

DOI: 10.11686/cyxb2020061

<http://cyxb.magtech.com.cn>

柳书俊, 姚新转, 赵德刚, 等. 湄潭茶园土壤养分特征及肥力质量评价. 草业学报, 2020, 29(11): 33—45.

Liu S J, Yao X Z, Zhao D G, *et al.* An evaluation of soil nutrient status and balance in Meitan tea plantations. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 33—45.

湄潭茶园土壤养分特征及肥力质量评价

柳书俊^{1,2}, 姚新转^{1,2}, 赵德刚^{2,3}, 吕立堂^{1,2*}

(1. 贵州大学茶学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学农业生物工程研究院山地植物资源与种质创新
省部共建教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省农业科学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为探明湄潭茶园土壤养分特征及肥力质量现状, 选用 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾 6 个指标, 应用主成分分析法对湄潭 6 种类型茶园土壤养分特征及肥力质量状况进行评价。结果表明: 1) 湄潭茶园土壤 pH 为 3.73~7.26, 均值为 5.01, 61.11% 的茶园土壤达到优质茶园的标准, 湄潭茶园土壤 pH 整体适宜, 16.67% 的茶园土壤有酸化趋势。2) 湄潭茶园土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量整体丰富, 均值分别为 22.84 g·kg⁻¹、1.43 g·kg⁻¹、124.50 mg·kg⁻¹、44.16 mg·kg⁻¹ 和 135.61 mg·kg⁻¹, 分别有 61.11%、70.37%、61.11%、55.56% 和 59.26% 的茶园土壤达到优质茶园的标准, 但各养分指标之间存在着明显的空间差异。3) 湄潭茶园土壤肥力综合指标值 (IFI) 为 0.179~0.989, 均值为 0.683, 分别有 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; 各类型茶园 IFI 之间存在明显的空间差异, 其由大到小分别为: 中山黄壤>丘陵黄壤>丘陵石灰土>低山黄壤>中山石灰土>低山石灰土。4) pH 与有机质、全氮、有效磷之间呈极显著负相关关系, 与碱解氮呈显著负相关关系; 各养分指标之间存在着显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 的正相关关系, 各养分之间关系比较密切且具有同源性。pH 与 IFI 呈极显著 ($P<0.01$) 负相关关系, 其他养分指标均与 IFI 呈极显著 ($P<0.01$) 正相关关系。

关键词: 湄潭茶园; 土壤养分; 土壤肥力质量; 土壤肥力综合指标值; 主成分分析

An evaluation of soil nutrient status and balance in Meitan tea plantations

LIU Shu-jun^{1,2}, YAO Xin-zhuan^{1,2}, ZHAO De-gang^{2,3}, LÜ Li-tang^{1,2*}

1. College of Tea Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. The Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education), Institute of Agro-Bioengineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550025, China

Abstract: This research investigated the soil nutrient status and balance in Meitan tea plantations. Six indicators were selected (pH, organic matter, total nitrogen, alkaline nitrogen, available phosphorus and available potassium) and data on these collected for six categories of tea plantation. The data were evaluated by principal component analysis. It was found that: 1) The soil pH of Meitan tea plantations ranged from 3.73 to 7.26, with an average value of 5.01. In 61.11% of the surveyed tea plantations, the soil tests satisfied the standard set for high quality tea plantations. Hence, the soil pH of Meitan tea plantations was generally suitable, although soil in 16.67% of the tea plantations had an acidification trend. 2) The contents of organic matter, total

收稿日期: 2020-02-20; 改回日期: 2020-03-23

基金项目: 贵州省优秀青年科技人才项目“白化、黄化、紫化茶树品种茶叶品质提升关键技术研究”(黔科合平台人才[2019]5651)和中央引导地方科技发展专项“贵州省茶产业技术创新中心”(黔科中地引[2017]4005)资助。

作者简介: 柳书俊(1995-), 男, 陕西临潼人, 在读硕士。E-mail: 384354153@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ltlv@gzu.edu.cn

nitrogen, alkaline nitrogen, available phosphorus and available potassium in Meitan tea plantations were in most cases rich, with average values of $22.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $1.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $124.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $44.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $135.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. For the same list of tests, soil in 61.11%, 70.37%, 61.11%, 55.56% and 59.26%, respectively, of the tea plantations met the standard for high quality tea plantations, but the status for individual nutrients differed between plantations. 3) The integrated fertility index (IFI) range for the surveyed Meitan tea plantations was 0.179–0.989, with an average value of 0.683. In 51.85% of the tea plantations soil was at level I status, and in 31.48%, it was at level II. Hence, the soil nutrient status is generally good. There were obvious differences in IFI between the different categories of tea plantations, with the ranking being: medium mountain yellow soil > hilly yellow soil > hilly calcareous soil > low mountain yellow soil > medium mountain calcareous soil > low mountain calcareous soil. 4) There was a very significant negative correlation between pH and organic matter, total nitrogen, and available phosphorus, and a significant negative correlation of pH with alkaline nitrogen. There was a significant ($P < 0.05$) and a very significant ($P < 0.01$) positive correlation between the nutrient indexes; i. e. the values for the various nutrients at any one test site were relatively close and homologous. Tea plantation values for soil pH were negatively correlated with IFI ($P < 0.01$), and test values for other nutrients were positively correlated with IFI ($P < 0.01$).

Key words: Meitan tea plantations; soil nutrient; soil fertility quality; integrated fertility index (IFI); principal component analysis

土壤作为茶树(*Camellia sinensis*)生长的物质基础,其养分及肥力水平是其物理、化学和生物特性的综合反映,其丰缺程度直接影响了茶树的生长发育,进而影响茶叶的产量和品质^[1-5]。因此,开展茶园土壤养分特征及肥力质量评价对于摸清茶园土壤本底、掌握茶园土壤质量具有重要意义。土壤养分及肥力质量综合评价的方法有主成分分析法^[6]、聚类分析法^[6]、地统计学^[7]、模糊数学分析法^[1]、指数和法^[4,8]等;目前,主成分分析法在土壤质量评价中得到广泛的应用,一般认为主成分分析可以弱化变量间的自相关性所引起的误差,形成互不相关的主成分得分,获得各主成分得分,同时通过计算得到综合评价得分,从而达到对土壤养分质量的精确评价,以及可精确筛选土壤属性的变异性^[9-10]。我国众多学者对茶园土壤养分及肥力状况已经进行了相关研究。高菲菲等^[3]的研究表明,云南普洱市茶园土壤适宜茶树的种植,但土壤碱解氮和速效钾的含量相对偏低。吴云等^[11]的研究表明,茶园土壤在不同 pH 值区段内的化学性质随 pH 值的变化差异明显,土壤酸化程度加剧对茶树的生长十分不利。周国兰等^[12]的研究表明,贵州茶园土壤养分状况分布不均衡,大多处于适宜或最适宜之间,各地区土壤养分含量变化幅度大。任艳芳等^[13]的研究表明,贵州省开阳茶园土壤肥力质量总体水平良好,但土壤偏酸,速效磷和速效钾的含量相对偏低,应重点改酸和增施磷钾肥。准确掌握茶园土壤养分及肥力状况是茶树合理施肥的前提条件,以上研究都为当地茶园合理施肥和提高茶叶产量提供了参考依据^[13]。

湄潭是贵州最大的茶区,2018 年茶园种植面积达 40000 hm^2 ,是贵州省茶叶高效示范园区,茶叶产业已成为湄潭农村经济中的重要支柱产业^[13]。有学者对湄潭茶园养分及理化性质状况研究发现:茶园土壤 pH 为 3.68~5.69,有机质为 $10.25 \sim 42.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮为 $0.92 \sim 3.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮为 $54.11 \sim 241.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷为 $1.87 \sim 38.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为 $30.67 \sim 202.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有酸化趋势,且酸化程度与长期连续的化肥使用直接相关^[14-18]。开展湄潭不同类型茶园土壤养分及肥力质量状况的研究,对于摸清茶园土壤本底、掌握茶园土壤质量、指导茶园科学施肥管理、提高茶园土壤肥力、优化茶园生态系统环境质量、提升茶叶产量品质、实现茶产业可持续发展、推行农业绿色发展和促进生态文明建设具有重要的意义。

基于此,本研究选用 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾 6 个指标,应用主成分分析法对湄潭 6 种类型茶园土壤养分特征及肥力质量状况进行评价,掌握湄潭茶园土壤养分特征及肥力质量现状,以期为土壤合理施肥和养分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湄潭区位于贵州省遵义市东部、大娄山南麓,面积 1844.9 km²,地理位置为 20°12′30″—27°20′18″ N, 107°15′36″—107°41′08″ E,属长江流域上游,乌江水系^[19]。全县南北狭长,最长距离为96.50 km,东西最宽距离为25.50 km。地形北部、西南部高,中部、东部和南部边境低,海拔 631~1556 m,平均海拔 940 m。属中亚热带湿润季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,雨热同期,年均降水量 1137.6 mm,随海拔增高降水量增大,全年气候温和,年均气温 14.9 ℃,月均温变幅 4.1~24.9 ℃,全年总积温 5475 ℃,全年无霜期 284 d,年均日照时数 1163 h^[20]。成土母岩为碳酸岩、砂页岩及第四纪粘土,土壤类型多样,以黄壤和石灰土为主,自然肥力高,富含氮、磷、钾和有机质^[21]。湄潭区地表资源丰富,土壤富含锌、硒等对人体有益的微量元素,是典型的“高海拔、低纬度、寡日照、多云雾、无污染”的地区,其自然地理环境特别适宜于茶树生长。

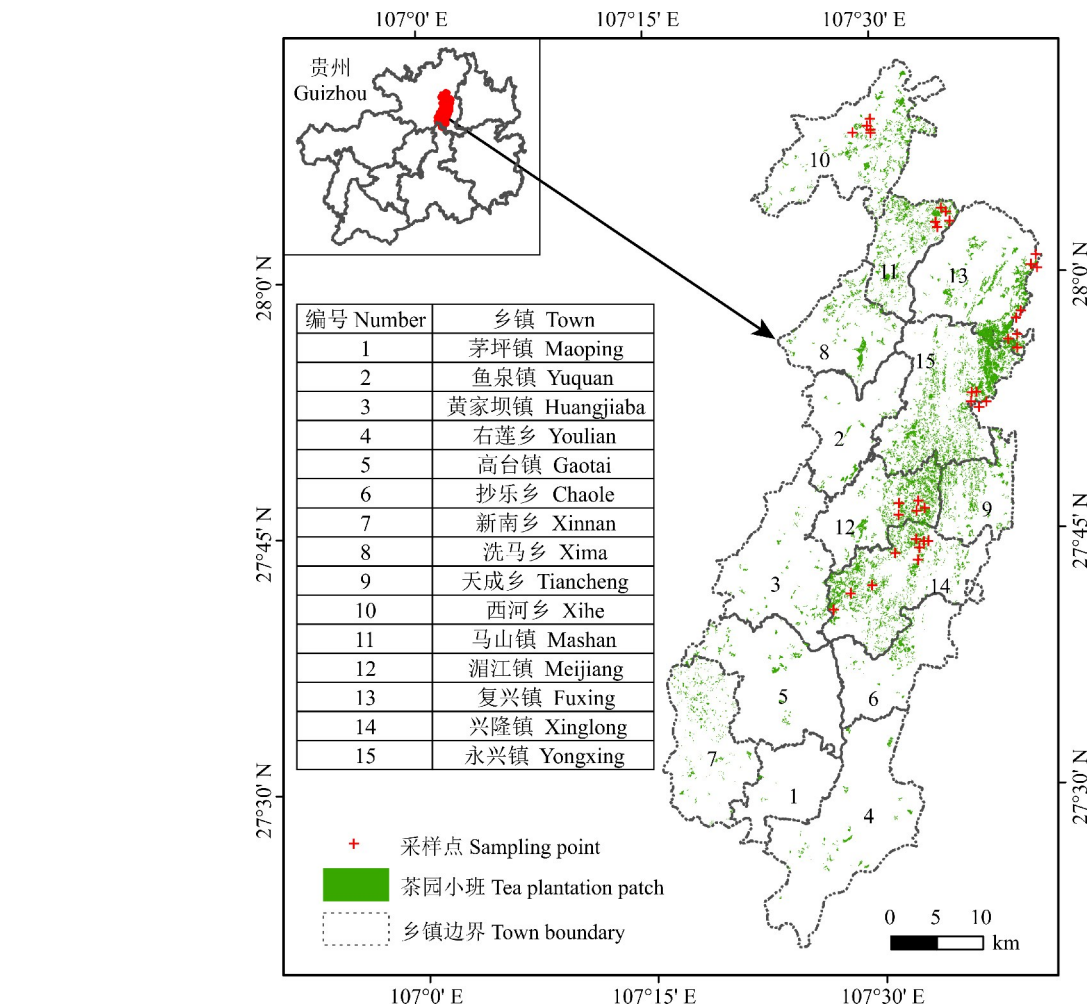


图 1 茶园土壤采样图
Fig. 1 Tea plantations soil sampling map

1.2 样品采集与测试

于 2019 年 5 月 6 日—2019 年 5 月 18 日,基于湄潭县 2015 年二调数据库,根据茶园地形和土壤(《贵州省第四次林业资源规划设计调查实施细则》^[22])将湄潭茶园分为 6 种类型:低山黄壤、低山石灰土、丘陵黄壤、丘陵石灰土、中山黄壤和中山石灰土,每种类型茶园随机布设 9 个样方(图 1)。采样方法按照《土壤农化分析》^[23]进行,采用“S”形布点采样法,每个样方采集 5 个 0~20 cm 土层的土样混合为 1 个土壤样品,除去石块、植物根系和凋

落物后,用四分法取各混合土样 1 kg 左右,并记录各采样点的经纬度信息。

参考《土壤农化分析》^[23]测定土壤样品中的 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量,采用玻璃电极法测定(水土比为 2.5 : 1)pH;采用重铬酸钾容量法测定有机质含量;采用半微量凯氏法测定全氮含量;采用碱解扩散法测定碱解氮含量;采用钼锑抗比色法测定有效磷含量;采用火焰光度法测定速效钾含量。

1.3 土壤肥力综合质量评价方法

1.3.1 土壤单项肥力指标隶属度的确定 选取 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾 6 项指标作为确定湄潭茶园土壤肥力综合指标值(integrated fertility index, IFI)的因子。常用的隶属函数有 S 型和抛物线两种,其中 pH 属于抛物线型函数,其余各项指标均属于 S 型函数。其函数表达式分别为:

S 型隶属函数:

$$N_i=f(x)=\begin{cases}1.0 & x\geqslant x_2 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1 & x_1<x<x_2 \\ 0.1 & x\leqslant x_1\end{cases}\tag{1}$$

抛物线型隶属函数:

$$N_i=f(x)=\begin{cases}1.0-\frac{0.9(x-x_3)}{x_4-x_3} & x_3<x<x_4 \\ 1.0 & x_2\leqslant x\leqslant x_3 \\ 1.0+\frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1} & x_1<x<x_2 \\ 0.1 & x\geqslant x_4\text{ 或 }x\leqslant x_1\end{cases}\tag{2}$$

式中: N_i 为评价因子 i 的隶属值, x 为实测值,根据茶园土壤各肥力指标与茶叶产量与质量之间的关系,结合已有研究^[1-2,13],确定各肥力指标的隶属度函数类型和各项函数曲线转折点的取值(表 1)。隶属值大小为 0.1~1.0,最大值 1.0 表示土壤肥力指标完全适宜作物生长,最小值 0.1 表示土壤肥力指标严重缺乏;由于土壤中不可能没有某种养分,因此最小值没有取 0^[24]。

表 1 各肥力指标隶属度函数曲线转折点的取值

Table 1 Value of turning point of membership function curve of each fertility index

转折点取值 Turning point value	pH	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen (mg · kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg · kg ⁻¹)
x_1	4.0	10	0.75	60	5	50
x_2	4.5	30	2.00	120	20	150
x_3	6.0	—	—	—	—	—
x_4	7.0	—	—	—	—	—

注:“—”表示为空值。
Note: “—” indicate null value.

1.3.2 土壤单项肥力指标权重系数的确定 权重系数表征各项肥力指标对土壤肥力的影响程度或贡献率。本研究采用主成分分析法,选取累计百分率大于 85%的主成分来确定土壤肥力因子的权重值^[2,24]。计算公式如下:

$$W_i=\frac{r_{i均}}{\sum r_{i均}}\tag{3}$$

式中: $r_{i均}$ 为评价因子 i 与其他各因子间相关系数的平均值。

1.3.3 土壤肥力综合指标值的计算 土壤肥力综合指标值是一个反映土壤肥力状况的指标值,其大小表示土壤肥力的等级,计算公式如下:

$$IFI=\sum_{i=1}^nW_i\times N_i$$

(4)

式中:IFI 为土壤肥力综合指标值, n 为评价指标数量, W_i 和 N_i 分别为第 i 个评价指标的权重系数和隶属值,根据 IFI 值即可对土壤肥力指标进行划分^[1](表 2)。

表 2 土壤肥力综合评价标准
Table 2 Comprehensive evaluation criteria of soil fertility

土壤肥力综合指标 IFI	IFI≥0.75	0.50≤IFI<0.75	0.25≤IFI<0.50	IFI<0.25
土壤肥力等级 Soil fertility grade	I 级 Level I	II 级 Level II	III 级 Level III	IV 级 Level IV

1.4 数据分析

用 IBM SPSS 25.0 和 Origin 2018 软件进行统计分析和制图。

2 结果与分析

2.1 茶园土壤养分的基本状况

根据国家绿色食品产地环境技术条件(NY/T 391-2013)^[25] 和国家茶叶产地环境技术条件(NY/T 853-2004)^[26] 中茶园土壤肥力的分级标准,并结合韩文炎等^[27] 提出的优质高效高产茶园的土壤营养诊断指标确定湄潭茶园土壤养分分级标准(表 3)。

表 3 茶园土壤养分分级标准
Table 3 Tea plantations soil nutrients classification standard

指标 Index	一级 Level I	二级 Level II	三级 Level III	优质茶园标准 High quality tea plantation standard
pH	<4.5	4.5~5.5	>5.5	4.5~5.5
有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	>15	10~15	<10	≥20
全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	>1.0	0.8~1.0	<0.8	≥1.5
碱解氮 Alkaline nitrogen (mg·kg ⁻¹)	>100	50~100	<50	≥100
有效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	>10	5~10	<5	≥20
速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)	>120	80~120	<80	≥100

2.1.1 土壤 pH 值 由表 4 可知,湄潭茶园土壤 pH 变化范围为 3.73~7.26,均值为 5.01,变异系数为 15.98%,属于弱变异,说明各类型茶园的土壤 pH 变异不大;从茶园土壤 pH 分布来看,土壤 pH 低于 4.5 的茶园占 16.67%,高于 5.5 的茶园占 22.22%,pH 为 4.5~5.5 的茶园占 61.11%,表明有 61.11%的茶园土壤达到了优质茶园的标准。各类型茶园土壤 pH 均值为 4.72~5.48,其中,丘陵黄壤>中山石灰土>低山石灰土>低山黄壤>中山黄壤>丘陵石灰土,仅丘陵黄壤与丘陵石灰土之间存在显著性差异($P<0.05$),且各类型茶园 pH 均值均符合优质茶园标准。

2.1.2 土壤有机质 由表 4 可知,湄潭茶园土壤有机质变化范围为 9.24~44.62 g·kg⁻¹,均值为 22.84 g·kg⁻¹,不同茶园有机质含量变异为中等变异,变异系数为 33.06%;从茶园土壤有机质含量分布来看,土壤有机质含量大于 15 g·kg⁻¹的茶园高达 87.04%,10~15 g·kg⁻¹的茶园有 11.11%,小于 10 g·kg⁻¹的茶园仅1.85%,且有 61.11%的茶园达到优质茶园的标准。各类型茶园土壤有机质均值为 18.93~26.00 g·kg⁻¹,其中,丘陵石灰土>丘陵黄壤>中山黄壤>中山石灰土>低山石灰土>低山黄壤,但各类型茶园之间无显著性差异($P>0.05$),除低山黄壤茶园外,其余各类型茶园土壤有机质含量均值均符合优质茶园标准。

表 4 湄潭茶园土壤的主要养分状况

Table 4 Main nutrient status of soil in Meitan tea plantations

茶园类型 Types of tea plantation	pH	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen (mg · kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorous (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg · kg ⁻¹)
低山黄壤 Low mountain yellow soil	5.12±0.29ab	18.93±2.25a	1.16±0.11a	95.67±8.05b	16.36±3.91a	110.78±20.99a
低山石灰土 Low mountain calcareous soil	5.16±0.32ab	22.35±2.88a	1.45±0.17a	169.65±51.83a	48.24±23.84a	172.00±36.49a
丘陵黄壤 Hilly yellow soil	5.48±0.34a	23.60±4.04a	1.41±0.22a	119.58±21.30ab	56.45±43.56a	114.67±32.19a
丘陵石灰土 Hilly calcareous soil	4.72±0.10b	26.00±1.63a	1.54±0.10a	123.57±7.67ab	41.57±10.02a	170.44±26.57a
中山黄壤 Medium mountain yellow soil	4.77±0.09ab	23.21±1.48a	1.53±0.09a	121.18±11.20ab	46.54±20.38a	108.67±12.75a
中山石灰土 Medium mountain calcareous soil	5.34±0.28ab	22.92±2.11a	1.46±0.09a	117.35±8.94ab	55.79±11.40a	137.11±27.17a
范围 Range	3.73~7.26	9.24~44.62	0.74~2.77	33.01~380.28	0.91~404.05	30.00~360.00
平均值 Average	5.01±0.11	22.84±1.03	1.43±0.06	124.50±9.83	44.16±9.06	135.61±11.16
标准差 Standard deviation	0.80	7.37	0.38	51.50	66.85	73.14
变异系数 Coefficient of variation (%)	15.98	33.06	27.66	44.85	147.00	56.07
分布频率 Distribution frequency (%)						
I 级 Level I	16.67	87.04	85.19	61.11	74.07	50.00
II 级 Level II	61.11	11.11	9.25	37.04	14.82	24.07
III 级 Level III	22.22	1.85	5.56	1.85	11.11	25.93
优质茶园占比 High quality tea plantation proportion (%)	61.11	61.11	70.37	61.11	55.56	59.26

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

2.1.3 土壤氮、磷、钾元素 由表 4 可知,湄潭茶园土壤全氮含量为 0.74~2.77 g · kg⁻¹,均值为 1.43 g · kg⁻¹,不同茶园全氮含量变异系数为 27.66%,属中等变异;从茶园土壤全氮含量分布来看,土壤全氮含量高于 1.0 g · kg⁻¹的茶园高达 85.19%,低于 0.8 g · kg⁻¹的仅 5.56%,0.8~1.0 g · kg⁻¹之间的占 9.25%,有 70.37%的茶园达到优质茶园的标准。各类型茶园土壤全氮均值为 1.16~1.54 g · kg⁻¹,其中,丘陵石灰土>中山黄壤>中山石灰土>低山石灰土>丘陵黄壤>低山黄壤,各类型茶园之间无显著性差异($P>0.05$),且各类型茶园中仅丘陵石灰土和中山黄壤茶园全氮含量均值符合优质茶园标准。

湄潭茶园土壤碱解氮含量为 33.01~380.28 mg · kg⁻¹,均值为 124.50 mg · kg⁻¹,不同茶园土壤碱解氮含量变异系数为 44.85%,属强变异,说明各茶园间的碱解氮含量差异较大;从茶园土壤碱解氮含量分布来看,土壤碱解氮含量大于 100 mg · kg⁻¹的茶园占 61.11%,小于 50 mg · kg⁻¹的茶园仅 1.85%,50~100 mg · kg⁻¹的占 37.04%,有 61.11%的茶园达到优质茶园的标准。各类型茶园土壤碱解氮均值为 95.67~169.65 mg · kg⁻¹,其中,低山石灰土>丘陵石灰土>中山黄壤>丘陵黄壤>中山石灰土>低山黄壤,仅低山黄壤与低山石灰土之间存在显著性差异($P<0.05$),且仅低山黄壤茶园土壤碱解氮含量均值不符合优质茶园的标准。

湄潭茶园有效磷含量为 0.91~404.05 mg · kg⁻¹,均值为 44.16 mg · kg⁻¹,不同茶园有效磷含量变异系数高达 147.00%,属强变异;从茶园土壤有效磷分布来看,土壤有效磷含量大于 10 mg · kg⁻¹的茶园占 74.07%,小于 5 mg · kg⁻¹的茶园占 11.11%,5~10 mg · kg⁻¹的茶园占 14.82%,有 55.56%茶园达到优质茶园的标准。各类型茶园有效磷均值为 16.36~56.45 mg · kg⁻¹,其由大到小依次为:丘陵黄壤>中山石灰土>低山石灰土>中山黄壤>丘陵石灰土>低山黄壤,各类型茶园之间无显著性差异($P>0.05$),且仅低山黄壤茶园土壤有效磷含量均值不符合优质茶园的标准。

湄潭茶园速效钾含量为 30.00~360.00 mg·kg⁻¹,均值为 135.61 mg·kg⁻¹,不同茶园速效钾含量变异系数高达 56.07%,属于强变异;从茶园土壤速效钾含量分布来看,土壤速效钾含量大于 120 mg·kg⁻¹的茶园占 50.00%,小于 80 mg·kg⁻¹的茶园占 25.93%,80~120 mg·kg⁻¹的占 24.07%,有 59.26%的茶园达到优质茶园的标准。各类型茶园土壤速效钾均值为 108.67~172.00 mg·kg⁻¹,其中,低山石灰土>丘陵石灰土>中山石灰土>丘陵黄壤>低山黄壤>中山黄壤,各类型茶园之间无显著性差异($P>0.05$),均符合优质茶园的标准。

2.2 土壤肥力质量等级评定

2.2.1 单项土壤肥力指标的隶属度和权重 根据土壤肥力质量评价方法中的隶属度函数公式,计算各项肥力质量指标的隶属度(表 5)和单项肥力指标间的相关系数(表 6),其中,pH 与有机质、全氮、有效磷之间呈极显著负相关关系,与碱解氮呈显著负相关;有机质与全氮、碱解氮、有效磷、速效钾之间,全氮与碱解氮、有效磷、速效钾之间,碱解氮与有效磷、速效钾之间均呈极显著正相关,表明土壤养分之间的关系比较密切。

表 5 湄潭茶园土壤肥力质量指标的隶属度
Table 5 Membership of soil fertility quality index in Meitan tea plantations

茶园类型 Types of tea plantation	隶属度 Membership					
	pH	有机质 Organic	全氮 Total	碱解氮 Alkaline	有效磷 Available	速效钾 Available
		matter	nitrogen	nitrogen	phosphorous	potassium
低山黄壤 Low mountain yellow soil	0.86	0.60	0.40	0.72	0.73	0.63
低山石灰土 Low mountain calcareous soil	0.71	0.57	0.51	0.67	0.54	0.50
丘陵黄壤 Hilly yellow soil	0.89	0.55	0.48	0.72	1.00	0.77
丘陵石灰土 Hilly calcareous soil	0.85	0.56	0.51	0.77	0.78	0.58
中山黄壤 Medium mountain yellow soil	0.92	0.78	0.71	0.85	0.69	0.71
中山石灰土 Medium mountain calcareous soil	0.80	0.62	0.55	0.65	0.59	0.68

表 6 土壤肥力质量指标间的相关性
Table 6 Correlation between soil fertility quality indexes

项目 Item	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkaline nitrogen	有效磷 Available phosphorous
有机质 Organic matter	-0.491**				
全氮 Total nitrogen	-0.442**	0.935**			
碱解氮 Alkaline nitrogen	-0.328*	0.669**	0.749**		
有效磷 Available phosphorous	-0.491**	0.511**	0.551**	0.446**	
速效钾 Available potassium	-0.183	0.415**	0.374**	0.439**	0.092

注:“***”表示极显著相关($P<0.01$),“*”表示显著相关($P<0.05$)。
Note: “***” represents extremely significant correlation at $P<0.01$ level, and “*” represents significant correlation at $P<0.05$ level.

采用主成分分析法,选取累计百分率大于 85%的主成分(表 7)来确定土壤肥力因子的权重值(表 8)。由表 8 可知,茶园土壤各项指标的权重系数差异较大,全氮、碱解氮和有效磷的权重系数差别较小,均≥0.181,速效钾和有机质的权重系数较小,分别为 0.131 和 0.028。表明茶园肥力提升主要依靠增施氮肥和磷肥,茶树对钾肥的需求略小。

2.2.2 土壤肥力综合评价 由表 9 可知,湄潭茶园土壤肥力综合指数 (IFI)变化范围为 0.179~0.989,均值为 0.683,变异系数为 29.68%,属中等变异。大部分茶园土壤肥力综合指数处于 I 和 II 级水平,分别占 51.85% 和 31.48%,土壤养分状况总体较好,仅有 3.71%的土壤样本综合肥力指数在 0.25 以下,该部分茶园需要进一步改善土壤肥力。

表 7 各肥力指标的主成分特征根与方差贡献率

Table 7 Principal component characteristic root and variance contribution rate of each fertility index

主成分	特征值	贡献率	累计贡献率	主成分	特征值	贡献率	累计贡献率
Principal component	Eigenvalue	Contribution (%)	Cumulative contribution (%)	Principal component	Eigenvalue	Contribution (%)	Cumulative contribution (%)
1	3.473	57.890	57.890	4	0.481	8.023	93.427
2	0.979	16.316	74.205	5	0.343	5.713	99.140
3	0.672	11.199	85.404	6	0.052	0.860	100.000

表 8 各肥力指标的相关系数平均值和权重系数

Table 8 Correlation coefficient average and weight coefficient of each fertility index

指标	pH	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾
Index		Organic matter	Total nitrogen	Alkaline nitrogen	Available phosphorous	Available potassium
相关系数平均值 Correlation coefficient average	0.387	0.064	0.610	0.526	0.418	0.301
权重系数 Weighting factor	0.168	0.028	0.265	0.228	0.181	0.131

表 9 茶园土壤综合肥力指标分布

Table 9 Distribution of soil comprehensive fertility index in tea plantations

茶园土壤等级	平均值	标准差	变异系数	范围值	样本数	占比
Soil grade of tea plantations	Average	Standard deviation	Coefficient of variation (%)	Range	Number of samples	Proportion (%)
I	0.839	0.030984	7.27	0.760~0.989	28	51.85
II	0.619	0.072184	11.66	0.501~0.732	17	31.48
III	0.353	0.047710	13.52	0.274~0.412	7	12.96
IV	0.188	0.008920	4.74	0.179~0.197	2	3.71
平均 Average	0.683	0.202706	29.68	0.179~0.989	54	100.00

表 10 湄潭各类型茶园土壤肥力等级分布

Table 10 Distribution of soil fertility of various tea plantations in Meitan

茶园类型	土壤肥力综合 指标值 IFI	等级 Level	分布频率 Distribution frequency (%)			
			I 级	II 级	III 级	IV 级
			Level I	Level II	Level III	Level IV
低山黄壤 Low mountain yellow soil	0.669	II	44.44	33.33	11.11	11.11
低山石灰土 Low mountain calcareous soil	0.585	II	33.33	44.44	11.11	11.11
丘陵黄壤 Hilly yellow soil	0.739	II	55.56	44.44	0.00	0.00
丘陵石灰土 Hilly calcareous soil	0.687	II	66.67	11.11	22.22	0.00
中山黄壤 Medium mountain yellow soil	0.776	I	66.67	33.33	0.00	0.00
中山石灰土 Medium mountain calcareous soil	0.641	II	44.45	22.22	33.33	0.00

由表 10 可知,湄潭茶园土壤肥力水平空间差异明显,各类型茶园土壤肥力综合指数由大到小分别为:中山黄壤>丘陵黄壤>丘陵石灰土>低山黄壤>中山石灰土>低山石灰土,仅中山黄壤茶园土壤肥力综合指数处于 I 级,其余茶园均处于 II 级。其中,丘陵黄壤和中山黄壤类型茶园土壤肥力综合指数全部分布在 I、II 级;丘陵石灰

土和中山石灰土茶园土壤肥力综合指数主要分布在Ⅰ、Ⅱ级,分布频率在 73.64%以上;低山黄壤和低山石灰土在各等级均有分布,但以Ⅰ和Ⅱ级为主,分布频率均为 77.77%,分布在Ⅳ级的有 11.11%,该部分茶园需要适当的补充钾肥。

将土壤肥力综合指数与各养分因子进行拟合分析发现,pH 与 IFI 的线性回归关系最为密切,且 pH 与 IFI 呈极显著 ($P<0.01$) 负相关关系;有机质、全氮、碱解氮、速效钾、有效磷与 IFI 的 Logistic 回归关系最为密切,且各养分指标与 IFI 呈极显著 ($P<0.01$) 正相关关系(图 2)。为进一步了解各养分因子与 IFI 之间的载荷情况,主成分分析结果(表 11)表明:前 2 个主成分的特征值大于 1,累计贡献率为 73.311%。IFI 与有机质、全氮、碱解氮在第一主成分(PC1)上具有较大载荷,均大于 0.800;PC2 上 pH 和速效钾与 IFI 具有较高载荷,表明湄潭茶园土壤中 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量对土壤肥力均有较大的影响。

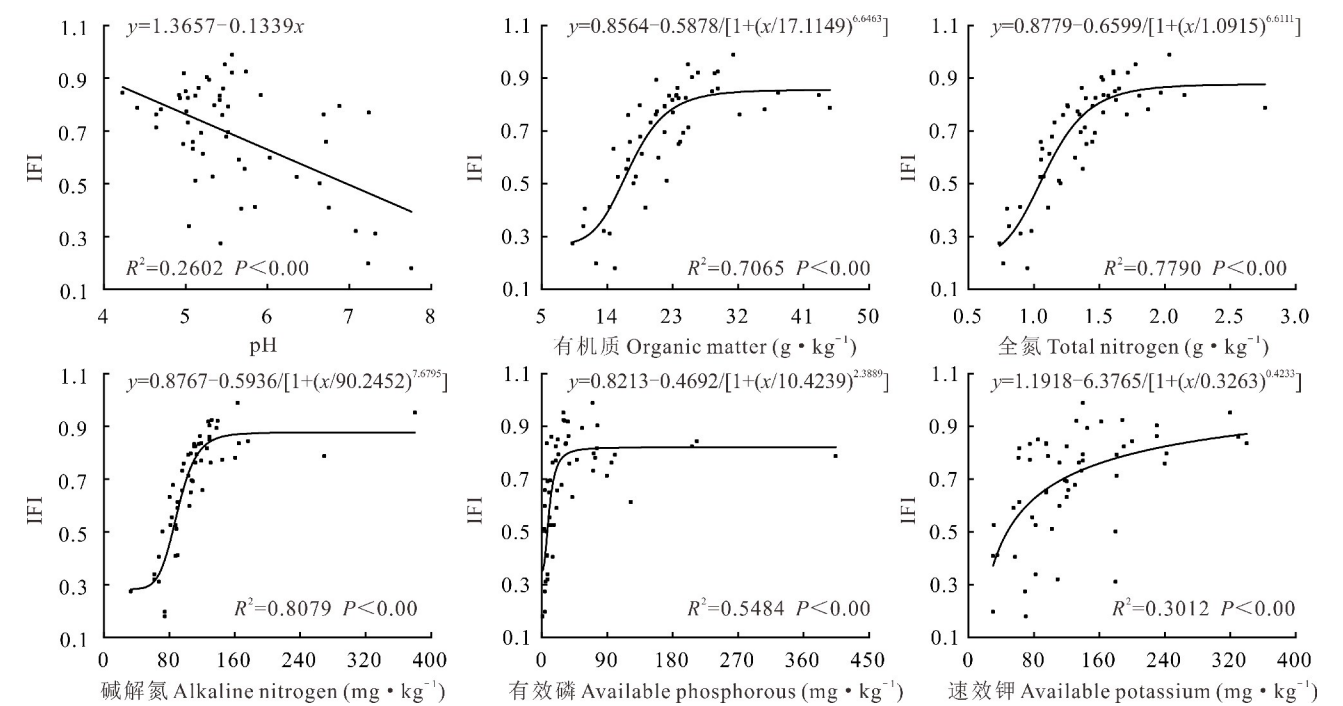


图 2 土壤肥力综合指标 (IFI) 与各养分指标的拟合关系

Fig. 2 The fitting relationship between the integrated fertility index (IFI) and various nutrients

表 11 土壤养分元素因子载荷

Table 11 Soil nutrient element factor loading									
主成分 Principal component	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkaline nitrogen	有效磷 Available phosphorous	速效钾 Available potassium	IFI	方差贡献率 Variance contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative contribution (%)
PC1	−0.616	0.910	0.932	0.812	0.618	0.541	0.843	58.872	58.872
PC2	0.356	−0.032	−0.046	0.121	−0.576	0.703	0.200	14.439	73.311

3 讨论

茶园土壤养分及肥力对茶树的生长发育,茶叶的品质、质量等方面有着重要的作用。茶树是喜酸性植物,土壤酸碱度的大小直接影响茶树的生长状况及茶叶的品质。适合茶树生长的 pH 值为 4.0~5.5,最适宜茶树生长的 pH 值为 4.5~5.5^[1,17]。当 pH 小于 4.5 或大于 6.5 时,茶树不仅对氮、磷、钾、镁等元素的吸收能力显著降低,而且会破坏土壤微生物区系,从而影响茶叶的产量和品质^[28-29]。本研究,湄潭茶园土壤 pH 为 3.73~

7.26, 平均值为 5.01, 变异系数为 15.98%, 大部分茶园土壤 pH 适宜茶树的生长, 但有部分茶园土壤酸化, 以低山石灰土、中山黄壤和中山石灰土茶园土壤酸化较为明显, 各类型茶园的土壤 pH 值变异不大, 这与张小琴等^[17]、李渝等^[18]的研究结果相似。茶园土壤酸化, 一方面可能是由于部分茶园氮肥施用过多^[30], 另一方面可能是长期种植导致茶树凋落物、修剪枝叶等自身循环加重了土壤中硅酸盐化合物及含铁化合物的矿化, 加速了钾、钙等元素的流失和铝、硅积累^[31-32]。总体来看, 湄潭茶园土壤 pH 整体适宜, 土壤酸碱度较适合茶树的种植, 有部分茶园土壤偏酸性。土壤有机质不仅是土壤固态物质的重要组成部分, 而且可以提供植物所需的各种养分, 其含量也是衡量土壤肥力高低的重要指标^[29, 33]。本研究中, 湄潭茶园土壤有机质含量为 9.24~44.62 g·kg⁻¹, 平均值为 22.84 g·kg⁻¹, 变异系数为 33.06%, 大部分茶园土壤有机质含量较高, 中山黄壤最高、低山石灰土茶园次之; 仅有 2% 的茶园土壤有机质含量偏低, 主要分布在中山石灰土和丘陵石灰土茶园, 这与杨秀琴^[14]、李渝等^[18]的研究结果相似。总体来看, 湄潭茶园土壤有机质含量较高, 仅 2% 的茶园有机质含量处于缺乏状态, 该部分茶园需增施有机肥。湄潭茶园主要分布在低山和丘陵地带, 茶农们对茶园的精心呵护及茶树修枝后的枝条与叶子直接散落于茶垄中, 外加当地湿润的气候与丰沛的降水使得这些修剪物更好的腐化, 进而转化为有机质, 使得茶园土壤更加肥沃。土壤氮、磷、钾养分作为作物生长和养分供应的重要养分库, 是土壤肥力的重要反映指标, 其含量高低及比例直接影响茶叶生长、产量和品质的高低^[34-35], 茶树作为一种叶用植物, 每年生产大量的芽叶, 树体对氮、磷、钾的需求量大且迫切^[36]。氮素是茶树生长需求最多的元素, 也是茶树主要品质成分游离氨基酸、茶多酚、糖类等的组成部分, 可直接或间接地影响茶树的生长^[37-38]。本研究中, 湄潭茶园土壤全氮和碱解氮含量平均值分别为 1.43 g·kg⁻¹ 和 124.50 mg·kg⁻¹, 变异系数为 27.66% 和 44.85%, 大部分茶园的全氮和碱解氮含量较高, 低山黄壤和丘陵黄壤茶园的含量较低, 这与张小琴等^[17]的研究结果趋势相同, 但本研究全氮和碱解氮的含量约为张小琴等^[17]研究结果的 2.42 倍, 这主要是由于近年来市场对茶叶需求量的增大, 促使茶农们大量的使用氮肥或复合肥来提高茶叶的产量。磷素是茶树正常生长发育不可或缺的元素, 参与茶树的光合作用、呼吸作用及生长发育等多种生理活动, 特别是茶树体内的酶促反应和能量传递与磷有很大的关联^[39]。钾是影响茶树生长发育及产量、品质的重要营养元素之一, 参与了茶树体内几乎所有的生化反应, 它是茶树多种酶的活化剂, 可以促进茶树光合作用、蛋白质合成以及增强碳水化合物化合物的代谢等, 对提高茶树的抗逆性和抗病虫害有积极作用^[39-40]。本研究中, 湄潭茶园土壤有效磷和速效钾均值分别为 44.16 mg·kg⁻¹ 和 135.61 mg·kg⁻¹, 变异系数分别为 147.00% 和 56.07%, 均属强变异, 这与张小琴等^[17]的研究结果趋势比较吻合, 但本研究有效磷和速效钾的含量分别约为张小琴等^[17]研究结果的 4.58 和 1.89 倍, 这主要与近年来化肥的大量使用和茶园腐殖质的积累有关。

本研究中湄潭茶园 IFI 变幅为 0.179~0.989, 均值为 0.683, 有 51.85% 和 31.48% 茶园分别为 I 和 II 级水平, 茶园土壤肥力质量较好, 除中山黄壤茶园土壤肥力为 I 级水平外, 其他茶园土壤肥力均为 II 级水平。究其原因, 这主要与各茶园的 pH 呈负相关关系, 与其他养分含量呈正相关关系有关。

本研究发现, 湄潭茶园各养分指标含量和土壤肥力之间存在着较强的空间变异, 这可能是因为现有茶园在种茶之前原有的植被覆盖度不同, 土壤养分背景之间存在着较大差异和不同茶园的管理水平参差不齐。湄潭各类型茶园间 pH 与有机质、全氮和有效钾含量呈极显著负相关关系, 与碱解氮含量呈显著负相关关系, 各养分指标之间呈极显著正相关关系, 说明各养分之间具有同源性, 这与温继良等^[2]的研究结果一致。总体而言, 湄潭茶园土壤养分及肥力状况整体良好, 但空间上存在一定的差异, 有少部分茶园土壤养分缺失、肥力状况一般。今后在大力发展湄潭茶园种植的同时, 应对茶园土壤养分现状问诊把脉, 对症下药, 科学施肥, 增施有机肥, 可根据实际情况套种绿肥, 加强茶园规范化管理, 减少茶园水土流失, 改善茶园土壤养分结构及肥力质量, 提高茶叶产量与品质, 提升品牌影响力, 努力实现“产业兴、人气旺、环境美、生态好”的产业发展目标, 深入贯彻落实习总书记的“两山论”, 努力建设“百姓富、生态美”的多彩贵州。

4 结论

本研究应用主成分分析法, 对湄潭 6 种类型茶园土壤养分特征及肥力质量进行了分析, 得到如下主要结论:

1) 湄潭茶园土壤 pH 为 3.73~7.26, 平均值为 5.01, pH 低于 4.5 的茶园占 16.67%, 有 61.11% 的茶园土壤达到优质茶园的标准, 湄潭茶园土壤 pH 整体适宜, 各类型茶园土壤 pH 均值均达到优质茶园的标准, 但部分茶园土壤有酸化趋势, 土壤 pH 存在空间差异; 其中, 丘陵石灰土、中山黄壤和中山石灰土茶园土壤酸化程度高于低山黄壤、低山石灰土和丘陵石灰土茶园。

2) 湄潭茶园土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量整体丰富, 平均值分别为 $5.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $22.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $124.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $44.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $135.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别有 61.11%、70.37%、61.11%、55.56% 和 59.26% 茶园达到优质茶园的标准, 但各养分指标存在着明显的空间差异。

3) 湄潭茶园 IFI 为 0.179~0.989, 平均值为 0.683, 大多数处于 I 和 II 级水平, 分别占 51.85% 和 31.48%, 土壤养分状况整体良好; 各类型茶园 IFI 之间存在明显的空间差异, 其由大到小分别为: 中山黄壤 > 丘陵黄壤 > 丘陵石灰土 > 低山黄壤 > 中山石灰土 > 低山石灰土。

4) pH 与有机质、全氮、有效磷之间呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关关系, 与碱解氮呈显著 ($P < 0.05$) 负相关; 各养分指标之间存在着显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 的正相关关系, 各养分之间关系比较密切且具有同源性。pH 与 IFI 呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关关系, 其他养分指标均与 IFI 呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系。

参考文献 References:

- [1] Qi L, Pan J H, Huan Z F, *et al.* Analysis and quality evaluation of soil nutrient status in tea garden of Rizhao City based on fuzzy evaluation method and entropy weight. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(6): 54–61.
齐丽, 潘继花, 邹志飞, 等. 基于熵权的模糊评价法对日照市茶园土壤养分分析与质量评价. *中国农学通报*, 2019, 35(6): 54–61.
- [2] Wen J L, Zhou Y Q, Yang D H, *et al.* Nutrient characteristics and assessment for the fertility quality of the tea plantation soils in Xinping County. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 33(5): 925–933.
温继良, 周元清, 杨东华, 等. 新平县茶园土壤养分特征及肥力质量评价. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2018, 33(5): 925–933.
- [3] Gao F F, Li J H, Zhou P, *et al.* Analysis on soil nutrients of tea gardens in Pu'er City of Yunnan Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(2): 398–402.
高菲菲, 李家华, 周平, 等. 云南省普洱市茶园土壤养分调查分析. *土壤通报*, 2013, 44(2): 398–402.
- [4] Zhou W, Wang W J, Zhang B, *et al.* Soil fertility evaluation for urban forests and green spaces in Changchun City. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(4): 1211–1220.
周伟, 王文杰, 张波, 等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价. *生态学报*, 2017, 37(4): 1211–1220.
- [5] Yang G R, Wang X Q, Xie J, *et al.* Analysis of the relationship between soil nutrients and tea main quality components of ancient tea arboretum and modern tea garden in Yunnan Province. *Journal of Tea Science*, 2015, 35(6): 574–582.
杨广荣, 王秀清, 谢瑾, 等. 云南古茶园和现代茶园土壤养分与茶叶品质成分关系的研究. *茶叶科学*, 2015, 35(6): 574–582.
- [6] Wu H Y, Jin R D, Fan Z W, *et al.* Assessment of fertility quality of black soil based on principal component and cluster analysis. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 325–334.
吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 325–334.
- [7] Yang Q H, An Y L. Comprehensive evaluation of soil fertility in yujiawu town of Tongzhou District using geostatistics and GIS. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(4): 882–891.
杨全合, 安永龙. 基于地统计学和 GIS 的通州区家务乡土壤肥力综合评价. *西南农业学报*, 2019, 32(4): 882–891.
- [8] Sun B, Zhou S L, Zhao Q G. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 2003, 115(1/2): 85–99.
- [9] Chen J, Zhao B Z, Zhang J B, *et al.* Application of principal component analysis in evaluation of soil quality under different long-term fertilization. *Soils*, 2010, 42(3): 415–420.
陈吉, 赵炳祥, 张家宝, 等. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用. *土壤*, 2010, 42(3): 415–420.
- [10] Wu Y H, Tian X H, Tong Y A, *et al.* Assessment of integrated soil fertility index based on principal components analysis. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 173–180.
吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 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.
- [11] Wu Y, Yang J H, Wei C F. Chongqing tea garden soil acidification and fertility character. *Chinese Journal of Soil Science*,

- 2004, 35(6): 715—719.
- 吴云, 杨剑虹, 魏朝富. 重庆茶园土壤酸化及肥力特征的研究. 土壤通报, 2004, 35(6): 715—719.
- [12] Zhou G L, Zhao H F, Wang X C, *et al.* Analysis on soil nutrients of tea gardens in Guizhou. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(8): 116—120.
- 周国兰, 赵华富, 王校常, 等. 贵州茶园土壤养分调查分析. 贵州农业科学, 2009, 37(8): 116—120.
- [13] Ren Y F, He J Y, Zhang Y C, *et al.* Soil nutrient status and comprehensive evaluation of quality of soil fertility of tea garden in Kaiyang of Guizhou Province. *Soils*, 2016, 48(4): 668—674.
- 任艳芳, 何俊瑜, 张艳超, 等. 贵州省开阳茶园土壤养分状况与肥力质量评价. 土壤, 2016, 48(4): 668—674.
- [14] Yang X Q. Soil fertility analysis of tea garden in Meitan County, Guizhou Province//*Proceedings of 2015 annual meeting of Chinese Society of Environmental Sciences*. Shenzhen: Chinese Society for Environmental Sciences, 2015: 1439—1444.
- 杨秀琴. 贵州省湄潭县茶园土壤肥力分析//2015年中国环境科学学会学术年会论文集. 深圳: 中国环境科学学会, 2015: 1439—1444.
- [15] Lü G, Zhao B, Zhao G X, *et al.* Physical and chemical traits and characteristics of soils in tea gardens in Meitan County of Guizhou Province. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44(9): 84—88.
- 吕刚, 赵宾, 赵国宣, 等. 贵州湄潭县茶园土壤的理化性状特征. 贵州农业科学, 2016, 44(9): 84—88.
- [16] Wang J Z, Huang D C, Zhang B C, *et al.* Research on nutrition and terahertz spectroscopy in two kinds of tea garden soil in Meitan of Guizhou. *Journal of Zunyi Normal College*, 2017, 19(3): 111—113.
- 王加真, 黄大灿, 张宝成, 等. 贵州湄潭两种茶园土壤养分状况及太赫兹光谱特征分析. 遵义师范学院学报, 2017, 19(3): 111—113.
- [17] Zhang X Q, Chen J, Gao X B, *et al.* Analysis on pH and major soil nutrients of tea gardens in key tea producing areas of Guizhou. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(1): 286—291.
- 张小琴, 陈娟, 高秀兵, 等. 贵州重点茶区茶园土壤 pH 值和主要养分分析. 西南农业学报, 2015, 28(1): 286—291.
- [18] Li Y, Liu Y L, Huang X C, *et al.* Assessing soil nutrient and microbial biomass in tea plantation regions of Guizhou Province. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(8): 98—105.
- 李渝, 刘彦伶, 黄兴成, 等. 贵州不同茶区土壤养分及微生物量分析评价. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 98—105.
- [19] Yang X, Le L. Study on regionalization of soil and water conservation at county level: A case study of Meitan County, Guizhou Province. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2018, 38(3): 37—41.
- 杨雪, 乐立. 县级水土保持区划研究—以贵州省湄潭县为例. 环境保护与循环经济, 2018, 38(3): 37—41.
- [20] Zhang D G, Xu J, Zhu P J, *et al.* Status quo and degeneration control measures of *Chimonobambusa angustifolia* in Meitan County, Guizhou Province. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(3): 27—33.
- 张道贵, 许俊, 祝平建, 等. 贵州省湄潭县狭叶方竹现状及退化防治对策. 农学通报, 2018, 8(3): 27—33.
- [21] Meitan County Comprehensive Agricultural Zoning Compilation Group. Meitan County comprehensive agricultural zoning. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1992: 44—60.
- 湄潭县综合农业区划编写组. 湄潭县综合农业区划. 贵阳: 贵州人民出版社, 1992: 44—60.
- [22] Forestry Department of Guizhou Province. Implementation rules of the fourth forest resources planning and design survey in Guizhou Province. Guiyang: Forestry Department of Guizhou Province, 2015.
- 贵州省林业厅. 贵州省第四次森林资源规划设计调查实施细则. 贵阳: 贵州省林业厅, 2015.
- [23] Bao S D. Analysis of soil agrochemical (The Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Lü X N, Lu Y F, Wang R C. Preliminary studies on the integrated evaluation of soil nutrient fertility. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 1999, 25(4): 378—382.
- 吕晓男, 陆允甫, 王人潮. 土壤肥力综合评价初步研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1999, 25(4): 378—382.
- [25] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Green food-environmental quality for production area (NY/T 391-2013). Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- 中华人民共和国农业部. 绿色食品产地环境技术条件(NY/T 391-2013). 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [26] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Environmental requirement for growing area of tea (NY/Y 853-2004). Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- 中华人民共和国农业部. 茶叶产地环境技术条件(NY/Y 853-2004). 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [27] Han W Y, Ruan J Y, Lin Z, *et al.* The major nutritional limiting factors in tea soils and development of tea speciality fertilizer series. *Journal of Tea Science*, 2002, 22(1): 65, 70—74.
- 韩文炎, 阮建云, 林智, 等. 茶园土壤主要营养障碍因子及系列茶树专用肥的研制. 茶叶科学, 2002, 22(1): 65, 70—74.
- [28] Fung K, Wong M. Effects of soil pH on the uptake of Al, F and other elements by tea plants. *Journal of the Science of Food*

- and Agriculture, 2002, 82(1): 146–152.
- [29] Zhang W, Chen H S, Wang K L, *et al.* The heterogeneity and its influencing factors of soil nutrients in peak-cluster depression areas of Karst Region. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(3): 322–329.
- [30] Yan M J, Lin Q, Wu Y Q, *et al.* Effects of different nitrogen fertilization treatments on soil condition of tea garden and tea quality. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 452–456.
颜明娟, 林琼, 吴一群, 等. 不同施氮措施对茶叶品质及茶园土壤环境的影响. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 452–456.
- [31] Liu M Y, Yi X Y, Shi Y Z, *et al.* Research progress of soil properties in tea gardens and the absorption and translocation mechanisms of nutrients and other elements in tea plant. *Journal of Tea Science*, 2015, 35(2): 110–120.
刘美雅, 伊晓云, 石元值, 等. 茶园土壤性状及茶树营养元素吸收、转运机制研究进展. *茶叶科学*, 2015, 35(2): 110–120.
- [32] Solomon D, Fritzsche F, Tekalign M, *et al.* Soil organic matter composition in the subhumid ethiopian highlands as influenced by deforestation and agricultural management. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(1): 68–82.
- [33] Fang S W, Yang M H, Zhao X M, *et al.* Spectral characteristics and quantitative estimation of som in red soil typical of Ji'an County, Jiangxi Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 1003–1010.
方少文, 杨梅花, 赵小敏, 等. 红壤区土壤有机质光谱特征与定量估算—以江西省吉安县为例. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1003–1010.
- [34] Wen Y C, Li Y Q, Yuan L, *et al.* Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 91–99.
温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 91–99.
- [35] Yan X, Zhang Y Z, Liu J, *et al.* Soil nutrient status and assessment for fertility quality of 5 tea bases of Dongting Lake region in Hunan Province. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2008, 34(5): 596–600.
颜雄, 张杨珠, 刘晶, 等. 洞庭湖区 5 个茶叶基地土壤的养分状况与肥力质量评价. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 34(5): 596–600.
- [36] Luo F, Zhang T, Gong X J, *et al.* Effects of different fertilization ways on the contents of N, P, K in new shoots and photo-biological characters of tea tree. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3499–3506.
罗凡, 张厅, 龚雪蛟, 等. 不同施肥方式对茶树新梢氮磷钾含量及光合生理的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3499–3506.
- [37] Su Y J, Liao W Y, Ding Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on yield and quality of tea. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 19(6): 1430–1436.
苏有健, 廖万有, 丁勇, 等. 不同氮营养水平对茶叶产量和品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 19(6): 1430–1436.
- [38] Xiang F, Li W, Liu H Y, *et al.* Characteristics of photosynthetic and chlorophyll fluorescence of tea varieties under different nitrogen application levels. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(6): 1138–1145.
向芬, 李维, 刘红艳, 等. 氮素水平对不同品种茶树光合及叶绿素荧光特性的影响. *西北植物学报*, 2018, 38(6): 1138–1145.
- [39] Zhuang W F. *Physiology of tea plant*. Beijing: China Agriculture Press, 1984: 156–158.
庄晚芳. *茶树生理*. 北京: 中国农业出版社, 1984: 156–158.
- [40] Zhong Q S, Lin Z H, Chen C S, *et al.* Effects of varied potassium supply on growth and antioxidant enzyme activities in leaves of tea seedlings. *Acta Tea Sinica*, 2018, 59(1): 12–18.
种秋生, 林郑和, 陈常颂, 等. 不同浓度钾对茶树幼苗生长及叶片活性氧代谢酶类的影响. *茶叶学报*, 2018, 59(1): 12–18.