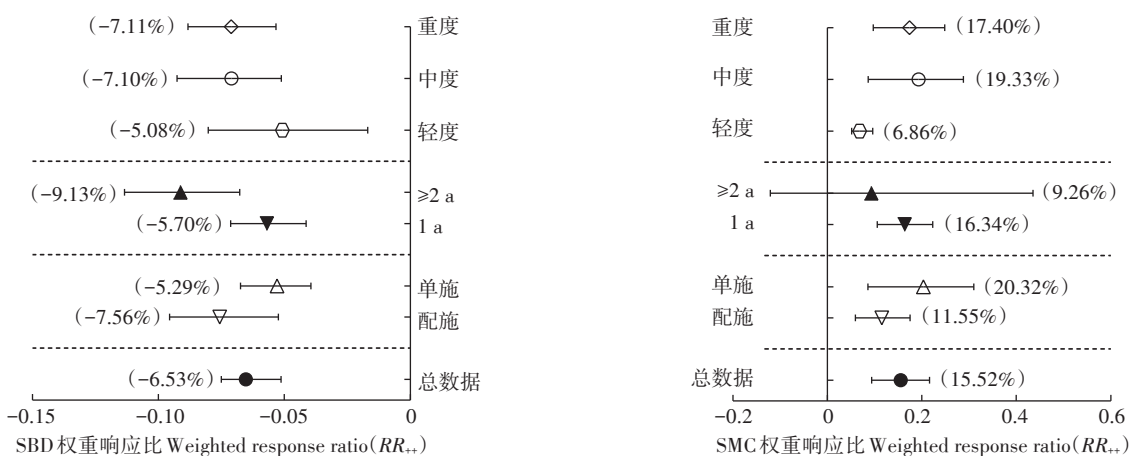


SOM、AHN、AK、AP分别表示土壤有机质、碱解氮、速效钾、有效磷。点和误差线分别代表权重响应比及其95%置信区间,误差线没有跨越零线表示处理组与对照组之间存在显著差异($P < 0.05$);括号内的数值代表处理组相较于对照组的相对变化率。下同

SOM, AHN, AK and AP denote soil organic matter, alkali-hydrolysable N, available K and available P. Points and error lines represent response weight ratios and their 95% confidence intervals, respectively; The error line does not cross the zero line indicates that there is a significant difference between the treatment group and the control group ($P < 0.05$); The values in parentheses represent the relative change rate of the treatment group compared with the control group. The same below

图1 有机肥施加对盐碱土养分指标的影响

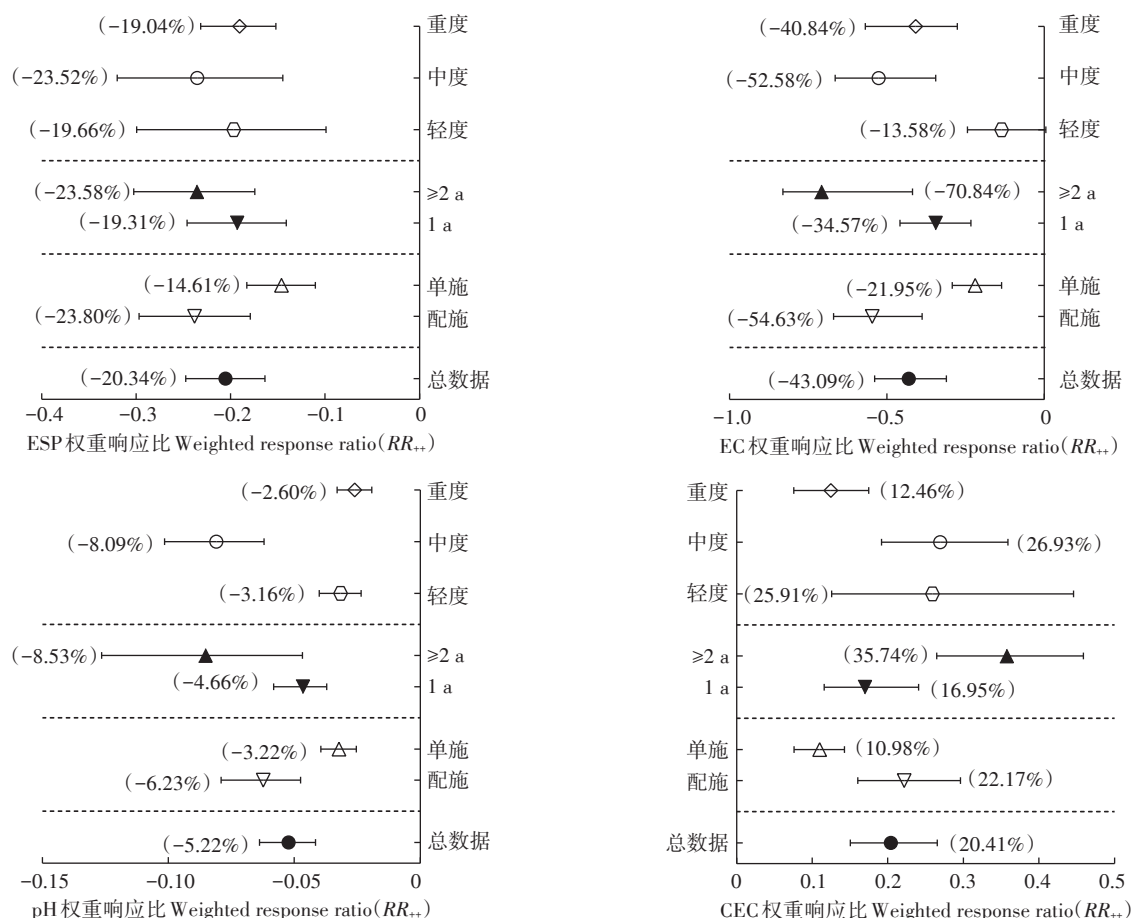
Figure 1 Effect of organic fertilizer application on nutrient index of saline soils



SBD和SMC分别表示土壤容重和土壤含水率
SBD and SMC denote soil bulk density and soil moisture content

图2 有机肥施加对盐碱土物理指标的影响

Figure 2 Effect of organic fertilizer application on physical index of saline soils



ESP、EC、CEC 分别表示碱化度、电导率、阳离子交换量
 ESP, EC, CEC denote exchange sodium percentage, electrical conductance, cation exchange capacity

图3 有机肥施加对盐碱土盐渍化指标的影响

Figure 3 Effect of organic fertilizer application on salinization index of saline soils

肥机具有正效应,起到促进作用,增幅为20.41%。采用不同的有机肥施加方式时,配施的增幅(22.17%)明显大于单施(10.98%)。施加有机肥≥2 a取得的改良效果(35.74%)明显优于仅施加1 a(16.95%)。在不同的盐渍化程度下,轻度(25.91%)和中度(26.93%)盐渍化样地改良效果明显优于重度样地(12.46%)。

2.3.4 有机肥施用对盐碱土生物学指标的影响

在施加有机肥后,过氧化氢酶(CAT)和脲酶(URE)两项生物学指标的权重响应比和95%CI均在横坐标0的右侧且不含0,说明施加有机肥对其有促进作用。将两项指标按照施加方式、施用年限、盐渍化程度分组后,CAT在施用年限组别中的95%CI包含0($P>0.05$),URE在施加方式和盐渍化程度组别中95%CI也包含0($P>0.05$),均无统计学意义,下述将不对其进行讨论。由图4可知,在不同施加方式下,配施的CAT增幅(18.65%)明显高于单施(8.70%)。在不同盐渍化程度的土壤中,有机肥施加后,轻度与重

度盐渍化土壤中CAT的增幅相近,而中度盐渍化土壤中,CAT的增幅明显低于轻度和重度。不同的施用年限下,URE的增幅无明显差异。

2.3.5 有机肥施用对作物产量的影响

施加有机肥后,盐碱土上种植的作物产量权重响应比和95%CI均在横坐标0的右侧,且不包含0,说明,施加有机肥可明显提高盐碱地种植作物的产量,增幅达到41.78%(图5)。从图5可以看出,单施条件下产量的增幅(60.55%)明显高于配施(36.35%)。在不同盐渍化程度的盐碱地上有机肥对产量的促进效果也不相同,增幅表现为重度(65.93%)>中度(55.50%)>轻度(17.69%)。

3 讨论

3.1 有机肥施用可有效改良盐碱土的盐渍化状况

盐碱土中有机质、碱解氮、有效磷、速效钾等指标是衡量土壤肥力的主要物质基础,也是作物碳素及氮

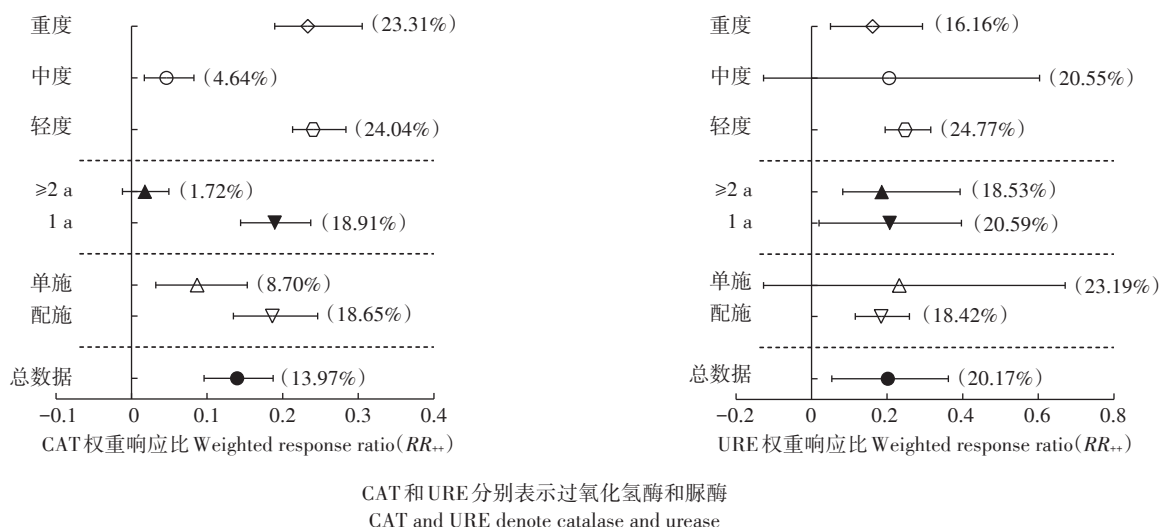


图4 有机肥施加对盐碱土生物学指标的影响

Figure 4 Effect of organic fertilizer application on biological index of saline soils

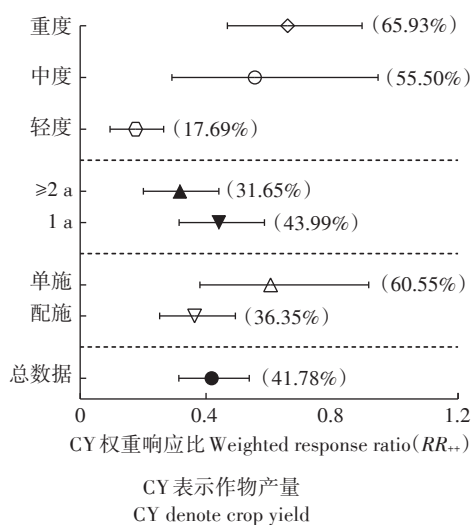


图5 有机肥施加对盐碱土作物产量的影响

Figure 5 Effect of organic fertilizer application on crop yield in saline soils

磷钾等养分的重要来源^[28-29]。施加有机肥后,各养分指标的含量能否得到增加,主要与有机肥所带来的养分输入量和土壤中有机质的矿化分解有关^[30]。本研究表明,在施入有机肥后,盐碱土壤中有机质、碱解氮、有效磷、速效钾的含量均得到了明显的增加,与李娟等^[31]的研究结果一致。这主要归因于施加的有机肥本身含有多种营养元素^[32],通过矿化分解缓慢长效地释放到土壤中,而且在该过程中会生成多种有机酸,有机酸可溶解土壤中原有的钾盐、磷酸盐等矿物盐,从而增加了磷、钾等元素的有效性^[33]。

施加有机肥后,土壤容重、碱化度、pH和电导率4

项指标均出现了明显的降低,使得土壤的盐渍化程度得到了明显的改善,这与张雅贞^[34]的研究结果一致。同时,本研究还发现,盐碱土壤的电导率与有机质在施加有机肥后呈现相反的变化趋势,这也验证了部分研究得到的土壤电导率与有机质含量呈负相关的结论^[35]。依据赵红等^[36]、赵兴敏等^[37]、吕欣欣等^[38]的研究结果,土壤中有有机质含量与总团聚体的数量和稳定性呈正相关,可以判断施加有机肥后,伴随土壤中有机质含量的增加,土壤团聚体的数量会得到进一步提升。而Hussain^[39]的研究表明,土壤团聚体的增加会破坏土壤中的毛管孔隙,并且会增加非毛管孔隙的数量,这种变化会提升土壤的代换量,能够极大地减弱盐碱土壤的返盐能力,减少表土盐分的积累,从而使土壤的碱化度和电导率等盐渍化指标降低。

本研究还发现,有机肥施加后盐碱土的pH降低,且随着施加年限的增加,降幅增大。这与张金柱等^[40]和刘国伟^[41]的研究结果一致,即有机肥施加后,其中所含的腐植酸、富里酸等会与土壤中的碱性物质发生反应,对土壤起到一定的酸化作用,明显降低盐碱土的pH^[42]。有机肥还具有较强的酸碱缓冲作用,所以土壤的pH并不会发生较为剧烈的变化。

3.2 有机肥的施加方式对盐碱土改良效果的影响

有机肥的不同施加方式均提高了盐碱土的养分水平,降低了盐渍化程度,只是效果存在一定差异。单独施用有机肥时盐碱土的SOM、AHN、AK、AP等养分指标的增幅更为明显,而有机肥与无机肥配施则更有利于降低土壤的盐渍化指标,如EC、pH、ESP

等。但以作物产量作为检验盐碱土综合改良效果的指标时,则有机肥单施的效果优于配施,这与吴建繁等^[43]的研究结果不同。其原因可能是:无论单独施加有机肥还是将有机肥和无机肥配合施用,实际上均能够对土壤盐分产生明显的抑制作用,尽管效果有差异,但均有可能将土壤盐分降低到影响或不影响作物生长的范围内。在此基础上,在盐分含量下降的前提下,由于盐碱土往往较为贫瘠^[42],因此养分含量即成为盐碱土改良中影响作物生长及产量形成的限制性因素。在本研究所选取的文献中,由于施加的肥料总量均以氮素作为衡量标准,且配施的化肥全部作为基肥一次性施入土壤,因而淋洗和挥发作用必然会导致较多的养分损耗。而同等氮素含量的有机肥养分的释放则是一个缓慢的过程,产生的损耗较小。另外高等植物对土壤中氮素的吸收,有45%~50%来源于土壤有机质^[44],相比之下,有机肥与无机肥配合施用时分养分指标的增幅较单独施用有机肥更低,从而使后者在盐碱土改良的综合效果上优于前者,并最终体现在作物产量上。

3.3 不同盐渍化土壤条件下有机肥施用对盐碱土改良效果的影响

在不同盐渍化程度的土壤中,有机肥加入后,中度盐渍化土壤的各项指标相较于轻度和重度发生的变化程度更大,不仅体现在养分指标的增幅最高,而且各土壤盐渍化相关指标的降幅也更加明显。究其原因,可能是轻度盐渍化土壤本身的盐渍化程度处于较低的水平,各项盐渍化指标的背景值更为接近正常土壤^[45],从而导致其变化的幅度不明显。重度盐渍化水平的土壤盐渍化程度较高,土壤板结严重,返盐强度很高^[46],其土壤盐渍化指标的背景值虽然很高,但是在施加有机肥后,一方面盐渍化相关指标的降幅有限,另一方面受微生物活性的限制,有机质的矿化分解速率并不高,进而导致养分指标的提高程度也受到限制。

4 结论

本研究采用Meta分析方法探讨了有机肥施加方式、施用年限对不同盐渍化程度盐碱地相关指标的影响,结论如下:

(1)整体而言,施加有机肥对盐碱地有明显的改良效果,具体表现在:盐碱地的养分指标、生物学指标、作物产量、阳离子交换量以及土壤含水率均得到了不同程度的改善或增加;而土壤盐渍化相关指标以

及土壤容重均出现了一定程度的下降。

(2)单独施用有机肥更有利于提升盐碱地的养分含量和作物产量,而有机肥与无机肥配施在降低土壤盐渍化程度方面有更好的表现。以作物产量为标准综合考虑,单独施加有机肥对盐碱土的综合改良效果更好。

(3)以作物产量为衡量标准,施加有机肥对重度盐渍化土壤的改良效果更好,中度次之,轻度较差。

参考文献:

- [1] 刘森, 王志春, 杨福, 等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 1-8. LIU M, WANG Z C, YANG F, et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 1-8.
- [2] 王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 89-94. WANG F Y, WANG C, LIU Q Q, et al. Improved effect of humic acid, earthworm protein fertilizer and vermicompost on coastal saline soils[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(5): 89-94.
- [3] 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. YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 837-845.
- [4] 于宝勒. 盐碱地修复利用措施研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(7): 81-87. YU B L. Remediation measures of saline-alkali land: A review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(7): 81-87.
- [5] 田长彦, 买文选, 赵振勇. 新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7064-7068. TIAN C Y, MAI W X, ZHAO Z Y. Study on key technologies of ecological management of saline alkali land in arid area of Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7064-7068.
- [6] 杨德超. 有机无机肥配施对碱化草甸土壤理化性状及产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012: 12-13. YANG D C. Effect of application of organic-inorganic mixed fertilizers on physical and chemical properties and yield of meadow alkali soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012: 12-13.
- [7] 李大伟. 肇州县盐渍化旱地土壤肥力提升技术模式的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013: 4-6. LI D W. Research on promotion of soil fertility in salinization dryland soil in Zhaozhou County in China [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013: 4-6.
- [8] 李莹飞. 有机肥和木醋液对滨海盐土化学性质和酶活性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016: 39-40. LI Y F. Effects of organic manure and wood vinegar on chemical properties and enzyme activities in coastal saline soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016: 39-40.
- [9] TEJADA M, GARCIA C, GONZALEZ J, et al. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1413-1421.

- [10] DU Y, CUI B, WANG Z, et al. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: A meta-analysis[J]. *Catena*, 2020, 193(10):10–17.
- [11] 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.
- [12] 王旭东, 庄俊杰, 刘冰洋, 等. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的 Meta 分析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(8):12–24. WANG X D, ZHUANG J J, LIU B Y, et al. Residue returning induced changes in soil organic carbon and the influential factors in China's croplands: A meta-analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(8):12–24.
- [13] 王晓娇, 张仁陟, 齐鹏, 等. Meta 分析有机肥施用对中国北方农田土壤 CO₂ 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10):99–107. WANG X J, ZHANG R Z, QI P, et al. Meta-analysis on farmland soil CO₂ emission in northern China affected by organic fertilizer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10):99–107.
- [14] 姜玲玲, 刘静, 赵同科, 等. 有机无机配施对番茄产量和品质影响的 Meta 分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4):601–610. JIANG L L, LIU J, ZHAO T K, et al. Meta-analysis of combinative application of organic and inorganic fertilizers on effect of yield and qualities of tomato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4):601–610.
- [15] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9):3231–3239. LI Y B, LI P, WANG S H, et al. Effects of organic fertilizer application on crop yield and soil properties in rice-wheat rotation system: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9):3231–3239.
- [16] TRESEDER K K. A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO₂ in field studies[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2):347–355.
- [17] 刘丽媛, 徐艳, 朱书豪, 等. 有机肥配施对中国农田土壤容重影响的整合分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5):867–873. LIU L Y, XU Y, ZHU S H, et al. Meta-analysis on the responses of soil bulk density to supplementation of organic fertilizers in croplands in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5):867–873.
- [18] DE GRAAFF M A, VAN GROENIGEN K J, SIX J, et al. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO₂: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(11):2077–2091.
- [19] LI S, ZHENG X, LIU C, et al. Influences of observation method, season, soil depth, land use and management practice on soil dissolvable organic carbon concentrations: A meta-analysis[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 631/632(1):105–114.
- [20] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4):1150–1156.
- [21] ZHOU L, ZHOU X, ZHANG B, et al. Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7):2332–2343.
- [22] YE L, CAMPS-ARBESTAIN M, SHEN Q, et al. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(1):2–18.
- [23] XU W, YUAN W. Responses of microbial biomass carbon and nitrogen to experimental warming: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115(8):265–274.
- [24] ZHOU Z, WANG C, LUO Y. Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):1–10.
- [25] CHEN H, LI X, HU F, et al. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10):2956–2964.
- [26] WITTIG V E, AINSWORTH E A, NAIDU S L, et al. Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: A quantitative meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2):396–424.
- [27] AINSWORTH E A. Rice production in a changing climate: A meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7):1642–1650.
- [28] 王德领, 诸葛玉平, 杨全刚, 等. 3 种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1):20–27. WANG D L, ZHUGE Y P, YANG Q G, et al. Effects of three amendments on the soil properties of and maize growth in coastal saline-alkali soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1):20–27.
- [29] 石纹瑄, 刘世亮, 赵颖, 等. 猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5):431–438. SHI W X, LIU S L, ZHAO Y, et al. Effects of pig manure organic fertilizer application on available nutrient content and soil aggregate distribution in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5):431–438.
- [30] 张雅贞, 李跃进, 景宇鹏, 等. 施用有机肥对土默川平原盐碱土土壤盐分及养分特征的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(6):34–41. ZHANG Y Z, LI Y J, JING Y P, et al. Effect of increasing amounts of organic fertilizer on the soil salinity and nutrient characteristics of saline-alkaline soil in Tumochuan Plain[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(6):34–41.
- [31] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1):144–152. LI J, ZHAO B Q, LI X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1):144–152.
- [32] 卢合全, 唐薇, 罗振, 等. 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分、棉花生长发育及产量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(12):2511–2521. LU H Q, TANG W, LUO Z, et al. Effects of commercial

- organic fertilizer substituting chemical fertilizer partially on soil nutrients, plant development, and yield in cotton[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(12):2511–2521.
- [33] 王丽娜, 陈金林, 梁珍海, 等. 黄麻秸秆还田及有机肥对滨海盐土的改良试验[J]. 林业科技开发, 2009, 23(3):88–91. WANG L N, CHEN J L, LIANG Z H, et al. Effects of application of jute straw and organic fertilizers on the coastal saline soil[J]. *China Forestry Science and Technology*, 2009, 23(3):88–91.
- [34] 张雅贞. 有机无机肥配施对土默川平原盐碱土改良效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020:55–57. ZHANG Y Z. Study on the effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on the improvement of saline-alkali soil in Tumochuan Plain[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020:55–57.
- [35] 刘文全, 卢芳, 徐兴永, 等. 滨海废弃盐田复垦区土壤盐分和有机质的空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19):183–190. LIU W Q, LU F, XU X Y, et al. Spatial variability of soil salinity and organic matter in reclaimed area of abandoned salt pan in coast[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(19):183–190.
- [36] 赵红, 袁培民, 吕贻忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2):306–311. ZHAO H, YUAN P M, LÜ Y Z, et al. Effects of organic manure application on stability of soil aggregates[J]. *Soils*, 2011, 43(2):306–311.
- [37] 赵兴敏, 刘楠, 郭欣欣, 等. 秸秆和硫酸铝对淡黑钙土有机矿质复合体及有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):950–956. ZHAO X M, LIU N, GUO X X, et al. Effect of straw and aluminum sulfate on soil organic-mineral complex and organic carbon distribution in light chernozem[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):950–956.
- [38] 吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1):1–10. LÜ X X, DING X L, ZHANG B, et al. Effects of long-term fertilization and plastic-mulching on the stability and organic carbon contents of brown soil aggregates[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1):1–10.
- [39] HUSSAIN N. Mechanism of salt tolerance in rice[J]. *Pedosphere*, 2003, 13(3):233–238.
- [40] 张金柱, 郭春景, 张兴, 等. 生物有机肥对中度盐碱土壤理化性质影响的研究[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(12):1420–1422. ZHANG J Z, GUO C J, ZHANG X, et al. Improving effect of microbial organic fertilizer on physical and chemical properties of saline-alkaline soil[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2008, 47(12):1420–1422.
- [41] 刘国伟. 长期施用生物有机肥对土壤理化性质影响的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004:40–41. LIU G W. A study on the effect of the long-term applying biological-organic fertilizer on the soil physical-chemical properties[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004:40–41.
- [42] 杨文叶, 季淑枫, 李丹, 等. 连续施用商品有机肥对耕地质量及蔬菜产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4):319–322. YANG W Y, JI S F, LI D, et al. Effect of continuous application of commercial organic manure on farmland quality and vegetable yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(4):319–322.
- [43] 吴建繁, 王运华. 无公害蔬菜营养与施肥研究进展[J]. 植物学通报, 2000, 17(6):492–503. WU J F, WANG Y H. Progress in studies on nutrition and fertilization of non-pollution vegetables[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17(6):492–503.
- [44] 蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 等. 华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4):503–510. CAI Y Y, WANG R Q, WANG L L, et al. Effects of nitrogen amount and fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4):503–510.
- [45] 张金柱, 张兴, 郭春景, 等. 生物有机肥对轻度盐碱土壤理化性质影响的研究[J]. 生物技术, 2007, 17(6):73–75. ZHANG J Z, ZHANG X, GUO C J, et al. Improving effect of microbial organic fertilizer on physical and chemical properties of saline-alkaline soil[J]. *Biotechnology*, 2007, 17(6):73–75.
- [46] 赵振勇, 张科, 王雷, 等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5):1420–1425. ZHAO Z Y, ZHANG K, WANG L, et al. Desalination effect of halophytes in heavily salinized soil of Karamay, Xinjiang, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5):1420–1425.