

# 安溪铁观音茶园土壤养分状况与肥力评价

张 钊<sup>1,2</sup>, 金明康<sup>2,3</sup>, 黄鑫榕<sup>1,2</sup>, 杨乐阳<sup>2,3</sup>, 苏火贵<sup>4</sup>, 杨小茹<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 福建农林大学 生命科学学院, 福州 350002; 2. 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 福建省安溪土壤肥料技术推广站, 福建 安溪 362400)

**摘要:**【目的】茶叶产量和品质与茶园土壤养分状况及肥力质量密切相关。然而, 目前针对茶园肥力状况的调查评价依旧不足。【方法】本研究对福建省安溪县 13 个主要产茶乡镇共 38 个铁观音生产茶园进行土壤样品采集与理化指标检测, 并通过对土壤 pH 值以及关键营养元素分析, 建立土壤肥力综合指数 (IFI)。【结果】结果表明, 茶园土壤 pH 值平均值为 4.0, 有近 55% 样点茶园土壤酸化严重; 茶园土壤的有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾等指标相对优质标准较高; 综合各评价指标, 得到 IFI 值范围在 0.52~1.00, 平均值为 0.84, 有 84% 样点的茶园处于 I 级优质标准。【结论】安溪县铁观音茶园土壤大半已严重酸化, 但安溪茶园土壤整体养分状况优良, 茶园土壤肥力综合指数 IFI 较高, 表明安溪铁观音茶园土壤总体较健康。

**关键词:** 茶园土壤; 养分状况; 土壤肥力综合指数; 土壤肥料; 茶园管理

中图分类号: S158 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2023)04-0812-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022042607

张 钊, 金明康, 黄鑫榕, 杨乐阳, 苏火贵, 杨小茹. 安溪铁观音茶园土壤养分状况与肥力评价 [J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 812-821

ZHANG Zhao, JIN Ming-kang, HUANG Xin-rong, YANG Le-yang, SU Huo-gui, YANG Xiao-ru. Soil Nutrient Status and Comprehensive Evaluation of Soil Fertility Quality of Tea Garden in Anxi[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 812-821

【研究意义】中国是茶叶的发源地, 茶叶中因富含对人体健康有益的物质而备受欢迎<sup>[1]</sup>。铁观音是中国十大名茶之一, 安溪县作为铁观音茶叶主要生产区<sup>[2]</sup>, 安溪铁观音中国特色农产品优势区也被认定为第三批中国特色农产品优势区。【前人研究进展】随着生活水平日益提高, 人们对茶叶品质要求也越来越高。茶园土壤肥力优良与否是影响茶叶品质好坏的关键因素<sup>[3]</sup>, 施肥方式影响茶园土壤地力。近几十年来, 安溪铁观音茶园经历了长期单一种植和不合理施肥, 土壤酸化、重金属与潜在风险元素污染、养分不平衡等问题接踵而至, 这不仅影响了茶园土壤健康, 更影响了茶叶品质, 导致经济效益下滑, 严重可能危害人体健康<sup>[4]</sup>。然而, 目前对安溪县茶园土壤调查局限在某一养分是否丰缺, 对综合肥力因子的茶园土壤综合评价较少<sup>[5]</sup>, 导致对安溪县茶园土壤认识不足。

【本研究切入点】健康土壤生态产品助力乡村振兴, 目前土壤健康面临污染加剧的风险, 化肥、

农药过度施用造成土壤污染、酸化、退化严重<sup>[6]</sup>, 低耕地质量与全球气候变化导致土壤变质、有机质含量下降<sup>[6-9]</sup>。有机肥因为能改善土壤的板结性状, 提高土壤有机质含量<sup>[5]</sup>, 长期施用对土壤和茶叶质量都有好处而受到大力推广<sup>[7-9]</sup>。安溪县域内各茶园积极响应国家政策, 施用有机肥替代无机化肥, 但茶园施用有机肥料后其土壤养分状况是否改善尚未明确, 土壤肥力质量也无法据此得知。【拟解决的问题】因此, 我们对安溪县铁观音主要产区的茶园土壤进行了采集与分析, 以期全面了解当前茶园土壤养分状况及肥力水平, 旨在为铁观音茶园土壤养分管理和肥力提升提供更加科学的指导, 保障茶叶的营养健康, 助力乡村振兴, 促进共同富裕。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品采集

安溪县 (24°50'~25°26' N, 117°36'~118°17' E) 是福建省泉州市辖县, 共有 15 个镇、9 个乡, 由于地

收稿日期: 2022-05-03; 修订日期: 2022-08-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (4197201, 42021005)、"一带一路"国际科学组织联盟资助 (ANSO-PA-2020-18) 和安溪县农业农村局技术开发委托项目资助

作者简介: 张 钊 (1998-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要方向为生态学。E-mail: zzhang@iue.ac.cn

\*通讯作者: E-mail: xryang@iue.ac.cn

形地貌的差异,东部外和西部内安溪有着明显不同的气候特点,东部外安溪属南亚热带,农作物一年三熟;西部内安溪四季较分明,农作物一般一年两熟。

土壤样品采集自安溪县铁观音茶园(如图1),分布在感德镇、虎邱镇、龙涓乡等共13个乡镇,共38个茶园土壤采样点。所有样点均采用棋盘式的采样方法,采集耕层(0~20 cm)的土壤样品,每个采样点采集16份土样,用四分法最终混合成4份平行样。土壤样品采集时间为2020年9月下旬至10月初。采集好的土壤经自然风干、研磨后,分别过10目、100目、200目筛,用于测定不同理化指标。

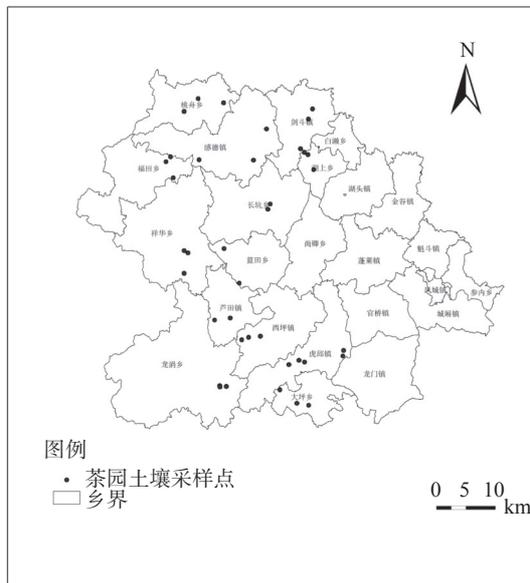


图1 铁观音茶园土壤采样地点图

Fig.1 Soil sampling sites of Tieguanyin tea garden

## 1.2 土壤肥力相关理化指标的测定

本实验测定了茶园土壤的酸碱度(pH)、有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)。

土壤pH值测定采用电位测定法,称取4g过筛后(10目)的土壤与10mL无菌水混合成土壤悬液,振荡2h后静置,使用pH计(IS126C Icon, 上海仪迈仪器科技有限公司)读取pH值。

土壤全磷、全钾含量测定使用X射线荧光光谱仪(Axios-MAX, 荷兰帕纳科公司),取4g过200目筛孔的土壤制成压片,进行元素的分析;土壤全氮含量测定使用CNS元素分析仪(Vario MAX, Elementar Analysensysteme GmbH),取200mg过200目筛孔的土壤在机器上测定。

土壤有机质含量测定参照农业部发布的《中华人民共和国农业行业标准》土壤检测第6部分(NY/T 1121.6—2006),采用重铬酸钾容量法进行测定;土壤有效磷含量测定参照土壤检测第7部分(NY/T 1121.7—2014),采用紫外/可见分光光度计法进行测定。土壤速效钾含量测定参照《中华人民共和国国家标准》森林土壤速效钾的测定(GB 7856—87),采用1 mol L<sup>-1</sup>乙酸铵浸提—火焰光度法进行测定;土壤碱解氮含量测定参照《中华人民共和国林业行业标准》森林土壤水解性氮的测定(LY/T 1229—1999),采用碱解-扩散法进行测定。以上土壤样品均过100目筛孔。

## 1.3 茶园土壤养分评价标准

土壤养分状况评价标准参照《中华人民共和国农业行业标准》茶叶产地环境技术条件(Y/T 853—2004)中茶园土壤肥力分级标准和国家绿色食品产地环境质量标准(NY/T 391—2013),将茶园土壤养分分为I、II、III 3个等级,茶园土壤养分含量分级标准如表1:

表1 茶园土壤养分分级标准

Table 1 Classification standard of soil nutrients in tea garden

采样点 Sampling point	I	II	III
pH	4.5 ~ 5.5	4.0 ~ 4.5或5.5 ~ 6.5	< 4.0或> 6.5
有机质 (g kg <sup>-1</sup> )	> 15	10 ~ 15	< 10
全氮 (g kg <sup>-1</sup> )	> 1.0	0.8 ~ 1.0	< 0.8
全磷 (g kg <sup>-1</sup> )	> 0.6	0.4 ~ 0.6	< 0.4
全钾 (g kg <sup>-1</sup> )	> 10	5 ~ 10	< 5
碱解氮 (mg kg <sup>-1</sup> )	> 100	50 ~ 100	< 50
有效磷 (mg kg <sup>-1</sup> )	> 10	5 ~ 10	< 5
速效钾 (mg kg <sup>-1</sup> )	> 120	80 ~ 120	< 80

## 1.4 土壤肥力综合指数计算

1.4.1 土壤单项肥力指标隶属度的确定 本研究选取pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾共8个指标确定安溪县土壤肥力综合指标值。常用的隶属度函数有S型和抛物线型两种<sup>[10-13]</sup>,其中,pH属于抛物线型隶属函数,其余都属于S型隶属函数。函数表达式如下:

抛物线型隶属函数:

$$A_i = f(x) = \begin{cases} 1.0 - \frac{0.9(x-x_3)}{x_4-x_3} & x_3 < x < x_4 \\ 1.0 & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0.1 + \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1} & x_1 < x < x_2 \\ 0.1 & x \geq x_4 \text{ 或 } x \leq x_1 \end{cases} \quad (1)$$

S 型隶属函数:

$$A_i = f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_2 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $A_i$  为评价因子  $i$  的隶属值,  $x$  为实测值, 隶属值大小为 0.1 ~ 1.0。各肥力指标的隶属度函数曲线转折点如表 2:

表 2 各肥力指标的隶属度函数曲线转折点的取值  
Table 2 Value of turning point of membership function curve of each fertility index

转折点取值 Value of turning point	pH	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK
$x_1$	4.0	10	0.8	0.4	5	50	5	80
$x_2$	4.5	15	1.0	0.6	10	100	10	120
$x_3$	5.5	-	-	-	-	-	-	-
$x_4$	6.5	-	-	-	-	-	-	-

1.4.2 土壤单项肥力指标权重系数的确定 采用主成分分析法, 选取累计百分率大于 80% 的主成分来确定土壤肥力因子的权重值<sup>[10-13]</sup>, 计算公式如下:

$$B_i = \frac{r_{i均}}{\sum r_{均}} \quad (3)$$

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,  $\sum r_{均}$  表示所有因子相关系数平均值和。

1.4.3 土壤肥力综合指数 IFI 的计算 土壤肥力综合指数 IFI 的计算公式如下:

$$IFI = \sum_{i=1}^n B_i \times A_i \quad (4)$$

式中:  $n$  为评价指标数量,  $B_i$  和  $A_i$  分别为第  $i$  个评价指标的权重系数和隶属值。将土壤肥力综合指数 IFI 进行等级划分<sup>[10-13]</sup>, 如表 3:

表 3 土壤肥力综合指数划分表  
Table 3 Division of comprehensive index of soil fertility

等级 Level	I	II	III	IV
土壤肥力综合指数IFI	$IFI \geq 0.75$	$0.50 \leq IFI < 0.75$	$0.25 \leq IFI < 0.50$	$IFI < 0.25$

## 1.5 数据分析

采用 Excel 2019 进行土壤养分含量数据处理并求算平均数、变异系数及肥力综合指数, 使用 MATLAB 2014 计算土壤单项肥力指标隶属度, 使用 IBM SPSS 22.0 进行主成分分析确定权重系数, 使用 Arcmap10.7 绘制养分含量点状图与柱状图等。

## 2 结果与分析

### 2.1 茶园土壤养分状况

2.1.1 茶园土壤 pH 值 安溪各乡镇铁观音茶园土壤 pH 值在 3.3 ~ 5.3 之间, 平均值为 4.0, 变异系数为 12.09%, 属于低变异, 空间差异性较小, 说明茶园土壤普遍酸化。如图 2-1 所示, 共 7 个样点的茶园土壤酸碱度达到 I 级标准, 占总茶园样点数的 19%; 10 个样点的茶园土壤酸碱度达到 II 级标准, 占总茶园样点数的 26%; 21 个样点的茶园土壤酸碱度处于 III 级标准, 占总茶园样点数的 55%, 茶园土壤酸化较为严重。

2.1.2 茶园土壤有机质含量 安溪各乡镇铁观音茶

园土壤有机质含量在 20 ~ 59 g kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 35 g kg<sup>-1</sup>, 变异系数为 26.36%, 属于中等变异。如图 2-2 所示, 所有茶园有机质含量都达到了 I 级优质茶园标准, 茶园土壤的有机质含量丰富。

2.1.3 茶园土壤氮素含量 安溪各乡镇铁观音茶园土壤全氮含量在 0.6 ~ 2.1 g kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 1.5 g kg<sup>-1</sup>, 变异系数为 26.07%, 属于中等变异。如图 2-3 所示, 共 31 个样点的茶园土壤达到 I 级标准, 占总茶园样点数的 81%; 6 个样点的茶园土壤达到 II 级标准, 占总茶园样点数的 16%; 1 个样点的茶园土壤达到 III 级标准, 占总茶园样点数的 3%。

安溪各乡镇铁观音茶园土壤碱解氮含量在 44 ~ 288 mg kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 162 mg kg<sup>-1</sup>, 变异系数为 38.49%, 属于中等变异。如图 2-4 所示, 共有 30 个样点的茶园土壤达到 I 级标准, 占总茶园样点数的 79%; 7 个样点的茶园土壤达到 II 级标准, 占总茶园样点数的 18%; 1 个样点的茶园土壤达到 III 级标准, 占总茶园数的 3%。

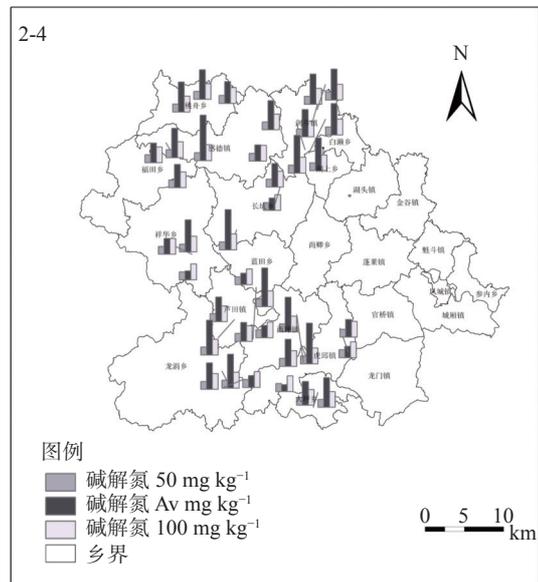
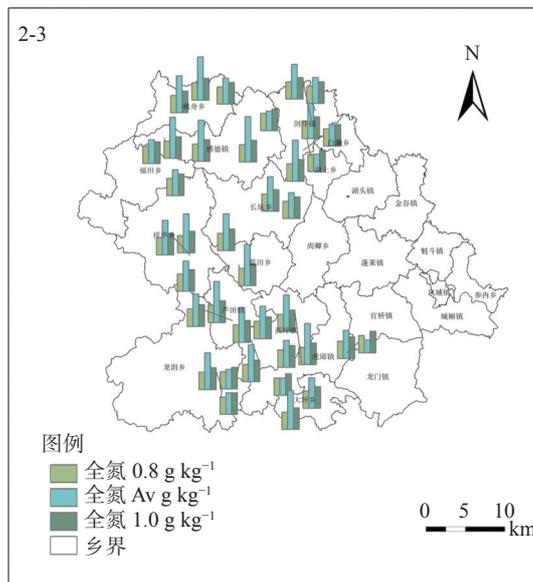
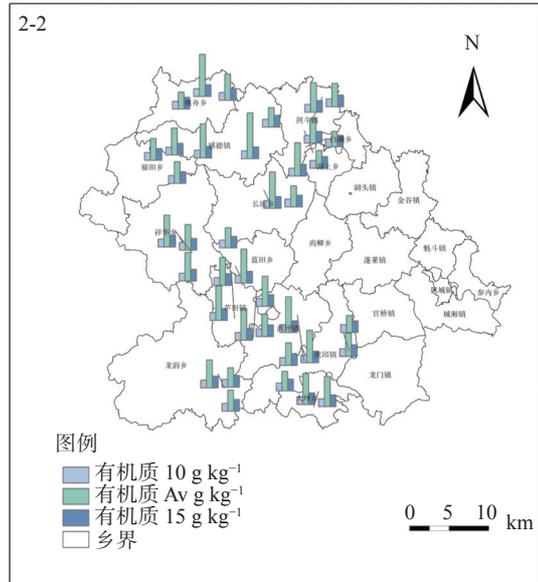
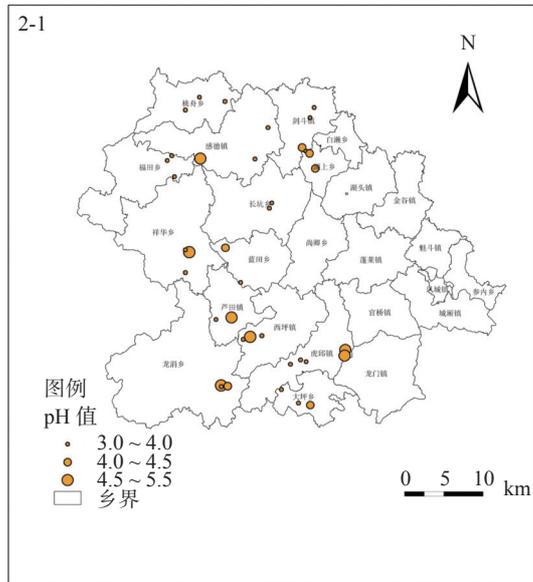
2.1.4 茶园土壤磷素含量 安溪各乡镇铁观音茶园

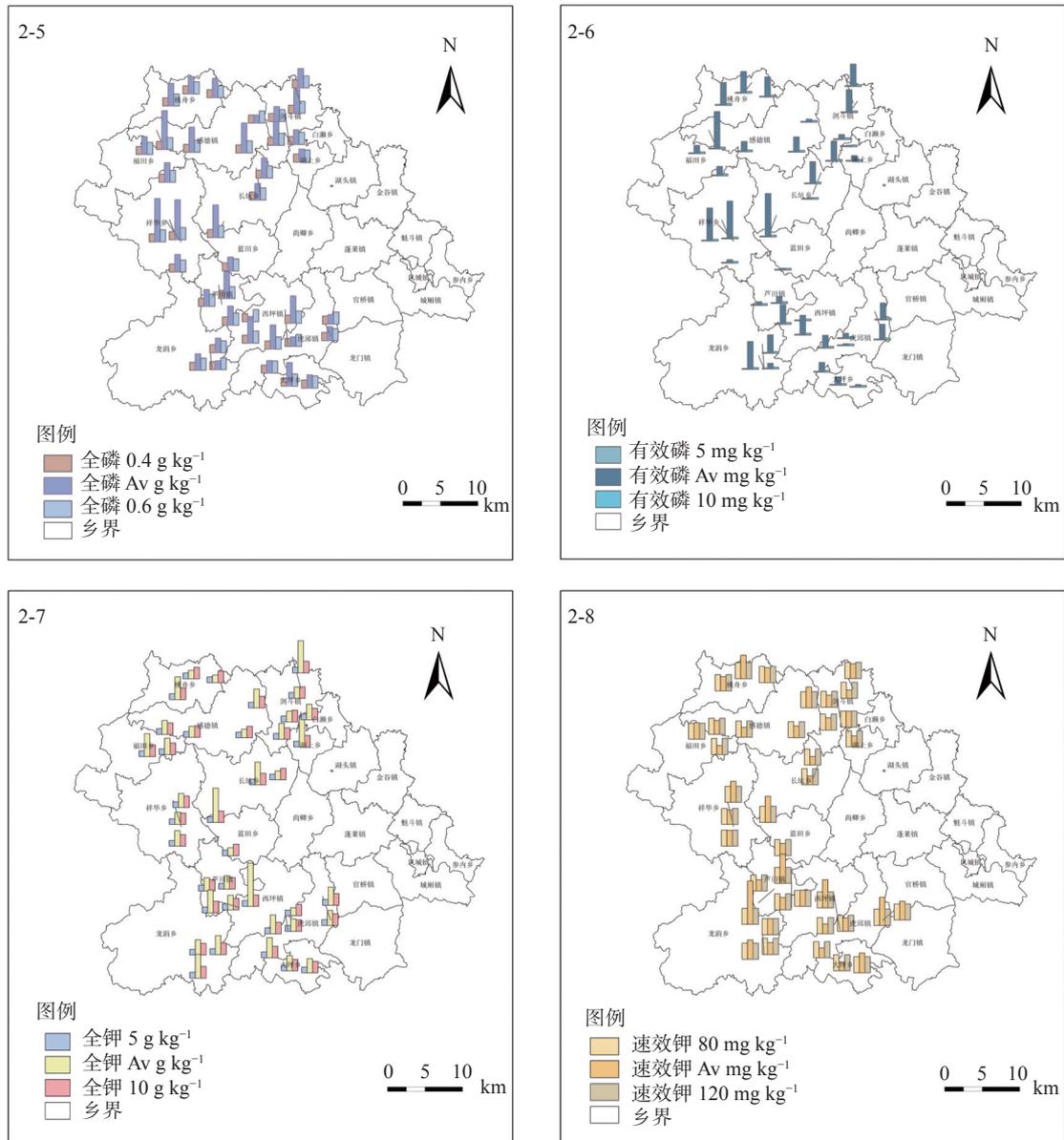
土壤全磷含量在  $0.3 \sim 2.2 \text{ g kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $1.0 \text{ g kg}^{-1}$ , 变异系数为 43.71%, 属于中等变异。如图 2-5 所示, 共 31 个样点的茶园土壤达到 I 级标准, 占总茶园样点数的 81%; 6 个样点的茶园土壤达到 II 级标准, 占总茶园样点数的 16%; 1 个样点的茶园土壤为 III 级标准, 占总茶园样点数的 3%。

安溪各乡镇铁观音茶园土壤有效磷含量在  $7 \sim 254 \text{ mg kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $84 \text{ mg kg}^{-1}$ , 远高于  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ , 变异系数为 78.84%, 属于强变异, 说明有效磷含量分布空间差异大。如图 2-6 所示, 共 34 个样点的茶园土壤达到 I 级标准, 占总茶园数的 89%; 4 个样点的茶园土壤达到 II 级标准, 占总茶园数的 11%。

安溪各乡镇铁观音茶园土壤全钾含量在  $7 \sim 37 \text{ g kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $15 \text{ g kg}^{-1}$ , 变异系数为 45.52%, 属于中等变异。如图 2-7, 共 29 个样点的茶园土壤达到 I 级标准, 占总茶园样点数的 76%; 9 个样点的茶园土壤达到 II 级标准, 占总茶园样点数的 24%。

安溪各乡镇铁观音茶园土壤有效钾含量在  $64 \sim 336 \text{ mg kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $125 \text{ mg kg}^{-1}$ , 变异系数为 45.71%, 属于中等变异。如图 2-8, 有 16 个样点的茶园土壤达到 I 级标准, 占总茶园样点数的 42%; 有 14 个样点的茶园土壤达到 II 级标准, 占总茶园样点数的 37%; 8 个样点的茶园土壤达到 III 级标准, 占总茶园样点数的 21%。





注:茶园土壤养分状况含量图分为点状图与柱状图。点状图用大、中、小三个点表示,分别代表 I 级、II 级、III 级标准,柱状图用三条柱体表示,其中中间柱体代表测量平均值,用 Av 表示,两边柱体为固定值,代表了分级标准中的两个临界值。如果中间柱体高于右边柱体,代表该处土壤处于 I 级标准,低于左侧则代表该处土壤处于 III 级标准,处于两侧之间则代表该处土壤处于 II 级标准。

图 2 茶园土壤养分状况含量图

Fig.2 Content map of soil nutrients in tea garden

### 2.1.5 茶园土壤钾素含量

## 2.2 茶园土壤肥力综合评价

**2.2.1 单项土壤肥力指标的隶属度与权重系数** 根据 1.4.1 公式 (1) (2), 计算各指标的隶属度, 如表 4:

采用主成分分析计算相关矩阵, 如表 5, pH 与 AK 呈显著正相关, 证明 pH 提高可以使有效钾含量显著升高, 即需要适宜 pH 来提高钾素利用率, TK 与 OM 呈显著负相关, 缺钾是限制有机质提升的重要原因。TP 与 AP 间显著正相关, 说明铁观音茶树

对磷肥的吸收较好, OM 与 TN、TP 呈显著正相关且 TN 与 TP 显著正相关, 表明土壤有机质含量提升有助于提高土壤养分库容, 土壤各养分间关系密切。

采用主成分分析法选取累计百分率大于 80% 的主成分 (表 6) 来确定肥力因子的权重系数 (表 7)。

如表 6, 选取累计百分率大于 80% 的前 4 个主成分, 如表 7, 各养分权重系数中, 全氮, 全磷、有效磷占权重相对较高, 说明磷素与氮素含量及利用率均较高, 而 pH 与全钾权重较低, 即对最终肥力贡

表 4 安溪茶园土壤肥力指标的隶属度  
Table 4 Membership degree of soil fertility index in Anxi tea garden

乡镇 Township	村落/地点 Point	pH	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK
桃舟乡	吾培村	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.775
	产业园	0.1	1.0	1.0	1.0	0.46	1.0	1.0	1.0
	莲山村	0.1	1.0	1.0	1.0	0.46	1.0	1.0	0.91
福田乡	双按村	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1
	尾洋村	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	丰都村	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.73
祥华乡	新寨村1	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.208	1.0	1.0
	新寨村2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.982	1.0	1.0
	新寨村3	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.865
龙涓乡	内灶大桥头	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.532	1.0	1.0
	楼梯坡	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	水云波	0.28	1.0	0.55	0.1	1.0	1.0	1.0	0.37
感德镇	槐植村	0.1	1.0	1.0	1.0	0.46	1.0	1.0	0.3475
	福德村	1.0	1.0	1.0	1.0	0.82	1.0	1.0	0.1
	霞云村	0.1	1.0	0.55	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0
长坑乡	南斗村1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.64	1.0	1.0	0.1
	南斗村2	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.604	0.82	0.1
蓝田乡	后清村1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.46	0.496	1.0	0.4375
	后清村2	0.28	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
芦田镇	芦田村1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	芦田村2	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2575
剑斗镇	御屏村	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8425
	古石庵	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1
	柿树仔	0.64	1.0	1.0	1.0	0.82	1.0	1.0	0.3925
湖上乡	湖上乡1	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4825
	湖上乡2	0.82	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.46	1.0
	湖上乡3	0.28	1.0	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.19
西坪镇	盖竹村	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	朱杨村	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4375
	宝山村	0.1	1.0	1.0	0.1	1.0	0.604	0.82	1.0
大坪乡	萍州村	0.46	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	福美村	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1
	双美村	0.1	1.0	0.1	1.0	1.0	0.1	1.0	0.1
虎邱镇	双格村	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1
	林东村	0.1	1.0	1.0	1.0	0.46	1.0	1.0	1.0
	高村村	0.1	1.0	1.0	0.55	1.0	1.0	1.0	0.64
	不同山1	1.0	1.0	0.1	0.55	1.0	1.0	1.0	1.0
	不同山2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.496	1.0	1.0

献较低,说明酸化与钾素流失较为严重。权重系数结果表明,影响土壤最终肥力的因素主要为氮肥与磷肥的施用。

**2.2.2 茶园土壤肥力综合评价** 根据 1.4 计算安溪各乡镇铁观音茶园土壤肥力综合指数 IFI (表 8), IFI 值在 0.52 ~ 1.00 之间,平均值为 0.84,符合 I 级优质茶园标准,变异系数为 13.33%,属于弱变异,说明各茶园土壤肥力普遍较优良。其中有 32 个茶园土壤达到 I 级标准,6 个样点土壤达到 II 级标准,优

良率达 100%,安溪铁观音茶园土壤适宜种植铁观音茶树。

使用克里金插值法,预测安溪县域内铁观音茶园土壤肥力综合指数 IFI 值空间分布。如图 3,采样区域乡镇茶园土壤 IFI 值较高,土壤肥力较高;西部内安溪区域土壤肥力相对东部外安溪区域土壤肥力更高,且安溪西部边界处土壤更肥沃。内安溪是铁观音茶叶的主产区,因其独特的气候特点,铁观音茶叶品质也相对更好,土壤肥力综合指数 IFI 值空间

表 5 安溪茶园土壤肥力指标间相关矩阵  
Table 5 Correlation matrix between soil fertility indices of Anxi tea garden

指标 Index	pH	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK
pH	1.000	-0.088	-0.162	0.069	0.011	0.089	0.065	0.373*
有机质	-0.088	1.000	0.779**	0.322*	-0.477**	0.019	-0.050	0.049
全氮	-0.162	0.779**	1.000	0.499**	-0.309	0.272	0.213	0.063
全磷	0.069	0.322*	0.499**	1.000	-0.241	0.224	0.689**	0.150
全钾	0.011	-0.477**	-0.309	-0.241	1.000	0.045	0.030	0.046
碱解氮	-0.089	0.019	0.272	0.224	-0.045	1.000	0.145	0.204
速效磷	0.065	-0.050	0.213	0.689**	0.030	0.145	1.000	0.119
速效钾	0.373*	0.049	0.063	0.150	0.046	0.204	0.119	1.000

注：“\*\*”表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )，“\*”表示显著相关 ( $P < 0.05$ )。

表 6 各肥力指标主成分总方差解释  
Table 6 Explanation of total variance of principal components of each fertility index

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract sum of squares of load		
	总计Total	方差百分比 Variance percentage	累积(%) Cumulative percentage	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积(%) Cumulative percentage
1	2.564	32.055	32.055	2.564	32.055	32.055
2	1.628	20.353	52.408	1.628	20.353	52.408
3	1.219	15.240	67.648	1.219	15.240	67.648
4	1.014	12.678	80.326	1.014	12.678	80.326
5	0.715	8.943	89.269			
6	0.503	6.290	95.559			
7	0.222	2.776	98.335			
8	0.133	1.665	100.000			

表 7 土壤各养分指标权重系数  
Table 7 Weight coefficients of soil nutrient indexes

指标 Index	pH	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK
权重系数	0.085	0.113	0.171	0.197	0.001	0.126	0.161	0.146

分布图也证实了这点。

### 3 讨论

#### 3.1 茶园土壤养分状况与肥料选择

茶树适宜生长于在酸性土壤环境中，但长期茶树种植会使茶园土壤酸化严重<sup>[14]</sup>。一般来说，适宜茶树生长 pH 值为 4.5 ~ 5.5，在过去几十年间，茶园土壤酸化程度远大于种植水果、蔬菜和谷物土壤<sup>[14]</sup>。从近些年研究结果上看<sup>[3,15-18]</sup>，茶园土壤 pH 一直显强酸性 (pH < 4.5)，明显低于周边土壤，并且呈现出随时间递减的趋势。强酸性土壤占比 (尤其 pH < 4.0 的茶园土壤) 越来越高，茶园土壤过酸已经是一个普遍性问题。

造成这种现象的可能原因之一是土壤的自然酸化，即内源酸化因子，铁观音茶树自身物质循环与根系分泌物在土壤中的运动导致了茶园土壤的自然酸化<sup>[17]</sup>。另一个重要原因，即外源酸化因子，是无机

氮肥的过度使用<sup>[19]</sup>。茶树是喜铵植物，茶树生长幼芽需要更多的氮，茶园中经常施用氮肥来提高铁观音茶叶的产量与品质<sup>[20]</sup>，而铵态氮肥增加了氮的淋失率，导致了土壤酸化。因此，长期的单一茶树种植和不合理施肥可能是造成茶园土壤酸化严重的重要原因。

从养分含量结果中可以看到，所有铁观音茶园土壤有机质含量均处于最适宜水平，与前人测量结果相比较<sup>[3-6,15-17,21]</sup>，养分状况也有了较明显提升，但也不能忽略 pH 过低的问题，土壤长期过酸对铁观音茶园土壤、茶树状况及茶叶品质都会产生反作用。施肥是茶叶采前处理的重要手段，但是单一的施肥不一定可以按比例提高茶叶的产量与质量，反而可能加剧如土壤酸化、养分淋失等问题，肥料的选择至关重要。

近年来茶树种植者们响应国家号召，使用有机肥替代无机肥，取得了较好的成效，土壤有机质含量大幅提升<sup>[7-9]</sup>，安溪铁观音茶园土壤养分状况得

表 8 铁观音茶园土壤肥力综合指数 IFI  
Table 8 Comprehensive index of soil fertility IFI of Tieguanyin tea garden

乡镇 Township	村落/地点 Point	IFI	乡镇 Township	村落/地点 Point	IFI
桃舟乡	吾培村	0.89	芦田镇	芦田村1	1.00
	产业园	0.92		芦田村2	0.81
	福田乡	莲山村	0.91	剑斗镇	御屏村
双按村		0.79	古石庵		0.79
祥华乡		尾洋村	0.92	湖上乡	柿树仔
	丰都村	0.88	湖上乡1		0.85
	新寨村1	0.82	湖上乡2		0.90
新寨村2		1.00	湖上乡3	0.67	
新寨村3		0.90	西坪镇	盖竹村	1.00
龙涓乡	内灶大桥头	0.94		朱杨村	0.84
	楼梯垵	0.92		宝山村	0.67
	水云波	0.59	大坪乡	萍州村	0.95
感德镇	槐植村	0.83		福美村	0.79
	福德村	0.87		双美村	0.52
	霞云村	0.67	虎邱镇	双格村	0.79
长坑乡	南斗村1	0.79		林东村	0.92
	南斗村2	0.71		高村村	0.78
蓝田乡	后清村1	0.78	不同山1	0.76	
	后清村2	0.94	不同山2	0.94	

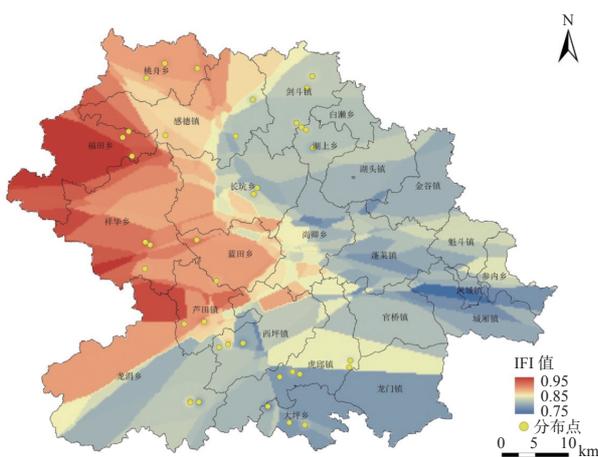


图 3 茶园土壤肥力综合指数 IFI 值空间分布图

Fig.3 Spatial distribution map of IFI value of comprehensive index of soil fertility in the tea gardens

到了一定的改善,事实证明有机肥适合长期施用。研究发现,生态友好型肥料或土壤改良剂对茶园土壤改善具有较大潜力。例如,施用腐殖基质可以提高养分的有效性<sup>[22]</sup>,施用饼肥是既可以保持土壤肥力,又可以减少农业上面源污染<sup>[19]</sup>。复合肥与尿素按比例调和施用不仅能提高茶叶浸出物与茶汤浓度,也能改善土壤环境<sup>[23]</sup>。生物炭作为一种土壤改良剂,可以提高有效氮磷钾含量与 pH 值,提高茶叶叶面积和光合作用效率,促进植物的生长<sup>[23-25]</sup>。生物炭与肥料相结合,即生物炭基肥料,可以改善低养分酸性土壤<sup>[26]</sup>。土壤改良剂与菌剂联合使用比单独使用更能抑制土壤酸化<sup>[27]</sup>,将蜡样芽胞杆菌这类根际促生菌接种到制

备的生物炭中,可以得到高效的生物肥料<sup>[28]</sup>。

目前,还需长期的田间试验、国家的补贴政策等,研究出更高效有益的肥料来改善土壤品质,实现茶叶品质与经济共增,助力乡村振兴,实现“三农梦”。

### 3.2 茶园土壤肥力状况与茶园管理

土壤肥力综合评价可以去除主观因素影响,体现土壤肥力综合水平。安溪县茶园土壤肥力综合评价结果表明,铁观音茶园土壤总体处于优良状态。整体来说,安溪茶园土壤肥力有了较高提升<sup>[3,6,16]</sup>。

监测茶园土壤肥力状况并提出适宜改良方案可以促进绿色茶园的发展。因此,我们要注重养分管理<sup>[29]</sup>,改善施肥方式,改善土壤养分循环,保持土壤的结构与肥力<sup>[30]</sup>,综合养分管理是一种强有力的策略<sup>[31]</sup>。通过建立养分专家系统(Nutrient Expert system, NE),既能减少化肥使用量,提高其利用率,又能降低温室气体排放,降低环境风险。对于已经不适宜种植的地区,实施“退茶还林”,转向原生态。密集耕作会导致养分大量流失,疏植会减少这种流失<sup>[32]</sup>。温室条件下修剪枯枝落叶回放到茶园土壤上,能提高生物量,提高茶树的株高<sup>[22]</sup>。在茶树间作或套种大豆、花生等绿肥有利于提高 pH、有机质、有效碳氮磷钾、土壤酶活性与资源利用率<sup>[33]</sup>。通过疏植留高、茶草共生、茶林混合等方式进行合理有效的生态茶园管理<sup>[34]</sup>,可以促进铁观音茶园生态系

统可持续发展, 管理后的茶园也会具有一定的观赏价值, 未来或可实现茶园“公园化”。

## 4 结论

安溪县 13 个乡镇 38 个铁观音茶园土壤 pH 为 3.3 ~ 5.5, 超过半数铁观音茶园的土壤已酸化严重; 茶园土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾整体含量丰富, 平均值均达到 I 级优质标准, 各个养分指标含量存在着一定的空间差异; 绝大多数茶园土壤肥力综合指数 IFI 值达到了 I 级标准, 安溪茶园土壤总体适宜种植铁观音茶树。

### 参考文献:

- [ 1 ] Karak T, Bhanat R M. Trace elements in tea leaves, made tea and tea infusion: A review[J]. *Food Research International*, 2010, 43(9): 2234 ~ 2252.
- [ 2 ] 黄华斌, 林承奇, 于瑞莲, 等. 安溪铁观音茶园土壤重金属分布及污染评价[J]. *环境化学*, 2018, 37(5): 994 - 1001.
- [ 3 ] 杨如兴, 张 磊, 王文建, 等. 安溪铁观音茶园土壤肥力分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(21): 160 - 166.
- [ 4 ] 张阿惠. 茶园土壤肥力综合评价及其绿色可持续发展思考[J]. *低碳世界*, 2021, 11(1): 213 - 215.
- [ 5 ] 叶伟娇. 安溪茶园质量等级评价指标体系构建研究[D]. 福建农林大学, 2020.
- [ 6 ] 李 娟, 章明清, 尤志明, 章赞德, 姚建族, 苏火贵, 刘辽源. 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(01): 19 - 25.
- [ 7 ] 耿赛攀, 马立锋, 杨向德, 等. 有机肥替代化肥对茶园土壤质量及新梢养分吸收的影响[J]. *中国茶叶*, 2021, 43(5): 52 - 57.
- [ 8 ] 郭 龙, 李 陈, 刘佩诗, 等. 牛粪有机肥替代化肥对茶叶产量、品质及茶园土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 264 - 269.
- [ 9 ] 龚雪蛟, 秦 琳, 刘 飞, 等. 有机类肥料对土壤养分含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1403 - 1416.
- [ 10 ] 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[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 668 - 674.
- [ 11 ] 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[J]. *草业学报*, 2020, 29(11): 33 - 45.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 王育军, 周冀衡, 孙书斌, 等. 云南省罗平县烟区土壤肥力适宜性评价及养分时空变异特征[J]. *土壤*, 2015, 47(3): 515 - 523.
- [ 14 ] Yan P, Wu L Q, Wang D H, et al. Soil acidification in Chinese tea plantations[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 715: e136963.
- [ 15 ] 张炳铃. 安溪县茶园土壤养分特性评价[J]. *福建农业科技*, 2012, (7): 40 - 42.
- [ 16 ] 苏火贵. 安溪县茶园肥力状况与合理利用研究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(28): 132 - 135.
- [ 17 ] 穆 聪, 黄梓臻, 苏 达, 等. 铁观音茶园土壤酸化与交换性镁的现状[J]. *中国土壤与肥料*, 2021, (2): 39 - 43.
- [ 18 ] 林 诚, 陈子聪, 吴一群, 等. 林地转变为茶园的土壤pH及养分变化特征[J]. *茶叶科学*, 2020, 40(2): 186 - 193.
- [ 19 ] 王海斌, 陈晓婷, 丁 力, 等. 福建省安溪县茶园土壤酸化对茶树产量及品质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(6): 1398 - 1403.
- [ 20 ] Xie S W, Yang F, Feng H X, et al. Organic fertilizer reduced carbon and nitrogen in runoff and buffered soil acidification in tea plantations: Evidence in nutrient contents and isotope fractionations[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 762: e143059.
- [ 21 ] 吴志丹, 江福英, 张 磊, 等. 福建省安溪县铁观音茶园土壤氮素状况[J]. *土壤*, 2020, 52(1): 16 - 24.
- [ 22 ] Pramanik P, Safique S, Jahan A. Humic substrates facilitated nitrogen uptake in tea bushes by influencing biochemical and microbiological properties in soil of Northeast India[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(18): 2376 - 2385.
- [ 23 ] Gao S L, Hu S S, He P, et al. Effects of reducing chemical fertilizer on the quality components of Tieguanyin tea leaves[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, 559: e012020.
- [ 24 ] Wang Z T, Geng Y B, Liang T. Optimization of reduced chemical fertilizer use in tea gardens based on the assessment of related environmental and economic benefits[J]. *Science of The Total Environment*, 713: e136439. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136439.
- [ 25 ] Yan P, Shen C, Zou Z H, et al. Biochar stimulates tea growth by improving nutrients in acidic soil[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 283: e110078.
- [ 26 ] 金桂梅, 李昱航, 郑向群, 等. 不同土壤管理与施肥模式对茶园土壤环境及茶叶产量的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(1): 152 - 158.
- [ 27 ] Wang L, Butterfly C R, Chen Q H, et al. Surface Amendments Can Ameliorate Subsoil Acidity in Tea Garden Soils of High ~ Rainfall Environments[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 180 - 191.
- [ 28 ] Azeem M, Hassan T U, Tahir M I, et al. Tea leaves biochar as a carrier of *Bacillus cereus* improves the soil function and crop productivity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 157: e103732.
- [ 29 ] 刘 扬, 孙丽莉, 廖 红. 养分管理对安溪茶园土壤肥力及茶叶品质的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 917 - 927.
- [ 30 ] He S Q, Zheng Z C, Zhu R H. Long ~ term tea plantation effects on composition and stabilization of soil organic matter in Southwest China[J]. *Catena*, 2021: 199.
- [ 31 ] Tang S, Zheng N, Ma Q X, et al. Applying Nutrient Expert system for rational fertilisation to tea (*Camellia sinensis*) reduces environmental risks and increases economic benefits[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 305: e127197.
- [ 32 ] Chu L, Hennayake H M K D, Sun H. Biochar Effectively Reduces Ammonia Volatilization from Nitrogen ~ Applied Soils in Tea and

Bamboo Plantations[J]. *Phyton*, 2019, 88(3): 261 – 267.

quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119: 171 – 178.

[ 33 ] Ma Y H, Fu S L, Zhang X P, et al. Intercropping improves soil nutrient availability, soil enzyme activity and tea quantity and

[ 34 ] 刘金龙, 高水练. 生态茶园管理模式探索与实践——以安溪举源茶叶专业合作社为例[J]. *中国茶叶加工*, 2018, (2): 28 – 30.

## Soil Nutrient Status and Comprehensive Evaluation of Soil Fertility Quality of Tea Garden in Anxi

ZHANG Zhao<sup>1,2</sup>, JIN Ming-kang<sup>2,3</sup>, HUANG Xin-rong<sup>1,2</sup>, YANG Le-yang<sup>2,3</sup>,  
SU Huo-gui<sup>4</sup>, YANG Xiao-ru<sup>1,2,3\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Xiamen 350002, China; 2. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Bureau of Agricultural and Rural Affairs of Anxi County, Quanzhou City, Fujian Province, Soil and Fertilizer Technology Extension Station, Anxi 362400, China)

**Abstract:** [Objective] The nutrient status and fertility quality of tea garden soil directly affect the quality of tea. However, the investigation and assessment of soil health in tea garden is still insufficient. [Method] The physical and chemical indices of soil samples from 38 Tieguanyin tea gardens in 13 main tea-producing towns in Anxi were detected, and a comprehensive evaluation with the integrated fertility index (IFI) was constructed by measuring soil pH value and key nutrient elements. [Result] The results showed that the average pH value of tea garden soil was 4.0, and nearly 55% of tea garden soil was strongly acidic. The indices of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium in tea garden soil were relatively high. According to the comprehensive evaluation indices, the IFI value ranged from 0.52 to 1.00, with an average value of 0.84. The percentages of 84 in the tea gardens were in class I high-quality standard. [Conclusion] Most of the Tieguanyin tea garden soil in Anxi has been seriously acidified, but the overall nutrient status of Anxi tea garden soil is still in good condition, and the comprehensive index of soil fertility (IFI) of the tea garden is high, indicating that the soil is generally healthy in Anxi Tieguanyin tea garden.

**Key words:** Tea garden soil; Nutrient status; Soil fertility comprehensive index; Soil fertilizer; Tea garden management

[责任编辑: 刘轶飞]