

DOI: 10.11766/trxb201904300148

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.

LIU Yang, SUN Lili, LIAO Hong. Effects of Nutrient Management on Soil Fertility and Tea Quality in Anxi Tea Plantation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 917–927.

养分管理对安溪茶园土壤肥力及茶叶品质的影响*

刘 扬, 孙丽莉, 廖 红[†]

(福建农林大学资源与环境学院根系生物学研究中心, 福州 350002)

摘 要: 安溪是铁观音的主产区, 茶园养分管理滞后已成为该地区茶叶生产的瓶颈, 本研究旨在为该地区茶园的养分管理提供科学依据。试验于 2015 年在安溪县采集了 50 个茶园的茶青与土壤样品, 测定了土壤 5 项主要肥力指标和茶青中 9 种主要次生代谢物含量; 并根据茶农氮肥用量调研数据, 初步将茶园养分管理划分为: 少量、中量和过度型等三种方式。限制性主坐标轴分析发现, 此分类方式可解释 34.4% ($P < 0.001$) 茶园土壤肥力参数的总体差异, 说明此分类方式能反映出不同茶园养分管理的总体水平; 并且, 养分管理对表层土壤有效磷的影响最为显著。进一步分析表明, 养分管理对茶青综合品质的影响可解释品质总差异的 7.48% ($P < 0.001$); 大部分茶青次生代谢物在中量型管理下含量最高。说明养分管理影响安溪茶园土壤的肥力状况, 施肥量过高或过低均不利于高品质茶叶的生产, 该地区的建议施氮量约为 $200 \sim 400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

关键词: 土壤肥力; 茶青品质; 次生代谢物; 养分管理; 茶园

中图分类号: S571.1 文献标志码: A

Effects of Nutrient Management on Soil Fertility and Tea Quality in Anxi Tea Plantation

LIU Yang, SUN Lili, LIAO Hong[†]

(Root Biology Center, College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: 【Objective】 Tea is the most important non-alcoholic beverage crop in the world. To meet increasing demand of the market, tea production is intensified through nutrient management. Anxi County in China is one of the main regions producing famous oolong tea—Tieguanyin, where lagging nutrient management is the bottleneck of tea production. This study aims to provide a scientific basis for nutrient management in Anxi tea plantations, through comprehensive analysis of effects of nutrient management modes on plantation soil fertility and tea leaf quality. 【Method】 In 2015, tea and soil samples were collected from 50 representative tea plantations in the ten major tea production towns of Anxi County, including 150 fresh tea leaf samples, 50 surface soil samples (0–20 cm) and 46 profile soil samples (top: 0–20, mid: 20–40, sub: 40–60 cm). The soil samples were air-dried and ground for determination of soil pH, organic matter (OM), alkali nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and

* 福建省自然科学基金项目 (2017J01602)、农业部“茶树根系养分高效改良及应用创新团队”项目和国家自然科学基金项目 (31701989) 共同资助 Supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province in China (No. 2017J01602), MOA Modern Agricultural Talents Support Project and the National Natural Science Foundation of China (No. 31701989)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hliao@fafu.edu.cn

作者简介: 刘 扬 (1993—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 研究方向: 植物营养。E-mail: 329129309@qq.com

收稿日期: 2019–04–30; 收到修改稿日期: 2019–11–07; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019–12–06

available potassium (AK), the five indices set as soil fertility parameters in this study, and the tea leaf samples were analyzed on UPLC-MS (ultra-high performance liquid chromatography coupled with triple quadruple mass spectrometry) for determination of contents of nine main tea-quality-related secondary metabolites. By N fertilization rate, the 50 tea plantations were tentatively divided into three groups: low, moderate and excess. 【Result】 Based on the division, restricted principal axis analysis shows that nutrient management significantly explained 34.4% of the overall differences in topsoil fertility between the tea plantations ($P < 0.001$), which further confirmed that the classification by N fertilization rate could represent the comprehensive level of nutrient management of a tea garden. The tea plantations of the moderate group significantly differed from those of the low and excess groups in soil fertility in the top and mid soil layers, but did not so obviously in the sub soil layer. Nutrient management had the most significant effect on AP among the five soil fertility indices in the topsoil, which was followed by AK, AN and OM, and excess fertilization resulted in severe soil acidification. Further analysis shows that nutrient management significantly affected tea quality and explained 7.48% of the differences in the comprehensive tea quality between the groups ($P < 0.001$). The tea leaves from the plantations of the moderate group were the high in content of secondary metabolites, and so the best in tea quality. 【Conclusion】 On the whole, nutrient management does not only affect soil fertility in the tea plantations in Anxi, but also influence quality of the Tieguanyin produced therein. Either excess or less fertilization is not suitable for production of high quality tea leaves. A proper N fertilizer application rate for high-quality tea production in Anxi tea region is recommended to be 200–400 kg·hm⁻²·a⁻¹.

Key words: Soil fertility; Tea leaf quality; Secondary metabolites; Nutrient management; Tea plantation

铁观音, 属青茶类, 是中国十大名茶之一^[1]。安溪县是我国铁观音的主要产区, 2009 年以来, 连续多年位居全国重点产茶县的榜首。目前, 安溪全县茶园面积超过 4 万 hm², 总产量 6.8 万 t, 涉茶总产值达 148 亿元, 全县涉茶人口 80 多万, 农民 56% 的经济收入来自于茶叶, 茶产业支撑着全县的经济发展^[2-3]。近年来, 茶农片面理解施肥对茶叶增产提质的作用, 只看重产量而忽视茶青品质, 在经济利益的驱使下, 过度开垦茶园、大量施用复合肥追求高产, 致使茶园土壤问题日趋严重^[4]。茶园养分管理呈现两种极端, 一种是野放化管理, 完全任由茶树自然生长, 常年采收, 导致土壤养分过度消耗, 造成茶园土壤肥力退化; 另一种是盲目大量施肥造成资源浪费、环境污染, 使得茶园土壤酸化^[5-6]、水土流失日益严重^[7], 同时导致茶叶品质下降。因此, 研究茶园养分管理与土壤肥力和茶叶品质间的关系, 明确养分管理对茶园土壤肥力和茶叶品质的影响, 对合理发展茶产业、防止资源浪费和提升茶叶品质尤为重要。

铁观音作为闽南乌龙茶的代表, 其品质主要受环境因素和人为因素的影响。人为因素主要指加工工艺, 包括茶青采摘标准、摇青、杀青、烘焙方式和时间等^[8-10]。环境因素则包括土壤、水分、气候和季节等^[11-12]。茶树的生长发育状况决定了茶青品

质的优劣, 而茶树生长发育过程中所需的各种矿质养分元素均来自土壤。因此, 研究土壤对茶叶品质的影响十分重要。洪翠云等^[13]发现, 不同供试地铁观音鲜叶品质成分显著不同, 根本原因在于土壤肥力存在显著差异。Ruan 等^[14]研究发现, 土壤中氮素养分的空间异质性会显著影响茶青中氨基酸含量的变化。李倩等^[15]认为土壤的养分指标与绿茶品质化学成分间存在一定的线性关系, 有机质和碱解氮与茶叶品质密切相关。

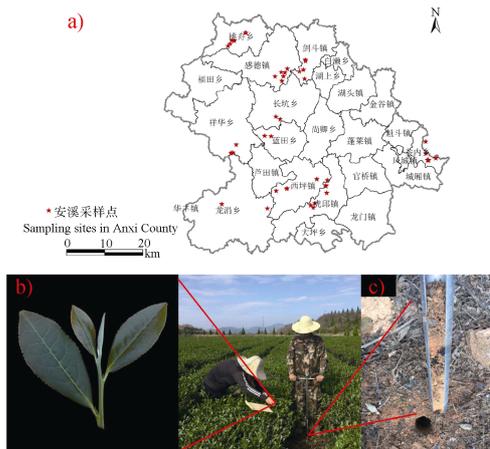
大量研究报道, 养分管理能够影响茶园土壤肥力和茶叶品质。合理施肥不仅可以增加茶叶产量, 还能提升茶青品质。毛平生等^[16]发现, 不同耕作、施肥方式会显著影响绿茶鲜叶中茶多酚、氨基酸和咖啡碱含量的变化。程博一^[17]认为开沟覆膜能提升茶叶的水浸出物、咖啡碱和游离氨基酸含量, 同时降低茶多酚含量, 显著提高土壤养分利用效率。李磊^[18]利用 6 种肥料类型, 研究施肥对茶叶品质的影响, 发现施肥能显著改善茶叶品质, 其中生物有机肥效果最佳。Huang 等^[19]证实了不同氮源处理会显著影响茶叶黄酮类物质和茶氨酸的积累。施用复合肥不仅能够提高茶叶氨基酸的含量, 改善茶叶品质, 还能促进土壤养分趋于平衡^[20]。虽然大量研究证明了施肥会影响茶园土壤养分状况, 进而影响茶叶品质, 但不同地区、不同茶树品种对养分的需求不尽

相同。本研究针对安溪铁观音养分管理的需求，选取代表性茶园，分析了不同养分管理对土壤肥力及茶青次生代谢物的影响，旨在为该地区茶园养分管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与处理

2015 年 7—8 月在安溪县 10 个主要产茶乡镇，采集了 50 个茶园的茶青与土壤样品。具体采样点 (图 1a)) 包括：1. 参内乡 (8 个样点)：参山村、茶学院、岩前村；2. 感德镇 (6 个)：槐植村、槐东村；3. 虎邱镇 (9 个)：芳婷村、高村、林东村、双格村；4. 剑斗镇 (5 个)：福斗村、双洋村；5. 蓝田乡 (2 个)：进德村；6. 龙涓乡 (4 个)：举源村、长塔村、珠塔村；7. 桃舟乡 (6 个)：达新村、康随村、吾培村；8. 西坪镇 (5 个)：柏溪村、盖竹村、西原村、珠洋村；9. 祥华乡 (3 个)：新寨村、寨片场；10. 长坑乡 (2 个)：珍田村。



a) Distribution map of sampling sites, b) Picture of tea sampling, c) Picture of soil sampling

图 1 安溪采样点分布及取样图 a) 茶采样园分布图, b) 茶青取样图, c) 土壤取样图

Fig.1 Distribution map of sampling sites in Anxi County and pictures of sampling

茶青样品采集与处理：茶树品种为铁观音。按照传统 1 芽 3 叶的标准采集茶青 (图 1b))，相邻两株茶树采集鲜叶 50 g 左右混合成一个样品，每个茶园随机采摘 3 个样品，共计 150 个茶青样品。样品

采用热固样法，24 h 之内在烘箱加热 105℃ 杀青 30 min，然后降至 75℃ 烘干至恒重。使用研磨机将茶叶样品磨成粉末状，用于主要次生代谢物的测定。

土壤样品采集与处理：与采摘茶青相对应，沿茶树“滴水缘”垂直投影，清除地表枯枝落叶，用土钻采集 0~20 cm 土壤 (图 1c))，同一茶园与茶青样品对应，采 3 点混合形成 1 个土样，用于测定表层土壤肥力指标。同时，每个茶园分 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 三层，分别采集一个剖面土壤样品。除少数茶园因土层较浅，未采集剖面样品外，共计 50 个表层土样、46 个剖面土样。土样在室内自然风干，研磨土样分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛用于测定土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾。

1.2 茶园分类

根据在 50 个茶园调研的茶农施肥习惯 (特别是氮肥的投入量)，同时参考表层土壤养分的测定状况，将茶园养分管理初步分为三种类型：少量型 (施氮量小于 200 kg·hm⁻²·a⁻¹)、中量型 (施氮量 200~400 kg·hm⁻²·a⁻¹) 和过度型 (施氮量大于 400 kg·hm⁻²·a⁻¹)。按照此方法，采样的茶园包括少量型 16 个、中量型 14 个和过度型 20 个。

1.3 样品检测与方 法

茶青品质成分测定：参照国标 GB/T 8303-2013 和 GB/T 8313-2018，称取 50 mg 烘干的茶叶样品粉末，加入 1 mL 70% 甲醇溶液，涡旋混匀 1 min，超声破碎 20 min，12 000 r·min⁻¹ 离心 10 min，吸取上清液 500 μL，稀释 200 倍后，利用超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱 (Xevo TQ-S, Waters 公司，美国) 测定。定量测定了 9 种与茶叶品质相关的主要次生代谢物，包括茶氨酸 (Theanine)、咖啡碱 (Caffeine)、芦丁 (Rutin)、表儿茶素 (EC)、没食子儿茶素 (GC)、表没食子儿茶素 (EGC)、表儿茶素没食子酸酯 (ECG) 和表没食子儿茶素没食子酸酯 (EGCG) 及总儿茶素 (Total catechin)。

土壤养分指标参考鲍士旦《土壤农化分析 (第三版)》^[21] 进行测定，具体方法如下：pH 采用电位法测定 (水土比 2.5 : 1)；有机质 (Organic matter, OM) 采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法测定；碱解氮 (Alkaline nitrogen, AN) 采用 1 mmol·L⁻¹ NaOH 碱解扩散法测定；有效磷 (Available phosphorus, AP) 采用 Bray I 法 0.03 mol·L⁻¹ NH₄F + 0.025 mol·L⁻¹

HCl 提取, 钼锑抗比色法测定; 速效钾 (Available potassium, AK) 采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定。

1.4 数据分析与处理

通过 SPSS 19.0 统计学分析软件, 对所得到的数据进行正态检验、T 检验 (Student's *t* test)、单因素方差分析 (One-way ANOVA)、双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 和邓肯多重比较 (Duncan) 法进行差异显著性检验。在考虑外界环境因素条件下, 人为将样本进行分组, 综合考虑多个因素, 进行限制性主坐标轴分析 CPCoA (Constrained principal coordinate analysis), 观察分组间是否存在显著差异^[22]。并运用 R 语言包 ggplot2、SigmaPlot12.5 软件, 进行数据处理及作图。

2 结果

2.1 养分管理对表层土壤肥力的影响

利用养分管理作为限制因素, 土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾等五项指标作为土壤肥力参数, 进行土壤肥力的限制性主坐标轴分析 (图 2)。结果表明, 坐标轴 1 (CPCoA1) 是造成样本间差异性的最大主坐标成分, 可以解释 86.4% 的差异, 其次为主坐标 2 (CPCoA2), 解释度为 13.6%; 三种管理方式下的样本在 CPCoA1 维度上可以显著地分开。证实通过农户调查的施氮水平, 确实可以反映不同茶园的养分管理水平。并且, 不同养分管理对表层土壤肥力影响极为显著 ($P < 0.001$, 图 2), 三种管理方式可解释 34.4% 不同茶园土壤肥力的总体差异。可见, 不同养分管理显著改变了安溪茶园表

层土壤的肥力状况。其中, 中量型茶园土壤肥力与少量和过度型茶园显著不同。

对茶园表层土壤分析结果表明, 目前安溪茶园土壤酸化严重, 并且土壤酸化程度受养分管理影响显著 (图 3a))。三种管理方式下, 土壤 pH 分别为 4.6、4.3 和 4.2, 均在 5.0 以下。过度型管理下土壤 pH 最低, 酸化最为严重。

随着施肥量的增加, 土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量均显著提升 (图 3b) ~ 图 3e), 其中过度管理的茶园土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量最高, 中量型次之, 少量型最低。在所测定的土壤肥力指标中, 养分管理对土壤有效磷的影响最为显著, 其次为土壤速效钾含量。与少量型管理的茶园相比, 中量和过度型管理的茶园土壤有效磷含量分别增加了 3.5 倍和 14.7 倍, 土壤速效钾含量分别提升了 26.6% 和 73.2%。少量型和中量型管理的茶园土壤有机质和碱解氮含量差异不显著。

2.2 养分管理对土壤剖面肥力的影响

双因素方差分析结果 (表 1) 表明, 养分管理和土层深度对大部分土壤肥力指标影响极为显著。其中, 养分管理显著影响了全部 5 个指标, 土层深度则影响了有机质、碱解氮和有效磷等 3 个指标; 并且养分管理和土层深度对土壤有效磷存在交互作用。

养分管理对中上层土壤肥力影响极为显著, 对下层土壤 (40~60 cm) 肥力影响不明显 (表 1)。虽然不同养分管理下, 不同剖面土壤 pH 的差异不显著, 但整体上呈现出少量型高于中量型和过度型的趋势。在有机质方面, 过度型管理显著提升了表

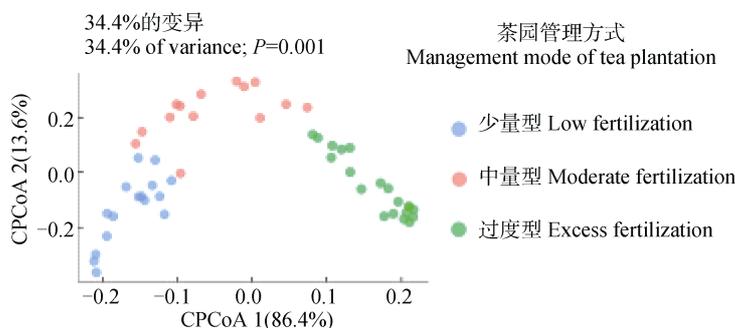
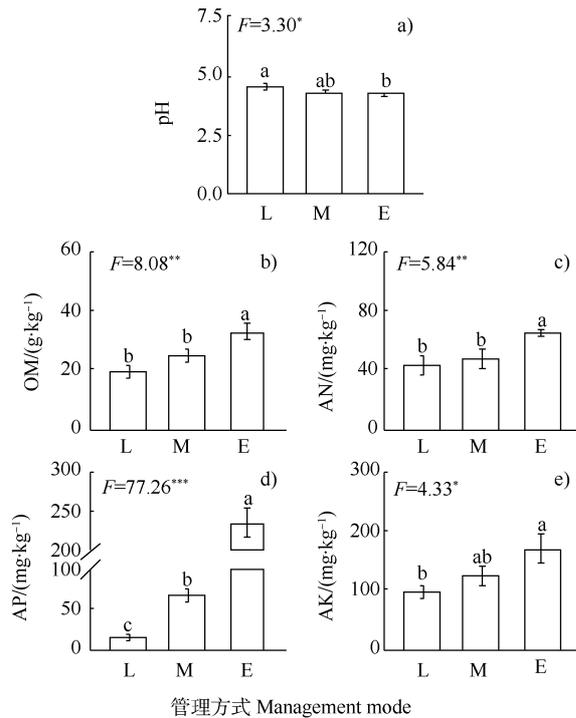


图 2 不同管理方式土壤肥力的限制性主坐标轴分析 (CPCoA)

Fig. 2 Restricted principal axis analysis (CPCoA) of soil fertility relative to nutrient management mode



注: 图中数据为 0~20 cm 土壤各指标的平均值与标准误差, L: 少量型 ($n=16$), M: 中量型 ($n=14$), E: 过度型 ($n=20$)。OM、AN、AP、AK 分别为有机质、碱解氮、有效磷、速效钾; 不同字母表示不同管理方式间差异显著 ($P<0.05$)。ns: 差异不显著; *, $0.01<P<0.05$; **, $0.001<P<0.01$; ***, $P<0.001$ 。下同。Note: The data in the figure are the mean plus standard error of the soil (0-20 cm). L: low fertilization, M: moderate fertilization, E: excess fertilization. OM, AN, AP and AK represent organic matter, alkaline nitrogen, available phosphorus and readily available potassium. Different letter (s) indicated significant differences between different fertilization mode at 0.05 level. ns: not significant, *, $0.01<P<0.05$, **, $0.001<P<0.01$, ***, $P<0.001$. The same below.

图 3 不同管理方式下土壤肥力状况变化

Fig. 3 Changes in soil fertility relative to nutrient management mode

层土壤有机质的含量, 与少量型和中量型相比, 分别提升了 64.06%和 30.85%; 养分管理对中下层 (20~40 cm 和 40~60 cm) 土壤有机质影响不显著。过度型管理显著提升了中上层碱解氮含量, 但少量型和中量型两种管理下, 三个土层间差异不显著。

养分管理对不同土层有效磷影响最为明显, 表现出过度型、中量型、少量型依次减小的趋势。与少量型相比, 过度管理下三个土层有效磷分别提升了 14.50 倍、9.22 倍和 3.89 倍; 中量型管理显著提升了中上层土壤有效磷含量。速效钾的变化与有效磷类似, 过度型管理与少量型相比, 整个土壤剖面速效钾含量均显著提升, 分别提升了 64.79%、93.60%和 52.74%, 中量型管理与少量型相比, 各土层速效钾含量有所提升, 但差异不显著。

安溪茶园土壤中有机质、碱解氮、有效磷和速效钾等 4 个指标变异幅度较大, 不同土层间普遍以有效磷含量变异最大, 并且随着土层的深度增加, 变异系数随之变大, 例如少量型管理下, 上、中、下三层土壤, 有效磷变异系数分别为 66.19%、88.54%和 152.21% (表 2)。

2.3 养分管理对铁观音茶青品质成分的影响

利用养分管理作为限制因素, 9 种茶青主要次生代谢物作为品质参数, 进行限制性主坐标轴分析 (图 4)。结果表明, 养分管理显著影响茶青品质。不同养分管理下, 茶青次生代谢物存在显著差异; 该差异可解释 7.48%茶青品质成分的总体差异, 达到极显著水平 ($P<0.001$)。其中 CPCoA1 占主导, 可以解释 87.02% 的差异; 并且, 按照测定的 9 种品质成分, 中量型管理下的茶青次生代谢物与其他两种管理显著分离, 说明中量型管理的茶园, 其茶青品质显著不同。

表 1 土壤剖面肥力变化

Table 1 Variation of soil fertility along profile depth

管理方式 Management mode	土层深度 Soil depth/cm	pH	OM/ (g·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)
L ($n=14$)	0~20	4.56±0.15ns	19.70±2.01aB	44.04±7.07aB	14.99±2.65aC	102.0±11.36aB
	20~40	4.44±0.09ns	15.60±1.75aA	35.81±3.31aB	6.64±1.57bB	90.56±11.21aB
	40~60	4.44±0.07ns	14.86±2.18aA	33.29±3.59aA	5.00±2.20bB	82.92±9.29aB
M ($n=13$)	0~20	4.30±0.06ns	24.70±2.22aB	47.50±6.22aB	64.23±7.47aB	124.2±16.13aAB
	20~40	4.20±0.10ns	17.05±2.10bA	35.11±4.76abB	23.49±6.85bB	119.6±14.55aB
	40~60	4.26±0.09ns	15.86±1.92bA	31.36±3.36bA	8.28±3.40bB	113.3±15.17aAB

续表

管理方式 Management mode	土层深度 Soil depth/cm	pH	OM/ (g·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)
E (n=19)	0~20	4.27±0.09ns	32.32±2.94aA	63.19±2.42aA	232.4±19.64aA	168.0±23.60aA
	20~40	4.27±0.06ns	21.05±1.80bA	49.78±3.50bA	67.86±11.95bA	175.3±18.95aA
	40~60	4.31±0.04ns	13.97±1.13cA	35.70±2.22cA	24.46±6.46cA	126.7±11.89aA
<i>F</i> 值 <i>F</i> value						
NM		6.13**	5.80**	8.80***	62.73***	8.96***
SP		0.63ns	20.02***	14.03***	53.70***	2.04ns
NM×SP		0.18ns	2.01ns	0.63ns	25.30***	0.69ns

注: NM: 养分管理, SP: 土壤剖面, 同一性状不同小写字母表示同一管理方式下不同土层间差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示同一土层不同管理方式间差异显著 ($P<0.05$)。Note: NM: nutrient management, SP: soil profile. Different low-case letters the same column of trait indicate significant differences between soil layers in the same profile. Different upper-case letters indicate significant differences between fertilization modes at the same soil layer ($P<0.05$).

表 2 土壤剖面理化性质统计特征

Table 2 Statistical characteristics of physico-chemical properties of soil profiles

管理方式 Management types	土层深度 Soil depth/cm	pH			OM			AN		
		Min	Max	CV/%	Min/ (g·kg ⁻¹)	Max/ (g·kg ⁻¹)	CV/%	Min/ (mg·kg ⁻¹)	Max/ (mg·kg ⁻¹)	CV/%
L (n=14)	0~20	3.9	6.2	12.2	7.62	31.79	38.19	23.33	111.1	60.02
	20~40	3.82	5.07	7.28	6.14	27.14	42.1	14.47	70	34.61
	40~60	3.89	4.95	5.94	4.46	35.32	54.99	21.47	68.6	37.36
M (n=13)	0~20	3.99	4.66	4.91	9.11	35.88	32.41	23.33	91.7	47.25
	20~40	3.34	4.69	8.95	10.41	36.62	44.35	17.5	80.73	48.85
	40~60	3.73	4.64	7.25	8.18	33.09	43.6	13.07	45.5	37.08
E (n=19)	0~20	3.68	5.47	9.28	19.15	70.09	39.68	37.33	78.95	16.66
	20~40	3.95	4.95	6.35	11.53	37.55	37.31	30.57	83.77	30.69
	40~60	3.96	4.78	4.46	7.44	24.26	35.33	25.56	49	21.5
管理方式 Management types	土层深度 Soil depth/cm	AP			AK					
		Min/ (mg·kg ⁻¹)	Max/ (mg·kg ⁻¹)	CV/%	Min/ (mg·kg ⁻¹)	Max/ (mg·kg ⁻¹)	CV/%			
L (n=14)	0~20	2.10	28.62	66.19	49.3	179.7	41.69			
	20~40	0.78	22.53	88.54	36.83	204.2	46.33			
	40~60	0.42	28.51	152.2	40.84	141	41.9			
M (n=13)	0~20	31.5	103.7	41.96	43.51	253.2	46.82			
	20~40	0.83	67.31	105.1	62.66	222	43.88			
	40~60	0.44	44.85	147.8	59.99	257.6	48.27			
E (n=19)	0~20	126	413.7	36.83	38.61	428	61.21			
	20~40	9.91	180.5	76.75	76.46	355.6	47.11			
	40~60	1.35	94.85	112	65.78	220.9	38.7			

注: Min: 最小值; Max: 最大值; CV: 变异系数。Note: Min: minimum value; Max: maximum value; CV: coefficient of variation.

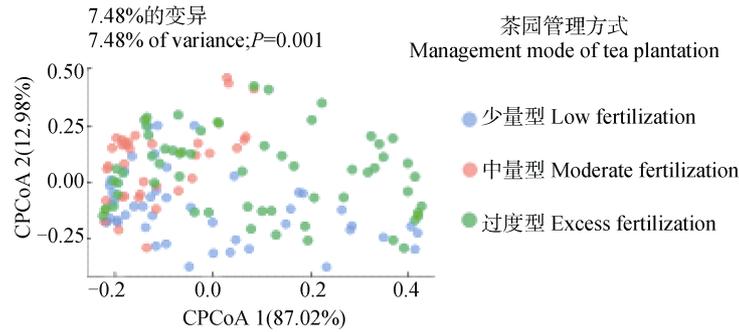
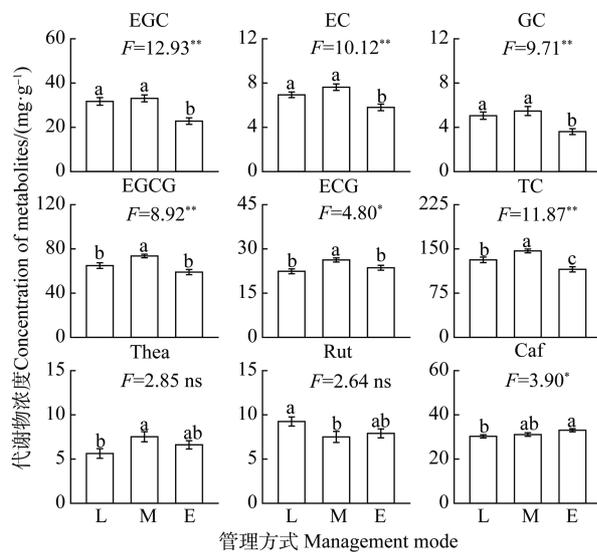


图 4 不同管理方式茶青次生代谢物的限制性主坐标轴分析 (CPCoA)

Fig. 4 CPCoA of secondary metabolites in tea leaves relative to nutrient management mode

从图 5 可见, 养分管理显著影响了 9 种茶青次生代谢物的浓度 (图 5)。除芦丁外, 大部分茶青次生代谢物在中量型浓度最高, 说明过高或过低施肥均影响茶青大部分次生代谢物的合成, 从而降低茶叶品质。就整体茶青次生代谢物浓度而言, 中量型养分管理下茶青品质最好。



注: EGC: 表没食子儿茶素; EC: 表儿茶素; GC: 没食子儿茶素; EGCG: 表没食子儿茶素没食子酸酯; ECG: 表儿茶素没食子酸酯; TC: 总儿茶素; Thea: 茶氨酸; Rut: 芦丁; Caf: 咖啡碱。图中数据为茶叶代谢物浓度的平均值与标准误差。不同字母表示不同管理方式间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: EGC: epigallocatechol; EC: epicatechin; GC: galocatechin; EGCG: epigallocatechin gallate; ECG: epicatechin gallate; TC: total catechin; Thea: theanine; Rut: rutin; Caf: caffeine. The data in the figure are the mean and standard error of the concentration of secondary metabolites in tea leaves. Different letter(s) in the figure indicated significant differences between nutrient management mode at 0.05 level.

图 5 不同管理方式茶青主要次生代谢物变化

Fig. 5 Variation of secondary metabolites in tea leaves relative to nutrient management mode

3 讨论

3.1 养分管理显著影响安溪茶园土壤肥力

由于常年采摘, 茶园土壤肥力耗竭严重^[20], 为提高茶叶产量, 茶园普遍通过施肥来提升土壤肥力, 从而满足茶树对养分的需求。然而, 我国茶园施肥缺乏统一标准, 不同地区和不同茶园养分管理, 即施肥习惯和施肥量, 均差异较大^[23-24]。因此, 研究茶园养分管理及其对茶叶品质的影响日趋重要。

本研究发现, 养分管理对安溪茶园中上层土壤肥力影响较大 (图 2~图 3, 表 1)。施肥过多或过少, 均会导致土壤肥力下降 (图 2)。在所测的 5 个土壤肥力指标中, 养分管理对表层土壤有效磷的影响最为显著, 其次为速效钾、碱解氮和有机质, 对土壤 pH 也存在显著的影响。究其原因, 可能是茶树作为一种亚热带多年生常绿作物, 具有喜酸及喜铵的偏好性^[17, 25], 过度的茶叶采摘与养分管理, 特别是氮肥的过量施用, 促使茶树根系释放更多的质子, 从而加剧土壤的酸化过程^[26-27]。茶树能正常生长的土壤 pH 范围在 4.0~5.5 之间^[28], pH 过低或过高均会抑制根系的生长发育, 不利于茶树对养分的吸收和利用; 同时, 土壤过度酸化, 还会减少土壤的有益微生物菌群^[29]。本研究中各茶园施氮水平差异极大 (分别为小于 200, 200~400 和大于 400 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 茶园表层土壤 pH 表现出少量型、中量型、过度型递减的趋势, 过度型管理土壤酸化最为严重。这与前人^[30]报道安溪茶园土壤整体酸化严重的结论相一致。

茶树作为一种叶用经济作物, 全年的养分需求氮、钾、磷依次递减。据 Sun 等^[31]报道, 乌龙茶茶青 (包括安溪铁观音) N:P:K 的比例为 10:1:5。

因此, 本研究发现过量施肥, 并未大幅度提高茶园有机质和碱解氮含量(图 3, 表 1)。常年多次采摘, 造成土壤氮素耗竭严重, 施肥不足则会造有机质含量下降。杨如兴等^[32]调查了安溪 8 个主要产茶乡镇铁观音茶园的土壤肥力状况, 发现安溪茶园面临养分失衡, 土壤碱解氮严重缺乏, 土壤钾素养分相对匮乏等问题。早期研究普遍提出安溪茶园速效钾含量匮乏, 与本文有所出入, 这可能与安溪茶农施肥存在盲目性和跟风性有关^[33]。随着当地土肥站科研报告的公布, 茶园管理中迅速增大了钾肥的施用量。同时因对酸性土壤磷肥利用率低、有效磷匮乏的误解, 茶园管理中往往会选用高配比的复合肥, 最终造成土壤有效磷和速效钾含量冗余, 与本文研究结果一致。因此, 过度型养分管理造成土壤有效磷和速效钾的大幅度上升, 可能与近年来大量使用复合肥, 特别是 15 : 15 : 15 等高浓度、高配比复合肥有关。

3.2 合理养分管理利于提高茶叶品质

养分管理除影响土壤肥力外, 还直接影响茶叶品质。茶氨酸、咖啡碱、芦丁、ECG、EGCG 等 9 种理化指标是茶叶中重要的品质成分, 每种次生代谢物对茶叶品质均有独特的贡献, 其含量的多少直接决定茶叶品质的好坏^[34-35]。在绿茶生产中往往通过配方施肥, 提高茶青中氨基酸含量, 降低酚氨比, 达到提升绿茶品质的目的^[20]。李磊^[18]对北方茶园的研究发现, 不同种类的肥料施用均会显著影响茶青中茶多酚和氨基酸含量的变化, 其中生物有机肥显著提高茶叶氨基酸含量, 降低茶多酚含量, 对咖啡碱影响不显著。颜明娟等^[36]研究发现, 有机肥和无机肥配施, 显著提升了铁观音茶青中茶多酚和氨基酸的含量, 从而提升茶青品质。叶江华等^[37]研究发现, 铁观音根际土壤肥力显著影响茶叶中茶氨酸和咖啡碱的变化, 对茶多酚影响不显著。在不施肥的情况下, 随着茶树种植年限的增加, 铁观音鲜叶中茶氨酸和咖啡碱的含量显著降低。不同品种的乌龙茶随着不施肥年限的增加, 茶青中茶多酚、茶氨酸和咖啡碱的含量均呈现下降趋势, 茶多酚中以 EGCG、ECG 和 EGC 的含量下降最为显著^[38]。与上述研究结果一致, 本研究也发现养分管理确实显著影响了茶青品质成分, 中量型养分管理下茶青品质最好(图 4, 图 5)。在长期施肥不足的情况下, 茶树的生长发育受到显著抑制, 游离氨基酸含量明显

降低^[14], 茶氨酸作为茶树主要氮源供给茶树新芽萌发生长^[39], 进而使得茶氨酸、咖啡碱和 EGCG、ECG 等儿茶素含量显著降低, 导致茶青品质下降(图 5)。随着施肥量的增加, 在中量型管理下, 各类儿茶素含量及茶氨酸含量均显著提升, 达到最优状态(图 5)。氮素是茶氨酸、儿茶素、咖啡碱等含氮代谢物的重要组成部分, 这几类化合物的累积呈现此消彼长的特性^[40], 过度管理, 大量施用高配比、高浓度复合肥, 导致茶青中 EGCG、ECG 等儿茶素及茶氨酸含量显著降低, 咖啡碱显著提升(图 5), 在降低茶叶滋味的同时提高了茶叶的苦味, 茶青品质急剧下降。可见, 施肥过多或过少均影响茶叶品质, 合理施肥是高品质茶叶生产的关键因素。

前人研究表明, 土壤肥力变化会显著影响茶青中次生代谢物含量的变化, 从而影响茶叶品质。例如, 李倩等^[15]在对崂山地区土壤养分与茶叶品质研究中, 提出茶青中的茶多酚、氨基酸和咖啡碱含量与土壤养分之间存在一定的线性关系。周志等^[41]发现, 土壤养分状况显著影响茶叶品质成分, 并且不同土壤养分指标对不同品质成分的影响有所不同。通过边际效应分析, 发现各次生代谢物的最高含量均有其对应的土壤养分范围。土壤养分含量过高或过低均影响茶叶品质。本研究也发现, 中量型管理的茶园, 不仅其土壤肥力状况显著有别于其他两种管理类型, 其茶青品质也优于其他类型。说明合理的养分管理, 不仅有利于生产高品质茶叶, 而且有助于提高土壤肥力, 从而提升茶叶产量。

4 结 论

养分管理显著影响安溪茶园中上层土壤肥力, 对下层土壤影响不明显。在所测的 5 个土壤肥力指标中, 养分管理对表层土壤有效磷的影响最为显著, 其次为速效钾、碱解氮和有机质, 随着施肥量的增加, 土壤 pH 显著降低。中量型(施氮量 200~400 kg·hm⁻²·a⁻¹)管理方式下, 安溪茶园土壤肥力较高。同时, 不同的养分管理下, 茶青次生代谢物含量也存在显著差异, 中量型养分管理下茶青品质最优。综上所述, 合理的养分管理, 不仅有利于提升茶叶品质, 而且有助于提高茶园土壤肥力, 维持茶园的可持续生产。

参考文献 (References)

- [1] Wang T, Peng X Y, Xin Y, et al. Anxi Tieguanyin is the representative of oolong tea [J]. *Agricultural Products Market Weekly*, 2017 (18): 15. [王太, 彭小元, 辛燕, 等. 安溪铁观音 乌龙茶代表[J]. *农产品市场周刊*, 2017 (18): 15.]
- [2] Chen Y S. Study on construction of quality hygiene and safety traceability system for tieguanyin tea in Anxi[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. [陈雁声. 安溪铁观音茶叶质量卫生安全可追溯体系建设研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.]
- [3] Chen M X. Development status and countermeasures of Anxi Tieguanyin industry [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018 (15): 262—264. [陈旻贤. 安溪铁观音产业化发展现状及对策[J]. *现代农业科技*, 2018 (15): 262—264.]
- [4] Yu B H. Study on the development problem of Anxi tieguanyin tea[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2016, 6 (3): 34—37. [喻保华. 安溪铁观音茶叶发展问题研究[J]. *农业灾害研究*, 2016, 6 (3): 34—37.]
- [5] Yang X D, Shi Y Z, Yi X Y, et al. Research progress and prospects on soil acidification at tea plantations[J]. *Acta Tea Sinica*, 2015, 56 (4): 189—197. [杨向德, 石元值, 伊晓云, 等. 茶园土壤酸化研究现状和展望[J]. *茶叶学报*, 2015, 56 (4): 189—197.]
- [6] Zhang Q, Zong L G, Cao D, et al. Study on soil acidification and its restrictive factors of typical tea garden in Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2011, 43 (5): 751—757. [张倩, 宗良纲, 曹丹, 等. 江苏省典型茶园土壤酸化趋势及其制约因素研究[J]. *土壤*, 2011, 43 (5): 751—757.]
- [7] Tang L F. Soil and water loss status and prevention countermeasures of mountain tea garden in Anxi County, Fujian Province [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2017, 29 (2): 29—31. [唐丽芳. 福建省安溪县山地茶园水土流失现状及防治对策[J]. *亚热带水土保持*, 2017, 29 (2): 29—31.]
- [8] Lin J S, Xie C C, Lin R X. Effect of different baking treatment on Nongxiang Tie-Guanyin quality[J]. *Tea Science and Technology*, 2013, 54 (2): 13—15. [林金俗, 谢承昌, 林荣溪. 不同烘焙处理对浓香铁观音品质的影响[J]. *茶叶科学技术*, 2013, 54 (2): 13—15.]
- [9] Chen J H. Preliminary study on the effect of different fermentation degrees on Tieguanyin quality[J]. *Tea in Fujian*, 2013, 35 (5): 6—7. [陈进火. 不同发酵程度对铁观音品质影响的初步研究[J]. *福建茶叶*, 2013, 35 (5): 6—7.]
- [10] Lin D Y, Xu Z J, Zhao X, et al. Influences of different leaf quantity and fixation machine speed on the quantity of Tieguanyin[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8 (12): 4771—4775. [林东艺, 许智晶, 赵炫, 等. 不同投叶量与杀青机转速对铁观音品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8 (12): 4771—4775.]
- [11] Xu B, Zheng H F. The effect of climate on the quality of Tie-Guan-Yin oolong tea[J]. *China Tea Processing*, 2005 (3): 30—32. [徐飙, 郑惠丰. 气候因素对安溪铁观音品质风格的影响[J]. *中国茶叶加工*, 2005(3): 30—32.]
- [12] Yang Y H. Effects of water conditions in tea gardens on the growth, yield and quality of tea plants [J]. *Chaye Journal of Tea*, 1985, 11 (3): 6—8, 16. [杨跃华. 茶园水分状况对茶树生育及产量、品质的影响[J]. *茶叶*, 1985, 11 (3): 6—8, 16.]
- [13] Hong C Y, Zheng L Y, Wang G, et al. Quality comparison on Tie Guanyin planted in different agrochemical characters[J]. *Subtropical Plant Science*, 2010, 39 (4): 21—23. [洪翠云, 郑丽燕, 王果, 等. 不同土壤农化性状下铁观音茶叶品质比较[J]. *亚热带植物科学*, 2010, 39 (4): 21—23.]
- [14] Ruan L, Wang L Y, Wei K, et al. Comparative analysis of nitrogen spatial heterogeneity responses in low nitrogen susceptible and tolerant tea plants (*Camellia sinensis*) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246 : 182—189.
- [15] Li Q, Wang Y, Hou J H, et al. Quality of Laoshan green tea and its relationship with soil fertility factor[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41 (5): 1101—1104. [李倩, 王玉, 侯君合, 等. 崂山绿茶品质及其与土壤肥力关系的研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41 (5): 1101—1104.]
- [16] Mao P S, Ruan J Y, Li Y S, et al. Effect of different fertilization methods on tea quality of tea garden[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2014, 34 (3): 4—7, 11. [毛平生, 阮建云, 李延升, 等. 茶园不同施肥方式对茶树养分和鲜叶品质相关成分的影响[J]. *热带农业科学*, 2014, 34 (3): 4—7, 11.]
- [17] Cheng B Y. The effects of different fertilization patterns on tea qualities, yield components and soil nutrients[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2014. [程博一. 不同施肥模式对茶叶品质、产量构成以及土壤肥力的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.]
- [18] Li L. The effect of utilizing fertilizer in north tea garden on tea plant growth and tea quality[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2010. [李磊. 不同肥料处理对茶树生长和茶叶品质的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2010.]
- [19] Huang H, Yao Q Y, Xia E H, et al. Metabolomics and transcriptomics analyses reveal nitrogen influences on the accumulation of flavonoids and amino acids in young shoots of tea plant (*Camellia sinensis* L.) associated with tea flavor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66 (37): 9828—9838.
- [20] Tian R Q, Lv R Q. Effect of formulated fertilization on

- nutrient in soil, quality and yield of tea shoots[J]. *Acta Tea Sinica*, 2016, 57 (3): 149—152. [田润泉, 吕润强. 配方施肥对茶园土壤养分状况及茶鲜叶产量品质的影响[J]. *茶叶学报*, 2016, 57 (3): 149—152.]
- [21] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [22] Zgadzaj R, Garrido-Oter R, Jensen D B, et al. Root nodule symbiosis in *Lotus japonicus* drives the establishment of distinctive rhizosphere, root, and nodule bacterial communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113 (49): E7996-E8005. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616564113>.
- [23] Zhang M Q, Li J, You Z M, et al. Optimized N, P, K, and organic fertilizations for BaiyaQilan tea[J]. *Acta Tea Sinica*, 2016, 57 (3): 119—123. [章明清, 李娟, 尤志明, 等. ‘白芽奇兰’施肥效应及其氮磷钾适宜用量研究[J]. *茶叶学报*, 2016, 57 (3): 119—123.]
- [24] Zhang M Q, Li J, You Z M, et al. A fertilization index of nitrogen, phosphorus and potassium for Tie Guanyin (*Camellia sinensis*) tea garden production in Fujian[J]. *Acta Tea Sinica*, 2015, 56 (3): 151—158. [章明清, 李娟, 尤志明, 等. 投产铁观音茶园氮磷钾施肥指标研究[J]. *茶叶学报*, 2015, 56 (3): 151—158.]
- [25] Wan Q, Xu R K, Li X H. Effect of forms of nitrogen on proton release from tea plant roots under hydroponic condition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (4): 720—725. [万青, 徐仁扣, 黎星辉. 氮素形态对茶树根系释放质子的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (4): 720—725.]
- [26] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [27] Qiao C L, Burenbayin. Effects of application of synthetic nitrogen fertilizers on soil nutrient supply and loss of reactive nitrogen in tea (*Camellia sinensis* L. kuntze) gardens in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (1): 174—181. [乔春连, 布仁巴音. 合成氮肥对中国茶园土壤养分供应和活性氮流失的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (1): 174—181.]
- [28] Luo Y P. The science of tea cultivation[D]. 5th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 107—108. [骆耀平. 茶树栽培学[D]. 5版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 107—108.]
- [29] Wang S Q, Hu C Y, Cheng D H, et al. Effects of adjusting pH of tea plantation soil on indigenous microbial fauna and physiological group[J]. *Soils*, 2011, 43 (1): 76—80. [王世强, 胡长玉, 程东华, 等. 调节茶园土壤 pH 对其土著微生物区系及生理群的影响[J]. *土壤*, 2011, 43 (1): 76—80.]
- [30] Li J, Zhang M Q, You Z M, et al. Plentiful and lack index of soil available nitrogen, phosphorus and potassium and soil fertility evaluation for oolong tea garden in Fujian Province[J]. *Acta Tea Sinica*, 2018, 59 (1): 19—25. [李娟, 章明清, 尤志明, 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.]
- [31] Sun L L, Liu Y, Wu L Q, et al. Comprehensive analysis revealed the close relationship between N/P/K status and secondary metabolites in tea leaves[J]. *ACS Omega*, 2019, 4 (1): 176—184.
- [32] Yang R X, Zhang L, Wang W J, et al. Soil fertility analysis of Tieguanyin tea garden at Anxi County[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26 (21): 160—166. [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.]
- [33] Su H G. Status and rational utilization of soil fertility in Anxi tea garden[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31 (28): 132—135. [苏火贵. 安溪铁观音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.]
- [34] Lu J S, Wei F H, Li C H. A study on the relationship between main chemical components and quality of tea varieties[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 1994, 7 (S1): 1—5. [陆锦时, 魏芳华, 李春华. 茶树品种主要化学成份与品质关系的研究[J]. *西南农业学报*, 1994, 7 (S1): 1—5.]
- [35] Yang C, Hu Z Y, Lu M L, et al. Application of metabolomics profiling in the analysis of metabolites and taste quality in different subtypes of white tea[J]. *Food Research International*, 2018, 106: 909—919.
- [36] 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[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23 (3): 452—456. [颜明娟, 林琼, 吴一群, 等. 不同施肥措施对茶叶品质及茶园土壤环境的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (3): 452—456.]
- [37] Ye J H, Wang H B, Chen X T, et al. Oolong tea: Change of rhizosphere soil fertility and leaves quality without fertilization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32 (28): 160—165. [叶江华, 王海斌, 陈晓婷, 等. 不施肥条件下乌龙茶树根部土壤肥力及茶叶叶片品质变化分析[J]. *中国农学通报*, 2016, 32 (28): 160—165.]
- [38] Wang H B, Ye J H, Chen X T, et al. The effect of Oolong tea cultivars (*Camellia sinensis*) planting on the soil nutrient contents and qualities of tea leaves[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016 (6): 51—55. [王海斌, 叶江华, 陈晓婷, 等. 不同品种乌龙茶种植后土壤肥力和茶叶品质的变化[J]. *中国土壤与肥料*, 2016 (6): 51—55.]

- [39] Li R L. Study on theanine in tea leaves [J]. *Journal of Tea Communication*, 1992, 19 (3): 31—34. [李荣林. 茶叶中茶氨酸的研究[J]. *茶叶通讯*, 1992, 19 (3): 31—34.]
- [40] Su Y J, Liao W Y, Ding Y, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield and quality of tea[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1430—1436.]
- [41] Zhou Z, Liu Y, Zhang L M, et al. Soil nutrient status in Wuyi tea region and its effects on tea quality-related constituents[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(8): 1425—1434. [周志, 刘扬, 张黎明, 等. 武夷茶区茶园土壤养分状况及其对茶叶品质成分的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (8): 1425—1434.]

(责任编辑: 陈荣府)