

基于最小数据集的贵阳市茶园土壤肥力评价

任明慧*, 舒英格#, 何季

贵州大学农学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年3月17日; 录用日期: 2022年5月4日; 发布日期: 2022年5月12日

摘要

为了解贵阳市茶园土壤的肥力状况, 以开阳县龙岗镇和花溪羊艾茶园土壤为研究对象, 测定分析13项土壤肥力指标, 采用主成分分析与相关性分析、结合Norm值构建土壤指标的最小数据集(MDS), 通过指标权重与隶属度求得土壤肥力综合值(IFI)进行土壤肥力评价。结果表明, 最小数据集(MDS)指标包括全磷、蔗糖酶、速效钾和有机质4个。土壤碱解氮和速效钾是影响茶园土壤肥力的主要限制因子, 开阳和花溪茶园土壤肥力综合值为II级, 总体处于中上水平。基于最小数据集的土壤肥力评价结果与全数据集的结果呈正相关关系, 相关系数为0.8961, 故可采用最小数据集方法代替全数据集方法评价土壤肥力。

关键词

贵阳, 最小数据集, 土壤肥力, 茶园土壤, 主成分分析

Soil Fertility Evaluation of Tea Gardens in Guiyang City Based on Minimum Data Set

Minghui Ren*, Yingge Shu#, Ji He

College of Agriculture Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Mar. 17th, 2022; accepted: May 4th, 2022; published: May 12th, 2022

Abstract

In order to understand the soil fertility status of tea gardens in Guiyang, taking the soils of Longgang Town and Huaxi Yang'ai tea gardens in Kaiyang County as the research objects, 13 soil fertility indicators were measured and analyzed, and principal component analysis and correlation analysis were used to construct soil indicators combined with Norm value. And evaluate the soil fertility by obtaining the comprehensive soil fertility value (IFI) through the indexes weight and membership

*第一作者。

#通讯作者

degree. The results showed that the minimum data set (MDS) indicators included total phosphorus, sucrose, available potassium and organic matter. Soil alkaline hydrolyzable nitrogen and available potassium were the main limiting factors affecting soil fertility in tea gardens. The comprehensive soil fertility value of Kaiyang and Huaxi tea gardens was II, which was generally at the middle and upper level. The soil fertility evaluation results based on the minimum data set have a positive correlation with the results of the full data set, and the correlation coefficient was 0.8961, so the minimum data set method can be used instead of the full data set method to evaluate soil fertility.

Keywords

Guiyang, Minimum Data Set, Soil Fertility, Tea Garden Soil, Principal Component Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

茶树(*Camellia sinensis*)属山茶科山茶属,是多年生喜酸性深根木本常绿植物,我国重要的经济作物,也是热带和亚热带地区的重要经济作物之一[1]。而茶叶作为贵州山区经济发展的重要支柱产业和特色产业,是广大农民重要的收入来源。截止2020年底,贵州省茶树种植面积达714.63万亩,相较于2016年增加了13.22% [2]。但随着植茶年限的增加,茶园土壤由于茶树自身旺盛的新陈代谢、不科学的施肥习惯以及修剪枝叶等措施,易造成茶园土壤酸化加重、土壤性质恶化、土壤某种大量养分积累和部分微量元素亏缺等土壤问题[3] [4] [5] [6]。如柳书俊等[7]对湄潭茶园土壤肥力评价的研究表明,有51.85%和31.48%的茶园土壤处于I和II级水平,土壤养分状况整体良好;任艳芳[8]等对贵州省开阳茶园土壤养分和肥力质量进行评价,研究表明,开阳县茶园土壤肥力质量总体水平属于良好,但土壤偏酸,速效磷和速效钾含量相对偏低,应重点改酸和增施磷钾肥;李文昭[9]等人采用主成分分析法和模糊数学模型评价遵义市典型茶园土壤肥力,结果表明遵义市的湄潭县永兴茶园和余庆县松烟茶园的土壤肥力质量等级为III级,处于中下水平;湄潭县的兴隆茶园、湄江茶园和余庆县的花山茶园、关兴茶园的土壤肥力质量等级为II级,处于中上水平;李渝等[10]人研究表明,土壤酶和微生物量可作为贵州茶园土壤养分评价的重要生物学指标,在不同茶区应注意氮磷钾肥平衡施用,对贵定、湄潭和石阡等有机质较低的茶区还应重视有机肥施用。

土壤是茶树的立地之本、茶叶生产的主要生产资料,其蕴含着大量的营养物质,可为茶园生态系统提供物质循环和能量转换的原料和动力。土壤肥力评价是土壤质量研究的基础,茶园土壤肥力的高低对茶树的生长和产量有着直接影响,对茶叶的品质也起着决定性作用。最小数据集(minimum data set, MDS)是从众多的土壤物理、化学和生物指标中筛选出最少的能反映土壤质量的指标集合,其能够最大限度地减少指标冗余和人为主观影响[11] [12] [13] [14];常用的方法有聚类分析、主成分分析、相关性分析、Norm值提取指标等[15]。本研究对贵阳市2个典型茶园进行野外采样和测定分析,采用主成分分析方法结合Norm值提取最小数据集,为贵阳市典型茶园土壤肥力评价因子的选取提供依据,以期为提高茶园的生产能力、施肥管理提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集与处理

以贵阳市的开阳县龙岗镇和花溪区湖潮乡两个茶园土壤为研究对象,于2021年10月初,根据茶园

分布情况,选择集中连片且具有代表性的茶园共分为 18 个采样单元,采集 30 个土样,其中开阳县龙岗镇 18 个,花溪湖潮乡羊艾茶场 12 个。选择茶树种植面积在 50 亩以上的茶园,按平均 50~80 亩取一个混合土样,同一采样单元内采集 5~10 个小样点土壤进行混合。按照农业部《测土配方施肥技术规范》执行,选取植茶年限相近,取样点避开施肥点、路边、沟边等特殊位置;在同一坡度坡向上,用“S”形布点法采集深度为 0~40 cm 的土样;将各采样点的土样混合均匀,用四分法取 2 kg 左右土样,分拣出石砾、根系等杂物后带回;将样品编号登记并保留部分新鲜土样用于测定 pH、含水率和土壤酶活性,剩余土样置阴风干后过筛用于其余理化性质的测定。

2.2. 评价指标选取及测定

根据评价指标的筛选原则,1) 主导性原则:影响土壤肥力的因素众多,应从中选取主要的、能正确反映土壤的基本功能,且具有代表性的物理、化学和生物性质,以避免评价指标体系复杂化;2) 敏感性:选取的指标应对环境、气候、土壤利用方式及管理条件变化具有较敏感的反应;3) 实用性原则:应选择易理解、容易定量测定且重现性好的指标;4) 独立性原则:为避免重复评价,所选的指标间不应出现因果关系[16]。基于前人研究成果[7][8][10],及结合研究区实际情况,本研究选择土壤 pH、CEC、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶等 13 土壤理化指标和酶活性指标进行黔中茶园土壤肥力评价。

选取的土壤酶指标主要参考《土壤酶及其研究方法》[17],土壤理化指标的测定方法主要参考《土壤农化分析》[18]。其中,酸性磷酸酶采用苯磷酸二钠比色法,蔗糖酶采用 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 滴定法,脲酶采用靛酚比色法,过氧化氢酶采用 KMnO_4 滴定法。土壤 pH 值采用电位法(土水比为 1:2.5),阳离子交换量用 DETA-乙酸铵交换法,有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法,氮的全量采用凯氏定氮法,碱解氮采用碱解扩散法,磷的全量采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 熔融钼锑抗比色法,磷的有效量采用 0.5 mol/L NaHCO_3 浸提钼锑抗比色法,钾的全量采用 NaOH 熔融火焰光度法,钾的有效量采用 1mol/L NH_4Ac 浸提火焰光度法。

2.3. 土壤肥力评价

2.3.1. 土壤肥力评价最小数据集的构建

首先,根据提取特征值 ≥ 1 的原则,运用 SPSS 25.0 对所测定 13 项土壤指标进行主成分(PC)分析,从而得到几个主成分;再将各个主成分中载荷值 ≥ 0.5 的指标划分为一组,若某土壤指标同时在不同主成分中的载荷均大于 0.5,则根据各指标间的相关系数,将该指标划分到与其他指标相关性较低的那一组[19]。其次,计算各个指标的 Norm 值,选取每组中与最高 Norm 值相差 10%范围内的指标,进一步分析各组之间指标的相关性;若相关性较高(Pearson 相关系数 $r > 0.5$),则得分最高的指标入选最小数据集,其余将被剔除,反之则均进入最小数据集。从而得到最终的最小数据集(MDS)[20]。另外, Norm 值越大则说明其解释综合信息的能力就越强。Norm 值计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_1^k (u_{ik}^2 \times \lambda_k)} \quad (1)$$

式中: N_{ik} 为第 i 个变量在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分上的综合载荷; u_{ik} 为第 i 个变量在第 k 个主成分上的载荷,其可反映第 i 个变量在第 k 个主成分的相对重要性; λ_k 是第 k 个主成分的特征值。

2.3.2. 土壤肥力评价指标隶属度的确定

评价指标隶属度由其所隶属隶属度函数确定。隶属度函数一般分为升型、降型和抛物线型三种,隶属度函数的确定根据研究区土壤特点及各参评指标对土壤肥力的正负效应而确定[9],但本研究中不涉及降型效应的土壤肥力指标。各指标所属隶属函数类型如表 1 所示。

Table 1. Types of membership functions of soil fertility evaluation indexes**表 1.** 土壤肥力评价指标隶属函数类型

指标	隶属函数类型	隶属函数
有机质、CEC、全氮、全磷、全钾、 碱解氮、有效磷、速效钾、蔗糖酶、 脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶	升型隶属函数	$N_i = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases}$
pH	抛物线型隶属函数	$N_i = \begin{cases} \frac{0.9(x_4-x)}{x_4-x_3} + 0.1 & x_3 \leq x < x_4 \\ 1.0 & x_2 < x < x_3 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1} + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_2 \end{cases}$

根据上述隶属函数来确定各参评指标的隶属度值，需要先确定各评价指标的转折点 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ，根据前人研究[21] [22] [23] [24] [25]、全国第二次土壤普查的分级标准，结合茶园土壤及作物生长实际情况，分别确定各评价指标的相应取值，其中土壤酶指标临界值取相应的最小值和最大值作为函数的转折点。各评价指标转折点如表 2 所示。

Table 2. Turning points of each evaluation indexes**表 2.** 各评价指标转折点

转折点	pH	CEC	有机质	全氮	碱解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾	蔗糖酶	脲酶	酸性磷酸酶	过氧化氢酶
x_1	4.0	5	6	0.5	60	0.2	3	6	30	0.85	0.02	23.33	0.04
x_2	4.5	20	40	2	200	1	40	30	200	11.11	0.55	296.12	0.70
x_3	6.0	-	-										
x_4	7.0	-	-										

2.3.3. 土壤肥力评价指标权重的确定

评价指标权重系数表征着各项土壤肥力指标对土壤肥力的贡献率或影响程度。对评价指标进行主成分分析，参评指标权重表示为各个指标的公因子方差占有所有指标公因子方差总和的比例[15]。计算权重 (W_{Fi})公式如下：

$$W_{Fi} = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (2)$$

式中： F_i 为第 i 项评价因子的载荷值。

2.3.4. 土壤肥力综合评价指数

土壤肥力综合评价指数(integrated fertility index, IFI)通过各土壤肥力指标权重和隶属函数值来计算，是对土壤肥力的综合反映，土壤肥力指数越大，就表明土壤的肥力质量越高。本研究在全数据集和最小数据集方法的土壤肥力综合评价指数(IFI)计算公式如下：

$$IFI = \sum_{i=1}^n W_{Fi} \times N_i \quad (3)$$

式中: N_i 为指标隶属度; n 为指标数量; W_{Fi} 为指标权重值。

2.4. 数据处理

采用 Excel 2019 对原始数据进行整理, 应用 SPSS25.0 对数据进行主成分分析, Origin 9.0 进行线性回归分析、相关性分析以及绘制柱状图。其中变异系数计算公式为: 变异系数 CV = 标准偏差 SD/平均值 Mean \times 100%。

3. 结果分析

3.1. 茶园土壤理化性质及酶活性的统计特征

在土壤学研究中, 通常变异系数 CV 小于 0.1 为弱变异, 在 0.1~1 范围内为中等变异, 大于 1 为强变异[26]。通过对贵阳市茶园土壤理化性质及酶活性分析可知(表 3), 土壤 pH 值在 3.43~5.53 范围内变化, 平均值为 4.36, 土壤有明显酸化趋势; 变异系数为 0.13, 说明贵阳市茶园土壤 pH 差异不明显。土壤有机质含量为 12.34~55.49 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 29.57 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异数为 0.42; 土壤全氮含量为 0.33~2.15 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 1.00 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异数为 0.53; 碱解氮含量为 24.50~188.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 71.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 0.62; 全磷含量为 0.48~2.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 1.01 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 0.49; 有效磷含量为 7.71~65.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 29.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异数为 0.51; 全钾含量为 12.39~36.77 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 25.13 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 0.30; 速效钾含量为 15.53~74.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 41.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异数为 0.39; CEC 为 11.27~19.54 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 15.61 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 0.18; 土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾和 CEC 均属于中等变异强度, 说明贵阳市茶园土壤中各养分指标含量均存在中等强度差别。

Table 3. Statistical characteristics of soil physicochemical properties and enzyme activities in tea gardens

表 3. 茶园土壤理化性质、酶活性的统计特征

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数 C·V
pH	3.43	5.53	4.36	0.13	0.13
有机质($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	12.34	55.49	29.57	2.92	0.42
全氮($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.33	2.15	1.00	0.12	0.53
碱解氮($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	24.50	188.02	71.33	10.44	0.62
全磷($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.48	2.24	1.01	0.12	0.49
有效磷($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	7.71	65.25	29.25	3.48	0.51
全钾($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	12.39	36.77	25.13	1.79	0.30
速效钾($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	15.53	74.39	41.62	3.83	0.39
CEC($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	11.27	19.54	15.61	0.66	0.18
蔗糖酶($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.85	11.11	4.13	0.80	0.82
过氧化氢酶($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.04	0.70	0.31	0.03	0.46
脲酶($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.02	0.55	0.23	0.04	0.68
酸性磷酸酶($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	23.33	296.12	111.69	20.53	0.78

茶园土壤蔗糖酶活性为 0.85~11.11 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、过氧化氢酶为 0.04~0.70 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、脲酶为 0.02~0.55 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,

酸性磷酸酶为 23.33~296.12 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ；四个酶活性平均值分别为 4.13 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、0.31 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、0.23 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 111.69 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，变异系数分别为 0.82、0.46、0.68 和 0.78，均属于中等强度变异，且除过氧化氢酶外，其他酶指标变异系数均高于土壤理化指标；说明贵阳市茶园土壤酶活性变化差异较大，且较土壤理化性质敏感。参考全国第二次土壤普查养分分级标准[27]和国家茶叶产地环境技术条件(NY/T853-2004)中茶园的肥力分级标准[28]，从茶园土壤养分含量均值来看，总体上表现为有机质、全氮、全磷、有效磷和全钾含量较为丰富，达到 I 级优质茶园肥力标准；土壤阳离子交换量保肥能力较好，处于 II 级水平；而碱解氮和速效钾含量相对偏低，为 III 级水平，其均值分别为 71.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 41.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；这与任艳芳[8]、张小琴[29]等研究结果一致。

3.2. 土壤肥力评价最小数据集构建

主成分分析结果如表 4 所示，根据特征值 ≥ 1 的提取原则，共提取到 4 个主成分，其贡献率分别为 38.574%、21.338%、11.962% 和 7.719%，累积贡献率达到 79.593%，说明所提取的 4 个主成分能解释贵阳市茶园土壤属性对土壤肥力影响的能力较强。根据各主成分的因子载荷值和相关系数将所有指标进行分组，碱解氮、有效磷、脲酶、酸性磷酸酶、全磷、CEC、全氮在 PC1 上因子载荷绝对值均 ≥ 0.5 ，其中速效钾在 PC1 和 PC3、有机质在 PC2 和 PC4 上均 ≥ 0.5 ；速效钾与 PC1 上指标间相关系数绝对值范围为 0.13~0.56，与 PC3 上指标间相关系数分别为 0.14 (图 1)，总体上与第 3 组指标间相关性较小，因此进入第 3 组；同理有机质被归入第 4 组，最终分组：第 1 组为碱解氮、有效磷、脲酶、酸性磷酸酶、全磷、CEC、全氮；第 2 组为全钾、蔗糖酶和 pH；第 3 组为过氧化氢酶和速效钾；第 4 组为有机质。

Table 4. Soil indexes principal component loading matrix and Norm value

表 4. 土壤指标主成分载荷矩阵及 Norm 值

评价指标	分组	PC1	PC2	PC3	PC4	Norm
碱解氮	1	0.826	-0.187	0.008	0.203	1.89
有效磷	1	0.812	-0.059	0.034	-0.335	1.85
脲酶	1	0.803	0.323	-0.036	0.178	1.89
酸性磷酸酶	1	0.787	-0.334	0.301	0.271	1.91
全磷	1	0.785	0.473	-0.121	-0.184	1.94
CEC	1	0.779	0.248	0.123	-0.073	1.80
全氮	1	0.767	-0.319	0.315	-0.12	1.84
全钾	2	0.287	0.797	-0.343	0.209	1.55
蔗糖酶	2	0.38	-0.754	-0.193	-0.152	1.54
pH	2	-0.122	0.734	0.441	0.354	1.41
过氧化氢酶	3	0.106	0.141	0.797	-0.138	1.06
速效钾	3	0.556	0.23	-0.577	-0.065	1.49
有机质	4	0.193	-0.563	-0.119	0.69	1.25
主成分特征值	-	5.015	2.774	1.555	1.004	-
主成分方差贡献率(%)	-	38.574	21.338	11.962	7.719	-
主成分累积贡献率(%)	-	38.574	59.911	71.873	79.593	-

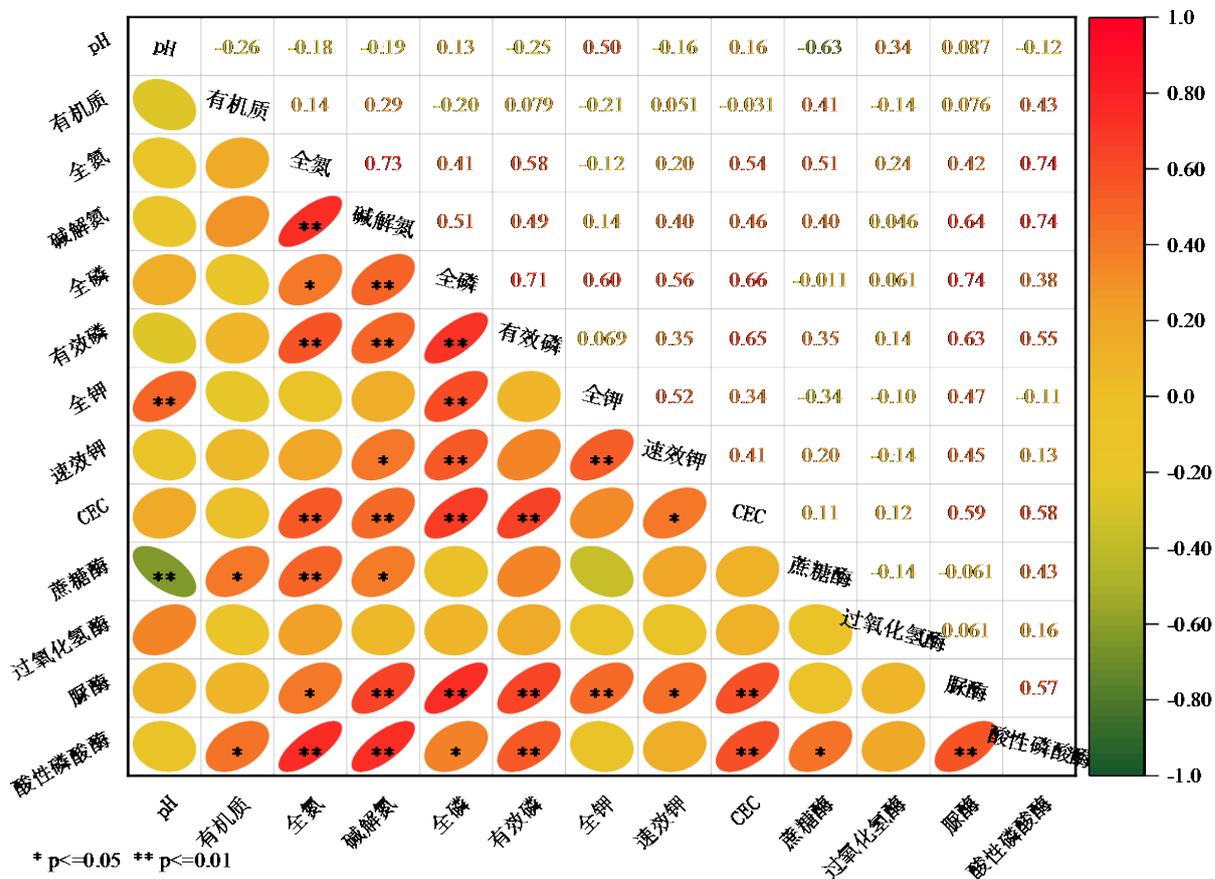


Figure 1. Person correlation coefficient matrix of soil fertility evaluation indexes

图 1. 土壤肥力评价指标 Person 相关系数矩阵

根据公式(1)计算各指标 Norm 值及最小数据集指标筛选原则, 对比各分组指标 Norm 值, 选取每组中与最高 Norm 值相差 10%范围内的指标, 结合各组指标间的相关性进行指标筛选(图 1)。第 1 组中碱解氮、有效磷、脲酶、酸性磷酸酶、全氮与全磷相关系数分别为 0.51^{**}、0.71^{**}、0.74^{**}、0.38^{*}、0.41^{*}, 均大于 0.35 成显著相关关系, 所以全磷进入最小数据集; 第 2 组的蔗糖酶和全钾相关系数为-0.34, 小于 0.35, 但全钾与全磷呈极显著相关关系, 所以蔗糖酶入最小数据集; 第 3 组和第 4 组分别是速效钾和有机质进入最小数据集。最终确定的最小数据集为全磷、蔗糖酶、速效钾和有机质。本研究中所选 13 个指标, 经筛选后得到最小数据集 4 个, 筛选率达到 69.23%, 简化了土壤肥力评价指标体系, 有效的消除其他冗余信息对土壤肥力质量评价的影响。

3.3. 土壤肥力评价

3.3.1. 土壤肥力单项指标评价

雷达图的中心隶属度函数值为 0, 向外递增, 最外围隶属度函数值为 1 (最大值为 1)。坐标轴上各个点的值可反映各项指标的状态, 坐标轴上的点越靠近原点, 所反映的单一指标的肥力水平越低, 反之离原点越远, 所反映的单一指标的肥力水平越高[30]。由图 2 可知, 贵阳市茶园土壤肥力指标隶属度值从大到小分别为全钾(0.787) > 全磷(0.785) > CEC (0.714) > pH (0.663) > 有机质(0.606) > 有效磷(0.589) > 过氧化氢酶(0.472) > 脲酶(0.349) > 全氮(0.318) > 蔗糖酶(0.288) > 酸性磷酸酶(0.285) > 碱解氮(0.189) > 速效钾(0.162)。

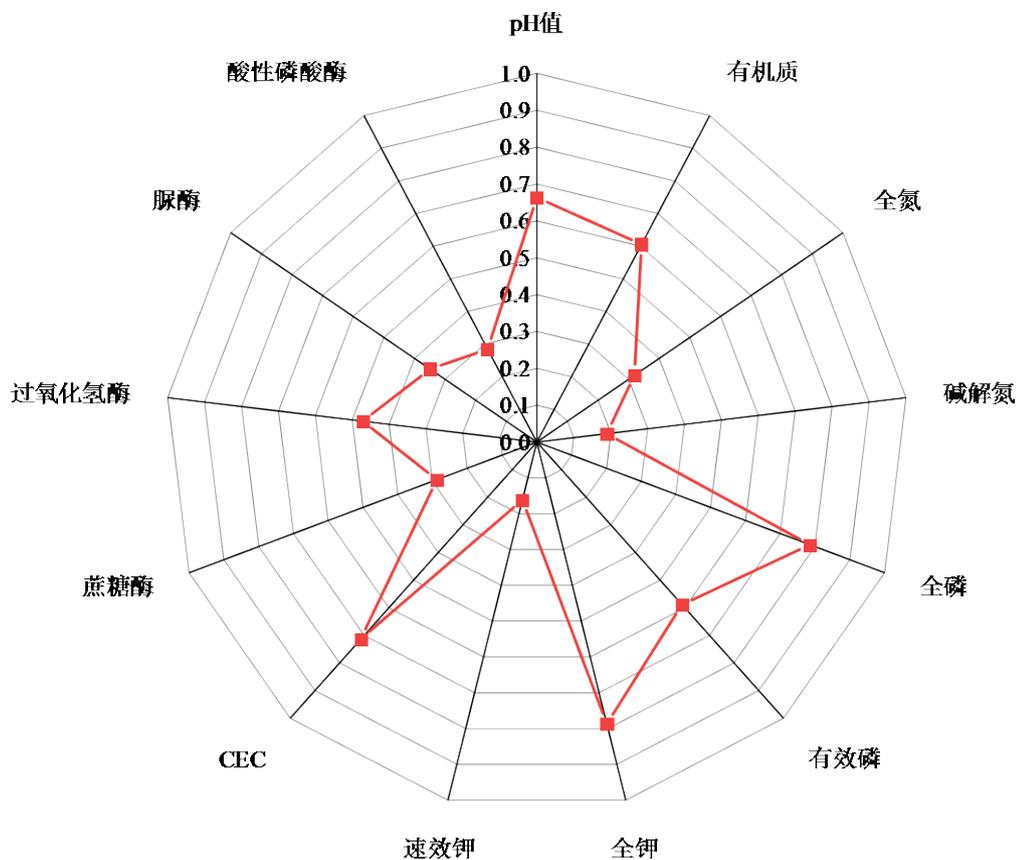


Figure 2. Radar chart of membership function values of soil fertility evaluation indexes
图 2. 土壤肥力评价指标隶属度函数值雷达图

3.3.2. 土壤肥力综合评价

评价指标公因子方差及权重结果见表 5，MDS 中全磷所占权重最大，其次是速效钾和有机质，蔗糖酶最小，说明全磷对土壤肥力的贡献率较大，其次是速效钾与有机质。根据上述公式，计算得到贵阳市开阳和花溪茶园土壤的土壤肥力综合评价值。结果如图 3 所示，土壤肥力综合值在全数据集(total data set, TDS)和最小数据集中呈现的趋势相同，均表现为花溪 > 开阳，且全数据集大于最小数据集。根据李文昭[9]等对土壤肥力质量的分级结合贵阳市茶园土壤质量状况，将 IFI 值划分为 4 个评价等级(表 6)。由表 6 可知，在全量数据集和最小数据集下贵阳市两个茶园的土壤质量等级均为 II 级，茶园土壤肥力质量处于“中等”偏上水平。

Table 5. Common factor variance and weight of soil indicators
表 5. 土壤指标的公因子方差及权重

评价指标	全量数据集		最小数据集	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重
pH	0.874	0.084		
有机质	0.845	0.082	0.726	0.238
全氮	0.803	0.078		
碱解氮	0.759	0.073		

Continued

全磷	0.888	0.086	0.811	0.266
有效磷	0.776	0.075		
全钾	0.879	0.085		
速效钾	0.699	0.068	0.800	0.263
CEC	0.689	0.067		
蔗糖酶	0.773	0.075	0.709	0.233
过氧化氢酶	0.686	0.066		
脲酶	0.781	0.075		
酸性磷酸酶	0.895	0.086		

Table 6. Classification of soil fertility

表 6. 土壤肥力等级划分

IFI 评价值	$IFI \geq 0.75$	$0.75 > IFI \geq 0.5$	$0.5 > IFI \geq 0.25$	$IFI < 0.25$
评价等级	I	II	III	IV

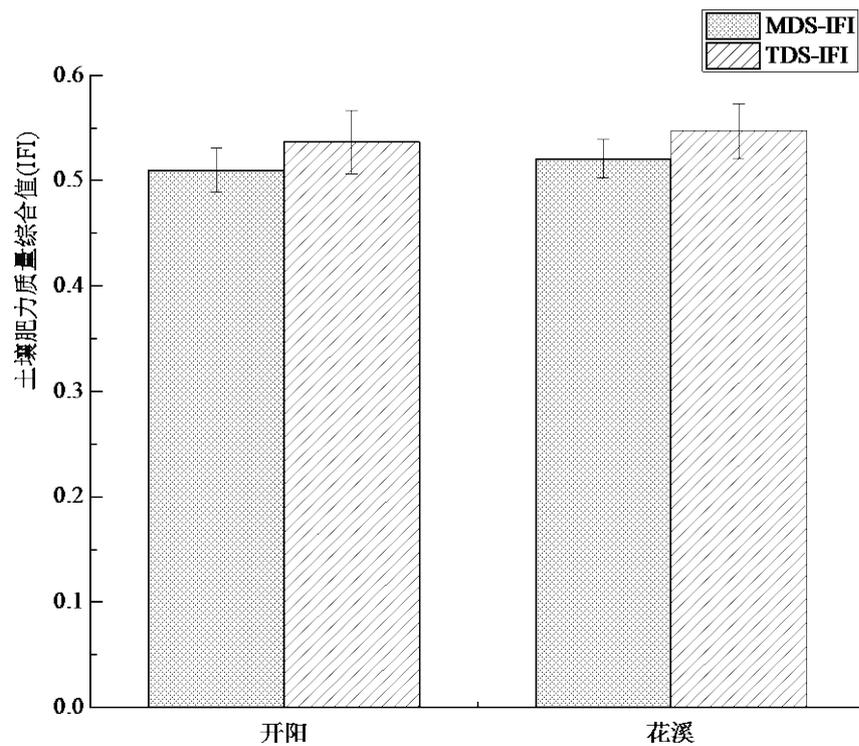


Figure 3. Combined values of soil fertility and quality in the minimum and total datasets

图 3. 最小数据集和总数据集土壤肥力质量综合值

为避免评价指标所包含的土壤肥力质量信息被忽略, 导致评估结果准确度的下降等问题。因此, 利用全量数据集与最小数据集的 IFI 值进行线性回归分析, 对最小数据集指标进行验证(图 4)。结果表明, 二者的 IFI 值拟合度好且呈显著正相关关系, 相关系数为 0.8961 ($P < 0.05$); 故可利用最小数据集指标代替全量数据集指标对贵阳市茶园土壤肥力质量状况进行评价。

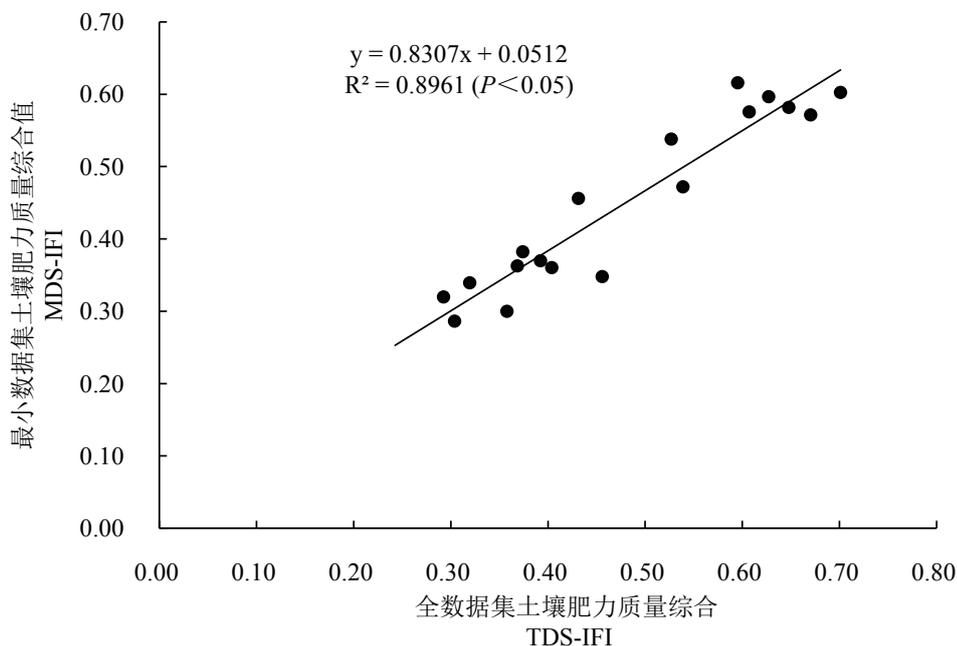


Figure 4. Correlations between the combined values of soil fertility and quality in the MDS and the TDS

图 4. 最小数据集和全数据集土壤肥力质量综合值间相关性

4. 讨论

土壤肥力是茶树生长发育的物质基础。通常认为,土壤肥力下降在一定程度上不利于茶树健康生长。例如,土壤缺乏有机质、氮磷钾等养分,会影响茶叶中内含物的合成和茶树的生长发育等[31]。韩文炎等[3]研究发现,茶园土壤氮、磷和钾等因素与茶叶产量和品质有明显的相关性;土壤中全氮量和腐殖质少的茶园,所采制的茶叶品质也较差。徐丽红等[32]研究表明,茶叶中每一种品质化学因子都在 pH、有机质、速效氮、速效钾、速效磷等多种土壤肥力因子相互作用下才能获得较好的品质,因此,要在相对多施有机肥、氮肥的情况下,配合磷钾等肥的施用,才能对茶树产量及品质的提高起到积极的作用。李渝等[10]研究发现,土壤酸性磷酸酶、脲酶、SMBC、SMBP 等土壤生物性质与土壤 CEC、有机质、全氮、氨氮等土壤理化指标极显著正相关,可作为评价茶园土壤肥力的重要生物学指标。

本研究通过测定分析贵阳市茶园土壤肥力指标,对该地区茶园土壤肥力状况有了初步了解。茶树是喜酸性作物,茶树为喜酸性经济作物,对土壤酸碱度的反应极为敏感,土壤过酸或过碱都将对茶树的生长发育及茶叶品质产生影响;茶树生长的适宜 pH 为 4.0~6.5,最适 pH 为 4.5~5.5 [8] [21];研究表明,贵阳市茶园土壤 pH 值在 3.43~5.53 范围内变化,有明显酸化趋势;应注意调节土壤 pH,适时适量的施用改良剂防止土壤过度酸化。CEC 作为评价土壤保肥能力的指标,是改良土壤和合理施肥的重要依据;有机质作为土壤的重要组成部分,是维持土壤结构和微生物活动及反映土壤肥力的重要指标之一[9] [33];土壤氮、磷、钾养分是植物生长发育必需的大量元素元素,对茶树生长发育和茶叶品质元素的形成有重要作用[8];测定结果表明,研究区土壤 CEC、有机质、酶活性及氮磷钾等养分指标均属于中等强度变异,表明其在贵阳市不同茶园土壤中具有差异性;其中土壤有机质、全氮、全磷、有效磷、和全钾含量丰富,达到优质茶园土壤肥力标准,且 CEC 保肥能力处于中等偏上,适宜茶树生长;而碱解氮和速效钾含量相对偏低,且隶属函数值均明显低于其他肥力指标,表明碱解氮和速效钾是贵阳市茶园土壤土壤肥力的限制性因子。土壤碱解氮和速效钾含量低易引起土壤氮、钾素供应不足,应采取一定措施适当补充。赵海

燕[34]、李文凤[35]等研究表明,蔗糖酶与土壤养分关系十分紧密,可以表征土壤中生物活性的强度,加速蔗糖的分解,且肥力越高的土壤,其活性也越高;此外它还可以用于评价土壤的熟化程度的土壤肥力水平;脲酶与尿素氮肥的水解密切相关,可反映土壤中氮素状况和表征土壤中有有机态氮的转化状态;磷酸酶可促进有机磷的脱磷速度,从而增加土壤中磷的有效性;过氧化氢酶能促进土壤中过氧化氢的分解防止过氧化氢对生物体的毒害作用;其活性的强弱可体现有机质积累情况和表征土壤腐质化强度,可作为土壤肥力及质量评价的指标。因此,土壤酶活性在土壤肥力评价中的作用不容忽视。

在土壤肥力评价过程中,通常认为选取的指标越多越好,然而许多指标之间存在的共线性会导致指标冗余,从而增加分析的成本、耗时费力。因此,进行土壤肥力评价的关键是选择合适且具有代表性的指标,由于研究者评价目的不同以及土壤类型、土地利用方式的不同,因此评价指标和评价方法的选择也大不同。如陈方正等[22]通过建立最小数据集对洞庭湖流域耕地土壤进行土壤肥力评价,建立 MDS 包括成土母质、剖面土体构型、阳离子交换量、容重、有机质、有效磷和全钾等 7 项指标;冯万忠等[36]对河北平原区冬小麦/夏玉米高产田的研究,建立最小数据集 pH 值、土壤容重、有机质含量、速效磷含量、磷酸酶活性、阳离子交换量(CEC)、微生物量碳、微生物量氮等 8 项指标;朱娟娟等[37]对贺兰山东麓葡萄园土壤的研究,建立的 MDS 包括有机质、pH 值、速效磷、全硼和有效硼 5 个指标。有研究表明,指标成分各不相同,所选择的指标原则上应包涵土壤物理、化学和生物三方面[20],同时某些指标间存在显著的相关性,而最小数据集能将众多指标简化,筛选出能够代表土壤整体质量的指标集合。本研究通过主成分分析与相关性分析结合 Norm 值,筛选出包含了土壤化学和生物属性的土壤全磷、蔗糖酶、速效钾和有机质 4 个指标代替土壤的 13 项指标。运用隶属度值和权重值,求得 MDS 土壤肥力值(IFI),结果表明,贵阳市的开阳县龙岗镇和花溪羊艾茶园土壤肥力质量均为 II 级,茶园土壤肥力质量处于“中等”偏上水平;且 MDS 与 TDS 相关性表明,可利用最小数据集代替全数据集评价土壤肥力质量;这与冯万忠、朱娟娟和刘引等[36] [37] [38]研究结果一致。对于土壤物理属性对贵阳市地区茶园土壤肥力的影响如何,还有待今后进一步的研究。

5. 结论

1) 通过主成分分析与相关性分析并结合 Norm 值构建贵阳市茶园土壤肥力评价的最小数据集指标包括全磷、蔗糖酶、速效钾和有机质 4 个。

2) 土壤碱解氮和速效钾是茶园土壤肥力的主要限制因子,开阳和花溪茶园土壤肥力综合值为 II 级,总体上处于中上水平,适宜茶树生长。

3) 基于最小数据集的土壤肥力评价结果与全数据集的结果呈正相关关系,相关系数为 0.8961,可采用最小数据集方法代替全数据集方法评价土壤肥力。

本研究存在不足之处缺乏对土壤肥力随时间变化的评价。在后续研究中,应进一步的调查与监测研究区域内土壤肥力质量的长期演变,筛选出对生产性能及茶园土壤肥力质量敏感且更具代表的指标,从而提高最小数据集在茶园土壤研究中的普适性和实践价值。

资助项目

贵阳市科技局重大专项(筑科合同[2011401]01 号);贵州省科技计划项目(黔科合基础[2019]1106 号)。

参考文献

- [1] 任艳芳,何俊瑜,张艳超,王艳玲,林肖,杨波. 贵州省开阳茶园土壤有效微量元素状况分析[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 432-435.
- [2] 贵州省统计局. 贵州统计年鉴-2020[EB/OL].

- <http://hgk.guizhou.gov.cn/publish/tj/2021/zk/indexch.htm>, 2021-12-06.
- [3] 韩文炎, 阮建云, 林智, 吴洵, 许允文, 石元值, 等. 茶园土壤主要营养障碍因子及系列茶树专用肥的研制[J]. 茶叶科学, 2002, 22(1): 70-74+65.
- [4] 廖万有, 王宏树, 苏有键, 康启兵. 我国茶园土壤的退化问题及其防治[C]//中国茶叶学会. 第三届海峡两岸茶业博览会暨茶业国际高峰论坛论文集. 2009: 139-145.
- [5] Yan, P., Shen, C., Fan, L.C., Li, X., Zhang, L., Han, W., *et al.* (2018) Tea Planting Affects Soil Acidification and Nitrogen and Phosphorus Distribution in Soil. *Agriculture Ecosystems, & Environment*, **254**, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.015>
- [6] Yang, X.D., Ni, K., Shi, Y.Z., Yi, X.,-Y., Zhang, Q.-F., Fang, L., *et al.* (2018) Effects of Long-Term Nitrogen Application on Soil Acidification and Solution Chemistry of a Tea Plantation in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **252**, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.004>
- [7] 柳书俊, 姚新转, 赵德刚, 吕立堂. 湄潭茶园土壤养分特征及肥力质量评价[J]. 草业学报, 2020, 29(11): 33-45.
- [8] 任艳芳, 何俊瑜, 张艳超, 刘冬, 王艳玲, 陈会. 贵州省开阳茶园土壤养分状况与肥力质量评价[J]. 土壤, 2016, 48(4): 668-674.
- [9] 李文昭, 颜雄, 徐国勇, 孙若楠, 何雨茹. 遵义市典型茶园土壤肥力质量评价[J]. 南方农业, 2019, 13(21): 184-187.
- [10] 李渝, 刘彦伶, 黄兴成, 张雅蓉, 周国兰, 周富裕, 等. 贵州不同茶区土壤养分及微生物量分析评价[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 98-105.
- [11] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 任意, 张骏达, 徐明岗. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043-3056.
- [12] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 刘益军, 娄义宝, 杨旭. 基于聚类及PCA分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
- [13] Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H.A., Fereidouni, Z. and Rahimi Bandarabadi, S. (2014) Assessment of Soil Quality Indices in Agricultural Lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, **40**, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003>
- [14] 韩素芳, 程诗明, 付金贤, 屈明华, 刘亚群, 徐梁, 等. 浙江省油茶土壤肥力评价最小数据集研究[J]. 浙江林业科技, 2021, 41(1): 8-15.
- [15] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 李鹏, 刘满强, 李辉信, 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.
- [16] 周俊英. 黄土丘陵区典型种植梯田土壤肥力质量评价[D]: [硕士学位论文]. 西北农林科技大学, 2017.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [19] 张丽星, 海春兴, 常耀文, 高晓媚, 高文邦, 解云虎. 羊草及芨芨草草原和西北针茅草原土壤质量评价[J]. 草业学报, 2021, 30(4): 68-79.
- [20] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 682-689.
- [21] 刘娟, 张乃明, 邓洪. 勐海县茶园土壤养分状况及肥力质量评价[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 79-86.
- [22] 陈方正, 任健, 刘思涵, 胡克林. 基于最小数据集的洞庭湖流域南部耕地土壤肥力综合评价[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1348-1359.
- [23] 卢翠玲. 伊河流域中下游地区土壤质量特征及评价[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2018.
- [24] 李彬彬. 黄土高原区域尺度农田土壤质量评价[D]: [硕士学位论文]. 西北农林科技大学, 2017.
- [25] 张嘉宁. 黄土高原典型土地利用类型的土壤质量评价研究[D]: [博士学位论文]. 西北农林科技大学, 2015.
- [26] 潘萍, 孙玉军, 欧阳勋志, 饶金凤, 冯瑞琦, 杨子云. 江西省马尾松林生态系统碳密度空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1885-1892.
- [27] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [28] 中华人民共和国农业部. NY/Y853-2004. 茶叶产地环境技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [29] 张小琴, 陈娟, 高秀兵, 段学艺, 曹雨, 赵华富, 等. 贵州重点茶区茶园土壤 pH 值和主要养分分析[J]. 西南农业学报, 2015, 28(1): 286-291.

-
- [30] 叶少萍, 李铤, 张俊涛, 曹芳怡. 基于主成分分析的古树土壤肥力综合评价[J]. 生态科学, 2022, 41(1): 196-205.
- [31] 李娟, 章明清, 尤志明, 章赞德, 姚建族, 苏火贵, 等. 福建乌龙茶园土壤速效氮磷钾丰缺指标与肥力状况评价[J]. 茶叶学报, 2018, 59(1): 19-25.
- [32] 徐丽红, 吴全聪, 李阳, 王建清, 王伟, 陈栎安. 丽水茶园土壤肥力与茶叶品质关系的研究[J]. 茶叶, 2012, 38(3): 146-150.
- [33] 高秀兵, 陈娟, 郭燕, 郭灿, 邢丹, 陈瑶, 等. 贵州省 4 个地方茶树品种的根际土壤质量评价[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(12): 100-104.
- [34] 赵海燕, 徐福利, 王渭玲, 王伟东, 陈钦程, 赵亚芳, 等. 秦岭地区华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性变化[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1086-1094.
- [35] 李文凤, 房翠翠, 牛玉昊, 霍英芝. 高原地区不同农作物土壤酶活性与土壤养分关系研究[J]. 北方园艺, 2014(12): 159-161.
- [36] 冯万忠, 马振朝, 张丽娟, 马峙英, 吉艳芝. 河北平原冬小麦/夏玉米高产田土壤肥力质量最小数据集构建及其评价[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(15): 233-238.
- [37] 朱娟娟, 马海军, 李敏, 倪志婧, 刘雅琴, 王薇. 基于最小数据集的贺兰山东麓葡萄园土壤肥力评价[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 172-180+187.
- [38] 刘引, 颜鸿远, 欧小宏, 郭兰萍, 刘大会. 基于最小数据集的麻城菊花种植区土壤肥力质量评价[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(24): 5382-5389.