

郭慧婷, 高静, 张强, 李建华, 靳东升, 徐明岗. 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 HT, Gao J, Zhang Q, Li JH, Jin DS, Xu MG. Differences and reasons for the effects of organic fertilizer on the pH of acidic and alkaline soils in China [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2024, 30 (3): 496-503

有机肥对我国酸性和碱性土壤pH的影响差异及原因

郭慧婷^{1,2} 高静^{1,2} 张强² 李建华²✉ 靳东升² 徐明岗^{1,2}✉

¹山西农业大学资源环境学院 晋中 030800

²山西农业大学生态环境产业技术研究院/土壤环境与养分资源山西省重点实验室 太原 030031

摘要 施用有机肥对改善土壤pH及提高作物产量稳定性具有重要作用; 研究全国不同气候类型、土壤性质和农田管理措施下, 施用有机肥对酸性和碱性土壤pH影响的差异及原因, 可为有效提升土壤肥力、优化农田管理措施提供科学依据。共收集2002-2022年间发表的103篇文献(308组相对独立的涉及pH的数据), 采用整合分析(Meta-analysis)方法从气候、土壤pH水平、有机肥类型、施肥量、施肥年限等多个方面定量分析施用有机肥对我国农田土壤pH的影响。结果表明, 酸性(pH < 7)土壤条件下, 年均温 $\leq 8^{\circ}\text{C}$ 、降雨量400-600 mm时, 施用有机肥对土壤pH提升幅度最大; 在有机肥施用下, 低有机质土壤pH增幅为8.07%, 高量有机肥增幅为6.42%, 粪肥增幅最显著, 为7.14%, 中、长期施肥对土壤pH的提升幅度显著高于短期施肥。碱性(pH > 7)土壤条件下, 年均温 $\leq 8^{\circ}\text{C}$ 、降雨量400-600 mm时, 施用有机肥对土壤pH降幅最大; 有机肥施用显著降低了低有机质土壤pH(4.07%); 粪肥与商品有机肥对土壤pH降幅比生物有机肥高约3.60倍; 随着有机肥施用量的增加, 土壤pH下降幅度增加; 中、长期施肥对土壤pH降低幅度最为显著(11.41%和7.82%)。在酸性土壤中有有机肥施用年限是影响pH的主控因素, 而碱性土壤则是年均温。总之, 有机肥施用对不同酸碱度土壤pH的影响不同, 低温且降雨量适中区在有机质含量较低的酸性土壤中长期施用高量粪肥可显著提高土壤pH, 有效缓解土壤酸化效应, 而碱性土壤中长期施用高量粪肥和商品有机肥均可有效降低土壤pH。上述结果可为有机肥的合理施用和土壤肥力提升提供科学依据。(图5 参55)

关键词 有机肥; 土壤pH; 整合分析; 中国农田; 管理措施

Differences and reasons for the effects of organic fertilizer on the pH of acidic and alkaline soils in China

GUO Huiting^{1,2}, GAO Jing^{1,2}, ZHANG Qiang², LI Jianhua²✉, JIN Dongsheng² & XU Minggang^{1,2}✉

¹ College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030800, China

² Academy of Eco-environment and Industrial Technology/Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China

Abstract The application of organic fertilizers plays an important role in improving soil pH and crop yield stability. Investigating the effects of organic fertilizers on the pH of acidic and alkaline soils under different climate types, soil properties, and farmland management practices in China could provide a scientific basis for effectively improving soil fertility and optimizing farmland management. In this study, we collected 103 articles (308 groups of relatively independent pH data) published from 2002-2022, and a meta-analysis was used to quantitatively analyze the effects of organic fertilizer application on soil pH in farmlands in China from many aspects, such as climate, soil pH level, organic fertilizer type, fertilizer amount, and fertilization period. Under acidic soil (pH < 7) conditions, the average annual temperature was $\leq 8^{\circ}\text{C}$ and rainfall was 400-600 mm; the application of organic fertilizer had the largest increase in soil pH. Under the application of organic fertilizer, the pH of soil with low organic matter, high amount of organic fertilizer, and manure increased by 8.07%, 6.42%, and 7.14%, respectively. Medium- and long-term fertilization significantly increased the soil pH compared to short-term fertilization. The increases in soil pH with medium- and long-term fertilization were significantly higher than that with short-term fertilization. Under alkaline soil (pH > 7), the average annual temperature was $\leq 8^{\circ}\text{C}$ and rainfall was 400-600 mm; the application of organic fertilizer had the most significant decrease in soil pH. Organic fertilizer significantly reduced the pH of soil with low organic matter content by 4.07%. The decrease in the soil pH of manure and commercial organic fertilizer was 3.60 times higher than that of the bio-

收稿日期 Received: 2023-06-04 接受日期 Accepted: 2024-01-07

山西省重大研发计划项目(202201140601028)资助 Supported by the Shanxi Province Major R&D Program Project (202201140601028)

✉通信作者 Corresponding authors (E-mail: xuminggang@caas.cn; jianhua0119@163.com)

organic fertilizer. With an increase in the amount of organic fertilizer, the decrease in soil pH also increased. The most significant decrease in soil pH was caused by medium-and long-term fertilization (11.41% and 7.82%, respectively). The years of organic fertilizer application were the main factors affecting pH in acidic soils, whereas the average annual temperature was the main factor in alkaline soil. Overall, the application of organic fertilizers had different effects on soil pH at different pH levels. At low temperatures and moderate rainfall areas, medium-and long-term application of high amounts of manure in acidic soils with low organic matter content can significantly improve soil pH and alleviate soil acidification, whereas long-term application of high amounts of manure and commercial organic fertilizer in alkaline soil can effectively reduce soil pH. The present study provides a scientific basis for the rational application of organic fertilizer for improvement in soil fertility.

Keywords organic fertilizer; soil pH; meta-analysis; Chinese farmland; management measure

pH是衡量土壤酸碱强弱的指标^[1],其变化对有机质分解、矿物质数量和微生物活性有着不同程度的影响,是影响农作物生长发育的决定性因素^[2-3]。近40年来随着人类对土壤的不合理利用,土壤养分流失、土壤酸化和盐碱化等问题日益突出,降低了土壤生产能力,严重影响农业绿色可持续发展^[4-5]。化肥被广泛用于农业生产,虽然其投入对我国农业生产发挥了重要意义,但不合理的化肥施用被视为导致土壤酸化、盐碱化问题的主要原因^[6-8]。施用有机肥可以提高土壤有机质含量并改良土壤结构,增强土壤酸碱缓冲力,促进微生物繁殖和作物根系生长发育,提高作物产量^[9-10]。有研究表明,施用有机肥可以中和部分酸性土壤表层质子,降低土壤代换性铝含量,有效改良土壤酸度^[5, 11-12]。而在碱性土壤中施用有机肥能够为土壤微生物提供营养物质,影响有机组分矿化分解形成有机酸,降低土壤pH^[13-14]。可见,施用有机肥后土壤pH的变化会受到土壤本身酸碱性的影响。因此,明确有机肥施用对不同酸碱性农田土壤pH的改良效果,对于我国耕地土壤质量提升及农业可持续发展起到至关重要的作用。

施用有机肥可不同程度缓冲或提高土壤pH,施肥措施不同,对土壤pH提升效果不同,柳开楼等在江西旱地红壤研究发现与施化肥相比,单施有机肥和有机无机配施处理的土壤pH分别增加了0.91和1.35个单位^[15]。不同施肥类型对土壤pH影响不同的,肖辉等研究发现与施用化肥相比,施用粪肥能提高土壤pH,但商品有机肥对土壤pH影响不显著^[16]。有机肥施用量和施用年限对土壤pH提升效果也有一定差异,李晓亮、胡天睿等研究表明在酸性土壤上随着有机肥替代化肥投入量的增加,土壤pH逐渐升高,其中60%替代处理的效果最佳,表明长期施用有机肥可以维持或提高红壤pH,有效提升红壤抗酸能力^[11, 17]。然而,大量研究也表明有机肥的施用会降低土壤pH,不同的施肥方式、施肥类型、施肥量及施用年限对土壤pH的降低幅度存在显著差异。王伟等在大庆盐碱地研究发现,有机肥混施较不施肥处理土壤pH值下降了1.06个单位^[18]。张秀志等研究表明,商品有机肥+黄腐酸+1/2化肥处理相较于单施化肥显著降低了各土层pH值且降低幅度为1.91%-4.38%^[19]。胡诚等研究发现碱性土壤的pH值随有机肥施用量增加而降低,最终趋于中性^[20]。于菲等基于东北地区长期试验发现施用有机肥后,土壤pH值随施肥年限的增加逐渐降低,施用有机肥13年、19年和24年的土壤pH值较不施肥对照降低了20.00%-24.45%^[21]。

由此可见,目前研究中施用有机肥对酸碱性土壤pH影响的差异及原因仍存在争议,诸多研究仅从单方面分析有机肥对土壤pH的影响,未综合考虑气候、土壤酸碱性和有机肥

施用情况等对土壤pH的影响。因此,需要收集全国范围内独立试验数据进行综合分析,系统量化有机肥对我国酸性和碱性土壤pH影响的差异及原因。本研究运用Meta分析的方法,收集已发表的有关施用有机肥对土壤pH影响的文章,整合分析施用有机肥对我国农田酸性和碱性土壤pH影响的差异及原因,明确不同气候条件、土壤属性及农田管理措施对土壤pH变化的贡献,旨在为我国农田合理施用有机肥及提升土壤质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

于Web of Science、中国知网、万方数据等文献数据库进行文献检索,通过设置检索时间“2002年12月-2022年3月”,关键词为“中国农田(croplands in China)”“施用有机肥(organic fertilizer)”“土壤pH(soil pH)”“土壤养分(soil nutrient)”,进行文献筛选。同时所筛选文章必须满足以下4个标准:(1)中国农田进行的田间试验,且有试验前的基本理化指标(pH、有机质等数据);(2)试验中不同处理至少3次重复;(3)同一试验中需有严格的处理与对照,对照组为不施肥(CK)/施化肥(NPK),处理组为单施有机肥(OM)/有机无机配施(NPKM);(4)处理组和对照组除有机肥处理外,其他试验条件一致。通过使用Excel 2016软件建立土壤pH的数据库,其中主要信息有作者、参考文献、地理信息(经度和纬度)、气象信息(年均温和年降雨)、土壤基本理化信息(土壤初始pH值、有机质含量等)、施肥措施、有机肥类型、有机肥年施用量(t/hm^2)和有机肥施用年限等。共收集到符合标准的文献共103篇,其中中文文献73篇,英文文献30篇,有效数据共308组。根据收集的文献数据进行数据分组:施肥措施分为单施有机肥和有机无机配施;有机肥类型分为腐熟的粪肥、商品有机肥和生物有机肥;其中粪肥是简单腐熟之后的粪便;商品有机肥是来源于植物和(或)动物,经过发酵腐熟的含碳有机肥^[22];生物有机肥指的是添加了特定功能微生物与主要以动植物残体为来源,并经无害化处理、腐熟的有机肥料复合而成的一类兼具微生物肥料和有机肥效应的肥料^[23]。土壤pH值参考了酸碱度的标准,分为酸性土壤($\text{pH} < 7$)和碱性土壤($\text{pH} > 7$);年均温和年降雨量的分组分别为 $\leq 8^\circ\text{C}$ 、 $8-16^\circ\text{C}$ 、 $> 16^\circ\text{C}$ 和 $\leq 400\text{ mm}$ 、 $400-600\text{ mm}$ 、 $> 600\text{ mm}$ ^[24-25];有机质含量($\text{SOM}/\text{g kg}^{-1}$)参考李园宾等的分组^[24],分为低水平($\text{SOM} \leq 20\text{ g/kg}$)、中水平($20\text{ g/kg} < \text{SOM} \leq 30\text{ g/kg}$)、高水平($\text{SOM} > 30\text{ g/kg}$);有机肥施肥量划分为 $\leq 10\text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $10-20\text{ t}/\text{hm}^2$ 和 $\geq 20\text{ t}/\text{hm}^2$ ^[26];施肥年限(a)也参考了李园宾等^[24]

的分组,分为短期施肥(≤ 3 a)、中期施肥(3-10 a)和长期施肥(≥ 10 a)。

1.2 数据分析

本研究中的数据均来自检索的文献,并将其进行标准化处理,对文献中给出的土壤有机碳(SOC)数据转化成土壤有机质(SOM),根据以下公式^[27]计算。

$$\text{SOM} = \text{SOC} \times 1.724 \quad (1)$$

对文献中给出的土壤pH(CaCl_2)转化为pH(H_2O),根据以下公式^[28]计算。

$$\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 1.65 + [0.86 \times \text{pH}(\text{CaCl}_2)] \quad (2)$$

同样, pH(KCl_2)转化为pH(H_2O),根据以下公式^[29]计算。

$$\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = -1.95 + 11.58 \times \log_{10}[\text{pH}(\text{KCl}_2)] \quad (3)$$

每组数据均有对照组和处理组的土壤pH、标准差(SD)以及重复数(n)。若文献数据提供的是标准误(SE),需要通过以下公式将其转换为标准差:

$$\text{SD} = \text{SE} \sqrt{n} \quad (4)$$

式(4)中, n 是重复次数。若文献缺失标准差(SD)数据,需用数据库变异系数来转换。

权重响应比(response ratios, RR)用来表示统计学指标,并计算其95%的置信区间(95% CI)。其计算公式为

$$\text{RR} = M_i/M_c \quad (5)$$

式(5)中, M_i 和 M_c 分别是处理组(OM/NPKM)和对照组(CK/NPK)的平均值。在分析过程中,将RR自然对数化,通过自然对数响应比($\ln \text{RR}$)反映施用有机肥对土壤pH的影响程度并可以通过以下公式实现^[30]。

$$\ln \text{RR} = \ln (M_i/M_c) = \ln M_i - \ln M_c \quad (6)$$

将每个独立研究响应比进行加权,得出加权响应比(R_{++})。其计算公式^[31]为

$$R_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij} R_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij}} \quad (7)$$

式(7)中, m 是分组数, k_i 是第 i 分组的总比较对数, j 表示 k_i 中的第 j 对, w_{ij} 表示权重系数。

w_{ij} 可以根据以下公式计算。

$$w_{ij} = \frac{1}{V} \quad (8)$$

式(8)中, V 表示平均值的变异系数。

V 可以根据以下公式计算。

$$V = \frac{\text{SD}_i^2}{n_i M_i^2} + \frac{\text{SD}_c^2}{n_c M_c^2} \quad (9)$$

式(9)中, SD_i^2 和 n_i 分别代表处理组(OM/NPKM)的标准差与样本数, SD_c^2 和 n_c 分别代表对照组(CK/NPK)的标准差与样本数。

如果土壤pH的加权响应比(R_{++})的95%的置信区间没有包含横坐标零点,则说明处理组(OM/NPKM)相比对照组(CK/NPK)差异显著,区间 < 0 表示显著降低,区间 > 0 表示显著升高,否则表示对土壤pH没有显著影响,通过以下公式计算^[32]。

$$95\% \text{ CI} = R_{++} \pm 1.96 S(R_{++}) \quad (10)$$

$S(R_{++})$ 是指加权响应比(R_{++})的标准差。

$$S(R_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij}}} \quad (11)$$

土壤pH变化的百分数可以通过以下公式^[33]计算。

$$(e^{R_{++}} - 1) \times 100\%$$

在Meta分析计算加权平均响应比前,应采用卡方检验(Chi-square test)判断试验处理及结果是否存在异质性,若检验结果 $P > 0.05$,说明无异质性,可选择固定效应模型计算,否则选择随机效应模型^[34]。

1.3 数据处理

前期利用Microsoft Excel 2016建立数据库;在文献数据获取过程中,若文献中数据以表格形式表示,可直接获取数据;若文献中数据以图形式表示,用GetData Graph Digitizer 2.24^[35]软件获取数据。利用SPSS12.5软件进行数据统计分析、卡方检验(Chi-square test)和正态性检验(K-S检验法)。使用MetaWin 2.1软件整合分析数据^[36]。使用Origin 2019软件完成森林图的制作。各因素影响土壤pH变化的重要度用R语言中的软件包Random Forest进行计算^[37]。

2 结果与分析

2.1 有机肥施用对土壤pH变化的影响

对施用有机肥后土壤pH变化的响应比进行了正态分布检验,发现所搜集数据的拟合曲线呈显著的正态分布($P < 0.05$) (图1),符合整合分析要求。整体来看,有机肥施用对不同酸碱度土壤pH表现出不同的效果,单施有机肥和有机无机配施均可以影响土壤pH (图2);在酸性土壤中,单施有机肥(7.58%)较有机无机配施(4.70%)增加土壤pH效果最显著;在碱性土壤中,单施有机肥和有机无机配施均能降低土壤pH,但差异均不显著($P > 0.05$)。

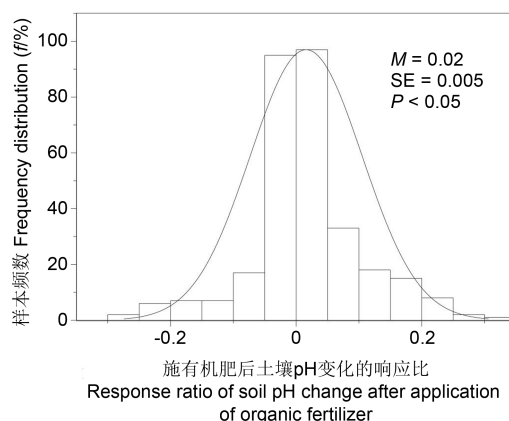


图1 施用有机肥后土壤pH变化的响应比。利用SPSS12.5软件对土壤pH数据进行正态性检验(K-S检验法),曲线代表了土壤pH变化响应比的频数分布; M 代表土壤pH变化响应比的平均值, SE 代表pH变化响应比均值的标准误拟合曲线呈显著的正态分布($P < 0.05$)。

Fig. 1 Response ratio of soil pH change after application of organic fertilizer. SPSS12.5 software was used to test the normality of soil pH data (K-S test method). The curve represents the frequency distribution of response ratio of soil pH change. M represents the mean value of the response ratio of soil pH change and SE represents the standard error fitting curve of the mean value of pH change response ratio presenting a significant normal distribution ($P < 0.05$).

2.2 酸性土壤下施用有机肥对土壤pH的影响

整合分析结果显示,有机肥施用于酸性土壤其pH的变化因气候类型、土壤属性、农田管理措施的不同而表现出显著差异 (图3)。在酸性土壤中施用有机肥均能提升土壤pH,

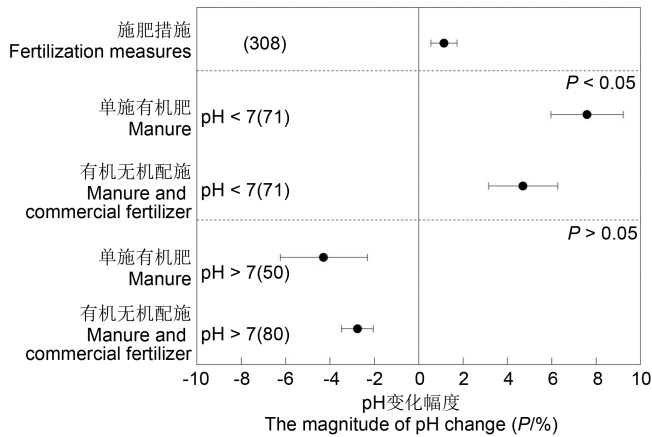


图2 不同施肥措施处理下土壤pH的变化。图中点和误差线分别代表响应比及其95%的置信区间，如果误差线没有跨越零线表示处理和对照存在显著差异；括号内的数值代表样本数。

Fig. 2 Changes in soil pH under different fertilization treatments. Points and error lines in the graph represent response ratios and their 95% confidence intervals, respectively. If the error line does not cross the zero line, it indicates a significant difference between treatment and control. Values in brackets represent sample size.

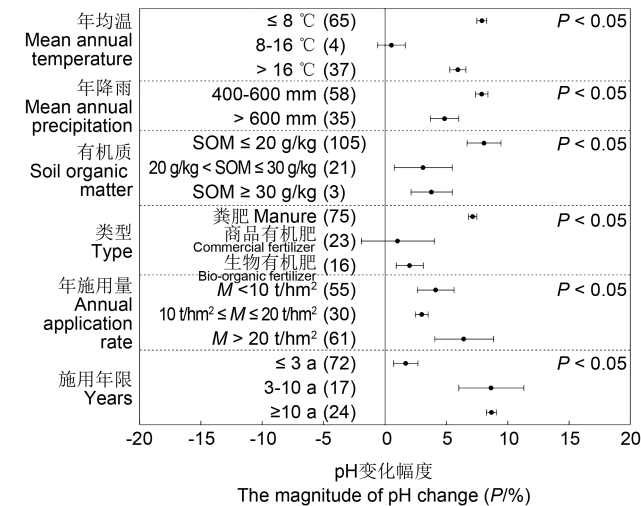


图3 酸性土壤下施用有机肥对土壤pH的影响。点和误差线分别代表增加的百分数及其95%的置信区间，如果95%的置信区间没有包含横坐标零点，表示处理与对照差异显著；括号内的数值代表样本数。

Fig. 3 Effect of organic fertilizer application on soil pH in acidic soil. The points and error lines represent the percent increase and their 95% confidence intervals, respectively. If the 95% confidence intervals do not include zero of the x-coordinate, the treatment and control are significantly different. The numbers in parentheses represent the number of samples.

年均温 $\leq 8^\circ\text{C}$ 时施用有机肥后可以显著提升土壤pH，其提升幅度为7.90%，较年均温 $> 16^\circ\text{C}$ 对土壤pH的提升幅度高2.94个百分点。年降水400-600 mm时施用有机肥后其土壤pH的增幅（7.89%）显著高于年降水 > 600 mm时土壤pH的增幅（4.85%）。在有机质含量不同的土壤中施用有机肥均能显著提升土壤pH，且在低有机质含量水平下对土壤pH增幅最大（8.07%），分别比中有机质含量水平土壤和高有机质含量水平土壤高4.97和4.29个百分点。对于不同有机肥来说，粪肥对土壤pH提升的效果（7.14%）显著高于生物有机肥（2.00%），且是生物有机肥的3.57倍。研究结果发现，酸性土壤条件下，施肥量和施肥年限不同，其对土壤pH的增幅也有显著差异。年施肥量 $> 20\text{ t/hm}^2$ 的土壤pH的增幅可达6.42%，显著高于年

施用量 $10\text{--}20\text{ t/hm}^2$ （2.99%）；中期施肥与长期施肥对土壤pH的提升幅度（8.67%和8.64%）显著高于短期施肥（1.68%）。因此，在酸性低水平有机质土壤中，长期施用高量粪肥对土壤pH增加效果更显著。

2.3 碱性土壤下施用有机肥对土壤pH的影响

与酸性土壤相似，有机肥施用于碱性土壤pH的变化也会因气候类型、土壤属性、农田管理措施的不同而表现出显著差异（图4）。

在碱性土壤（pH > 7 ）中，不同年均温条件下施用有机肥均显著降低土壤pH，年均温 $\leq 8^\circ\text{C}$ 时施用有机肥后可以显著降低土壤pH，其降低幅度为7.90%，较年均温 $> 16^\circ\text{C}$ 对土壤pH的降低幅度高5.95倍。年降水400-600 mm时施用有机肥后其土壤pH的降幅（6.11%）最为明显。在碱性土壤低有机质含量水平下施用有机肥，土壤pH显著下降4.07%；而在中有机质含量水平和高有机质含量水平土壤pH均无显著差异。结果表明，碱性土壤条件下，不同有机肥类型均能显著降低土壤pH，粪肥与商品有机肥对土壤pH降低幅度较大（3.48%和3.49%），是生物有机肥（0.97%）的3.60倍左右；有机肥年施用量在 $10\text{--}20\text{ t/hm}^2$ 和 $> 20\text{ t/hm}^2$ 对土壤pH的降幅均显著高于年施肥量 $< 10\text{ t/hm}^2$ （1.42%）。施用有机肥对土壤pH影响的效应大小会随着施用年限的延长而变化，中期施肥对土壤pH降低幅度更显著（11.41%），是长期施肥（7.82%）和短期施肥（1.44%）的1.46倍和7.92倍。因此，在碱性有机质水平低土壤条件下，中长期高量施用粪肥和商品有机肥对土壤pH降低效果更显著。

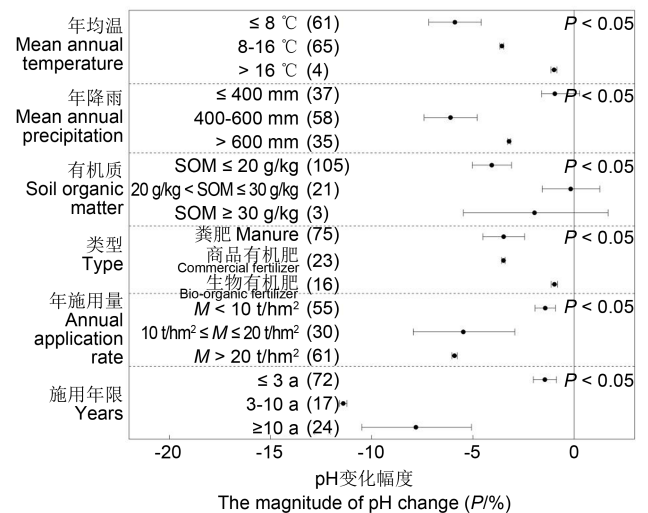


图4 碱性土壤下施用有机肥对土壤pH的影响。点和误差线分别代表增加的百分数及其95%的置信区间，如果95%的置信区间没有包含横坐标零点，表示处理与对照差异显著；括号内的数值代表样本数。

Fig. 4 Effect of organic fertilizer application on soil pH in alkaline soil. The points and error lines represent the percent increase and their 95% confidence intervals, respectively. If the 95% confidence intervals do not include zero of the x-coordinate, the treatment and control are significantly different. The numbers in parentheses represent the number of samples.

2.4 土壤pH变化的主要影响因素

在酸性土壤中有机肥施用年限、年均温、年降雨、有机肥年施用量和有机质含量对土壤pH的影响均达显著水平，且其相对贡献较高，超过11.87%，其中施肥年限是土壤pH最主要的影响因素，其相对解释率高达25.61%（图5）。在碱性土壤中年均温、有机肥年施用量、有机质和有机肥施用年限对土壤

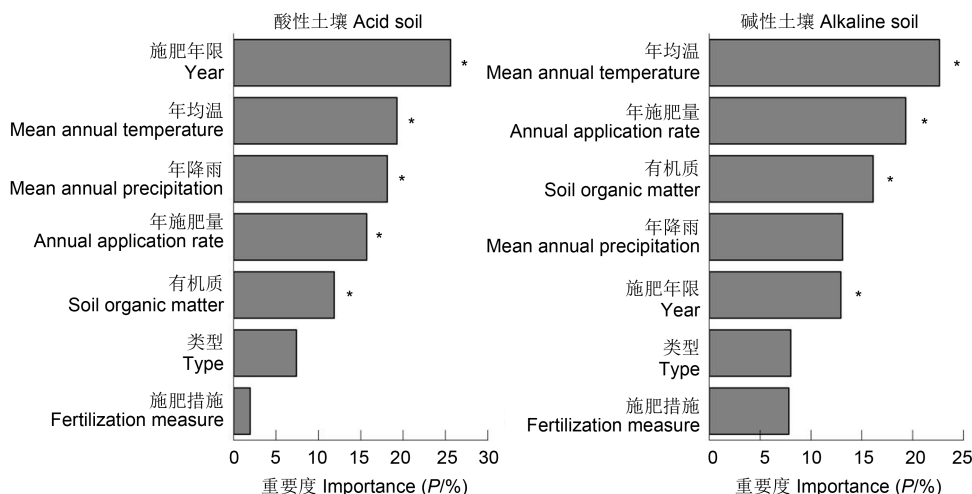


图5 有机肥影响土壤pH变化的主要因素. *代表显著.

Fig. 5 The main factors of organic fertilizer affecting soil pH changes. * stands for significant.

pH影响均显著; 且其重要度相对较高, 超过12.94%, 其中年均温是影响土壤pH最主要的因素, 其相对解释率高达22.65% (图5). 综上, 酸性土壤中有机肥施用年限是影响土壤pH的主控因素, 而碱性土壤中年均温是影响土壤pH的主控因素.

3 讨论

3.1 酸性土壤下土壤pH对施用有机肥的响应

本研究表明有机肥的施用可显著提高酸性土壤pH, 有效改善土壤酸化现象, 这与柳开楼等对中国南方稻田红壤长期施肥的研究结果^[38]一致. 这可能与以下几个原因有关: (1) 有机肥中的碱性物质可以中和土壤表层部分质子, 减少农作物收获后碱性物质的消耗, 从而避免农产品移除后土壤碱性物质的损失; (2) Cai等通过质子平衡计算研究表明, 在中国红壤上, 施用有机肥可以提供70%以上的氮源, 减少硝态氮的累积与淋溶损失, 从而缓解酸化作用^[39]; (3) 施入有机肥后其中的有机物质在矿化过程中, 产生大量有机酸和腐殖质, 这些物质与土壤中羟基铝、铁水合氧化物发生配位体交换, 从而消耗土壤中的 H^+ , 提高土壤pH^[40].

本研究发现, 年均温 $\leq 8^\circ C$ 、降雨量400-600 mm时, 施用有机肥后可以显著提升酸性土壤pH, 这可能由于有机肥中酸碱缓冲物质可以改善土壤pH, 因为低温降雨量适中条件下微生物活动减缓, 有机物质的分解速率较低^[41], 其酸碱缓冲物质在土壤中长期保留, 可以持久地改善土壤pH, 而降雨量较高时, 有机肥中酸碱缓冲物质易随地表径流淋失, 其改善效果较弱. 不同施肥措施下施用有机肥于酸性土壤中, 单施有机肥和有机无机配施均显著提高土壤的pH值, 单施有机肥效果更显著. 这与于冰等人研究结果^[42]一致, 造成这一现象的原因可能是有机无机配施的化肥中铵态氮或酰胺态氮肥的硝化作用释放氢离子, 一定程度降低了pH的提升幅度^[43]. 不同类型有机肥施用于酸性土壤中, 其对土壤pH的影响程度各不相同. 本研究结果表明在酸性土壤中施用粪肥较商品有机肥与生物有机肥能显著提升土壤pH, 原因可能是粪肥鲜基pH均属于碱性^[44], 而商品有机肥行业标准pH范围为5.5-8.5^[23], 粪肥能释放可交换性碱性阳离子, 可以通过脱羧和氨化过程, 消耗土壤中的 H^+ , 从而具有更强的酸化缓冲能力^[45]. 且不同类型

有机肥的碱度、纤维素、半纤维素、蛋白质和有机酸等含量存在变化, 同时数据收集资料显示, 粪肥年施肥量平均为17.01 t/hm², 而商品有机肥年施肥量平均为6.31 t/hm², 粪肥年施肥量远大于商品有机肥, 因此对pH值的影响程度不同. 酸性土壤条件下, 在有机质含量不同的土壤中施用有机肥均能显著提升土壤pH, 且在低有机质含量水平下对土壤pH增幅最大(8.07%). 这可能与有机肥施入土壤后, 土壤中有有机质含量增加有关, 土壤在pH 4.0-7.0范围内, 有机质中许多酸性官能团(如 $-COOH$ 和 $-OH$)解离后, 一方面, 有机阴离子质子化作用增强, 增加土壤酸性缓冲能力; 另一方面交换性碱性阳离子释放, H^+ 与碱性阳离子交换, 再与有机阴离子结合形成中性分子, 使土壤pH得到提高^[46]. 本研究中有有机肥年施用量超过20 t/hm²的土壤pH增幅最显著, 这与Liu等人施用有机肥对土壤生物化学性质影响的整合分析中得出调节适宜土壤pH的最佳年施肥量为25 t/hm²的结论^[46]具有一致性. 本研究发现, 长期施肥较短期施肥土壤pH提升幅度更显著, 这与陈红金等人研究结果^[47]一致, 这是因为有机肥对土壤pH长期效果受到其 H^+ 的消耗能力及硝化产生的酸的影响, 从而提升土壤pH. 随着施肥年限的增加, 有机肥中的有效成分能释放出来并长期吸附在土壤中, 因此在土壤施用有机肥后持续改善土壤的理化性状的作用可观, 但随着时间推移, 作物在生长过程中也会吸收有效成分, 从而降低有机肥含量, 降低盐基饱和度, 使增效降低^[48].

3.2 碱性土壤下土壤pH对施用有机肥的响应

土壤碱化是由土壤中碱性盐的积累引起的, 有效改良碱性土壤的方法是降低碱性盐基离子的活性. 本研究结果显示有机肥施用显著降低了碱性土壤的pH, 土壤盐渍化程度得到明显改善. Chintala等研究表明施用有机肥可以有效降低土壤中金属离子的活性, 例如 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 等, 从而降低土壤pH^[49]. 过去的研究发现有机肥中含有腐殖类物质, 是一种有机酸, 可与土壤中阳离子结合生成腐殖酸盐如硝基腐殖酸铵、硝基腐殖酸, 形成腐植酸-腐植酸盐相互转化的缓冲系统, 这种相互转化的缓冲结构具有有效调节土壤酸碱缓冲的能力^[50-51].

类似于酸性土壤, 年均温 $\leq 8^\circ C$ 、降雨量400-600 mm时,

施用有机肥也可以显著改善碱性土壤pH,其原因与酸性土壤类似。本研究显示在低有机质含量土壤中施用有机肥能显著降低土壤pH。这可能由于有机肥中富含大量的有机质和无机养分,为土壤微生物活动提供营养物质,提高土壤养分利用水平,而微生物分解有机质的过程中产生的有机酸可对碱性土壤pH起到缓冲或调节作用^[13]。粪肥和商品有机肥均可显著降低碱性土壤pH,但二者对pH的降低幅度无显著差异,这可能是因为粪肥虽然较商品有机肥具有较高含量的有机质^[23, 52],能分解产生较多腐殖酸,其本身或与土壤中金属离子结合对土壤pH降低幅度更大,但粪肥本身pH高于商品有机肥,一定程度减少了粪肥对pH的降低幅度,导致pH的降幅在两种有机肥之间无显著差异。相比于粪肥和商品有机肥,生物有机肥的施用对土壤pH的改善效果较差,这可能是因为生物有机肥本身对盐碱土壤有较高酸碱缓冲性能,所以不会使得土壤pH值发生剧烈的改变^[53]。随有机肥的投入量增加,碱性土壤pH下降幅度随之增加,这与胡诚等人的研究结果(碱性土壤pH值随有机肥年施用量增加而降低)^[20]一致。此外,长、中、短期施肥均能显著降低碱性土壤pH,但中长期降幅最大。过去的研究也发现,有机肥中所含的腐殖酸、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^[54-55],此外,有机肥富含有机质与无机养分,具有较强的吸附性与保肥能力,对土壤pH起到酸碱缓冲作用,不会发生较为剧烈的变化。

4 结论

基于相关文献采用Meta分析方法从气候、土壤pH水平、有机肥类型、施肥量、施肥年限等方面定量阐述了施用有机肥对我国农田土壤pH的影响,主要结论如下。

(1) 在年均温 $\leq 8^{\circ}\text{C}$ 、降雨量400-600 mm的地区,有机肥施用对酸性及碱性土壤pH改良效果均最显著。因此,在我国类似气候区施用有机肥可有效改善土壤pH,进而根据不同的气候特征选择合适有机肥进行调整。

(2) 在酸性低水平有机质土壤中,长期施用高量粪肥对土壤pH增加效果最大。在碱性有机质水平低土壤条件下,中长期高量施用粪肥和商品有机肥对土壤pH降低效果最显著。因此,应根据不同酸碱度土壤肥力水平选择不同类型及用量的有机肥,以改善土壤pH。

(3) 在酸性和碱性土壤中影响pH变化的主控因素并不同,酸性土壤中的主控因素是有机肥施用年限,碱性土壤中的主控因素是年均温。

本研究发现有有机肥施用可以有效改善不同酸碱度土壤,且改良效果受多种环境因素影响,可为优化施肥提供一定基础。进一步的研究应针对我国因pH过酸过碱导致的中低产田,从不同的田间管理措施入手,开展土壤治理的研究工作,为改善我国中低产田土壤质量及制定因地制宜的配套措施提供相关的理论依据。

参考文献 [References]

- 毛伟, 郁洁, 李文西, 左文刚, 仇美华, 张丽, 范新会, 陈明, 王绪奎, 柏彦超. 近40年江苏农田土壤pH时空变化特征及驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, **29** (2): 264-272 [Mao W, Yu J, Li WX, Zuo WG, Qiu MH, Zhang L, Fan XH, Chen M, Wang XK, Bai YC. Spatial and temporal variation of cropland pH and the driving factors in Jiangsu over the past 40 years [J]. *J Plant Nutr*, 2023, **29** (2): 264-272]
- Li SL, Liu YQ, Wang J, Yang L, Zhang ST, Xu C, Ding W. Soil acidification aggravates the occurrence of bacterial wilt in south China [J]. *Front Microbiol*, 2017, **8** (1): 703-714
- 陈瑞燕, 韩晶晶, 邢波, 滕凯玲, 周华. 亚热带东部稻田土壤酸缓冲性能与酸化特点研究[J]. 三峡生态环境监测, 2023, **8** (2): 100-111 [Chen RY, Han JJ, Xing B, Teng KL, Zhou H. Acid buffering and acidification characteristics of farmland soils in the eastern subtropical zone [J]. *Ecol Environ Monitor Three Gorg*, 2023, **8** (2): 100-111]
- 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 GH, Mai WX, Tian CY. Effects of organic fertilizer application on the improvement of saline soils: meta analysis [J]. *J Agric Resour Environ*, 2023, **40** (1): 86-96]
- 张瀚口, 胡斌, 包维楷, 李贵利, 潘宏兵, 杜邦. 攀枝花地区芒果园土壤pH现状及变化趋势[J]. 应用与环境生物学报, 2020, **26** (1): 63-73 [Zhang HY, Hu B, Bao WK, Li GL, Pan HB, Du B. Current status and change tendency of soil pH in mango orchards in Panzhihua City, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2020, **26** (1): 63-73]
- 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, Gilles C. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21** (6): 1615-1621 [Zhou XY, Xu MG, Zhou SW, Colinet G. Soil acidification characteristics in southern China's croplands under long-term fertilization [J]. *J Plant Nutr*, 2015, **21** (6): 1615-1621]
- 徐明岗, 文石林, 周世伟, 孙楠. 南方地区红壤酸化及综合防治技术[J]. 科技创新与品牌, 2016, **109** (7): 74-77 [Xu MG, Wen SL, Zhou SW, Sun N. Acidification of red soils in the southern region and integrated control techniques [J]. *Sci-Tech Innov Brand*, 2016, **109** (7): 74-77]
- Dai ZM, Zhang XJ, Tang C, Muhammad N, Wu JJ, Brookes PC, Xu JM. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-a critical review [J]. *Sci Total Environ*, 2017, **582** (1): 601-611
- 李娟, 韩慧, 常少刚, 李颖, 王竞, 王锐, 孙权. 羊粪有机肥施用量对沙地甘蓝生长和产量及土壤化学性质的影响[J]. 上海农业学报, 2019, **35** (6): 97-101 [Li J, Han H, Chang SG, Li Y, Wang J, Wang R, Sun Q. Effects of sheep manure organic fertilizer application rate on growth, yield of Brassica oleracea and soil chemical properties in sandy land [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2019, **35** (6): 97-101]
- 美丽, 红梅, 刘鹏飞, 赵巴音那木拉, 德海山, 李志新. 有机肥施用对农田中小型土壤动物群落的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018, **277** (5): 154-162 [Mei L, Hong M, Liu PF, Zhao BYNML, De HS, Li ZX. Impact of organic fertilizer on cropland soil mesofauna community in the black soil area [J]. *Soil Fert Sci China*, 2018, **277** (5): 154-162]
- 胡天睿, 蔡泽江, 王伯仁, 张璐, 文石林, 朱建强, 徐明岗. 有机肥替代化学氮肥提升红壤抗酸化能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, **28** (11): 2052-2059 [Hu TR, Cai ZJ, Wang BR, Zhang L, Wen SL, Zhu JQ, Xu MG. Swine manure as part of the total N source improves red soil resistance to acidification [J]. *J Plant Nutr*, 2022, **28** (11): 2052-2059]
- 司海丽, 纪立东, 刘菊莲, 柳晓桐, 郑淑欣. 有机肥施用量对玉米产量、土壤养分及生物活性的影响[J]. 西南农业学报, 2022, **35**

- (4): 740-747 [Si HL, Ji LD, Liu JL, Liu XT, Zhang SX. Effects of organic fertilizer application rate on maize yield, soil nutrients and biological activity [J]. *SW Chin J Agric Sci*, 2022, **35** (4): 740-747]
- 13 施梦馨, 王豪吉, 土馨雨, 马佳轮, 朱兴果, 白雪, 官会林, 徐武美. 施用有机肥对碱性土壤理化特征与作物生长的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2022, **42** (1): 50-57+63 [Shi MX, Wang HJ, Tu XY, Ma JL, Zhu XG, Bai X, Guan HL, Xu WM. Effects of the application of organic fertilizer on the alkaline soil properties and crop growth [J]. *J Yunnan Nor Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, **42** (1): 50-57+63]
- 14 王占海, 王环, 马秀芳, 王勤礼, 王增君. 盐碱地中增施生物有机肥对玉米产量及土壤理化性质的影响[J]. 现代化农业, 2022, **518** (9): 21-23 [Wang ZH, Wang H, Ma XF, Wang QL, Wang ZJ. Effect of additional bio-organic fertilizer application on maize yield and soil physicochemical properties in saline soils [J]. *Mod Agric*, 2022, **518** (9): 21-23]
- 15 柳开楼, 韩天富, 胡惠文, 黄庆海, 余喜初, 李大明, 叶会财, 胡志华. 红壤旱地玉米开花期土壤酶活性对长期施肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24** (6): 1610-1618 [Liu KL, Han TF, Hu HW, Huang QH, Xu XC, Li DM, Ye HC, Hu ZH. Response of soil enzyme activity in flowering stages of maize to long-term fertilization in red soil [J]. *J Plant Nutr*, 2018, **24** (6): 1610-1618]
- 16 肖辉, 潘洁, 程文娟, 王立艳. 不同有机肥对设施土壤全盐累积与pH值变化的影响[J]. 中国农学通报, 2014, **30** (2): 248-252 [Xiao H, Pan J, Cheng J, Wang LY. Effect of organic fertilizer on soil salt accumulation and pH changes in greenhouse [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, **30** (2): 248-252]
- 17 李晓亮, 余小兰, 戚志强, 杜公福, 杨衍. 海南有机肥替代氮肥对辣椒生长和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, **291** (1): 151-155 [Li XL, Yu XL, Qi ZQ, Du GF, Yang Y. Study on the effect of organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer on growth and quality of pepper in Hainan province [J]. *Soil Fert Sci China*, 2021, **291** (1): 151-155]
- 18 王伟, 李明, 张文慧, 韩毅强, 柳苗苗, 杜吉到. 不同改良措施对盐碱地芸豆生长及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, **30** (1): 1-7+16 [Wang W, Li M, Zhang WH, Han YQ, Liu MM, Du JD. Effect of the improvement measures on growth and yield of kidney beans in saline-alkali soil [J]. *J Heilongjiang Bayi Agric Univ*, 2018, **30** (1): 1-7+16]
- 19 张秀志, 郭甜丽, 焦学艺, 刘晨露, 李宇星, 马锋旺, 符轩畅, 李翠英. 商品有机肥配施对果园土壤肥力和‘蜜脆’苹果果实品质的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, **44** (1): 65-74 [Zhang XZ, Guo TL, Jiao XY, Liu CL, Li YX, Ma FW, Fu XC, Li CY. Effects of combined application of commercial organic fertilizer on soil fertility and fruit quality of ‘Honeycrisp’ apple [J]. *J SW Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, **44** (1): 65-74]
- 20 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 马永良. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, **59** (3): 48-51 [Hu C, Cao ZP, Luo YR, Ma YL. Effect of long-term application of microorganismic compost or vermicompost on soil fertility and microbial biomass carbon [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2007, **59** (3): 48-51]
- 21 于菲, 赵硕, 赵影, 汪勇, 范益恺, 孟庆峰. 长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土肥力和玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, **40** (2): 172-180 [Yu F, Zhao S, Zhao Y, Wang Y, Fan YK, Meng QF. Effects of long-term application of cattle manure on soil fertility and corn yield of saline-sodic soil in western Songnen Plain [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2022, **40** (2): 172-180]
- 22 GB NY-884-2021. 生物有机肥 [GB NY-884-2021. Bio-organic Fertilizer]
- 23 GB NY-525-2021. 有机肥料 [23GB NY-525-2021. Organic fertilizer]
- 24 Zhao X, He C, Liu WS, Liu WX, Liu QY, Bai W, Li LJ, Lal R, Zhang HL. Responses of soil pH to no-till and the factors affecting it: a global meta-analysis [J]. *Glob Chang Biol*, 2022, **28** (1): 154-166
- 25 Yin MH, Ma YL, Kang YX, Jia Q, Qi GP, Wang JH, Yang CK, Yu JX. Optimized farmland mulching improves alfalfa yield and water use efficiency based on meta-analysis and regression analysis [J]. *Agric Water Manag*, 2022, **267** (1): 107617
- 26 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 徐璐瑶, 邓建军, 焦加国. 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 YB, Li P, Wang SH, Xu LY, Deng JJ, Jiao JG. Effects of organic fertilizer application on crop yield and soil properties in rice-wheat rotation system: a meta-analysis [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, **32** (9): 3231-3239]
- 27 刘丽媛, 徐艳, 朱书豪, 高艺, 郑向群. 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 LY, Xu Y, Zhu SH, Gao Y, Zheng XQ. Meta-analysis on the responses of soil bulk density to supplementation of organic fertilizers in croplands in China [J]. *J Agric Resour Environ*, 2021, **38** (5): 867-873]
- 28 Augusto L, Bakker MR, Meredieu C. Wood ash applications to temperate forest ecosystems-potential benefits and drawbacks [J]. *Plant Soil*, 2008, **306** (1): 181-198
- 29 Kabała C, Muszyfaga E, Gałka B, Łabuńska D, Mańczyńska, P. Conversion of soil pH 1:2.5 KCl and 1:2.5 H₂O to 1:5 H₂O: conclusions for soil management, environmental monitoring, and international soil databases [J]. *Pol J Environ Stud*, 2016, **25** (1): 647-653
- 30 Hedges LV, Gurevitch J, Curtis PS. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, **80** (4): 1150-1156
- 31 Curtis PS, Wang X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology [J]. *Oecologia (Berlin)*, 1998, **113** (3): 299-313
- 32 Pallmann P. Applied meta-analysis with R [J]. *J Appl Stat*, 2015, **42** (4): 914-915
- 33 Liu C, Lu M, Cui J, Li B, Fang C. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [J]. *Glob Chang Biol*, 2014, **20** (5): 1366-1381
- 34 何寒青, 陈坤. Meta分析中的异质性检验方法[J]. 中国卫生统计, 2006, **23** (6): 486-487 [He HQ, Chen K. Methods for measuring heterogeneity in a meta-analysis [J]. *Chin J Health Stat*, 2006, **23** (6): 486-487]
- 35 Taova S. Get Data Digitizing Program Code: Description, Testing, Training [M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, International Nuclear Data Committee, 2013
- 36 Rosenberg MS, Adams DC, Gurevitch J. Metawin: Statistical Software for Meta-analysis with Resampling Tests [M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc, 1997
- 37 Breiman L. Random forests [J]. *Mach Learn*, 2001, **45** (1): 5-32
- 38 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 余喜初, 叶会财, 徐小林, 胡慧文, 王赛莲. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学, 2014, **47** (2): 303-313 [Lou KL, Li DM, Huang QH, Yu XC, Ye HC, Xu XL, Hu HW, Wang SL. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments [J]. *Sci Agric Sin*, 2014, **47** (2): 303-313]
- 39 Cai ZJ, Wang BR, Xu MG, Zhang HM, He XH, Zhang L, Gao

- SD. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China [J]. *J Soils Sed*, 2015, **15** (2): 260-270
- 40 Mokolobate MS. An Evaluation of the Use of Organic Amendments to Ameliorate Aluminum Toxicity and Phosphorus Deficiency in an Acid Soil [M]. Pietermaritzburg: University of Natal, 2001
- 41 徐明岗, 张文菊, 杨学云. 农田土壤有机质提升理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2022 [Xu MG, Zhang WJ, Yang XY. Theory and Practice of Farmland Soil Organic Matter Improvement [M]. Beijing: Science Press, 2022]
- 42 于冰, 宋阿琳, 李冬初, 王伯仁, 范分良. 长期施用有机和无机肥对红壤微生物群落特征及功能的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, **272** (6): 58-65 [Yu B, Song AL, Li DC, Wang BR, Fan FL. Influences of long-term application of organic and inorganic fertilizers on the structure and function of microbial community in red soil [J]. *Soil Fert Sci China*, 2017, **272** (6): 58-65]
- 43 李佳乐, 梁泳怡, 刘文杰, 杨秋, 徐文娴, 汤水荣, 王晶晶. 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗生长和土壤环境的影响[J]. 应用生态学报, 2022, **33** (2): 431-438 [Li JL, Liang YY, Liu WJ, Yang Q, Xu WX, Tang SR, Wang JJ. Effects of manure substituting chemical nitrogen fertilizer on rubber seedling growth and soil environment [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2022, **33** (2): 431-438]
- 44 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999 [National Center for Agricultural Technology Extension Service. Nutrient Journal of Organic Fertilizers in China [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999]
- 45 Cai ZJ, Wang BR, Xu MG, Zhang HM, He XH, Zhang L, Gao SD. Nitrification and acidification from urea application in red soil (ferralsol cambisol) after different long-term fertilization treatments [J]. *J Soils Sed*, 2014, **14** (9): 1526-1536
- 46 Liu SB, Wang JY, Pu SY, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y, Razavi Bahar S. Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis [J]. *Sci Total Environ*, 2020, **745** (2): 141003
- 47 陈红金, 章日亮, 吴春艳. 长期施用有机肥对稻田的改良培肥效应[J]. 浙江农业科学, 2019, **60** (8): 1356-1359 [Chen HJ, Zhang RL, Wu CY. Effect of long-term organic fertilization on paddy soil fertility [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2019, **60** (8): 1356-1359]
- 48 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010 [Cai ZJ. Acidification characteristics of red soil under long-term fertilization and effect factors [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Master Dissertation, 2010]
- 49 Chintala R, Mollinedo J, Schumacher TE, Douglas D. Malo, James L. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil [J]. *Arch Agrono Soil Sci*, 2014, **60** (3): 393-404
- 50 杨惠婷. 灵芝渣有机肥制备及对盐碱土改良效果研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022 [Yang HT. Preparation of organic fertilizer from Ganoderma lucidum residue and its improvement effect on saline-alkali soil [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022]
- 51 陈静, 黄占斌. 腐植酸在土壤修复中的作用[J]. 腐植酸, 2014, **5** (4): 30-34+65 [Chen J, Huang ZB. Effect of humic acid on soil restoration [J]. *Humic Acid*, 2014, **5** (4): 30-34+65]
- 52 徐明岗. 农田土壤有机质提升理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2022 [Xu MG. Theory and Practice of Farmland Soil Organic Matter Enhancement [M]. Beijing: Science Press, 2022]
- 53 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 [Liu GW. 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]
- 54 张金柱, 郭春景, 张兴, 王金刚, 车代弟. 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 JZ, Guo CJ, Zhang X, Wang JG, Che DD. Improving effect of microbial organic fertilizer on physical and chemical properties of saline-alkaline soil [J]. *Hubei Agric Sci*, 2008, **47** (12): 1420-1422]
- 55 杨文叶, 季淑枫, 李丹, 周航, 王京文. 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 WY, Ji SF, Li D, Zhou H, Wang JW. Effect of continuous application of commercial organic manure on farmland quality and vegetable yield [J]. *J Agric Resour Environ*, 2014, **31** (4): 319-322]