

基于最小数据集的集约化葡萄园土壤健康评价

王斌¹, 李云¹, 李瑞鹏², 方菲¹, 张江周^{2,3*}, 张俊伶²

(1. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012; 2. 中国农业大学资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院/植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100193; 3. 福建农林大学资源与环境学院/国际镁营养研究所, 福州 350002)

摘要: 健康土壤是生产高产优质葡萄的基础, 目前葡萄园不合理管理导致果园土壤生产力下降和生态失衡。为摸清集约化葡萄园土壤健康状况, 该研究以河北省曲周县典型葡萄园为研究对象, 通过测定 20 项土壤物理、化学和生物学指标, 利用主成分分析法构建最小数据集, 开展土壤健康评价并揭示葡萄园存在的主要障碍因子。结果表明, 集约化葡萄园土壤健康评价最小数据集由有机碳、亚表层土壤硬度、交换性钠、容重、含水率和水稳性团聚体 6 个指标构成。利用线性和非线性评分函数, 基于全数据集和最小数据集计算的土壤健康指数间呈显著正相关 ($P < 0.01$), 这说明最小数据集可以代替全数据集用于葡萄园土壤健康评价。基于最小数据集, 利用线性和非线性评分函数获得的葡萄园土壤健康指数范围分别为 0.39~0.59 和 0.36~0.66, 平均值分别为 0.52 和 0.51, 处于中等水平。不同树龄葡萄园土壤健康指数差异不显著 ($P > 0.05$)。集约化葡萄园土壤障碍因子主要有土壤压实、养分不平衡和有机碳含量低等问题。通过适当减少田间管理频率, 结合增施(生物)有机肥、种植覆盖作物和养分综合管理能有效消减土壤障碍因子, 提升葡萄园土壤健康水平, 促进当地葡萄产业可持续发展。

关键词: 土壤; 葡萄园; 主成分分析; 最小数据集; 土壤健康指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310029

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-08-0071-09

王斌, 李云, 李瑞鹏, 等. 基于最小数据集的集约化葡萄园土壤健康评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 71-79. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310029 <http://www.tcsae.org>

WANG Bin, LI Yun, LI Ruipeng, et al. Soil health evaluation in the intensive vineyard based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(8): 71-79. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310029 <http://www.tcsae.org>

0 引言

健康土壤具有良好的物理结构、功能、弹力和恢复力, 能够维持高生产力, 保障粮食安全和动植物健康^[1]。土壤质量和土壤健康是常常被提起的两个概念, 土壤质量更关注土壤的功能, 土壤健康强调了土壤的生物活性和动态变化, 虽然两者的侧重点有所不同, 但两者基本同义, 可以相互替代使用^[1-2]。在集约化农业生产中, 过量的化肥投入及不合理的耕作造成了土壤酸化、养分不平衡、物理结构障碍等问题, 严重影响作物生产和生态系统功能, 制约了农业可持续发展^[3-5]。因此, 系统地评价及诊断土壤健康状况可以科学地指导农业管理, 为健康土壤培育提供重要理论支撑。

半定量法和定量法是评价土壤健康常采用的两种方法。视觉诊断法是半定量法的典型代表^[6], 但还需进一步定量。中国耕地质量评价方法、康奈尔土壤健康评价

方法、基于土壤管理的土壤健康评价方法是典型的定量评价方法^[7-8]。目前, 在开展土壤健康评价时广泛采用定量的评价方法。评价指标的选择是进行土壤健康评价最关键的一步, 全数据集 (total data set, TDS) 和最小数据集 (minimum data set, MDS) 是指标选择的两种方法。前者测定指标多, 后者是前者的简化数据集, 测试指标较少, 可以减少测试成本和提高测试效率^[9], 因此构建最小数据集用于土壤健康评价已经被广泛采用。常用构建最小数据集的方法包括专家建议、主成分分析、判别分析、聚类分析、偏最小二乘回归、最佳子集回归等^[10-12]。中国耕地质量评价方法采用德尔菲法 (又称专家调查法)、聚类分析法和层次分析法构建了包含自然条件、土壤条件、土壤管理等多因素最小数据集, 且不同区域数据集也存在差别^[13]。邓绍欢等^[14]和刘湘君等^[15]采用主成分分析法分别建立了南方冷浸田和黄淮海旱作区的最小数据集, 前者包含 pH、全氮、有效锰、 Fe^{2+} 、C/N、线虫数量 6 个指标, 后者包含土壤有机质、阳离子交换量、pH、耕作层厚度、耕作层穿透阻力和耕作层压实度 6 个指标。CHENG 等^[16]采用主成分分析法建立了脐橙园土壤健康评价最小数据集, 包含有机质、粉粒含量、pH、有效硼和速效钾。ZHANG 等^[12]利用最佳子集回归方法筛选出亚表层土壤硬度、水稳性团聚体、有效钾、有效铁、有机碳和土壤蛋白 6 个指标构建最小数据集,

收稿日期: 2023-10-08 修订日期: 2024-03-30

基金项目: 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心 2023 年度农业农村碳达峰碳中和领域研究课题; 国家重点研发计划项目 (2022YFD1901300)

作者简介: 王斌, 工程师, 主要研究方向为土壤污染防治和土壤健康。

Email: 397012293@qq.com

*通信作者: 张江周, 博士, 讲师。研究方向为土壤健康与耕地产能提升。

Email: zjzky2010@163.com

用于华北平原小麦-玉米轮作体系土壤健康评价。在南方冷浸田、黄淮海旱作区、华北平原小麦-玉米轮作体系等区域开展土壤健康评价时,对比分析了利用全数据集和最小数据集计算的土壤健康指数,两者之间呈显著的正相关关系^[12, 14-15],这说明可以用最小数据集代替全数据集用于土壤健康评价。但在评价过程中发现不同评价对象筛选出的最小数据集各不相同,这说明最小数据集的建立具有制宜性。因此,在进行土壤健康评价时,需要针对不同的评价对象筛选出适宜当地条件的最小数据集。

土壤健康指标筛选完后需采用线性评分函数 (linear scoring function, L)、非线性评分函数 (non-linear scoring function, NL) 或者阈值法进行指标标准化处理,转化为 0~1 之间无量纲数字^[7, 17-18],进行土壤健康评价。采用阈值法进行指标标准化时,化学指标一般具有参考标准,但是生物指标和物理指标缺乏参考标准,导致评价缺乏整体性。而线性和非线性评分函数法有效地克服了阈值法的缺点,这两种方法被广泛应用于不同施肥管理模式、土地利用方式转变、种植体系等的土壤健康评价^[12, 18-19],且线性和非线性评分函数计算的土壤健康指数与其他方法计算的结果比较接近,说明这两种方法可以准确地反映土壤健康评价状况。

葡萄是世界有名的水果,在世界各地均有种植。中国是世界葡萄第一生产国,据国家统计局数据显示,2021年中国葡萄总产量为 1500 万 t,新疆、河北、山东和云南葡萄产量位居全国前四。由于葡萄具有较高的经济价值,农民为了获得更高的产量,投入大量的生产资料。在集约化葡萄生产中化肥投入量是葡萄养分需求量的几倍甚至是几十倍,养分投入量高且比例不协调,而有机肥投入量较少^[20-21]。这种不合理的施肥方式造成了葡萄园土壤有机质含量低,养分含量不均衡^[22]。同时,频繁的人为活动和机械耕作导致部分葡萄园出现土壤容重过大(最大值为 2.02 g/cm³)和总孔隙度降低的现象^[23]。目前在葡萄土壤肥力、土壤质量评价等方面开展大量研究工作,但关于简化评价指标体系的研究较少^[22, 24-27]。本研究以河北省曲周县典型集约化生产葡萄园为研究对象,基于康奈尔土壤健康评价指标体系确定土壤物理、化学和生物学指标^[8],通过主成分分析法建立集约化葡萄园土壤健康评价最小数据集,并验证其可行性,为明确集约化葡萄园土壤健康现状及健康土壤培育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于中国农业大学曲周实验站前衙村葡萄研究基地(36.69°N, 114.96°E),该地区暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 13.1 °C。年平均降雨量为 556.2 mm,降水主要集中在 7—9 月份,占全年降雨量的 1/3。该区葡萄种植面积 133.3 hm²,占比耕地面积 85%,主要种植巨峰、京亚、藤稔、黑巴拉多、维多利

亚等品种,其中巨峰品种占葡萄种植面积的 60%,是当地主栽品种。研究区域土壤类型为潮土,土壤质地为中壤土。

1.2 土壤样品采集与测定

本研究选取巨峰葡萄园,葡萄种植年限 3~30 a 不等,共 42 个果园,每个果园间距至少在 50 m 以上。根据葡萄种植年限分为 10 a 以下(平均树龄 6 a)、10~15 a(平均树龄 13 a)和 15 a 以上(平均树龄 22 a) 3 个组,样本数量分别为 13、17 和 12。于 2020 年 10 月葡萄收获后,采集 0~20 cm 土层土壤样品,每个果园利用土钻采集样品,5 点(每个点间距在 5 m 以上)混合成一个样品。将采集的土壤样品中树枝、石头、杂草等挑拣出去,大土块捏碎。土壤样品(1 kg)分为两部分,一部分新鲜土壤样品(100 g)保存在 4 °C 冰箱中,用于测定土壤呼吸;其余样品带回实验室自然风干、过筛后用于测定土壤理化指标。同时利用铁铲采集原状土用于测定土壤水稳性团聚体。

基于康奈尔土壤健康评价指标体系,结合当地存在的潜在盐碱的问题,共测定土壤物理、化学和生物学指标 20 项。土壤含水率采用烘干法测定,采用环刀法测定土壤容重,表层硬度(0~10 cm)和亚表层硬度(10~20)采用硬度计测定^[8],水稳性团聚体(0.25~2 mm)采用湿筛法测定^[28],采用电位法测定 pH 值,重铬酸钾外加热法测定有机碳,碳氮分析仪测定全氮,分光光度计比色法测定有效磷(Olsen-P),火焰光度法测定速效钾,交换性钙、交换性镁、有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、交换性钠采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定,土壤活性炭采用高锰酸钾氧化碳测定法^[29],土壤蛋白采用柠檬酸钠萃取由分光光度计测定^[30],土壤呼吸采用气相色谱仪测定。

1.3 土壤健康评价

1.3.1 最小数据集构建

采用主成分分析法构建最小数据集。评价土壤健康时,选择特征值大于 1 的主成分作为评价指标。对于每一个主成分,只保留因子荷载量绝对值在最大因子荷载 10% 范围内的指标。如果一个主成分只有一个指标符合要求,则被选入最小数据集。若一个主成分包含多个指标符合要求,则对指标进行皮尔森相关分析;若相关系数小于 0.6,所有指标均被选入最小数据集,否则只选择荷载最高的指标为最小数据集^[31]。

1.3.2 土壤健康评价评分函数建立

采用线性和非线性评分函数将每个土壤健康指标转化为从 0~1 之间的无量纲数字^[7, 17-18]。对于线性评分函数,属于“越大越好”和“越小越好”的指标分别用式(1)和式(2)计算。对于属于“中间最优型”的指标,当数值低于最佳范围时,用式(1)计算;当数值高于最佳范围时,用式(2)计算。

$$S_{L1} = x/x_{max} \quad (1)$$

$$S_{L2} = x_{min}/x \quad (2)$$

式中 S_L 是土壤线性评分函数， x 是土壤健康指标的实测值， x_{max} 和 x_{min} 是测得各个土壤指标的最大值和最小值，用所有相应测定指标的前或后 5% 取平均值获得^[17-18]。

对于非线性评分函数：

$$S_{NL} = \frac{a}{1 + (x/x_{\mu})^b} \quad (3)$$

式中 S_{NL} 土壤非线性评分函数，介于 0 到 1 之间； a 是评分函数达到的最高分，在本研究中等于 1； x_{μ} 是每个相应指标的平均值； b 是方程斜率，符合“越大越好”的指标评分函数 b 值为 -2.5，符合“越小越好”指标的评分函数 b 值为 2.5^[17-18]。符合“越大越好”的指标包括含水率、水稳性团聚体、全氮、速效钾、交换性钙、交换性镁、有机碳、活性碳、土壤蛋白和土壤呼吸；表层硬度、亚表层硬度、容重和交换性钠属于“越小越好”型；“中间最优型”的指标有 pH、有效磷、有效铁、有效锰、有效铜和有效锌，最适范围参考李宝鑫等^[22] 和尹兴等^[24] 的研究结果。

1.3.3 土壤健康指数计算

采用加权综合法计算土壤健康指数 (soil health index, SHI)，利用主成分分析法计算各个指标的权重^[31]。

$$SHI = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot S_i) \quad (4)$$

式中 S_i 为各个指标利用线性或非线性评分函数得分， n 为用于计算土壤健康指数的指标数量， W_i 为每个土壤指标对应的权重值。

1.4 数据统计分析

采用 IBMSPSS 25.0 进行数据描述性统计分析、相关性分析、方差分析和主成分分析。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA)，Duncan's 法检验不同树龄葡萄间土壤健康指数差异 ($P < 0.05$)。利用 OriginPro 2023b 进行线性回归分析及作图。

2 结果与分析

2.1 葡萄园土壤健康指标描述性统计

葡萄园土壤物理、化学和生物学指标见表 1。对于物理指标而言，土壤含水率平均值为 14.6%，表层和亚表层土壤硬度分别为 1 203 kPa 和 1 023 kPa，变异系数分别 40.5% 和 32.1%。土壤容重变化范围为 1.23~1.57 g/cm³，平均值为 1.42 g/cm³。水稳性团聚体质量分数为 16.7%，变异系数为 37.0%。

表 1 集约化葡萄园土壤健康指标描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of measured soil health indicators in intensive vineyards

| 指标 Indicator | 土壤健康指标 Soil health indicators | 最小值 Minimum | 最大值 Maximum | 平均值 Mean | 标准差 Standard deviation | 变异系数 Coefficient of variation/% |
|--------------------------------|--|----------------|----------------|-------------|---------------------------|------------------------------------|
| 物理指标 Physical indicators | 含水率/% | 7.8 | 20.5 | 14.6 | 2.5 | 17.4 |
| | 表层硬度/kPa | 233 | 2 620 | 1 203 | 488 | 41 |
| | 亚表层硬度/kPa | 552 | 1 922 | 1 023 | 328 | 32 |
| | 容重/(g·cm ⁻³) | 1.23 | 1.57 | 1.42 | 0.07 | 4.96 |
| | 水稳性团聚体/% | 6.0 | 30.0 | 16.7 | 6.2 | 37.0 |
| 化学指标 Chemical indicators | pH 值 | 6.96 | 8.30 | 7.94 | 0.26 | 3.25 |
| | 全氮/(g·kg ⁻¹) | 7.2 | 15.0 | 11.4 | 1.7 | 15.3 |
| | 有效磷/(mg·kg ⁻¹) | 4.9 | 52.8 | 37.4 | 10.5 | 28.1 |
| | 速效钾/(mg·kg ⁻¹) | 200 | 623 | 397 | 109 | 27 |
| | 交换性钙/(mg·kg ⁻¹) | 3 898 | 5 050 | 4 430 | 298 | 7 |
| | 交换性镁/(mg·kg ⁻¹) | 280 | 672 | 460 | 98 | 21 |
| | 有效铁/(mg·kg ⁻¹) | 6.5 | 16.5 | 11.5 | 2.4 | 21.0 |
| | 有效锰/(mg·kg ⁻¹) | 6.6 | 12.8 | 9.2 | 1.4 | 15.0 |
| | 有效铜/(mg·kg ⁻¹) | 0.8 | 2.5 | 1.6 | 0.4 | 27.2 |
| | 有效锌/(mg·kg ⁻¹) | 1.3 | 10.0 | 3.7 | 1.8 | 49.9 |
| 生物学指标 Biological indicators | 交换性钠/(mg·kg ⁻¹) | 12.7 | 262.0 | 86.1 | 50.7 | 58.9 |
| | 有机碳/(g·kg ⁻¹) | 5.6 | 13.1 | 8.3 | 1.7 | 20.2 |
| | 活性碳/(mg·kg ⁻¹) | 161 | 378 | 271 | 56 | 20 |
| | 土壤蛋白/(mg·g ⁻¹) | 1.0 | 2.8 | 1.7 | 0.4 | 21.9 |
| | 土壤呼吸/(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹) | 5.6 | 14.6 | 10.8 | 1.9 | 17.2 |

对于土壤化学指标，葡萄园土壤 pH 值变化范围为 6.96~8.30，平均值为 7.94，属于碱性土壤。土壤全氮平均值为 11.4 g/kg，变异系数为 15.3%。土壤有效养分丰缺状况参考李宝鑫等^[22] 和尹兴等^[24] 的分级标准，土壤有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁和有效铁平均含量为 37.4、397、4 430、460 和 11.5 mg/kg，均处于丰富水平。土壤有效锰含量平均为 9.19 mg/kg，处于中等水平，土壤有效铜和有效锌平均含量分别为 1.6 和 3.7 mg/kg，分别处于缺乏和丰富水平。土壤交换性钠含量平均值为 86.1 mg/kg，变异系数为 58.9%。

葡萄园土壤生物指标包括有机碳、活性碳、土壤蛋

白和土壤呼吸。土壤有机碳平均质量分数为 8.3 g/kg (5.6~13.1 g/kg)，处于缺乏水平。土壤活性炭平均质量分数为 271 mg/kg，土壤蛋白和土壤呼吸平均值分别为 1.7 mg/g 和 10.8 mg/(kg·d)。

2.2 葡萄园土壤健康评价最小数据集建立

主成分分析结果显示，特征值 > 1 主成分有 5 个，累计贡献率为 68.2%。在第 1 主成分到第 5 主成分，满足因子荷载量绝对值在最大因子荷载 10% 范围内的指标包括有机碳、全氮、速效钾、有效锰、土壤蛋白、表层土壤硬度、亚表层土壤硬度、交换性钠、容重、含水率和水稳性团聚体 (表 2)。

表2 土壤健康指标主成分分析

Table 2 Principal component analysis of the soil health indicators

| 土壤健康指标 Soil health indicators | 成分 Component | | | | |
|------------------------------------|--------------|-------|--------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 含水率 Soil water content | 0.11 | -0.05 | 0.25 | -0.72 | 0.02 |
| 表层硬度 Surface hardness | 0.36 | 0.72 | 0.10 | 0.19 | -0.13 |
| 亚表层硬度 Subsurface hardness | 0.18 | 0.78 | 0.20 | 0.02 | 0.004 |
| 容重 Bulk density | 0.08 | 0.04 | 0.26 | 0.74 | -0.18 |
| 水稳性团聚体 Wet aggregate stability | -0.09 | -0.07 | 0.06 | -0.12 | 0.89 |
| pH值 pH value | -0.41 | 0.45 | -0.34 | -0.25 | -0.03 |
| 全氮 Total nitrogen | 0.86 | 0.23 | 0.08 | 0.10 | 0.16 |
| 有效磷 Available P | 0.71 | -0.15 | 0.19 | 0.18 | 0.01 |
| 速效钾 Available K | 0.84 | 0.03 | 0.08 | 0.13 | -0.11 |
| 交换性钙 Exchangeable Ca | -0.35 | 0.41 | -0.002 | 0.50 | 0.03 |
| 交换性镁 Exchangeable Mg | 0.09 | 0.34 | 0.77 | 0.18 | -0.08 |
| 有效铁 Available Fe | 0.77 | 0.19 | 0.06 | -0.15 | -0.22 |
| 有效锰 Available Mn | 0.81 | 0.20 | -0.03 | -0.24 | -0.18 |
| 有效铜 Available Cu | 0.77 | 0.11 | 0.20 | -0.15 | -0.16 |
| 有效锌 Available Zn | 0.75 | 0.14 | 0.19 | 0.04 | -0.14 |
| 交换性钠 Exchangeable Na | 0.08 | 0.04 | 0.90 | -0.15 | 0.07 |
| 有机碳 Soil organic carbon | 0.86 | 0.19 | 0.04 | 0.06 | 0.23 |
| 活性碳 Permanganate oxidizable carbon | 0.58 | -0.02 | -0.15 | -0.10 | 0.44 |
| 土壤蛋白 Soil protein | 0.82 | -0.01 | -0.10 | -0.12 | 0.23 |
| 土壤呼吸 Soil respiration | 0.24 | 0.37 | 0.13 | 0.31 | -0.02 |
| 特征值 Eigenvalue | 6.67 | 1.98 | 1.88 | 1.78 | 1.33 |
| 方差贡献率 Variance contribution rate | 33.3 | 9.88 | 9.41 | 8.90 | 6.63 |
| 累计贡献率 Cumulative contribution rate | 33.3 | 43.2 | 52.6 | 61.5 | 68.2 |

通过指标间的皮尔森分析, 去除相关系数 > 0.6 的指标 (图1), 最终确定用于葡萄园土壤健康评价的最小数据集为有机碳、亚表层土壤硬度、交换性钠、容重、含水率和水稳性团聚体。

2.3 葡萄园土壤健康评价

对全数据集和最小数据集进行主成分分析, 进而计算得到各个指标的权重 (表3和表4), 利用式(4)计算得到土壤健康指数。线性评分函数计算的全数据集土壤健康指数 (SHI-L_{TDS}) 变化范围 0.57~0.75, 平均值为 0.67, 变异系数为 6.58%; 最小数据集土壤健康指数

(SHI-L_{MDS}) 平均值为 0.65 (0.52~0.79), 变异系数为 9.33%。从两者的变异系数来看, 利用最小数据集计算的土壤健康指数波动较大 (图2a)。

表3 全数据集评价土壤健康公因子方差及权重

Table 3 Community and weight of soil health indicators of total data set

| 土壤健康指标 Soil health indicators | 公因子方差 Community | 权重 Weight |
|------------------------------------|--------------------|--------------|
| 含水率 Soil water content | 0.603 | 0.044 |
| 表层硬度 Surface hardness | 0.716 | 0.053 |
| 亚表层硬度 Subsurface hardness | 0.673 | 0.049 |
| 容重 Bulk density | 0.658 | 0.048 |
| 水稳性团聚体 Wet aggregate stability | 0.825 | 0.060 |
| pH值 pH value | 0.549 | 0.040 |
| 全氮 Total nitrogen | 0.837 | 0.061 |
| 有效磷 Available P | 0.601 | 0.044 |
| 速效钾 Available K | 0.735 | 0.054 |
| 交换性钙 Exchangeable Ca | 0.546 | 0.040 |
| 交换性镁 Exchangeable Mg | 0.752 | 0.055 |
| 有效铁 Available Fe | 0.708 | 0.052 |
| 有效锰 Available Mn | 0.784 | 0.058 |
| 有效铜 Available Cu | 0.691 | 0.051 |
| 有效锌 Available Zn | 0.641 | 0.047 |
| 交换性钠 Exchangeable Na | 0.845 | 0.062 |
| 有机碳 Soil organic carbon | 0.844 | 0.062 |
| 活性碳 Permanganate oxidizable carbon | 0.561 | 0.041 |
| 土壤蛋白 Soil protein | 0.758 | 0.056 |
| 土壤呼吸 Soil respiration | 0.306 | 0.022 |

非线性评分函数计算的全数据集 (SHI-NL_{TDS}) 和最小数据集土壤健康指数 (SHI-NL_{MDS}) 平均值分别为 0.52 (0.39~0.59) 和 0.51 (0.36~0.66), 变异系数分别为 8.40% 和 12.3%。与线性评分函数计算的结果类似, 最小数据集计算的土壤健康指数波动较大 (图2b)。

基于全数据集和最小数据集的两种评分函数计算的土壤健康指数结果显示 (表5), 不同种植年限葡萄园土壤健康指数差异不显著 ($P > 0.05$)。

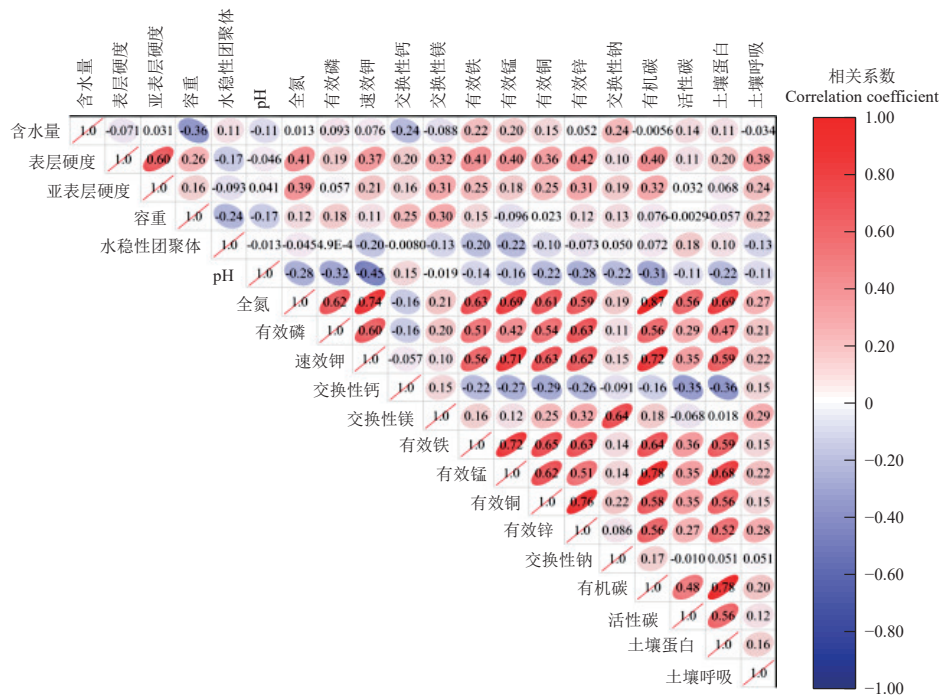


图1 土壤健康指标的皮尔森相关分析

Fig.1 Pearson correlation of soil health indicators

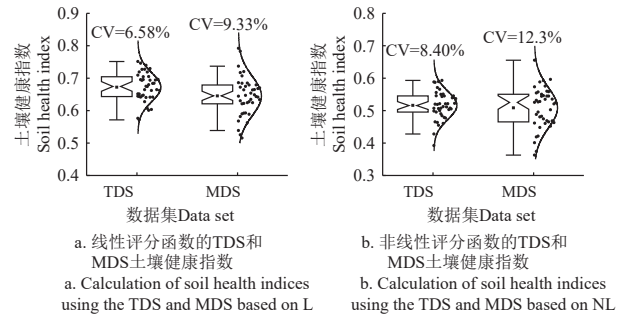
表 4 最小数据集评价土壤健康公因子方差、权重及相关的土壤功能

Table 4 Community and weight of soil health indicators using the minimum data set and related soil functions

| 土壤健康指标 Soil health indicators | 公因子方差 Community | 权重 Weight | 土壤功能 Soil functions |
|----------------------------------|--------------------|--------------|------------------------|
| 含水率 Soil water content | 0.605 | 0.198 | 土壤水保持 |
| 亚表层硬度 Subsurface hardness | 0.538 | 0.176 | 土壤板结与根系下扎阻力 |
| 容重 Bulk density | 0.653 | 0.214 | 土壤通气性 |
| 水稳性团聚体 Wet aggregate stability | 0.319 | 0.105 | 土壤入渗能力 |
| 交换性钠 Exchangeable Na | 0.470 | 0.154 | 土壤盐胁迫 |
| 有机碳 Soil organic carbon | 0.465 | 0.152 | 土壤碳储存与循环 |

2.4 基于最小数据集的葡萄园土壤健康评价方法验证

对全数据集和最小数据集计算的土壤健康指数进行线性回归分析结果显示，两种评分函数的全数据集和最小数据集土壤健康指数之间呈显著的正相关关系，线性评分函数回归方程为： $y=0.766x+0.130$ ($R^2=0.317$, $P < 0.01$) (图 3a)；非线性评分函数回归方程为： $y=0.934x+0.027$ ($R^2=0.421$, $P < 0.01$) (图 3b)。同时，线性和非线性两种方法间也呈显著的正相关关系 (图 3c 和图 3d)。可见，最小数据集可以代替全数据集用于评价集约化葡萄园土壤健康。



注：TDS，全数据集；MDS，最小数据集。L，线性评分函数；NL，非线性评分函数。下同。
Note: TDS, total data set; MDS, minimum data set. L, linearscoring function; NL, non-linearscoring function. Same as below.

图 2 葡萄园土壤健康指数
Fig.2 Soil health index of vineyard

表 5 不同树龄葡萄土壤健康指数 (SHI)

Table 5 Soil health indices of different tree age of vine

| 平均树龄 Average tree age | 线性 Linear | | 非线性 Non-linear | |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | SHI _{TDS} | SHI _{MDS} | SHI _{TDS} | SHI _{MDS} |
| 6 | 0.66±0.01a | 0.65±0.01a | 0.51±0.01a | 0.53±0.01a |
| 13 | 0.68±0.01a | 0.64±0.01a | 0.52±0.01a | 0.50±0.02a |
| 22 | 0.68±0.01a | 0.64±0.02a | 0.52±0.01a | 0.50±0.02a |

注：相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。SHI，土壤健康指数。
Note: The same lowercase letters indicate no significant differences ($P > 0.05$). SHI, soil health index.

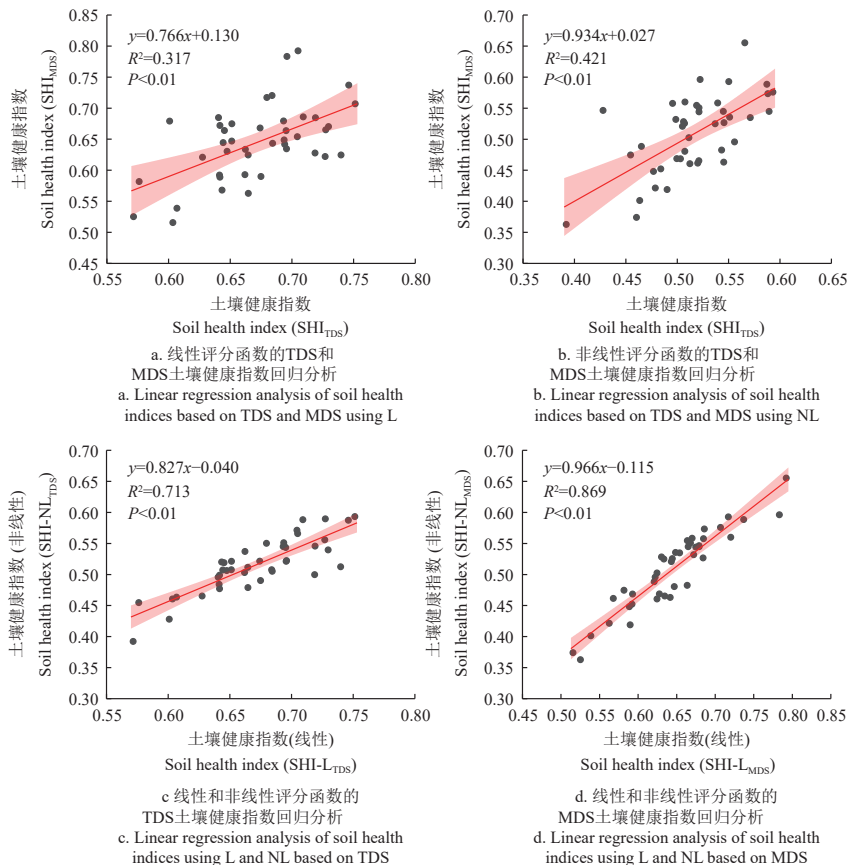


图 3 葡萄园土壤健康指数回归分析

Fig.3 Linear regression analysis of soil health index in vineyards

3 讨论

3.1 集约化葡萄园土壤健康评价最小数据集构建

利用主成分分析法构建的集约化葡萄园土壤健康评

价最小数据集包含有机碳、亚表层土壤硬度、交换性钠、容重、含水率和水稳性团聚体 6 个指标，利用线性和非线性评分函数，通过全数据集和最小数据集计算的土壤健康指数，线性回归分析发现两者均呈显著的正相关关

系。其他研究者在不同种植体系和施肥管理模式下也发现全数据集和全数据集计算的土壤健康指数呈显著的正相关关系^[12, 19, 32-33], 说明最小数据集结合线性、非线性评分函数可以用于集约化葡萄园土壤健康评价。前人在其他果园土壤健康评价中也建立了最小数据集。CHENG等^[16]在江西省信丰县脐橙园土壤健康评价建立的最小数据集包括有机质、粉粒含量、pH、有效硼和速效钾。李雨晨等^[34]在江西省宁都县脐橙园筛选全氮、饱和导水率、脲酶和过氧化氢酶构建了最小数据集。陕西省周至县猕猴桃园土壤健康评价构建的最小数据集为总孔隙度、全磷、速效氮、 Mg^{2+} 、全钾、有机质、含水率、速效磷和物理性黏粒 9 个指标^[35]。上海梨园和桃园选择土壤有机质、阳离子交换量、中性磷酸酶活性、pH、有效磷、土壤呼吸、几何平均直径、总水溶性盐、颜色平均变化率(表征微生物群落整体活性的指标)和体积含水率用于土壤健康评价^[36]。通过对比发现, 在果园土壤健康评价中都选择了有机质和水分相关的参数作为最小数据集的指标, 这与 BÜNEMANN 等^[9]的报道结果一致, 有机质和水分相关的参数是使用频率最高的指标。除以上两个指标外, 其他指标不尽相同, 这可能跟果园类型、研究区域和测定指标的种类有关。

就本研究而言, 建立的最小数据集还包括亚表层土壤硬度、交换性钠、容重和水稳性团聚体。土壤硬度、容重和水稳性团聚体是反映土壤物理状况的重要指标。在集约化农业生产中, 机械和人类对土壤频繁地扰动, 造成土壤压实等物理障碍日趋严峻^[37]。人类和机械频繁地田间作业会增加土壤硬度和容重, 降低土壤孔隙度^[3]。土壤硬度和容重增加会抑制土壤养分有效性、作物生长和产量提升^[38-39]。土壤水稳性团聚体会影响土壤通气性和水分入渗, 水稳性团聚体含量高可以有效降低土壤侵蚀^[40]。同时土壤团聚体具有调节和稳定有机碳、养分循环和生物活动的作用^[41-42]。因此, 选择土壤硬度、容重和水稳性团聚体作为最小数据集指标可以科学地评价葡萄园土壤健康状况, 并能及时诊断葡萄园存在的潜在障碍因子。土壤交换性钠一般很少作为土壤健康指标。本研究位于黄淮海平原, 20 世纪 70 年代以前是盐碱地发生区, 盐碱地经过长期改良和耕作后开始种植葡萄, 土壤电导率高于其他区域^[19], 是当地农业生产中潜在的土壤障碍因子。因此, 本研究筛选土壤交换性钠作为最小数据集中重要的指标。前人也有报道称, 受到盐害影响的土壤会选择交换性钠或电导率作为重要的指标用于评价土壤健康状况^[43-44]。本研究建立的最小数据集未包含土壤呼吸、土壤蛋白等生物学指标。以上生物学指标的变异系数在 20% 左右, 在研究区域葡萄体系属于低敏度指标^[45], 且这些指标的数值低于当地小麦-玉米轮作体系^[12], 这说明集约化葡萄园土壤生物活性相对较低, 如何提升土壤生物活性是未来集约化葡萄园研究的重点。

土壤健康指数计算综合了土壤物理、化学和生物学指标^[8]。本研究在康奈尔土壤健康评价体系的基础上, 结合目标葡萄园的实际情况, 通过主成分分析建立了最

小数据集。受研究区域的局限, 该数据集在其他葡萄种植区的适用性有待验证。未来, 在进行土壤健康评价时, 评价指标选择采用 $n+x$ 模式, n 是基础性指标, 必须测定; x 是约束性指标, 选择性测定^[46], 这样更加有利于开展土壤健康评价, 从而更好地指导生产。

3.2 集约化葡萄园土壤健康评价与提升

基于最小数据集, 采用线性和非线性评分函数计算的土壤健康指数分别为 0.52 和 0.51, 处于中等水平^[8]。不同树龄葡萄园土壤健康指数差异不显著, 这主要跟农户的田间管理有关。前期调查发现, 不同树龄葡萄园施肥管理、农事操作等比较相似, 且没有采用提升土壤健康的措施^[47]。因此, 随着种植年限的增加并没有提高土壤健康水平。这说明集约化葡萄园土壤健康具有很大提升潜力, 而明确主要土壤障碍因子是健康土壤培育的关键。葡萄园表层土壤硬度、亚表层土壤硬度和容重分别为 1 203 kPa、1 023 kPa 和 1.42 g/cm³, 达到中等压实水平^[48]。土壤压实严重抑制根系生长, 不利于作物产量提升^[3]。对于存在土壤压实的葡萄园, 尽量减少频繁地田间操作, 同时可以在果园行间种植粗根型、深根型且生长速度快的覆盖作物, 可以有效地减轻土壤压实, 改善土壤结构^[49]。

葡萄园土壤养分含量处于丰富甚至过量状态, 这主要跟葡萄园过量施肥有关。前期调研发现, 葡萄园 N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 781、592 和 724 kg/hm², 投入量是葡萄吸收量的 2~7 倍, 且养分比例不协调^[44]。因此, 在葡萄园应采用养分综合管理技术和水肥一体化技术可以有效地降低肥料投入, 调控土壤养分含量, 提高养分利用效率^[47]。土壤有机碳是反映土壤健康状况的重要指标, 而该研究区域葡萄园土壤有机碳质量分数平均为 8.33 g/kg, 处于缺乏水平。土壤有机碳含量低主要跟施肥种类有关, 当地多选择没有腐熟的鸡粪或猪粪作为有机肥, 这不仅不利于土壤有机碳含量地提升, 还可能存在带入抗生素和盐分的风险。因此, 在葡萄生产中应选择优质的商品有机肥或生物有机肥, 同时结合种植覆盖作物, 多途径提升土壤有机碳含量。大量的研究已经证明, 施用有机肥和种植覆盖作物可以显著提高土壤有机碳含量^[12, 49-51]。综上, 集约化葡萄园土壤健康水平地提升需要综合采用养分综合管理技术、增施优质(生物)有机肥、种植覆盖作物等措施, 促进葡萄产业绿色发展。

4 结 论

采用主成分分析法, 构建的集约化葡萄园土壤健康评价最小数据集包括土壤有机碳、亚表层土壤硬度、交换性钠、容重、含水量和水稳性团聚体等 6 个指标。基于全数据集和最小数据集计算的土壤健康指数间呈显著的正相关关系, 这说明最小数据集可以代替全数据集对集约化葡萄园开展土壤健康评价。基于最小数据集, 利用线性和非线性评分函数获得的葡萄园土壤健康指数分别为 0.52 和 0.51, 土壤健康状况处于中等水平。

[参 考 文 献]

- [1] 张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 783-796.
ZHANG Junling, ZHANG Jiangzhou, SHEN Jianbo, et al. Soil health and agriculture green development: Opportunities and challenges[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 783-796. (in Chinese with English abstract)
- [2] LEHMANN J, BOSSIO D A, KÖGEL-KNABNER I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 544-553.
- [3] SHAH A N, TANVEER M, SHAHZAD B, et al. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: An overview[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24: 10056-10067.
- [4] ZHANG J L, VAN DER HEIJDEN M G A, ZHANG F S, et al. Soil biodiversity and crop diversification are vital components of healthy soils and agricultural sustainability[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7(3): 236-242.
- [5] GUO J, LIU X, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008-1010
- [6] EMMET-BOOTH J P, FORRISTAL P D, FENTON O, et al. A review of visual soil evaluation techniques for soil structure[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32: 623-634
- [7] ANDREWS S S, KARLEN D L, CAMBARDELLA C A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 1945-1962.
- [8] MOEBIUS-CLUNE B N, MOEBIUS-CLUNE D J, GUGINO B K, et al. Comprehensive Assessment of Soil Health-The Cornell Framework (Edition 3.2)[M]. Geneva: Cornell University, 2016.
- [9] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z G, et al. Soil quality: A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105-125.
- [10] DORAN J W, PARKIN T B. Defining and assessing soil quality[M]// DORAN J W, COLEMAN D C, BEZDICEK D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA, Madison, WI, 1994: 3-21.
- [11] LI K, WANG C. Multiple soil quality assessment methods for evaluating effects of organic fertilization in wheat-maize rotation system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 150: 126929.
- [12] ZHANG J, LI Y, JIA J, et al. Applicability of soil health assessment for wheat-maize cropping systems in smallholders' farmlands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 353: 108558.
- [13] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603-616.
ZHANG Jiangzhou, LI Yizan, LI Ying, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 603-616. (in Chinese with English abstract)
- [14] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1326-1333.
DENG Shaohuan, ZENG Lingtao, GUAN Qiang, et al. Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in south China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1326-1333. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘湘君, 乔冠宇, 郭丰浩, 等. 基于最小数据集的黄淮海旱作区耕层土壤质量评价及障碍分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 104-113.
LIU Xiangjun, QIAO Guanyu, GUO Fenghao, et al. Evaluation and obstacle analysis of cultivated horizon soil quality based on MDS in the dry farming areas of Huang-Huai-Hai Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(12): 104-113. (in Chinese with English abstract)
- [16] CHENG J, DING C, LI X, et al. Soil quality evaluation for navel orange production systems in central subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 225-232.
- [17] ASKARI M S, HOLDEN N M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 150: 57-67.
- [18] RAIESI F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 307-320
- [19] LI K, WANG C, ZHANG H, et al. Evaluating the effects of agricultural inputs on the soil quality of smallholdings using improved indices[J]. *Catena*, 2022, 209: 105838.
- [20] 王探魁, 张丽娟, 冯万忠, 等. 河北省葡萄主产区施肥现状调查分析与研究[J]. 北方园艺, 2011(13): 5-9.
WANG Tankui, ZHANG Lijuan, FENG Wanzhong, et al. Present situation and research of fertilizer application on grape in main production region of Hebei Province[J]. *Northern Horticulture*, 2011(13): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王志慧, 马振朝, 张丽娟, 等. 河北葡萄园施肥与土壤养分演变及其对产量的影响[J]. 北方园艺, 2020(7): 106-115.
WANG Zhihui, MA Zhenchao, ZHANG Lijuan, et al. Fertilization and soil nutrient evolution of vineyards in Hebei and its impact on yield[J]. *Northern Horticulture*, 2020(7): 106-115. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李宝鑫, 杨俐苹, 卢艳丽, 等. 我国葡萄主产区的土壤养分丰缺状况[J]. 中国农业科学, 2020, 53(17): 3553-3566.
LI Baoxin, YANG Liping, LU Yanli, et al. Status of soil fertility in main grape producing areas of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(17): 3553-3566. (in Chinese with English abstract)
- [23] 武亚敬, 刘俊, 于祎飞, 等. 河北省酿酒葡萄主产区土壤物理性状研究[J]. 河北林业科技, 2022(3): 29-32.
WU Yajing, LIU Jun, YU Yifei, et al. Investigation and study on soil physical character of wine grape growing areas in Hebei province[J]. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, 2022(3): 29-32. (in Chinese with English abstract)
- [24] 尹兴, 吉艳芝, 倪玉雪, 等. 河北省葡萄主产区土壤养分丰缺状况[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 2067-2075.
YIN Xing, JI Yanzhi, NI Yuxue, et al. Status of soil fertility in vineyard-producing areas of Hebei Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(10): 2067-2075. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘佳, 李兆君, 龙健, 等. 京津冀地区葡萄园土壤肥力水平分析及施肥建议[J]. 中国土壤与肥料, 2022(8): 14-22.
LIU Jia, LI Zhaojun, LONG Jian, et al. Analysis on soil

- fertility level and fertilization suggestion of vineyard in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(8): 14-22. (in Chinese with English abstract)
- [26] 范晓晖. 福安市葡萄园土壤质量综合评价[J]. *土壤通报*, 2020, 51(6): 1297-1302.
FAN Xiaohui. Comprehensive evaluation of soil quality in the vineyards of Fu'an[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(6): 1297-1302. (in Chinese with English abstract)
- [27] 任艳华, 王超萍, 房经贵, 等. 山东省不同酿酒葡萄种植园土壤质量现状分析[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(7): 82-89.
REN Yanhua, WANG Chaoping, FANG Jinggui, et al. Analysis of soil quality status in different wine-grape plantation in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(7): 82-89. (in Chinese with English abstract)
- [28] MOEBIUS B N, VAN ES H M, Schindelbeck R R, et al. Evaluation of laboratory-measured soil properties as indicators of soil physical quality[J]. *Soil Science*, 2007, 172: 895-912.
- [29] WEIL R R, ISLAM K R, STINE M A, et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2003, 18: 3-17.
- [30] WRIGHT S F, UPADHYAYA A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Science*, 1996, 161: 575-586.
- [31] ANDREWS S S, KARLEN D L, MITCHELL J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 90(1): 25-45.
- [32] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 265-273.
LI Pengfei, ZHANG Xingchang, HAO Mingde, et al. Soil quality evaluation for reclamation of mining area on Loess Plateau based on minimum data set[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(16): 265-273. (in Chinese with English abstract)
- [33] 梅楠, 谷岩, 李德忠, 等. 基于最小数据集的吉林省黑土层土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 91-98.
MEI Nan, GU Yan, LI Dezhong, et al. Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on minimum data set[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(12): 91-98. (in Chinese with English abstract) (in Chinese with English abstract)
- [34] 李雨晨, 熊翱宇, 平原, 等. 基于最小数据集的宁都县不同整地方式下果园土壤质量评价[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 342-350.
LI Yuchen, XIONG Aoyu, PING Yuan, et al. Soil quality assessment of orchards under different land preparation measures in Ningdu County based on minimum data set[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 342-350. (in Chinese with English abstract)
- [35] 张福平, 高张, 李肖娟, 等. 基于最小数据集的周至县猕猴桃园地土壤质量评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(1): 69-75.
ZHANG Fuping, GAO Zhang, LI Xiaojuan, et al. Soil quality assessment of kiwifruit field using MDS method in Zhouzhi County[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(1): 69-75. (in Chinese with English abstract)
- [36] CAO Y, LI X, QIAN X, et al. Soil health assessment in the Yangtze River Delta of China: Method development and application in orchards[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 341: 108190.
- [37] 任利东, 王丽, 林琳, 等. 农田土壤机械压实研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 610-626.
REN Lidong, WANG Li, LIN Lin, et al. The progress and prospect of soil compaction by agricultural machinery in arable land: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 610-626. (in Chinese with English abstract)
- [38] REN B, LI X, DONG S, et al. Soil physical properties and maize root growth under different tillage systems in the North China Plain[J]. *The Crop Journal*, 2018, 6: 669-676.
- [39] ZHANG X, YANG W, XIN X, et al. Poor physical structural components restrict soil fertility and crop productivity for wheat-maize cropping[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 117: 169-184.
- [40] AMÉZKETA E. Soil aggregate stability: A review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, 14(2-3): 83-151.
- [41] MANNA M C, BHATTACHARYYA P, ADHYA T K, et al. Carbon fractions and productivity under changed climate scenario in soybean-wheat system[J]. *Field Crops Research*, 2013, 145: 10-20.
- [42] ADNAN M, XU M G, SYED A A S, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110894.
- [43] YAO R, YANG J, GAO P, et al. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 128: 137-148.
- [44] NABIOLLAHI K, TAGHIZADEH-MEHRJARDI R, KERRY R, et al. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 482-494.
- [45] 许明祥. 黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
XU Mingxiang. Soil Quality Evolvement Mechanism in the Process of Ecosystem Restoration and Its Management in Loess Hilly-gully Region[D]. Yanling: Northwest A&F University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [46] 张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J/OL]. *土壤学报*: 1-15[2024-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20240308.1322.002.html>.
ZHANG Jiangzhou, WANG Guangzhou, LI Yizan, et al. Re thinking the establishment of the farmland soil health assessment system [J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*: 1-15[2024-03-10], <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20240308.1322.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- [47] 杨燕玲. 水肥管理对葡萄产量和效率的影响—以前衙村为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
YANG Yanling. Effects of Water and Fertilizer Management on Grape Yield and Efficiency: A Case Study of Qianya

- Village[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [48] 魏彬萌. 渭北果园土壤质量退化及其机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- WEI Binneng. Soil Quality Degradation Characteristics and Mechanism of Orchard Soil in Weibei Region[D]. Yanling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [49] 裴浩, 苗宇, 侯瑞星. 全球黑土区有机物料还田对土壤有机碳固存影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 79-88.
- PEI Hao, MIAO Yu, HOU Ruixing. Meta analysis of the effects of global organic material returning on soil organic carbon equestration in Mollisols[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 79-88. (in Chinese with English abstract)
- [50] 谢钧宇, 张慧芳, 罗云琪, 等. 连续 7 年施肥提升复垦土壤肥力提高玉米产量的驱动因子[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 142-152.
- XIE Junyu, ZHANG Huifang, LUO Yunqi, et al. Driving factors of improving fertility and maize yields in the reclaimed soils by seven years of applied organic manure and chemical fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 142-152. (in Chinese with English abstract).
- [51] 张建恒, 张益兴, 侯赛赛, 等. 覆盖作物的效益及其合理选择的研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 23-34.
- ZHANG Jianheng, ZHANG Yixing, HOU Saisai, et al. Research progress on benefits and rational selection of cover crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(14): 23-34. (in Chinese with English abstract)

Soil health evaluation in the intensive vineyard based on minimum data set

WANG Bin¹, LI Yun¹, LI Ruipeng², FANG Fei¹, ZHANG Jiangzhou^{2,3*}, ZHANG Junling²

(1. Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences/National Academy of Agriculture Green Development/Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. College of Resources and Environment/ International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Healthy soils can provide the essential ecosystem services for food security and nutrition, climate, and sustainable development. Soil management practices can be optimized to promote the soil productivity and ecological balance for the high-yield and high-quality grapes in intensive grape production. This study aims to investigate the soil health status in the intensive vineyards in Quzhou County, Hebei Province, China. The soil samples were then collected in October 2020. A total of 42 vineyards were sampled in 0-20 cm soil depth. Twenty physical, chemical, and biological indicators were determined, including soil water content, surface hardness, subsurface hardness, bulk density, wet aggregate stability, pH, total nitrogen, available P and K, exchangeable Ca and Mg, available Fe, Mn, Cu and Zn, exchangeable Na, soil organic carbon, permanganate oxidizable carbon, soil protein, and respiration. The principal component analysis was used to establish the minimum dataset for the soil health evaluation in the intensive vineyards. Two evaluation approaches, Linear (L) and non-linear (NL) scoring functions, were used to calculate the soil health index. The limiting factors were also identified in the vineyards. The results revealed that six indicators were selected for the minimum dataset by the principal component analysis, including the soil organic carbon, soil subsurface hardness, exchangeable sodium, bulk density, water content, and wet stability aggregate. There was a significant positive correlation ($P < 0.01$) between the soil health index with the total data set and the minimum dataset with linear and nonlinear scoring functions. Alternatively, the minimum dataset was used to better replace the total dataset, in order to assess the soil health in vineyards. According to the minimum dataset, the soil health indices ranged from 0.39-0.59 and 0.36-0.66 with average values of 0.52 and 0.51 using linear and nonlinear scoring functions, respectively, indicating the medium level. The soil health indices in the average tree age of 6, 13, and 22 were 0.64-0.65 and 0.50-0.53 using linear and non-linear scoring functions using the minimum dataset, respectively. No significant difference was observed in the soil health index among vines of different tree ages. The soil surface hardness, subsurface hardness, and bulk density in the vineyards were 1 203 kPa, 1 023 kPa, and 1.42 g/cm³, respectively, indicating a medium compaction level. Soil available P and K, exchangeable Ca and Mg, and available Fe and Zn were all at the rich level. The average content of soil organic carbon was 8.33 g/kg with a range of 5.6-13.1 g/kg, which was at the deficiency level. Therefore, the major soil obstacles in the intensive vineyards mainly included soil compaction, nutrient imbalance, and low organic carbon content. The agricultural measures can be implemented to reduce the frequency of field management in the optimal utilization of organic or bio-organic fertilizers, and cover crop planting, as well as the integrated nutrient. These approaches can be expected to enhance the soil health level in the sustainable development of local grape industries.

Keywords: soils; vineyard; principal component analysis; minimum data set; soil health index