

DOI: 10.5846/stxb202106091529

赵西宁, 刘帅, 高晓东, 丁艳宏, 李钊, 杨阳, 杨明飞. 不同改良剂对黄土高原丘陵区山地果园土壤质量的影响. 生态学报, 2022, 42(17): 7080-7091.
Zhao X N, Liu S, Gao X D, Ding Y H, Li Z, Yang Y, Yang M F. Effect evaluation of soil amendments on soil quantity of mountain apple orchards in the hilly region of Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7080-7091.

不同改良剂对黄土高原丘陵区山地果园土壤质量的影响

赵西宁^{1,3,*}, 刘 帅^{2,3}, 高晓东^{1,3}, 丁艳宏^{2,3}, 李 钊^{2,3}, 杨 阳², 杨明飞²

1 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100

3 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100

摘要: 土壤质量是影响黄土高原丘陵区山地果园健康可持续发展的关键因素之一。针对黄土高原目前存在的土壤保水能力差, 肥力低及微生物群落结构单一等问题, 选取保水剂、生物炭和植物根际促生菌三种改良剂, 研究其对土壤质量的影响。研究设置 5 个处理, 分别为: 生物炭处理 (BC), 施用量为 5%; 枯草芽孢杆菌处理 (PGBS), 施用量为 0.25%; 胶质芽孢杆菌处理 (PGBM), 施用量为 0.25%; 腐殖酸型保水剂处理 (SAP), 施用量为 0.1%, 不施用土壤改良剂作为对照 (CK)。通过主成分分析法和最小数据集法筛选出相关指标, 分别与对照处理 (CK) 进行对比, 并进行综合评价。结果表明: 土壤全氮、速效磷、 β -1,4-葡萄糖苷酶、真菌 Chao1 指数、纤维素酶和细菌 Chao1 指数对土壤质量的影响较大; 同时土壤改良剂的施用可以明显提高果园土壤质量。通过综合评价, 发现不同改良剂改善土壤质量效果为: 生物炭 (BC) > 保水剂 (SAP) > 枯草芽孢杆菌 (PGBS) > 胶质芽孢杆菌 (PGBM)。综合考虑土壤质量和改良成本, 保水剂在黄土高原山地果园土壤改良方面的适用性最好, 若农林废弃物资源化则生物炭在黄土高原土壤改良方面具有很大的应用潜力。

关键词: 山地苹果园; 生物炭; 植物根际促生菌; 保水剂; 土壤质量评价

Effect evaluation of soil amendments on soil quantity of mountain apple orchards in the hilly region of Loess Plateau, China

ZHAO Xining^{1,3,*}, LIU Shuai^{2,3}, GAO Xiaodong^{1,3}, DING Yanhong^{2,3}, LI Zhao^{2,3}, YANG Yang², YANG Mingfei²

1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Soil quality is the main bottleneck restricting the healthy and sustainable development of mountain orchards in the hilly region of Loess Plateau. In order to solve the problems of poor soil water holding capacity, low fertility and single microbial community structure in the Loess Plateau, three amendments were selected and five treatments were set up in this study: biochar application rate was at 5% of soil weight (BC), bacillus subtilis application rate was at 0.25% of soil weight (PGBS), bacillus glia application rate was at 0.25% of soil weight (PGBM), humic acid water retaining agent application rate was at 0.1% of soil weight (SAP), and not application any amendment as a control (CK). The relevant indexes were

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900700); 国家自然科学基金项目 (42125705); 唐仲英基金会项目; 陕西省重点研发计划项目 (2020ZDLNY07-04)

收稿日期: 2021-06-09; 采用日期: 2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zxn@nwsuaf.edu.cn

selected by principal component analysis (PCA) and minimum data set (MDS) to comprehensively evaluate soil quality. The results showed that soil total nitrogen, available phosphorus, β -1,4-glucosidase, fungal Chao1 index, cellulase and bacterial Chao1 index had a significant effect on soil quality, and application of soil amendments could significantly improve the soil quality in apple orchards. The improvement effects of different amendments on soil quality as follows: BC > SAP > PGBS > PGBM through a comprehensive evaluation. Considering soil quality and cost, water retaining agent is more suitable for soil quality improvement in mountain apple orchards in the hilly region of Loess Plateau. Biochar has great application potential in soil amendment, if agricultural and forestry wastes can be recycled.

Key Words: mountain apple orchard; biochar; plant growth-promoting rhizobacteria; super absorbent polymer; soil quality evaluation

黄土高原以独特的地理气候条件已成为我国苹果优生区和主产区之一。该地区土壤类型主要为黄绵土,质地疏松绵软团聚状态差,土壤结构易遭受侵蚀破坏,养分和有机质含量低^[1],导致该区苹果产业可持续发展面临严峻挑战。黄土高原北部丘陵区多为旱作果园,土壤持水和入渗能力差,加之年内降雨量小且时空分布极不均匀,降水大部分以径流或无效蒸发形式损失^[2]。此外,果树蒸腾耗水强烈,果园土壤水分亏缺严重,进一步限制了当地苹果产业的持续健康发展^[3]。因此,如何改善果园土壤质量,提高土壤蓄水保肥能力以增加苹果产量,是目前亟待解决的关键问题。

土壤改良剂施用是快速改善土壤结构、提升土壤质量,增强土壤蓄水保肥能力的有效措施之一^[4]。目前,土壤改良剂主要分为天然改良剂、人工合成改良剂和生物改良剂三大种类^[5]。生物炭、保水剂和植物根际促生菌分别作为三大类改良剂的代表,因其在土壤改良中的良好效果已成为国内外研究的热点^[6-8]。合理的改良剂施用能够有效改善土壤结构、水热条件、养分状况和土壤微生态环境,进而提升土壤生产力^[9]。已有研究表明,施用生物炭可以显著增加土壤总孔隙度,减小土壤容重,增加团聚体数量及稳定性,增强雨水的入渗及土壤保水能力,进而改善土壤健康状况,增加作物产量^[10-12]。近年来,植物根际促生菌因其良好的土壤改良效果被作为生物菌肥广泛应用于农业生产中,其施入土壤后可活化土壤养分,促进土壤释放氮、磷、钾等作物生长所必需的元素,同时还能分泌氨基酸、激素、有机酸等促进作物吸收养分的物质^[13],进而增加作物产量。此外,根际促生菌能在一定程度上改善土壤结构、增强土壤保水能力^[14-16]。保水剂不仅可以吸收且长时间蓄持土壤水分,还可以作为肥料缓释剂保持土壤肥力并提升作物对土壤养分的利用能力^[17]。目前就单一改良剂改善土壤质量的相关研究已大量开展,但关于不同种类改良剂对黄土高原旱作果园土壤蓄水保肥及微生态环境影响效果的对比研究还鲜有报道。因此,开展不同改良剂对土壤改良效果的对比研究,筛选适宜黄土高原土壤质量提升的改良剂,对促进区域农业绿色高效可持续发展具有重要意义。

土壤质量评价指标主要包括土壤物理、化学和生物学 3 个方面^[18]。近年来,统计学方法在相关领域应用较为广泛,目前国内外主要采用主成分分析(PCA)和最小数据集(MDS)等方法对土壤质量评价指标进行重叠信息删减,采用隶属度函数模型和土壤质量指数模型综合评价土壤质量状况。李鹏飞等^[19]选取了 21 个土壤理化生指标,通过主成分分析法构建最小数据集,进而对黄土高原矿区复垦土壤质量进行评价。袁晶晶等^[20]选取 14 项土壤理化生指标,采用主成分分析和聚类分析方法对不同生物炭和氮肥配施的土壤质量进行评价,最终探明 10t/hm²生物炭配施 300kg/hm²的氮肥为枣园土壤最佳培肥模式。目前,针对改良剂对粮食作物农田土壤质量提升综合评价方面的研究较多,但关于改良剂对旱作果园土壤改良效果的综合评价鲜有报道。为此,本研究以黄土高原丘陵区山地苹果园为研究对象,从土壤理化性质、养分含量、生物学特性等多方面,综合评价了生物炭、植物根际促生菌及保水剂对果园土壤的改良效果,以期筛选出适宜黄土高原苹果园土壤质量与水资源高效利用协同提升的改良剂,为黄土高原丘陵区山地果园土壤改良提供科学的理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2019 年 4 月—2020 年 10 月在陕西省延安市宝塔区河庄坪镇余家沟村旱作山地果园内进行 (109°21'24"E, 36°41'15"N), 海拔 1277m, 是典型的黄土高原丘陵区, 属半干旱区暖温带大陆性季风气候。研究区年平均气温为 9.2℃, 多年平均降水量为 506.5mm, 年内降雨主要集中在 7—9 月, 占全年降水量的 70% 以上, 年平均相对湿度为 60.8%。土壤类型为黄绵土, 土层深厚, 容重为 1.3g/cm³, pH 为 7.81, 土壤有机碳含量为 2.69g/kg, 全氮含量为 0.3g/kg, 田间持水量为 24%。

1.2 试验材料与设计

供试生物炭以苹果树枝为原材料在 500℃ 无氧条件下缓慢热解而成, 购自陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司, 粒径为 0.02—2mm, pH 为 8.98, 有机碳含量为 306.25g/kg, 全氮含量为 8.97g/kg。植物根际促生菌选用枯草芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌, 购自济南金华峰辉生物科技有限公司, 其有效活菌数分别为 $\geq 2.0 \times 10^{10}$ CFU/g 和 $\geq 5.0 \times 10^9$ CFU/g, 载体为麦麸。保水剂选用腐殖酸型保水剂, 购自山东华潍新材料科技有限公司, 外观为黑灰色颗粒状或粉末状, 难溶于水, 其吸水倍数为 300—500 倍。

试验设置 5 个处理: 分别为施用 5% 的生物炭 (BC)、0.25% 的枯草芽孢杆菌 (PGBS)、0.25% 的胶质芽孢杆菌 (PGBM) 及 0.1% 的保水剂 (SAP) 处理, 不施用土壤改良剂作为对照 (CK), 每个处理 3 个重复, 共计 15 个小区。土壤改良剂施用量是在现有研究结果^[16,21-23]的基础上结合室内试验确定的最佳施用量。样地设置在同一水平梯田苹果园, 选取 15 棵树木形态、生长状况相似且均为 15 年生旱作山地红富士苹果树, 各果树处理和土壤管理等措施一致。苹果树种植株行距为 4.5m×4.5m, 树高平均 2.5m, 平均冠幅半径为 2.3m。为最大限度发挥改良剂的作用并降低其对果树生长的影响, 改良剂的施用位置为树冠 2/3 处, 以树干为圆心距树干 1.5m 处, 于 2019 年 4 月初人工开挖宽、深均为 60cm 的圆环状坑, 将改良剂与挖出土壤混匀后, 回填到环状坑中。在施用改良剂的环状区域中部随机取三个点布设水分监测点, 在施用区其他位置取样测定土壤物理、化学和生物学指标。

1.3 土壤样品采集与测定

在苹果生育期末, 采用环刀法测量 0—100cm 土层容重, 每 20cm 一层, 每层三个重复。使用 Guelph2800K1 渗透仪测定 0—60cm 土壤饱和导水率, 每 20cm 一层, 共 3 层, 每层三个重复。土壤水分采用 Trime-TDR 长期监测, 每个小区设置 3 个水分监测点, 共计 45 个土壤水分监测点。测量深度为 200cm, 每 20cm 土层测定一次, 测定时段为 2019 年和 2020 年 5 月初至 10 月底, 测量频率为每月一次。苹果收获后, 用直径为 10cm 高度为 60cm 的聚氯乙烯 (PVC) 管在圆环中央取原状土样, 每个处理三个重复, 带回实验室后沿着土壤自然结构轻轻剥成小块, 剔除植物根系和小石块等杂质后, 用湿筛法测定土壤水稳性团聚体。土壤团聚体稳定性评价指标包含平均重量直径 (MWD, mm); 几何平均直径 (GMD, mm); >0.25mm 的水稳性团聚体含量 ($WR_{0.25}$, %); 土壤分形维数 (D); 计算公式参照周虎等^[24] 和杨培岭等^[25] 研究成果。

其它土壤样品采样, 也在生育期结束后进行, 采用土钻分别在 0—20cm、20—40cm、40—60cm、60—80cm、80—100cm 五个土层取土, 土壤样品取出后立即转入无菌密封袋, 一部分土壤经过风干、研磨、过筛后, 采用重铬酸钾外加热法测定各层土壤有机碳含量; 采用凯氏定氮法测定土壤全氮; 采用火焰光度法测定土壤速效钾; 使用流动分析仪测定土壤速效氮和速效磷; 采用梅特勒 FiveEasy Plus 28 -Standard 测定土壤 pH, 水土比为 1:5^[26]。另一部分用于测定土壤酶活性和土壤微生物群落结构多样性, 采用比色法测定土壤蔗糖酶, 采用荧光分光光度计测定纤维素酶、 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -1,4-木聚糖酶、 β -D-纤维二糖水解酶和 N-乙酰- β -D 氨基葡萄糖苷酶^[27]; 采用高通量测序方法对核糖体脱氧核糖核酸 (16S rDNA) 和内转录间隔区 (ITS) 的扩增子进行测序, 分析土壤微生物群落结构^[28-29]。

1.4 土壤质量评价系数

采用土壤质量指数 (SQI) 评价不同改良剂对土壤质量的影响, 首先选择具有代表性的土壤物理、化学、微

生物和酶等指标,利用主成分分析法^[30-33]对选取的指标数据进行标准化处理,其次采用抽样适合性检验(KMO)和巴特利特球体检验(Bartlett)方法检验主成分分析法是否合理。若合理则根据所得结果对各个主成分内不同指标的值进行筛选,在筛选过程中,为了减少数据信息的丢失引入范数(Norm)值, Norm 值越大表明其解释土壤总体质量信息的能力越强^[34-35], Norm 值计算公式如下:

$$N_{ip} = \sum_i^p (H_{ip}^2 \lambda_p) \quad (1)$$

式中: N_{ip} 为各个指标在特征值 >1 的前 p 个主成分的综合荷载, H_{ip} 为第 i 个指标在第 p 个主成分上的荷载, λ_p 为第 p 个主成分的特征值。

将 Norm 值与各指标之间的相关性分析相结合,通过筛选的数据进入 MDS, MDS 里的数据不仅可以代表所有的指标且各指标相互独立、信息重叠率小。为了计算各个土壤指标的隶属度,需要对各个指标的功能和性质进行分析,判断各指标的隶属型函数,隶属函数公式为:

$$Q_x = \frac{(x_i - a)}{b - a} \quad (2)$$

$$Q_x = \frac{(b - x_i)}{b - a} \quad (3)$$

式(2)为 S 型函数,(3)为反 S 型函数。式中 x_i 为各个指标实测值, a 和 b 为该项指标的最小值和最大值。

由于所选评价指标较多,为了更合理的评价各个指标对于土壤质量状况的影响程度,使用权重来表示指标的贡献。计算公式如下:

$$S_L = \frac{C_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n C_i}} \quad (4)$$

$$M_L = \frac{\sum_{i=1}^n S_{Li} \sigma_i}{\sum_{i=1}^n \sigma_i} \quad (5)$$

$$M_{Fi} = \frac{M_{Li}}{\sum_{i=1}^n M_{Li}} \quad (6)$$

式中: S_L 为各主成分上各指标的线性系数, C_i 为各标在各主成分上的荷载; M_L 为权重模型系数; S_{Li} 为某指标在各个主成分上的线性系数; σ_i 为特征值大于 1 的各主成分的方差; M_{Fi} 为归一化后各个指标对应的权重。

根据土壤质量指数模型函数、隶属度和权重计算 SQI:

$$SQI = \sum_{i=1}^n Q_{xi} M_{Fi} \quad (7)$$

式中: n 为 MDS 中评价指标的个数; Q_{xi} 为各指标的隶属度; M_{Fi} 对应指标的权重。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 和 IBM SPSS Statistic 22.0 统计软件对数据进行整理、统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)对所有数据进行方差分析,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。采用 Origin Pro 2016 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤质量评价指标统计

本研究通过土壤物理、化学和生物学等多项指标对土壤质量进行综合评价。评价过程中选取 20 个土壤指标,包括 5 个物理指标,7 个化学指标和 8 个生物学指标,具体如表 1 所示。土壤细菌 Shannon 指数在 9.24—10.20 之间,变异系数最小;土壤容重、pH 和细菌 Chao1 指数变异系数均低于 0.1,表明施用改良剂不会对土壤容重、pH 和细菌造成较大的影响。土壤有机碳、硝态氮、铵态氮、纤维素酶和蔗糖酶的变异系数均大于

0.7, 变异性较大, 说明以上指标对不同类型改良剂有强烈的异质性, 且对改良剂种类较为敏感。

表 1 0—60cm 土层不同改良剂处理土壤质量评价指标统计

Table 1 soil quality assessment index statistics of 0—60 cm soil layer in different amendment treatments

土壤指标 Soil index	最大值 Max	最小值 Minimum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of Variation
容重 Bulk density/(g/cm ³)	1.41	1.07	1.22	0.078	0.064
平均重量直径 Mean weight diameter/mm	2.36	0.39	0.78	0.395	0.503
几何平均直径 Geometric mean diameter/mm	1.06	0.29	0.42	0.173	0.413
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/(cm/s)	63.26	11.32	34.94	11.881	0.340
土壤含水率 Soil water content/(cm ³ /cm ³)	26.12	13.25	21.06	3.100	0.147
pH	7.96	6.55	7.47	0.416	0.056
土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	29.33	2.13	5.71	5.228	0.916
总氮 Total nitrogen/(g/kg)	1.01	0.27	0.48	0.170	0.353
硝态氮 Nitrate nitrogen/(mg/kg)	39.17	1.81	11.82	8.718	0.737
铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg/kg)	581.97	7.55	160.28	165.724	1.034
速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	83.84	8.37	33.54	16.628	0.496
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	502.42	82.8	380.86	97.805	0.257
细菌 Shannon 指数 Bacteria shannon index	10.20	9.24	9.82	0.232	0.024
真菌 Shannon 指数 Fungus shannon index	8.69	3.5	6.87	0.909	0.132
细菌 Chao1 指数 Bacteria Chao1 index	4134.68	2739.27	3572.35	343.030	0.096
真菌 Chao1 指数 Fungus Chao1 index	2706.33	458.36	1486.62	403.411	0.271
纤维素酶 Cellulase/(μmol/min)	21.14	1.61	7.14	5.409	0.757
β-1,4-葡萄糖苷酶 β-1,4-Glucosidase/(μmol/min)	19.69	1.66	11.07	6.226	0.563
蔗糖酶 Sucrase/(μmol/min)	23.33	1.75	8.30	6.172	0.743
β-1,4-木聚糖酶 β-1,4-Xylanase/(μmol/min)	9.69	0.47	4.42	2.626	0.594

2.2 最小数据集确定

土壤各指标进行标准化之后, 对不同改良剂处理土壤容重、pH、有机碳含量、全氮含量、细菌 Shannon 指数、纤维素酶活性等 20 个土壤基本指标进行主成分分析, 其 KMO 值为 0.761。巴特利球形检验值小于 0.05, 表明主成分分析结果合理可靠, 其结果如表 2 所示。本研究中特征值大于 1 的主成分有 6 个, 特征值分别为 4.279、3.366、2.302、2.197、1.588 和 1.023, 6 个主成分的累积方差贡献率为 73.78%。根据已有研究, 主成分因子荷载越大变量在其中的影响力越高^[36], 本研究筛选出的各主成分中荷载值大于 0.5 的指标因子共 20 个, 被作为 MDS 备选数据。再根据 Norm 值小于 10% 原则^[20], 剔除最大 Norm 值 10% 范围之外的指标, 筛选出 11 个指标, 然后根据各个指标之间的相关性进行筛选, 各指标相关性如表 3 所示。原则上同一主成分中的指标若显著相关, 则将荷载值大的保留, 荷载值小的剔除。最终确定入选 MDS 的指标共有六个, 分别是主成分一中的指标细菌 Chao1 指数, 主成分二中的总氮, 主成分三中的纤维素酶, 主成分四中的真菌 Chao1 指数, 主成分五中的 β-1,4-葡萄糖苷酶, 主成分六中的速效磷。指标筛选过滤率为 60%, 对数据构成的简化率较高, 指标间的冗余重复信息大幅减少, 能够有效提高土壤质量综合评价效率。

表 2 土壤质量指标主成分分析

Table 2 Principal component analysis of soil quality index

土壤指标 Soil index	主成分荷载矩阵 Principal component load matrix						Norm 值 Norm value
	1	2	3	4	5	6	
容重 Bulk density/(g/cm ³)	0.024	0.516	0.593	-0.067	-0.301	0.154	1.3734
平均重量直径 Mean weight diameter/mm	0.035	0.715	0.175	0.015	0.065	-0.342	1.3869
几何平均直径 Geometric mean diameter/mm	0.034	0.682	-0.21	0.104	0.297	0.101	1.3588
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/(cm/s)	-0.077	0.271	-0.227	0.155	0.744	0.247	1.1770
土壤含水率 Soil water content/(cm ³ /cm ³)	-0.153	0.202	-0.089	0.590	-0.026	0.19	1.0288

续表

土壤指标 Soil index	主成分荷载矩阵 Principal component load matrix						Norm 值 Norm value
	1	2	3	4	5	6	
pH	0.43	-0.03	0.049	0.288	-0.694	0.124	1.3276
土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	0.179	0.675	0.123	-0.019	-0.052	0.375	1.3618
总氮 Total nitrogen/(g/kg)	-0.335	0.73	0.052	0.209	0.095	-0.019	1.5462
硝态氮 Nitrate nitrogen/(mg/kg)	0.478	-0.296	0.172	-0.406	0.071	0.183	1.3210
铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg/kg)	-0.075	0.537	-0.293	-0.299	0.141	0.253	1.2189
速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	0.098	0.118	0.100	0.332	0.110	0.787	1.0030
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	0.726	-0.123	0.039	-0.338	-0.017	0.271	1.6237
细菌 Shannon 指数 Bacteria shannon index	0.885	0.06	0.017	0.205	-0.005	-0.06	1.8602
真菌 Shannon 指数 Fungus shannon index	0.055	-0.048	0.056	0.794	0.064	0.033	1.1919
细菌 Chao1 指数 Bacteria Chao1 index	0.93	0.016	0.016	0.118	-0.115	-0.035	1.9378
真菌 Chao1 指数 Fungus Chao1 index	0.443	-0.132	0.261	0.758	-0.108	0.183	1.5396
纤维素酶 Cellulase/($\mu\text{mol}/\text{min}$)	0.021	-0.11	0.951	0.038	-0.03	0.023	1.4593
β -1,4-葡萄糖苷酶 β -1,4-Glucosidase/($\mu\text{mol}/\text{min}$)	0.491	0.359	0.44	-0.022	0.521	-0.002	1.5307
蔗糖酶 Sucrase/($\mu\text{mol}/\text{min}$)	0.097	0.032	0.934	0.069	0.062	0.015	1.4383
β -1,4-木聚糖酶 β -1,4-Xylanase/($\mu\text{mol}/\text{min}$)	0.548	-0.007	0.373	0.029	0.653	0.010	1.5115
特征值 Characteristic Value	4.279	3.366	2.302	2.197	1.588	1.023	-
方差贡献率 variance contribution rate(%)	21.394	16.832	11.51	10.985	7.942	5.117	-
累积贡献率 Cumulative contribution rate(%)	21.394	38.226	49.736	60.721	68.663	73.78	-

2.3 不同改良剂对土壤质量影响综合评价

2.3.1 评价结果精度验证

采用 MDS 进行土壤质量评价虽然减少了试验工作量、降低了复杂度,但是 MDS 对评价指标进行了简化,其评价结果的精度需要与总数据集法(全部土壤质量评价指标数据集定义为总数据集, TDS)评价结果进行对比。通过计算得出, TDS 的土壤质量指数均值为 0.406 ± 0.121 , 变异系数 (C_V) 为 0.297, 波动幅度较小 ($C_V < 30\%$); MDS 的土壤质量指数均值为 0.390 ± 0.126 , C_V 为 0.324, 波动幅度较大 ($C_V > 30\%$), 说明 MDS 对土壤质量指数的变化反应更为敏感。通过图 1 可知, 最小数据集质量指数和总数据集质量指数之间呈正相关, 决定系数 $R^2 = 0.804$, 说明 MDS 对土壤质量指数与 TDS 的土壤质量指数较为接近, 因此基于 MDS 计算的土壤质量指数可用于土壤质量评价。

2.3.2 综合评价指数确定

本文采用隶属函数对 MDS 中所选取的 20 个指标进行分类, 分为“越多越促进”和“越少越促进”两类^[30]。土壤容重和 pH 为“越少越促进”, 其隶属度用公式 (3) 计算, 其余指标为“越多越促进”, 用公式 (2) 计算隶属度。根据各指标数据的旋转成分荷载、主成分方差贡献率和累积贡献率计算得出的最小数据集中 6 个指标权重如表 4 所示, β -1,4-葡萄糖苷酶活性对土壤质量的影响最大, 其 SQI 分布在 0.002—0.190 之间, 均值为 0.104; 纤维素酶活性对土壤质量影响最小, 其 SQI 分布在 0.002—0.085 之间, 均值为 0.026。通过 MDS 对各指标进行权重分析发现, 各指标对土壤质量影响效果如下: 全氮 (0.253) > 速效磷 (0.252) > β -1,4-葡萄糖苷酶 (0.199) > 真菌 Chao1 指数 (0.199) > 纤维素酶 (0.094) > 细菌 Chao1 指数 (0.068)。

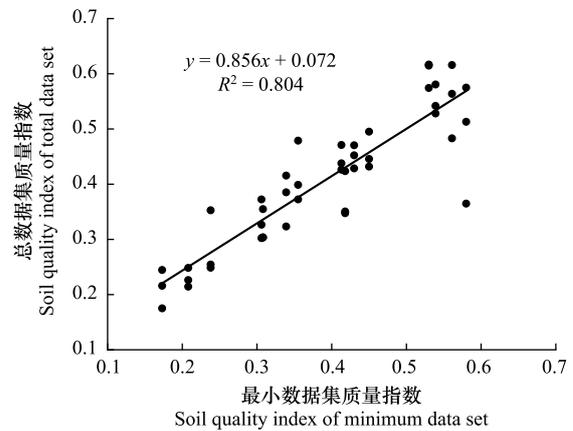


图 1 最小数据集和总数据集土壤质量指数线性关系

Fig.1 Linear relationship between minimum data set and total data set of soil quality index

表 3 土壤质量指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil quality index

指标 Index	BD	MWD	GMD	Ks	SWC	pH	SOC	TN	AN-NO ₃	AN-NH ₄	AP	AK	B-Shann	F-Shann	B-ChaoI	F-ChaoI	CEL	β -GLU	SUR	β -XYL	
BD	1																				
MWD	0.350*	1																			
GMD	0.13	0.472**	1																		
Ks	-0.124	0.144	0.399**	1																	
SWC	-0.032	0.108	0.311*	0.05	1																
pH	0.183	-0.132	-0.18	-0.422**	0.124	1															
SOC	0.350*	0.372*	0.330*	0.213	0.078	0.148	1														
TN	0.391**	0.374*	0.493**	0.278	0.197	-0.191	0.377*	1													
AN-NO ₃	0.058	-0.107	-0.014	-0.138	-0.307*	0.023	-0.087	-0.399**	1												
AN-NH ₄	0.056	0.143	0.384**	0.349*	0.064	-0.161	0.342*	0.275	-0.198	1											
AP	0.229	-0.035	0.177	0.278	0.297*	0.071	0.336*	0.143	0.029	-0.035	1										
AK	-0.026	-0.078	0.003	-0.123	-0.224	0.26	0.098	-0.415**	0.567**	0.097	0.092	1									
B-Shann	0.116	0.063	0.007	-0.046	-0.027	0.318*	0.137	-0.141	0.311*	-0.147	0.197	0.471**	1								
F-Shann	-0.046	0.027	0.092	0.164	0.274	0.183	0.02	0.129	-0.107	-0.164	0.204	-0.093	0.149	1							
B-ChaoI	0.065	0.01	-0.047	-0.136	-0.086	-0.459**	0.19	-0.272	-0.306*	-0.106	0.126	0.553**	0.880**	0.073	1						
F-ChaoI	0.125	-0.107	-0.038	0.015	0.266	-0.533**	0.06	-0.093	-0.007	-0.314*	0.392**	0.152	0.517**	0.657**	0.503**	1					
CEL	0.435**	0.074	-0.233	-0.288	0.009	0.094	0.053	-0.062	0.182	-0.251	0.067	0.088	0.029	0.078	0.055	0.306*	1				
β -GLU	0.332*	0.267	0.25	0.306*	-0.039	-0.057	0.332*	0.18	0.116	0.151	0.174	0.289	0.442**	-0.022	0.390**	0.194	0.346*	1			
SUR	0.463**	0.208	-0.116	-0.113	-0.051	0.074	0.174	0.015	0.143	-0.169	0.081	0.159	0.086	0.153	0.114	0.364*	0.922**	0.452**	1		
β -XYL	-0.002	0.058	0.1	0.294*	-0.028	-0.108	0.158	-0.091	0.298*	-0.085	0.176	0.348*	.447**	0.036	0.444**	0.247	0.347*	0.844**	0.392**	1	

BD: 土壤容重 Bulk density; MWD: 平均重量直径 Mean weight diameter; GMD: 几何平均直径 Geometric mean diameter; Ks: 饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity; SWC: 土壤含水量 Soil water content; pH: 土壤酸碱度 Soil pH; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 土壤全氮 Total nitrogen; AN-NO₃: 硝态氮 Nitrate nitrogen; AN-NH₄: 铵态氮 Ammonium nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; B-shann: 细菌 Shannon 指数 Bacteria shannon index; F-Shann: 真菌 Shannon 指数 Fungus shannon index; B-ChaoI: 细菌 ChaoI 指数 Bacteria ChaoI index; F-ChaoI: 真菌 ChaoI 指数 Fungus ChaoI index; CEL: 纤维素酶 Cellulase; β -GLU: β -1,4-葡萄糖苷酶 β -1,4-Glucosidase; SUR: 蔗糖酶 Sucrase; β -XYL: β -1,4-木聚糖酶 β -1,4-Xylanase; * 代表在 0.05 水平上显著相关, ** 代表在 0.01 水平上显著相关

表 4 基于最小数据集隶属函数的土壤质量指数

Table 4 Soil quality index based on minimum data set membership function

处理 Treatment	土层深度 Soil depth/cm	总氮 Total nitrogen/ (g/kg)	有效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	细菌 Chao1 指数 Bacteria Chao1 index	真菌 Chao1 指数 Fungus Chao1 index	纤维素酶 Cellulase/ ($\mu\text{mol}/\text{min}$)	β -1,4-葡萄 糖苷酶 β -1,4- Glucosidase
BC	0—20	0.608	0.527	0.529	0.500	0.136	0.894
	20—40	0.565	0.468	0.667	0.432	0.424	0.789
	40—60	0.573	0.366	0.365	0.387	0.072	0.551
PGBS	0—20	0.293	0.176	0.679	0.289	0.352	0.913
	20—40	0.274	0.377	0.521	0.395	0.379	0.334
	40—60	0.289	0.309	0.164	0.371	0.71	0.149
PGBM	0—20	0.237	0.473	0.765	0.462	0.017	0.779
	20—40	0.226	0.21	0.609	0.270	0.091	0.720
	40—60	0.257	0.231	0.333	0.339	0.06	0.207
SAP	0—20	0.163	0.295	0.924	0.841	0.654	0.891
	20—40	0.156	0.525	0.794	0.623	0.21	0.422
	40—60	0.151	0.358	0.74	0.654	0.062	0.165
CK	0—20	0.178	0.367	0.745	0.566	0.905	0.954
	20—40	0.194	0.200	0.530	0.383	0.114	0.051
	40—60	0.19	0.119	0.591	0.350	0.062	0.009
权重 Weights		0.253	0.252	0.068	0.135	0.094	0.199

BC:生物炭处理;PGBS:枯草芽孢杆菌处理,PGBM:胶质芽孢杆菌处理,SAP:腐殖酸型保水剂处理,CK:对照处理

2.3.3 土壤质量影响综合评价

土壤质量指数为各指标与其权重乘积之和,各处理不同土层 SQI 如图 3 所示,土壤质量指数随土壤深度增大而降低。在 0—20cm 土层, β -1,4-葡萄糖苷酶活性对土壤质量的影响最大。在 20—40cm 土层,BC 和 PGBM 处理土壤质量主要影响因素仍然为酶活性,但其余处理土壤质量主要影响因素逐渐转变为土壤速效磷和全氮。在 40—60cm 土层,土壤速效磷和全氮对土壤质量的影响最大,其 SQI 分布在 0.030—0.145 之间,均值为 0.072。由图 3 可知,随土壤深度增加土壤养分影响土壤质量的占比逐渐变大,但土壤真菌丰富度在 0—60cm 土层对土壤质量影响均较大。对比分析不同处理 0—60cm 土层 SQI 发现,BC 处理 SQI 较 CK 平均提高 1.08 倍,PGBS 较 CK 平均提高了 42%,PGBM 较 CK 平均降低了 29.74%,SAP 较 CK 平均提高 57.90%,结合图 4 综合分析表明施用生物炭、植物根际促生菌和保水剂可提升旱作山地果园土壤质量,且生物炭处理对土壤质量的提升效果最佳,其它三种改良剂效果表现为保水剂(SAP)>枯草芽孢杆菌(PGBS)>胶质芽孢杆菌(PGBM)。

2.4 不同改良剂在黄土高原丘陵区适用性评价

生物炭、植物根际促生菌和保水剂对土壤综合质量的提升效果显著,但综合评价改良剂在黄土高原丘陵区的适用性,还需考虑苹果产量和改良成本,本研究选用销售利润(SPR_i)综合考虑改良成本与苹果产量之间

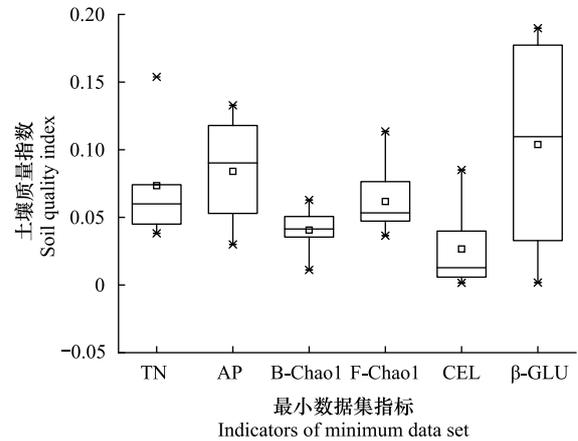


图 2 基于最小数据集的指标对土壤质量指数的影响

Fig.2 Effect of indicator based on minimum data set on soil quality index

TN:土壤全氮 Total nitrogen; AP:速效磷 Available phosphorus; B-Chao1:细菌 Chao1 指数 Bacteria Chao1 index; F-Chao1:真菌 Chao1 指数 Fungus Chao1 index; CEL:纤维素酶 Cellulase; β -GLU: β -1,4-葡萄糖苷酶 β -1,4-Glucosidase

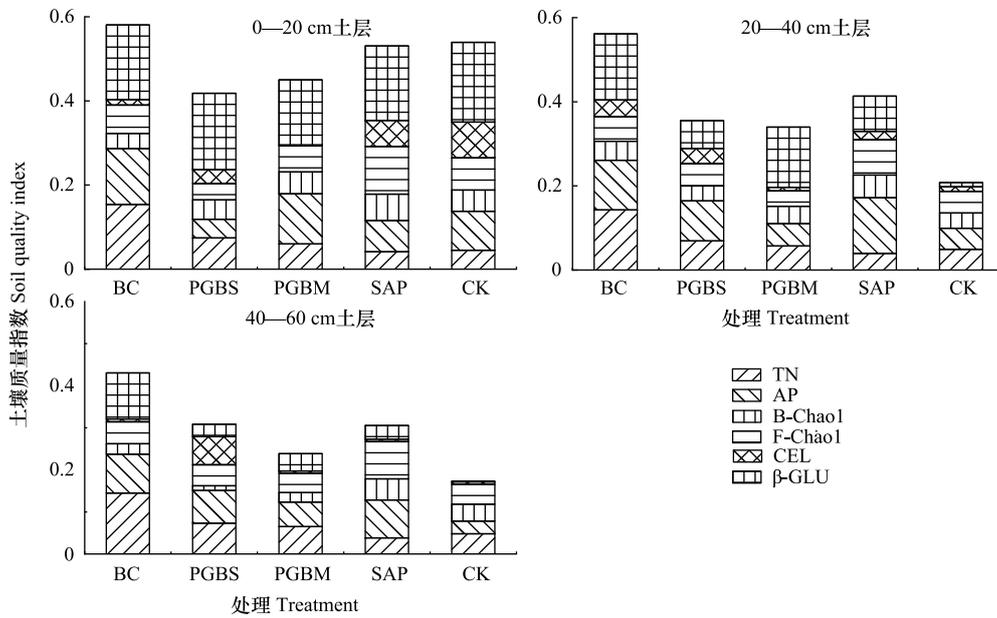


图3 不同改良剂对不同土层土壤质量指数的影响

Fig.3 Effects of different amendments on soil quality index of different soil layers

BC:生物炭处理;PGBS:枯草芽孢杆菌处理,PGBM:胶质芽孢杆菌处理,SAP:腐殖酸型保水剂处理,CK:对照处理

的关系,分析不同改良剂在黄土高原丘陵区山地果园的适用性,计算公式如下:

$$SPR_i = \frac{(\text{产量} \times \text{单价}) - \text{成本}}{\text{产量} \times \text{单价}} \quad (8)$$

由于本研究选取的是销售利润率,因此成本只考虑了改良剂的成本,没有考虑果树及果园管理成本,因此影响成本的主要因素就变成了改良剂单价及施用量。虽然生物炭的单价不是最高,但施用量最大,进而导致成本最高,根际促生菌与保水剂虽然材料价格较高,但施用量较少,成本较低,销售利润较高,具体销售利润率如表5所示。

本研究从改良剂对土壤质量提升、改良成本和苹果产量三个方面综合考虑,定义了改良剂适用性指数(Soil-ASI):

$$\text{Soil - ASI} = SPR_i \times SQI_i \quad (9)$$

表5 不同处理利润销售率

Table 5 Profit sales rate of different treatments

处理 Treatment	成本 Cost/(RMB/株)	产量 Yield/(kg/株)	单价 Unit price/(RMB/kg)	利润率 Profit rate/%
BC	120	44.12	5.40	0.50
PGBS	65	49.80	5.40	0.76
PGBM	65	46.47	5.40	0.74
SAP	52	47.68	5.40	0.80
CK	0	41.42	5.40	1.00

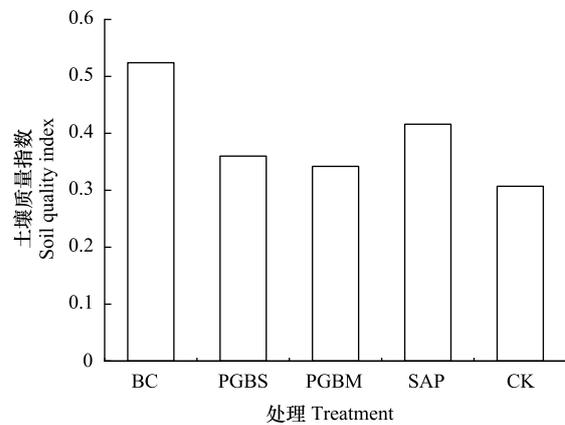


图4 土壤质量指数

Fig.4 Soil quality index

不同改良剂适用性指数如图 5 所示,保水剂处理适用性指数最高,即保水剂更适宜在黄土高原丘陵区山地果园推广应用。但综合考虑经济效益和生态环境效益,若农林废弃物可资源化则生物炭在黄土高原土壤改良方面的适用性潜力更大。

3 讨论

改良剂具有改善土壤结构、提高土壤肥力及改变土壤微生态环境的作用,但不同改良剂对不同类型土壤的影响效果也有所差异,采用 SQI 来评价土壤质量可以将复杂的土壤环境状况具体化^[37]。已有研究表明,在黄土高原丘陵区山地果园施用生物炭、植物根际促生菌和保水剂不仅对土壤结构、水分和肥力状况具有积极影响^[38],还可以减少温室气体排放从而达到固碳减排的效果^[39]。本研究以黄土高原丘陵区典型山地果园为研究对象,利用多项土壤理化、生物指标,通过土壤质量综合评价,研究了施用不同改良剂对土壤质量的影响,同时验证了该土壤质量评价方法的精确性,筛选出适宜黄土高原土壤质量提升的改良剂,并评价了其在该地区的推广适用性。本研究利用主成分分析法结合 Norm 值进行了最小数据集的筛选,运用 Norm 值考虑了指标在所有主成分上的载荷,避免了指标信息在其它主成分上的损失^[40]。相关研究表明土壤全氮、有机质、速效磷以及蔗糖酶等指标可以被应用于最小数据集集中较全面的评价土壤质量^[41-45]。研究表明,全氮、速效磷和葡萄糖苷酶 3 个指标能较好的评价土壤质量,除此之外,细菌和真菌 Chao1 指数入选了该研究区的 MDS,说明该研究区域土壤质量的主要影响因素除了全氮、速效磷以外,土壤微生物丰度及活性对土壤质量也有较为显著的影响。这主要是由研究区气候和土壤环境共同决定的,研究区年降雨量小,而苹果生长耗水量大,导致深层土壤水分含量较低,此外深层土壤有机质含量低,进而导致深层微生物活性较低。施用改良剂后改变了土壤结构,改善了土壤水肥气状况,促进了微生物生长繁殖,提高了土壤微生物活性,进而增加了土壤中微生物优势种群相对丰度,这与冯慧琳等^[46]和乌英嘎等^[47]的研究结果一致。因此,本研究筛选的 MDS 中的 6 个指标对黄土高原丘陵区山地果园改良剂提升土壤质量的综合评价具有一定的指导意义。

良好的土壤质量是维持黄土高原丘陵区苹果经济产业可持续发展的关键。通过对土壤综合质量评价发现,土壤全氮、速效磷和葡萄糖苷酶是影响土壤质量的主要因素。生物炭、植物根际促生菌和保水剂均可以提升土壤质量,且生物炭和保水剂提升效果更佳,根际促生菌次之。土壤改良剂的改良效果与自身特性有关,本研究所选用的生物炭是苹果树枝在 500℃ 绝氧条件下热裂解的产物,具有稳定的芳香族结构,进而赋予其高度的化学稳定性和生物稳定性^[48],矿化速率极为缓慢,施用到土壤中有效的改善了土壤结构,增加了土壤有机碳、全氮和速效养分含量,起到提升土壤质量的作用。保水剂为腐殖酸型保水剂,自身呈弱酸性,施用后能够显著改善土壤水肥状况,为微生物的生长繁殖提供良好的土壤环境,进而促进微生物生长繁殖,增加土壤微生物丰度,同时提高了土壤酶活性。根际促生菌可以加快土壤微生物代谢,促进生成更多微生物碳源,但在该区域水分有限的情况下,不能很好的发挥作用,因此土壤改良的效果较生物炭和保水剂差。除此之外,在土壤质量综合评价过程中,不仅要关注生物炭、植物根际促生菌和保水剂三种改良剂对土壤质量的提升效果,还应结合该区域实际情况,考虑产投比相关要素。通过综合评价三种改良剂的土壤改良效果和投入产出比发现,保水剂最适宜在该地区推广应用。但研究区农林废弃物量大、种类多,果园修剪废弃苹果树枝、作物秸秆以及香菇菌棒等均可作为生物炭制作原料,如果农林废弃物能够资源化,生物炭的改良成本会大幅降低,其在黄土高原土壤改良方面具有很大的应用潜力。

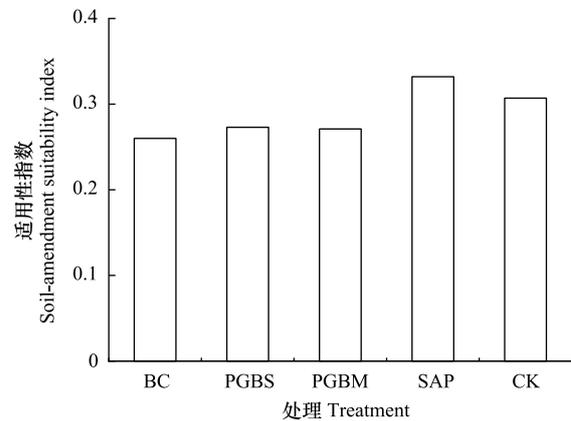


图 5 不同改良剂适用性指数

Fig.5 The application index of different amendments

4 结论

(1) 本研究通过对不同改良剂施用条件下 20 项土壤物理、化学和生物指标进行分析, 获得不同改良剂改善土壤质量评价的 MDS。该 MDS 共包含 6 项土壤指标, 分别为细菌 Chao1 指数、总氮、纤维素酶、真菌 Chao1 指数、 β -1,4-葡萄糖苷酶以及速效磷。通过优化筛选出的 MDS 指标可用于研究区不同改良剂提升土壤质量的效果评价, 并对其它地区土壤改良剂对土壤质量影响效果评价具有重要参考价值。

(2) 对黄土高原丘陵区山地果园施用生物炭、植物根际促生菌和保水剂土壤质量评价发现, 不同改良剂均可提升土壤质量, 其中生物炭处理对土壤质量的提升效果最佳, 其次是保水剂, 胶质芽孢杆菌改良效果一般。

(3) 通过综合评价不同改良剂的适用性发现保水剂最适宜在黄土高原丘陵区山地果园推广应用, 若农林废弃物可资源化, 生物炭在黄土高原土壤改良方面具有很大的应用潜力。

参考文献(References):

- [1] 陆皎云. 施氮磷肥对黄土高原不同生长阶段紫花苜蓿叶片养分重吸收的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [2] 冯晓明, 傅伯杰, 苏常红. 黄土高原地区生态修复对水资源的影响[C]. 中国新疆乌鲁木齐: 地理学核心问题与主线-中国地理学会 2011 年学术年会暨中国科学院新疆生态与地理研究所建所五十年庆典, 2011: 67.
- [3] 贾如浩, 杨建利, 赵西宁, 高晓东, 宋小林, 张伟. 二元覆盖对苹果树低耗水生育期土壤水分的影响. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4082-4090.
- [4] 柴冠群, 赵亚南, 黄兴成, 张跃强, 石孝均. 不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力. 水土保持学报, 2017, 31(001): 296-302.
- [5] 陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展. 生态环境, 2008, 17(3): 1282-1289.
- [6] 张美芝, 耿煜函, 张薇, 林昕, 温佳旭, 陈雪丽, 肖洋. 秸秆生物炭在农田中的应用研究综述. 中国农学通报, 2021, 37(21): 59-65.
- [7] 胡江春, 薛德林, 马成新, 王书锦. 植物根际促生菌(PGPR)的研究与应用前景. 应用生态学报, 2004(10): 1963-1966.
- [8] 李云开, 杨培岭, 刘洪禄. 保水剂农业应用及其效应研究进展. 农业工程学报, 2002(02): 201-206.
- [9] 吴增芳. 土壤结构改良剂: 科学出版社, 1976: 24-34.
- [10] Liu X Y, Ye Y X, Liu Y M, Zhang A F, Zhang X H, Li L Q, Pan G X, Kibue G W, Zheng J F, Zheng J W. Sustainable biochar effects for low carbon crop production: a 5-crop season field experiment on a low fertility soil from Central China. *Agricultural Systems*, 2014, 129: 22-29.
- [11] 尚杰, 耿增超, 赵军, 耿荣, 赵映翠. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响. 应用生态学报, 2015, 26(07): 1969-1976.
- [12] Sandhu S S, Kumar S. Impact of three types of biochar on the hydrological properties of eroded and depositional landscape positions. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(4): 878-888.
- [13] 刘五星, 徐旭士, 杨启银, 吴向华. 胶质芽孢杆菌对土壤矿物的分解作用及机理研究. 土壤, 2004(05): 547-550.
- [14] Akbar M, Aslam N, Khalil T, Akhtar S, Siddiqi E H, Iqbal M S. Effects of seed priming with plant growth-promoting rhizobacteria on wheat yield and soil properties under contrasting soils. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42(17): 2080-2091.
- [15] Xiao A W, Li Z, Li W C, Ye Z H. The effect of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on arsenic accumulation and the growth of rice plants (*Oryza sativa* L.). *Chemosphere*, 2020, 242: 1-8.
- [16] Zheng W J, Zeng S Q, Bais H, LaManna J M, Hussey D S, Jacobson D L, Jin Y. Plant Growth - Promoting Rhizobacteria (PGPR) Reduce Evaporation and Increase Soil Water Retention. *Water Resources Research*, 2018, 54(5): 3673-3687.
- [17] Narayanan A, Kartik R, Sangeetha E, Dhamodharan R. Super water absorbing polymeric gel from chitosan, citric acid and urea: Synthesis and mechanism of water absorption. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 191: 152-160.
- [18] 余坤, 李国建, 李百凤, 褚晓升, 冯浩. 不同秸秆还田方式对土壤质量改良效应的综合评价. 干旱地区农业研究, 2020, 38(03): 213-221.
- [19] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 张燕江, 崔勇兴, 朱世雷. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价. 农业工程学报, 2019, 35(16): 265-273.
- [20] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 袁国军. 生物炭与氮肥配施对枣园土壤培肥效应的综合评价. 农业工程学报, 2018, 34(01): 134-140.
- [21] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响. 环境科学, 2019, 40(07): 3388-3396.
- [22] 王颖, 孙层层, 周际海, 王彤彤, 郑纪勇. 生物炭添加对半干旱区土壤细菌群落的影响. 中国环境科学, 2019, 39(05): 380-389.
- [23] 杨浩, 王百田, 岳征文, 王婷, 李振. 应用保水剂对黄绵土水分特征的影响研究. 水土保持研究, 2011(03): 182-186.
- [24] 周虎, 吕贻忠, 李保国. 土壤结构量化研究进展. 土壤学报, 2009, 46(03): 501-506.

- [25] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [26] Pansu M, Gautheyrou J. Handbook of Soil Analysis[M]. 2006.
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 农业出版社, 1986.
- [28] Schmidt, Philipp-André, M Bólint, Greshake B, et al. Illumina metabarcoding of a soil fungal community. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 65: 128-132.
- [29] 赵力. 基于高通量测序技术的枯草芽孢杆菌在体动态变化研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [30] 李清雪, 贾志清. 高寒沙地不同植被恢复类型土壤肥力质量差异及评价. 土壤通报, 2015, 46(05): 1145-1154.
- [31] 喻阳华, 王璐, 钟欣平, 秦仕忆. 贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林土壤质量评价. 生态学报, 2018, 38(21): 7850-7858.
- [32] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 娄义宝, 何伟, 夏建荣. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价. 农业工程学报, 2019, 35(03): 256-267.
- [33] 张子龙, 王文全, 缪作清, 李世东, 杨建忠. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用. 生态学杂志, 2013, 32(06): 1636-1644.
- [34] 刘伟玮, 刘某承, 李文华, 郑颖, 王月婵. 辽东山区林参复合经营土壤质量评价. 生态学报, 2017, 37(08): 2631-2641.
- [35] 邵国栋, 艾娟娟, 孙启武, 董玉峰, 李建伟. 昆崙山不同林分类型土壤质量状况及评价. 林业科学研究, 2018, 31(06): 175-184.
- [36] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 南雄雄, 周密, 侯永辉. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173-180.
- [37] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
- [38] 刘帅, 赵西宁, 李钊, 丁艳宏, 高晓东, 王建平. 不同改良剂对旱地苹果园壤土团聚体和水分的影响. 水土保持学报, 2021, 35(02): 193-199.
- [39] 李钊, 刘帅, 丁艳宏, 孙文浩, 高晓东, 赵西宁. 不同改良剂对旱地苹果园温室气体排放的影响. 农业环境科学学报, 2021, 40(01): 227-236.
- [40] 吴春生, 刘高焕, 黄翀, 刘庆生, 管续栋. 基于 MDS 和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估. 资源科学, 2016, 38(07): 1275-1286.
- [41] 李强, 许明祥, 赵允格, 高丽倩, 张金, 张晓伟. 黄土高原坡耕地沟蚀土壤质量评价. 自然资源学报, 2012, 27(06): 1001-1012.
- [42] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 王兵. 黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价. 水土保持研究, 2018, 25(04): 30-35.
- [43] 王鹏飞, 贾璐婷, 杜俊杰, 张建成, 穆霄鹏, 丁伟. 黄土丘陵沟壑区欧李栽植对土壤质量改良作用的评价. 草业学报, 2017, 26(03): 65-74.
- [44] 罗珠珠, 黄高宝, 蔡立群, 张仁陟, 李玲玲, 谢军红. 黄土高原旱地土壤质量评价指标研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(02): 127-137.
- [45] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843-1848.
- [46] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制. 环境科学, 2021, 42(01): 422-432.
- [47] 乌英嘎, 张贵龙, 赖欣, 刘红梅, 杨殿林. 生物炭施用对华北潮土土壤细菌多样性的影响. 农业环境科学学报, 2014, 33(05): 965-971.
- [48] Laghari M, Mirjat M S, Hu Z, Fazal S, Xiao B, Hu M, Chen Z, Guo D. Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. Catena, 2015, 135: 313-320.