

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.011

段顺霞,刘嘉元,赵宏祥,等.基于 Meta 分析的黄土高原苹果园土壤改良措施效果评价[J].水土保持学报,2024,38(6):302-309.

DUAN Shunxia, LIU Jiayuan, ZHAO Hongxiang, et al. Evaluation of the effectiveness of soil improvement measures in apple orchards on the Loess Plateau: A meta-analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 302-309.

基于 Meta 分析的黄土高原苹果园土壤改良措施效果评价

段顺霞^{1,2,3}, 刘嘉元⁴, 赵宏祥⁵, 李秧秧^{2,5}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.中国科学院大学,北京 100049;4.河海大学浅湖综合调控与资源开发教育部重点实验室,南京 210098;5.黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,西北农林科技大学,陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 黄土高原苹果园直接面临土壤酸化、结构恶化、肥力退化及保水能力差等问题,有效的土壤改良技术对改善黄土高原苹果园土壤质量、促进果园的健康和可持续发展至关重要。[方法] 基于黄土高原苹果园土壤改良的 75 篇文献 1 302 对田间试验数据,采用 Meta 分析和主成分分析(PCA)定量评估不同改良方式(覆盖、施肥和土壤改良剂)对土壤质量的改善效果。[结果] 生草覆盖、地膜覆盖、秸秆覆盖和砂砾覆盖降低土壤质量密度效果良好,降低幅度分别为 6.63%,5.96%,6.04%,6.40%,其中,生草覆盖和秸秆覆盖还能够有效改善土壤养分含量。化肥可以有效提高土壤速效氮(111.17%)、速效磷(112.29%)和速效钾(43.95%)含量;有机肥不仅可以改善土壤速效养分,而且能够显著增加土壤有机质(57.19%)、全氮(57.64%)和硝态氮(94.51%)含量;有机肥化肥配施对质量密度(5.58%)和土壤养分含量均显著改善。保水剂在降低质量密度(4.88%)和增加全氮(40.90%)、硝态氮(143.51%)含量方面效果良好;而生物炭对有机质(39.35%)、硝态氮(91.23%)和速效磷(89.70%)含量有显著提高作用。土壤质量评价结果表明,各种改良措施下的土壤质量指数(SQI)依次为 7.72(有机肥)>7.68(秸秆覆盖)>7.20(有机肥化肥配施)>6.05(保水剂)>5.99(生草覆盖)>5.94(生物炭)>5.79(化肥)>3.53(地膜覆盖)>2.63(砂砾覆盖)。[结论] 综合考虑苹果园土壤质量和苹果产量现实条件,建议秸秆覆盖和有机肥化肥配施作为改良果园土壤的优先措施,其次为有机肥和生草覆盖。

关键词: Meta 分析; 土壤质量评价; 覆盖; 施肥; 土壤改良剂

中图分类号: S156.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)06-0302-08

Evaluation of the Effectiveness of Soil Improvement Measures in Apple Orchards on the Loess Plateau: A Meta-Analysis

DUAN Shunxia^{1,2,3}, LIU Jiayuan⁴, ZHAO Hongxiang⁵, LI Yangyang^{2,5}

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Soil acidification, structure and fertility degradation and poor water-holding capacities are common problems in the apple orchard on the Loess Plateau, effective soil improvement techniques are crucial for enhancing soil quality, and promoting the healthy and sustainable development of the orchards. [Methods] Based on 75 publications and 1 302 field trial datasets on soil improvement in the apple orchards of the Loess Plateau, meta-analysis and principal component analysis (PCA) were used to quantitatively evaluate the effects of different improvement measures, including mulching, fertilization, and soil

收稿日期:2024-06-11 修回日期:2024-07-18 录用日期:2024-07-20 网络首发日期(www.cnki.net):2024-11-19

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0115300)

第一作者:段顺霞(1999—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤质量评价研究。E-mail:duanshunxia@163.com

通信作者:李秧秧(1967—),女,博士,研究员,主要从事土壤—植物系统物质运移研究。E-mail:yyli@ms.iswc.ac.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

conditioners, on soil quality. [Results] The results indicated that grass mulching, plastic film mulching, straw mulching, and gravel mulching effectively reduced soil bulk density by 6.63%, 5.96%, 6.04%, and 6.40%, respectively. Additionally, grass mulching and straw mulching also significantly increased soil nutrient contents. Chemical fertilizer effectively increased available nitrogen (by 111.17%), available phosphorus (by 112.29%), and available potassium (by 43.95%), respectively. Organic fertilizer not only increased soil available nutrients, but also significantly increased soil organic matter (by 57.19%), total nitrogen (by 57.64%), and nitrate-nitrogen (by 94.51%). Combined application of organic and inorganic fertilizer significantly reduced soil bulk density (5.58%) and increased nutrient contents. Water-retaining agents effectively reduced soil bulk density (by 4.88%), increased total nitrogen (by 40.90%) and nitrate-nitrogen (by 143.51%). Biochar significantly increased soil organic matter (by 39.35%), nitrate-nitrogen (by 91.23%), and available phosphorus (by 89.70%). Soil quality assessment results indicated that soil quality index (SQI) ranked as 7.72 (organic fertilizer) > 7.68 (straw mulching) > 7.20 (organic-inorganic fertilizer) > 6.05 (water-retaining agent) > 5.99 (grass mulching) > 5.94 (biochar) > 5.79 (chemical fertilizer) > 3.53 (plastic film mulching) > 2.63 (gravel mulching). [Conclusion] Considering the practical conditions of soil quality and apple orchards yields, it is suggested that straw mulching and combined application of organic and inorganic fertilizer should be prioritized as measures to improve orchard soil quality, followed by organic fertilizers and grass mulching.

Keywords: Meta-analysis; soil quality assessment; mulching; fertilization; soil amendment

Received: 2024-06-11

Revised: 2024-07-18

Accepted: 2024-07-20

Online(www.cnki.net): 2024-11-19

黄土高原因其独特的地理位置和气候条件成为世界苹果优生区和主产区之一,其苹果产量和种植面积均超全球的 25%^[1]。然而,长期以来的清耕管理和不合理的施肥方式导致该地区苹果园土壤面临土壤表层裸露、水分蒸发加剧、土壤酸化、结构恶化及肥力退化等问题^[2]。如何改良土壤,促进苹果产业健康可持续发展是生产上面临的突出问题。

目前,该地区果农普遍采取生草覆盖、秸秆覆盖、地膜覆盖和砂砾覆盖等节水保墒措施,以改善土壤物理状态、稳定土壤结构,并协调水肥气热供应^[3]。在施肥技术方面,为提高苹果产量而过量施肥的现象普遍存在,导致土壤酸化、土壤硝态氮累积和氮肥利用率低等问题^[4]。尽管有机肥具有减少化肥用量、提高土壤肥力、改善土壤理化性质、促进酶活性和微生物群落结构等优点,但单一施用有机肥可能无法满足果树在关键时期的养分需求。有机肥化肥配施被视为一种综合的绿色农业生产技术,对实现农业生产系统的环境可持续性至关重要^[5]。土壤改良剂包括生物炭和保水剂也在局部使用。生物炭是一种稳定的、富含碳的产物,在缺氧条件下由生物质(如农业和林业废弃物)热解形成,具有强大的保水和养分供应能力^[6]。土壤添加生物炭能够促进土壤团聚体的形成,增加土壤 pH 和阳离子交换量,有效提高土壤有机质及氮、磷、钾的有效性,并改善微生物群落的结构和丰

度^[7]。保水剂掺入土壤可以降低土壤质量密度,增加土壤团聚性、透气性、孔隙度和保水能力^[8]。目前针对不同土壤改良方式(覆盖、施肥和改良剂)对苹果园土壤质量改良效果大多是在单一试验条件下进行的,缺乏基于大量试验数据的综合评估。因此,本研究通过综合搜集现有文献,运用 Meta 分析的方法,对不同土壤改良措施对黄土高原苹果园土壤质量影响进行评估。研究结果对于苹果园土壤管理、苹果产量和品质提升及果园生态系统稳定性和农业可持续发展具有重要价值。

1 材料与方法

1.1 数据采集

为了确定相关文献,在 Web of Science 核心数据库和中国知网(CNKI)核心数据库中搜索截至 2024 年 5 月公开发表的期刊文献。中文搜索检索式为“苹果园 AND 土壤 AND(恢复 OR 覆盖 OR 肥料 OR 施肥 OR 化肥 OR 有机肥 OR 无机肥 OR 氮肥 OR 磷肥 OR 钾肥 OR 保水剂 OR 生物炭)”。英文以“apple orchard AND soil AND (restor * OR rehab * OR reclam * OR cover crop OR fertilizer OR organic fertilizer OR chemical fertilizer OR inorganic fertilizer OR nitrogen * fertilizer OR phosph * fertilizer OR potas * fertilizer OR biochar OR aquasorber)”检索式进行检索。

该 Meta 分析所选取的研究,必须满足的标准为:(1)选择的文献必须是黄土高原苹果园田间试验,且至少有 1 对数据(无改良对照和土壤改良处理);(2)对照组(CK)和处理地块具有相同的条件(即气候、光照和土壤类型等);(3)如果试验在多个站点、改良方式或处理年限进行,则将其视为独立观察;(4)土层深度包括 0—20 cm,通过直接或间接计算而得;(5)收集样本个数、样本平均值及标准差或标准误,图表中的数据使用 WebPlotDigitizer 4.6 软件提取。

根据上述标准,最终收集 75 篇文献 1 302 个成对观察数据,涵盖 3 种改良方式下 9 种改良措施,跨越 4 个省 24 个市(105°43′—111°13′E,34°16′—38°28′N),涉及 11 种土壤类型,海拔 525~1 700 m,年平均降水量 180~721 mm,年平均气温 7.1~14.2 °C。每项研究收集土壤质量密度(BD, g/cm³)、土壤含水量(SWC, %)、pH、土壤有机质(SOM, g/kg)、全氮(TN, g/kg)、速效氮(AN, mg/kg)、硝态氮(NO₃⁻-N, mg/kg)、铵态氮(NH₄⁺-N, mg/kg)、全磷(TP, g/kg)、速效磷(AP, mg/kg)、全钾(TK, g/kg)和速效钾(AK, mg/kg)等土壤性质。黄土高原不同改良方式的研究地点分布见图 1。

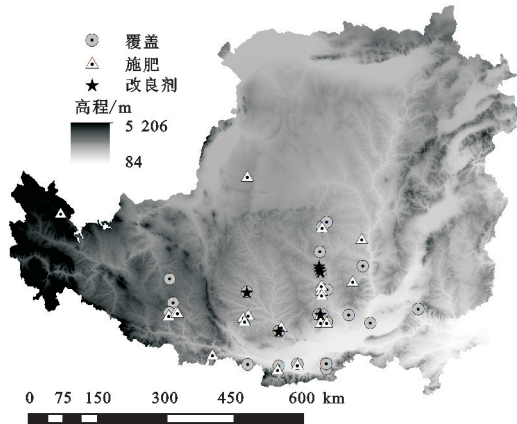


图 1 黄土高原不同改良方式的研究地点分布

Fig.1 Distribution of study sites under different improvement measures on the Loess Plateau

1.2 分析方法

土壤有机质的计算公式^[9]为:

$$SOM = SOC / 0.58 \quad (1)$$

式中:SOM 为土壤有机质含量(g/kg);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg)。

土壤全氮含量的换算公式^[10]为:

$$TN = \frac{Stock_{TN} \times 10}{BD \times H} \quad (2)$$

式中:TN 为土壤全氮含量(mg/kg);Stock_{TN} 为全氮储量(mg/hm²);BD 为土壤质量密度(g/cm³);H 为土层深度(cm)。

本次收集的 SOC 含量均 < 60 g/kg,故在无 BD 数据时采用公式(3)进行 BD 的换算^[11]:

$$BD = -0.1229 \times \ln(SOC) + 1.2901 \quad (3)$$

如果文献未报告标准差和标准误,则将样本平均值的 1/10 作为标准差^[10]。根据文献提供的标准误和样本量,计算公式为:

$$SD = \sqrt{N} \times SE \quad (4)$$

式中:SD 为标准差;N 为样本数量;SE 为标准误。

进行 Meta 分析时,用效应值表示土壤改良对土壤理化性质的影响。单个观察的效应大小通过公式(5)计算:

$$y_i = \ln RR = \ln \frac{x_t}{x_c} \quad (5)$$

式中:ln RR 为单个观察的效应大小; x_t 和 x_c 分别为试验组和对照组(CK)的平均值。

单个观察的组内方差(v_i)计算为:

$$v_i = \frac{SD_t^2}{n_t \times x_t^2} + \frac{SD_c^2}{n_c \times x_c^2} \quad (6)$$

式中:SD_t 和 SD_c 分别为试验组和对照组的组内标准差; n_t 和 n_c 分别为试验组和对照组的样本量。计算单个 ln RR 的权重(w_i)、总体效应大小(ln RR₊₊)及其相关的 95% 置信区间(95% CI)的公式为:

$$w_i = \frac{1}{v_i + \tau^2} \quad (7)$$

$$\ln RR_{++} = \sum_{i=1}^k \frac{w_i y_i}{w_i} \quad (8)$$

$$SE_M = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i}} \quad (9)$$

$$95\% CI = (\ln RR_{++}) \pm 1.96 SE(\ln RR_{++}) \quad (10)$$

式中: v_i 为单个观察的组内方差; τ^2 为单个观察的组间方差; y_i 为单个观察的效应值;RR₊₊ 为总体效应值;SE 为单个观察的标准误;CI_{lower} 和 CI_{upper} 分别为 95% 置信区间的下限和上限。

为了更好地解释结果,使用公式(11)对 ln RR₊₊ 和 95% CI 进行反变换:

$$P = (e^{\ln RR_{++}} - 1) \times 100 \quad (11)$$

式中:P 为效应值的反变换值。

1.3 Meta 分析

使用 SPSS 26.0 软件进行主成分分析,Origin 2021 软件绘图,R 4.3.2 软件“metafor”包进行效应大小的计算。为了便于解释,使用 ln RR 及其对应的置信区间(CI)作为效应大小的度量。如果 ln RR 的 95% 置信区间与零刻度线不重叠,则说明土壤改良对该变量的影响在 $\alpha=0.05$ 水平上显著。根据表 1 的数据分类

情况对数据进行亚组分析及土壤质量评价。

最后,使用 R 4.3.2 软件“metafor”包中的“funnel”函数和失安全系数(Fail-safe N)进行发表偏倚检验。由表 2 可知,检验结果表明,Fail-safe N 均大于临界值(5k+10),并且漏斗图没有明显的不对称性($p>0.05$)。因此,认为本研究不存在发表偏倚。

表 2 发表偏倚检验

Table 2 Publication bias test

指标	BD	SOM	TN	AN	NO ₃ ⁻ -N	AP	AK
Fail-safe N	7 024	284 995	143 709	171 334	5 990 563	1 205 120	2 332 266
临界值	345	860	655	635	540	880	605
<i>p</i>	0.52	0.08	0.10	0.11	0.42	0.34	0.28

1.4 土壤质量指数(SQI)的计算

土壤质量指数(SQI)是一种综合评价土壤质量状况的指标体系。传统 SQI 的计算方法是由试验测量的土壤指标,通过构建数据集,计算得到一个综合数值,即 SQI。XUE 等^[12]研究发现,用基于 Meta 分析效应值计算的 SQI 与传统 SQI 呈显著正相关,表明 Meta 分析可以在灵敏度和准确性上较好地量化土壤质量的变化。本研究利用 Meta 分析效应值计算 SQI 的步骤为:(1)通过判断土壤改良措施对收集的 12 个土壤性质的影响是否显著,确定指标的最小数据集(MDS),最终选择 7 个指标作为 MDS 指标;(2)本研究中 BD 为递减型(less is better)指标,其他土壤性质为递增型(more is better)指标^[13]。将递增型指标和递减型指标组成的 MDS 应用线性方法进行标准化,并通过主成分分析(PCA)选择特征值 ≥ 1 的因子进行权重计算^[14];(3)运用加权平均法将标准化后的得分综合成一个 SQI。最后,根据康奈尔土壤健康评价^[15],将土壤质量根据 SQI 划分为 3 个等级,分别为较差(SQI<4)、一般(SQI=4~6)、良好(SQI>6)。指标标准化计算公式^[9-10]为:

$$f(x) = 0.1 + 0.9 \times \frac{x - L_1}{U_1 - L_1}, L_1 \leq x \leq U_1 \quad (12)$$

$$f(x) = 1.0 - 0.9 \times \frac{x - L_2}{U_2 - L_2}, L_2 \leq x \leq U_2 \quad (13)$$

式中: L_1 、 U_1 分别为递增型曲线的下限和上限; L_2 、 U_2 分别为递减型曲线的下限和上限。

SQI 的计算公式^[15]为:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \times 10 \quad (14)$$

式中:SQI 为土壤质量指数; W 为各指标权重; S 为标准化的得分值。

2 结果与分析

2.1 土壤改良措施对土壤理化性质的影响

不同改良措施对土壤理化性质的影响不同(图

表 1 数据分类及依据

Table 1 Data classification and basis

分类方式	组别	土壤性质
覆盖	生草覆盖、秸秆覆盖、地膜覆盖、砂砾覆盖	BD、SOM、TN、
施肥	有机肥、化肥、有机肥化肥配施	AN、NO ₃ ⁻ -N、
改良剂	保水剂、生物炭	AP、AK

2)。与 CK 相比,生草覆盖、地膜覆盖、秸秆覆盖、砂砾覆盖、有机肥化肥配施和保水剂 6 种土壤改良措施均能够有效改善土壤 BD。覆盖处理下,秸秆覆盖对于土壤 SOM、TN、AN、NO₃⁻-N、AP 和 AK 的提高效果均高于其他覆盖措施;生草覆盖对于土壤 SOM、TN、NO₃⁻-N、AP 的效果仅次于秸秆覆盖;地膜覆盖可显著改善 AN 和 AK,在提高 SOM、TN、NO₃⁻-N 和 AP 方面表现效果较差;而砂砾覆盖对土壤 BD 的改善效果最好,对 SOM、TN、AN、NO₃⁻-N、AP 和 AK 的改良效果非常差(图 2a)。在施肥条件下,化肥对土壤 AN、AP 和 AK 的提高效果显而易见;有机肥可有效提高 SOM、TN、AN、NO₃⁻-N、AP 和 AK;有机肥化肥配施对于 BD、SOM、AN、NO₃⁻-N 和 AP 的改良效果较好(图 2b)。在土壤改良剂处理下,保水剂可有效改善土壤 BD、SOM、TN 和 NO₃⁻-N;生物炭对于 SOM、TN、NO₃⁻-N 和 AP 的改良效果较好(图 2c)。

在 9 种土壤改良措施下,覆盖、施肥和改良剂均能显著提高 SOM、TN 和 NO₃⁻-N。覆盖处理对于降低土壤 BD(6.18%)的效果最好,施肥处理在提高土壤 AN(23.05%)、AP(88.32%)和 AK(30.53%)的效应值最佳,而土壤改良剂在提升 SOM(38.78%)、TN(33.19%)和 NO₃⁻-N(95.31%)的效果最优。

2.2 不同改良措施土壤理化因子的相关性

在土壤改良条件下,各土壤理化性质效应值之间的内部联系见表 3。SOM 与 TN、SOM 与 NO₃⁻-N、TN 与 NO₃⁻-N、AN 和 AP 效应值之间的相关系数分别为 0.77、0.76、0.79 和 0.68($p<0.05$),表明 SOM 提高与 TN 和 NO₃⁻-N 提高,TN 提高与 NO₃⁻-N 提高,以及 AN 提高与 AP 提高之间存在显著的正相关关系。

2.3 土壤改良对土壤质量的影响

从表 4 可以看出,S-W 检验结果显示,7 个土壤性质的 $p>0.01$,表明它们服从正态分布。在主成分分析(PCA)中,AN 在第 1 个主成分上的载荷最大,

而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在第 2 个主成分上的载荷最大。值得注意的是, AN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之间没有显著的相关关系(表 3)。

在计算土壤质量指数(SQI)时, SOM 所占权重(0.24)最大, 其次为 TN(0.23), 而 AK(0.01)的权重最小。

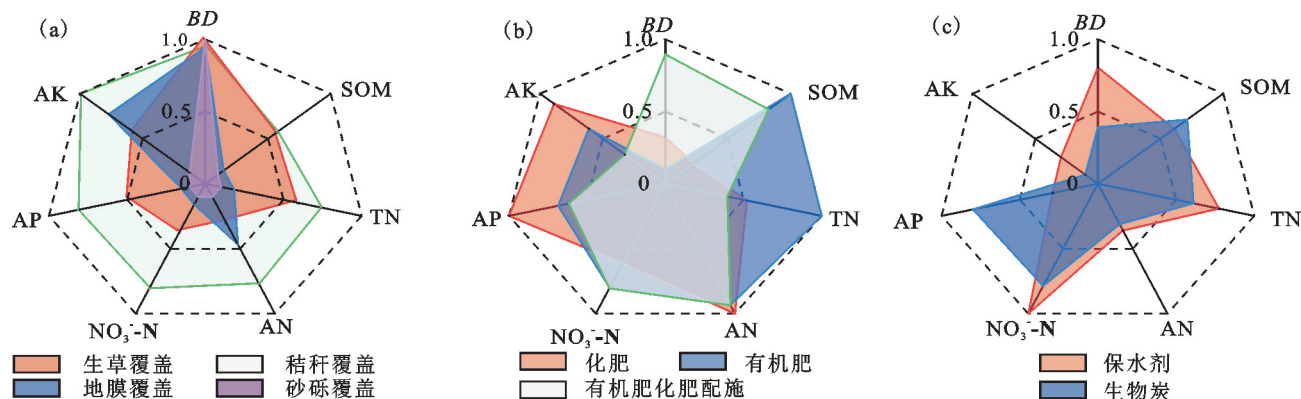


图 2 不同改良措施对土壤理化性质效应值的影响

Fig.2 Effects of different improvement measures on the effect size of soil physical and chemical properties

表 3 不同改良措施下土壤理化性质效应值的相关性

Table 3 Correlations between the effect values of soil physical and chemical properties under different improvement measures

指标	BD	SOM	TN	AN	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	AP	AK
BD	1.00						
SOM	0.42	1.00					
TN	0.57	0.77*	1.00				
AN	0.48	0.39	0.40	1.00			
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.42	0.76*	0.79*	0.47	1.00		
AP	0.61	0.42	0.54	0.68*	0.57	1.00	
AK	0.05	-0.15	0.22	0.59	-0.01	0.39	1.00

注: * 表示 $p < 0.05$ 。

不同改良措施对土壤质量的影响见图 3。改良效果由好到差依次为施肥>改良剂>覆盖。其中, 9 种土壤改良措施的 SQI 依次为 7.72(有机肥)>7.68(秸秆覆盖)>7.20(有机肥化肥配施)>6.05(保水剂)>5.99(生草覆盖)>5.94(生物炭)>5.79(化肥)>3.53(地膜覆盖)>2.63(砂砾覆盖)。根据土壤质量评价等级结果, 土壤质量等级良好的是有机肥、秸秆覆盖、有机肥化肥配施和保水剂, 而生草覆盖、生物炭和化肥措施下的土壤质量等级一般, 而地膜覆盖和砂砾覆盖的土壤质量较差。

3 讨论

3.1 覆盖对土壤质量的影响

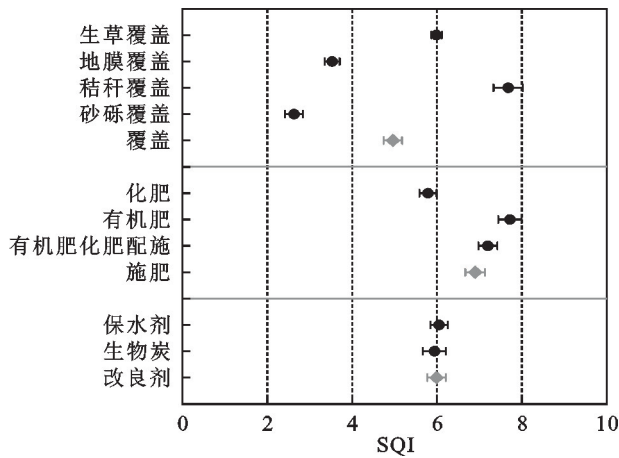
苹果园覆盖改善土壤质量的效果因所使用的材

料有所不同。一般认为, 生草覆盖、秸秆覆盖、地膜覆盖和砂砾覆盖能抑制水分蒸发, 有利于降低土壤 BD, 增加土壤含水量, 有效改善果园土壤的物理结构和蓄水保墒能力。本研究发现, 4 种覆盖措施均显著改善土壤 BD, 然而只有生草覆盖和秸秆覆盖对土壤养分含量的正效应达到显著, 地膜覆盖和砂砾覆盖对土壤养分的提高效果不显著。生草覆盖可以显著提高土壤养分, 因为通过草本植物及其根系为土壤提供稳定的养分来源, 地表枯落物和根系残体等有机物质的输入也加速了土壤微生物的分解作用, 从而增加果园土壤中的养分^[16]。秸秆覆盖为果园土壤提供大量的外源碳和矿质元素, 同时补充氮、磷和钾元素, 在土壤微生物的作用下, 这些物质被分解和转化, 促进 SOM 和土壤养分的积累^[17]。地膜覆盖影响地表透气性, 致使地表温度升高, 土壤微生物活性下降, CO_2 释放速率较低, 影响土壤物质代谢强度, 对土壤肥力产生不利的影响^[18]。卜玉山等^[19]研究发现, 覆膜加速表层 SOM 的降解, 影响 SOM 在土壤中的积累, 对土壤养分含量无显著影响; 杨文权等^[20]研究发现, 相比于清耕, 地膜覆盖和砂砾覆盖均显著增加土壤微生物数量, 但仍显著低于生草覆盖和秸秆覆盖, 表明地膜和砂砾覆盖下较低的土壤微生物数量可能影响养分的转化; 董铁等^[21]在分析覆盖方式对苹果园土壤性状影响的研究中发现, 砂砾覆盖对土壤养分含量增加效果不显著, 与本研究结果一致。

表 4 基于土壤改良效果的主成分分析

Table 4 Principal component analysis based on soil improvement effects

指标	BD	SOM	TN	AN	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	AP	AK	特征值	贡献率/%
S-W 检验	0.02	0.50	0.91	0.21	0.13	0.65	0.57		($p > 0.01$)
PC1	-0.76	0.56	0.74	0.85	-0.48	0.84	0.52	3.37	48.20
PC2	-0.13	0.75	0.50	-0.25	0.79	0.06	-0.66	1.95	27.92
权重 W	0.18	0.24	0.23	0.14	0.03	0.18	0.01		



注:圆形表示同一改良方式不同改良措施的效应值;菱形表示 3 种改良方式的效应值;误差棒为 9.5% 置信区间。

图 3 不同改良措施对土壤质量影响的效应值

Fig.3 Effect values of different improvement measures on soil quality

3.2 施肥对土壤质量的影响

化肥施用可显著增加土壤速效 N、P 和 K 含量,有研究^[22]表明,在养分有效性较高的土壤环境中,微生物的生长和代谢更加活跃,从而促进土壤速效养分的转化,使苹果根系能够吸收更多的水分和养分。施加有机肥不仅可提高速效养分,而且可以同步提升 SOM 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,是由于各种有机物随着有机肥的施入逐渐释放到土壤中,促进土壤有机质与微生物和酶之间的充分接触,激活微生物活动,加速有机质的分解,从而提高土壤多种养分含量^[23]。有机肥提供的 C 源和 N 源可以促进土壤硝化细菌和厌氧氨氧化菌等微生物的代谢活动,进而增加土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量^[24]。有机肥化肥配施不仅兼顾化肥和有机肥提高土壤养分含量的优点,而且能降低土壤 BD,一方面是有有机肥提供丰富的有机物料,有利于果树根系生长和养分吸收利用,根系的活性和大量根系分泌物又反过来改善土壤结构,从而降低土壤 BD^[25];另一方面,添加的养分可以促进微生物活动,微生物活动的增强改善土壤孔隙度,从而降低土壤 BD^[26]。

3.3 改良剂对土壤质量的影响

改良剂具有改善土壤物理结构、提高土壤养分含量及提升土壤肥力的作用,但不同改良剂对土壤质量的影响效果有所差异。保水剂施用后能够显著提高土壤 BD、TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,是由于保水措施营造的良好土壤水分条件,提高微生物丰度和酶活性,进而促进土壤养分活化^[27]。添加生物炭可显著降低土壤 BD,提升 SOM、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 AP 等养分含量,可能是生物炭具有较高的孔隙度和比表面积,且富含有机质、氮和磷等养分^[28],生物炭中的羟基碳、芳香

碳和无机元素促进微生物的活动,提高硝化速率,促进土壤中养分的释放,这些作用有助于果园土壤固碳,并保持苹果园土壤养分水平^[29]。赵西宁等^[13]研究发现,在黄土高原丘陵区施用生物炭和保水剂均能够有效改良土壤结构,增加 SOC、TN 和速效养分含量,提高苹果园土壤质量。

3.4 土壤改良措施对土壤质量的综合影响

土壤质量是可持续农业发展的基础,综合考虑土壤有机质、养分含量和土壤结构等因素是提升土壤质量的关键。土壤质量评价受土壤自身特性、土壤改良技术、所选 MDS 指标等诸多因素影响,因此,建立科学合理的土壤评价指标体系是土壤质量评价的关键。本研究选取包含 7 个指标的 MDS 评价体系,其中有 6 个指标在土壤质量评价中使用频率超过 40%,而 SOM 的使用频率更是高达超过 90%^[30],表明本研究所选取的 MDS 评价体系具有较好地代表性。本研究表明,秸秆覆盖和有机肥对土壤质量提升效果最显著。有机肥化肥配施、生草覆盖和保水剂也能较好地改善土壤质量。然而,生物炭和化肥处理下苹果园土壤质量一般,地膜覆盖和砂砾覆盖的效果较差,甚至可能对土壤质量产生负面影响。不同改良措施在这些方面的表现各有差异,在实际土壤改良过程中,选择适当的改良措施应根据具体的土壤条件、改良目标和成本效益分析等进行综合评估和权衡,以达到最佳的土壤改良效果。

本研究主要基于黄土高原南部地区苹果园的田间试验数据,探讨生草覆盖、秸秆覆盖、有机肥施用等多种土壤改良措施对苹果园土壤的改良效果,研究结果为黄土高原苹果园的土壤改良提供科学依据,也为其他类似地区的土壤改良提供参考,尤其是半干旱地区土壤有机质和养分含量较低、土壤结构不良的区域。然而,不同地区、不同土壤类型和不同气候条件下的效果可能存在差异,其他区域可能需要根据当地具体土壤条件进行调整和优化。部分改良措施的短期效果显著,但长期效果和可持续性有待进一步验证。一些改良措施(如生物炭和保水剂)的成本较高,对于小规模农户或资源有限的地区,实施这些措施可能存在经济上的挑战。未来研究应在长期效果、经济成本、区域适应性和环境影响等方面进行更深入的探讨,以完善土壤改良技术,促进苹果园的可持续发展。

4 结论

(1) 基于对黄土高原苹果园土壤改良措施的 Meta 分析,全面评估 9 种土壤改良措施对土壤理化性质的

影响。结果表明,4种覆盖措施均能有效降低土壤BD。秸秆覆盖和生草覆盖可以有效提高SOM、TN、AN、AP和AK含量,而地膜覆盖和砂砾覆盖对TN、NO₃⁻-N、AP含量的提高效果较差。有机肥和有机肥化肥配施在提高SOM、TN、AN、NO₃⁻-N和AP含量方面表现出色,相比之下,单施化肥仅对AN、AP和AK含量的提升较为显著。生物炭可显著提高SOM、NO₃⁻-N和AP含量,对土壤BD、AN和AK的影响较小,而保水剂在降低土壤BD、增加TN及NO₃⁻-N含量方面的效果较好。

(2)建立了由BD、SOM、TN、AN、NO₃⁻-N、AP和AK构成的MDS,通过所建立的MDS对该地区苹果园进行土壤质量评价,结果显示,土壤质量较好的是有机肥、秸秆覆盖、有机肥化肥配施和保水剂,其次为生草覆盖、化肥和生物炭,地膜覆盖和砂砾覆盖的土壤质量较差。考虑到苹果园管理和果实产量及有机肥难以满足关键时期养分需求等因素,建议在果园生产中注重秸秆覆盖和有机肥化肥配施,以促进果园土壤可持续健康发展。

参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nation, FAO Statistical Databases [EB/OL]. (2019-02-08) [2020-04-05]. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- [2] 张杰,马亚君,贺志斌,等.微生物肥料替代化肥在苹果种植中的应用效果研究[J].中国农业科技导报,2019,21(7):128-135.
ZHANG J, MA Y J, HE Z B, et al. Application of microbial fertilizer instead of fertilizer in apple planting[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(7):128-135.
- [3] 张嘉涛.基于生草技术的苹果园土壤微生物群落代谢特征分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
ZHANG J T. Analysis on metabolic characteristics of soil microbial community in apple orchard based on grass planting technology[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [4] 葛顺峰,朱占玲,陈倩,等.添加外源碳对苹果园土壤无机氮变化和氨挥发损失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):257-261.
GE S F, ZHU Z L, CHEN Q, et al. Effect of exogenous carbon on inorganic nitrogen and ammonia volatilization in apple orchard soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6):257-261.
- [5] HAN J L, JIN X L, HUANG S W, et al. Carbon and nitrogen footprints of apple orchards in China's Loess Plateau under different fertilization regimes[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 413: e137546.
- [6] XIU L Q, ZHANG W M, WU D, et al. Heat storage capacity and temporal-spatial response in the soil temperature of albic soil amended with maize-derived biochar for 2 years[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: e104762.
- [7] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 206: 46-59.
- [8] ZHAO J, DENG P Y, CHEN S C. Structural characteristics of the fly ash wrapped by the super absorbent resin among the plant fiber and the application research on the complex[J]. Materials Science Forum, 2011, 685: 272-277.
- [9] GONG L, RAN Q Y, HE G X, et al. A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 223-229.
- [10] CAO Y, LI X, QIAN X Y, et al. Soil health assessment in the Yangtze River Delta of China: Method development and application in orchards[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2023, 341: e108190.
- [11] LI P, ZHANG H J, DENG J J, et al. Cover crop by irrigation and fertilization improves soil health and maize yield: Establishing a soil health index[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 182: e104727.
- [12] XUE R, WANG C, LIU M L, et al. A new method for soil health assessment based on Analytic Hierarchy Process and meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2771-2777.
- [13] 赵西宁,刘帅,高晓东,等.不同改良剂对黄土高原丘陵山区山地果园土壤质量的影响[J].生态学报,2022,42(17):7080-7091.
ZHAO X N, LIU S, GAO X D, et al. Effect evaluation of soil amendments on soil quantity of mountain apple orchards in the hilly region of Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17):7080-7091.
- [14] ZAHEDIFAR M. Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis[J]. Catena, 2023, 222: e106807.
- [15] MOEBIUS B N, MOEBIUS D J, GUGINO B K, et al. Comprehensive assessment of soil health: The cornell framework[M]. New York: Cornell University, 2017.
- [16] 王娜,李乐,勾蒙蒙,等.长期生草对柑橘园土壤化学及生物学性质的影响[J].生态学报,2023,43(14):5890-5901.

- WANG N, LI L, GOU M M, et al. Effects of long-term living grass mulching on soil chemical and biological properties in different soil layers of a *Citrus* orchard [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(14): 5890-5901.
- [17] 于洋, 张常仁, 杨雅丽, 等. 长期免耕和秸秆覆盖量对黑土碳氮含量及碳氮循环相关酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(3): 695-704.
- YU Y, ZHANG C R, YANG Y L, et al. Effects of long-term no-tillage and different stover mulching amounts on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities of carbon and nitrogen cycle in Mollisols[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3): 695-704.
- [18] 张义, 谢永生, 郝明德, 等. 不同地表覆盖方式对苹果园土壤性状及果树生长和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 279-286.
- ZHANG Y, XIE Y S, HAO M D, et al. Effects of different patterns surface mulching on soil properties and fruit trees growth and yield in an apple orchard [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 279-286.
- [19] 卜玉山, 苗果园, 周乃健, 等. 地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(5): 1069-1075.
- BU Y S, MIAO G Y, ZHOU N J, et al. Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 1069-1075.
- [20] 杨文权, 寇建村, 贺璐, 等. 起垄后不同覆盖方式对苹果园土壤微生物和酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1377-1382.
- YANG W Q, KOU J C, HE L, et al. Effects of different mulching patterns on the amounts of soil microorganisms and the activities of enzymes after ridging in apple orchard [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(6): 1377-1382.
- [21] 董铁, 刘小勇, 张坤, 等. 旱塬区地面覆盖对苹果园土壤性状和树体生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(2): 155-160.
- DONG T, LIU X Y, ZHANG K, et al. Effect of mulching treatment on growth of apple tree and soil characters in dry land of eastern Gansu Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(2): 155-160.
- [22] ZHENG W, GONG Q L, LV F L, et al. Tree-scale spatial responses of extracellular enzyme activities and stoichiometry to different types of fertilization and cover crop in an apple orchard[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, 99: e103207.
- [23] LUO G W, LI L, FRIMAN V P, et al. Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124: 105-115.
- [24] SHI H T, HOU L Y, XU X P, et al. Effects of different rates of nitrogen fertilizer on apple yield, fruit quality, and dynamics of soil moisture and nitrate in soil of rainfed apple orchards on the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 150: e126950.
- [25] 王宪玲, 赵志远, 马艳婷, 等. 基于 CT 扫描技术研究有机无机肥长期配施对土壤物理特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1647-1655.
- WANG X L, ZHAO Z Y, MA Y T, et al. Study on the effects of long-term application of chemical fertilizer combined with manure on soil physical properties of apple orchard based on CT scanning technology [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1647-1655.
- [26] ZHANG B B, YAN S H, WU S F, et al. Organic and inorganic fertilizers combined with a water-saving technique increased soil fertilities and apple production in a rainfed hilly orchard[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 414: e137647.
- [27] 费丽彬, 胡化涛, 李赵伟, 等. 不同保水措施对苹果园土壤肥水及苹果树生长结果的影响[J]. *中国果树*, 2023(7): 30-36.
- FEI L B, HU H T, LI Z W, et al. Effects of different water retention treatments on soil water and fertilizer conservation and growth and development of apple orchard[J]. *China Fruits*, 2023(7): 30-36.
- [28] 刘伟, 罗玲, 钟奇, 等. 生草和地布覆盖对攀枝花地区芒果园土壤性质及果实品质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(2): 261-270.
- LIU W, LUO L, ZHONG Q, et al. Effects of grass planting and ground fabric mulching on soil properties and fruit quality in mango orchards in Panzhihua, China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(2): 261-270.
- [29] HAN J L, ZHANG A F, KANG Y H, et al. Biochar promotes soil organic carbon sequestration and reduces net global warming potential in apple orchard: A two-year study in the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: e150035.
- [30] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z G, et al. Soil quality: A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105-125.