

DOI: 10.11766/trxb202008170341

薛俊鹏, 卓座品, 刘扬, 周志, 黄泓晶, 许锐能, 郭子龙, 孙丽莉, 陈志长, 廖红. 武夷岩茶中矿质养分的地域性差异及影响因素[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 528–535.

XUE Junpeng, ZHUO Zuopin, LIU Yang, ZHOU Zhi, HUANG Hongjing, XU Ruineng, GUO Zilong, SUN Lili, CHEN Zhichang, LIAO Hong. Variation of Wuyi Rock Tea in Mineral Nutrition with Region and Its Affecting Factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 528–535.

武夷岩茶中矿质养分的地域性差异及影响因素*

薛俊鹏, 卓座品, 刘扬, 周志, 黄泓晶, 许锐能, 郭子龙, 孙丽莉, 陈志长[†], 廖红

(福建农林大学生命科学学院根系生物学研究中心, 福州 350002)

摘要: 武夷岩茶是一种传统名优乌龙茶, 其品质差异具有明显的地域性。本研究旨在探索不同产地武夷岩茶茶青中矿质养分的差异规律, 以期了解茶青养分对武夷岩茶品质的贡献。共采集武夷山 112 个茶园的茶青和土壤样品, 主要测定了茶青中 12 种矿质元素和土壤中 5 项肥力指标 (pH、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质)。通过主成分分析发现, 不同产地茶青矿质元素差异明显; 利用随机森林分析, 明确了不同岩区的茶青中磷、铜和氮元素的差异贡献最大, 且总体上浓度由高到低依次为洲茶区、半岩区、正岩区, 表明高品质的正岩茶中存在较低浓度的磷、铜和氮; 皮尔森相关分析显示, 土壤肥力 5 项指标与茶青中上述三种元素浓度相关性较弱, 说明茶青养分受到综合环境因素的影响。综上所述, 茶青中磷、铜和氮的水平与武夷岩茶的品质存在一定的负相关, 可为茶园土壤养分管理提供参考依据。

关键词: 武夷岩茶; 地域性; 矿质元素; 土壤肥力; 茶叶品质

中图分类号: S571.1 文献标志码: A

Variation of Wuyi Rock Tea in Mineral Nutrition with Region and Its Affecting Factors

XUE Junpeng, ZHUO Zuopin, LIU Yang, ZHOU Zhi, HUANG Hongjing, XU Ruineng, GUO Zilong, SUN Lili, CHEN Zhichang[†], LIAO Hong

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

Abstract: 【Objective】 Wuyi rock tea is a kind of traditional brand high-quality oolong tea. However, its quality varies from region to region significantly. This regional difference is mainly attributed to two major factors. One is soil parent material that affects soil nutrient supply, and the other is climate that determines temperature, light intensity, humidity, etc. To date, the focus of this study is to find out the determinants of quality formation of Wuyi rock tea. The purpose of this study was to explore

* 福建省自然科学基金项目 (2017J01602) 和农业农村部农业科研杰出人才项目共同资助 Supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province in China (No. 2017J01602) and the Modern Agricultural Talents Support Project of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China

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

作者简介: 薛俊鹏 (1991—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向: 茶树植物营养。E-mail: 18848967057@163.com

收稿日期: 2020-08-17; 收到修改稿日期: 2020-10-30; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-01-20

difference in mineral nutrition of Wuyi rock teas from different planting areas, so as to better understand contributions of the nutrients to the quality of Wuyi rock tea. 【Method】 In this study, tea leaf samples and soil samples were collected from 112 tea gardens in the Wuyi Mountain. The tea gardens were distributed in three planting areas, i.e. Zhengyan, Banyan and Zhou, producing teas, high, medium and low in quality, respectively. The tea leaf samples were analyzed for contents of 12 mineral elements (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Ni) and the soil samples were for 5 soil fertility parameters (pH, Alkaline nitrogen, Available phosphorus, Available potassium and Organic matter). 【Result】 Principal component analysis shows that the tea leaf samples varied evidently in content of mineral elements with the planting area. Random forest analysis shows that among all the mineral nutrients in the tea leaf samples tested, phosphorus, copper and nitrogen differed the most significantly from region to region. Furthermore, in terms of concentrations of the three elements the teas followed a decreasing order of Zhou tea > Banyan tea > Zhengyan tea, while in terms of tea quality, they followed an increasing order of Zhou tea < Banyan tea < Zhengyan tea, which indicates the lower the concentrations of phosphorus, copper and nitrogen, the higher the tea quality. Pearson correlation analysis shows that the 5 soil fertility parameters did not have much correlations with the three nutrient elements in the tea leaves, suggesting that contents of the nutrients in Wuyi rock tea are affected by comprehensive environmental factors, rather than solely determined by soil nutrient status. 【Conclusion】 To sum up, this study demonstrates that content of phosphorus, copper and nitrogen in tea leaves is somewhat negatively related to quality of Wuyi rock tea, which serve as references for soil nutrient management of tea gardens.

Key words: Wuyi rock tea; Regionality; Mineral elements; Soil fertility; The quality of tea

茶 (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) 是世界上最普遍的非酒精饮料作物, 属于山茶科山茶属, 其中, 中国种 (*Camellia sinensis* var. *sinensis*) 包括云南亚种和武夷亚种^[1-3]。岩茶是武夷山最具代表性的茶类, 属于半发酵型的闽北乌龙茶^[4]。武夷岩茶的品质具有明显的地域特性 (俗称: 山场), 民间根据茶叶品质的高低, 大致将武夷山分为三个茶区, 包括正岩区、半岩区和洲茶区^[5]。正岩区主要是指武夷山景区内“三坑两涧”的茶园, 品质最高; 半岩区为九曲溪内、“三坑两涧”外的茶园, 品质较好; 洲茶区则为景区外的茶园, 品质一般^[5]。有研究利用超高效液相色谱-四级杆-飞行时间质谱 (UPLC-Q-TOF-MS) 分析方法, 揭示了武夷岩茶的品质是一系列代谢物的综合效果, 并且与产地的密切关系客观存在^[6]。

不同茶区的土壤成土母质差别很大, 其矿质养分含量也不同^[7], 唐代陆羽在《茶经》中提到, 不同类型的土壤上种植出来的茶叶等级不同, 表明土壤养分可能影响茶叶的品质。通过对福建省茶叶主产区武夷山和安溪茶园进行调研分析发现, 茶园的土壤肥力显著影响茶叶的品质, 肥力不足或过量均会导致茶叶的品质下降^[8-9]。土壤中氮过高会显著降低茶园土壤的酶活性, 不利于茶树养分的吸收转化, 从而导致茶叶代谢物的累积减少^[10]。此外, 土

壤中的微量元素也会影响茶叶的生化成分^[11], 通过外施微量元素可调控茶叶的品质, 铜和锌肥均可提高茶叶中茶多酚、咖啡碱和游离氨基酸等主要代谢物的含量^[12], 施加适量锰能够降低茶叶中茶多酚的含量^[13]。以上研究表明, 茶园土壤的养分状况显著影响茶叶的品质。

同时, 茶青中的矿质养分影响代谢物的合成和转化, 进而决定茶叶的品质。通过大量分析安溪与武夷山茶青中代谢物与养分的关系, 发现茶青中的氮磷钾存在一定的比例关系, 养分过高或过低均不利于代谢物的积累, 其中对茶氨酸浓度的影响最大^[14]。茶叶中的氮直接参与茶氨酸和儿茶素的代谢^[15-16], 钾影响着氨基酸与咖啡因的代谢^[17-18], 锰、钙、镁则与总糖存在一定关系^[19]。因此, 茶青中的矿质元素对茶叶的品质形成具有重要影响。本研究根据武夷山的不同茶叶等级划分的传统区域 (正岩区、半岩区、洲茶区), 选取代表性茶园, 分析不同产地茶青中矿质元素的差异, 寻找土壤肥力与茶青养分的关系, 旨在为茶园土壤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

采样概况: 本研究以武夷山主栽茶树品种肉桂

为主要研究对象, 采样时间为 2018 年春季, 主要采集茶青样品和茶园对应的土壤样品。取样茶园共计 112 个, 涉及武夷山正岩区、半岩区和洲茶区三类茶区, 茶园数分别为 41、21 和 50 个。具体采样点

包括正岩区: 牛栏坑、慧苑坑、倒水坑、流香涧、悟源涧等; 半岩区: 岩茶村、乞丐岩、白云岩、一线天、燕子窠等; 洲茶区: 兴田、黄柏、仙店、历屯、太庙等 (图 1)。

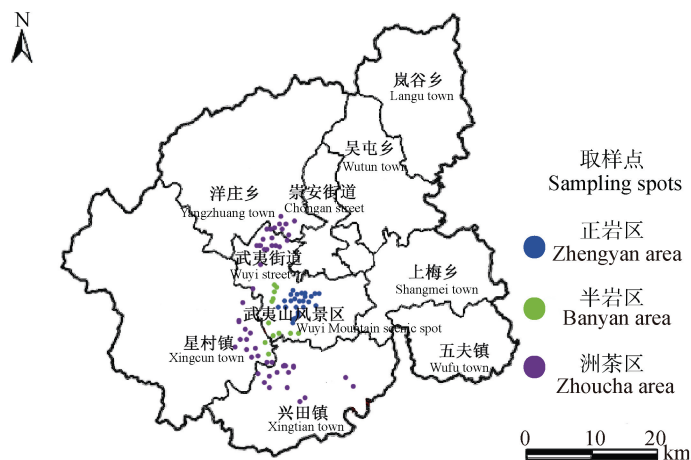


图 1 武夷山取样分布图

Fig.1 Distribution of the sampling spots in the Wuyi Mountain

茶叶样品的处理: 按照当地的采茶标准采摘三叶一新 (新叶为全开面), 样品采集后 24 h 内采用热固样法固定, 105 °C 烘箱加热 30 min, 75 °C 烘干至恒重, 研磨成粉末后称样消解, 用于测定 12 种主要矿质元素。每个茶园取 10 个茶青样品, 共计 1 120 个茶青样品。

茶园土壤的处理: 取土前, 先清除土壤表层的杂草及落叶; 取样时, 在茶树滴水缘垂直向下、靠近茶树根系的部位, 使用钻土器采集 0~20 cm 土层的土壤; 取土后, 土壤摊放于阴凉处风干、研磨过筛后, 用于检测土壤理化性质及养分指标。每个茶园取 3 个土壤样品, 共计 336 个土壤样品。

1.2 样品检测方法

茶青养分检测^[20]: 浓硫酸-双氧水消解法消解茶青获得待测溶液, 使用流动分析仪 (Skalar, 荷兰) 测定大量元素氮 (N) 和磷 (P) 浓度, 使用火焰光度计 (410 型, Sherwood, 英国) 测定钾 (K) 浓度; 硝酸消解法获得茶叶样品待测溶液, 使用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS7900 (Agilent, 美国) 检测钙 (Ca)、镁 (Mg)、铁 (Fe)、锰 (Mn)、硼 (B)、锌 (Zn)、铜 (Cu)、钼 (Mo) 和镍 (Ni) 等 9 种中微量元素。

土壤肥力检测^[20]: 土壤酸碱度 (pH) 测定采用

电位法; 有机质 (OM) 测定采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法; 碱解氮 (AN) 测定采用碱解扩散吸收法; 有效磷 (AP) 测定采用钼锑抗比色法; 速效钾 (AK) 测定采用乙酸铵浸提—火焰光度法。

1.3 数据分析

采用 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 并选用邓肯 (Duncan) 法进行多重比较, 使用 R 语言中的 Factoextra 和 FactoMineR 程序包进行主成分分析, RandomForest 程序包进行随机森林分析, 运用 ggplot2 程序包绘制小提琴图, corrplot 和 RColorBrewer 程序包进行皮尔森相关性分析及可视化。

2 结果

2.1 岩茶茶青中主要矿质元素差异

对武夷山 112 个茶园采集的 1 120 个茶青样品进行 12 种主要矿质元素的测定分析, 发现茶青中各矿质元素的含量差异很大 (表 1)。大量元素中, 氮的含量最高, 为 23.48 g·kg⁻¹; 钾和磷次之, 分别为 14.41 和 3.13 g·kg⁻¹, 氮: 磷: 钾的比例约为 (7~8): 1: (4~5), 表明大量元素中磷的含量相对较低 (表 1)。中量元素中, 钙和镁的含量分别约为磷的 82.0%

和 57.8%，表明茶树对钙和镁的需求量较大（表 1）。微量元素中，锰的含量最高，达到了 $551.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，约为铁的 4.3 倍，但其变异系数也是所分析元素中最大的，为 51.11%，表明茶树需要大量的锰，且其阈值范围较广（表 1）。

表 1 茶青中矿质元素含量

Table 1 Contents of mineral elements in tea leaves

矿质元素 Mineral elements	平均值 ¹⁾ Mean	标准误 SE	变异系数 CV/%
氮 N	23.48	0.22	9.96
磷 P	3.13	0.05	16.58
钾 K	14.41	0.11	7.63
钙 Ca	2.57	0.07	28.70
镁 Mg	1.81	0.02	11.47
铁 Fe	127.48	2.82	22.81
锰 Mn	551.77	27.26	51.11
硼 B	17.34	0.59	35.13
锌 Zn	70.01	1.13	16.69
铜 Cu	10.90	0.32	30.66
钼 Mo	0.87	0.07	84.70
镍 Ni	7.70	0.15	20.28

注：1) 茶青中氮、磷、钾、钙和镁含量的单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其余元素含量单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Note: The unit for content of N, P, K, Ca and Mg is $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, while for contents of the other elements are $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.2 岩茶茶青中形成产地差异的主要贡献元素

针对 12 种矿质元素含量进行主成分分析，仅前两个主成分就可解释茶青养分整体差异的 52%（第一主成分和第二主成分可分别解释差异的 38.2%和 13.8%）（图 2）。基于第一主成分和第二主成分，不同产地之间的茶青样品差异较大，尤其是正岩区与洲茶区之间，仅存在少许叠加；而半岩区的茶青样品之间差异较大，明显分隔成两个部分，其中一部分完全与正岩重叠，另一部分则趋近于洲茶区（图 2）。上述结果可以说明正岩区与洲茶区的茶青养分含量差异明显，而半岩茶则介于正岩茶与洲茶之间。

为了筛选形成产地差异的主要贡献元素，以产地作为分类依据进行随机森林分析，得到每个元素的平均精度下降值（mean decrease accuracy）和平均基尼指数降低值（mean decrease Gini）。结果显示磷的平均精度下降值和平均基尼指数降低值均为最高，铜和氮次之，表明对产地差异贡献最大的三种矿质元素依次为磷、铜和氮（图 3）。因此，在分析的 12 种矿质元素中，这三种元素可能对不同产地茶叶的品质差异起到主要贡献。

同时，本研究发现磷、铜、氮含量在正岩区、半岩区以及洲茶区之间确实存在着显著差异（图 4）。正岩区茶青中这三种元素的含量总体低于洲茶，表明高品质的正岩茶中含有较低含量的磷、铜、氮；而半岩茶居于正岩茶与洲茶之间，半岩茶中的磷和

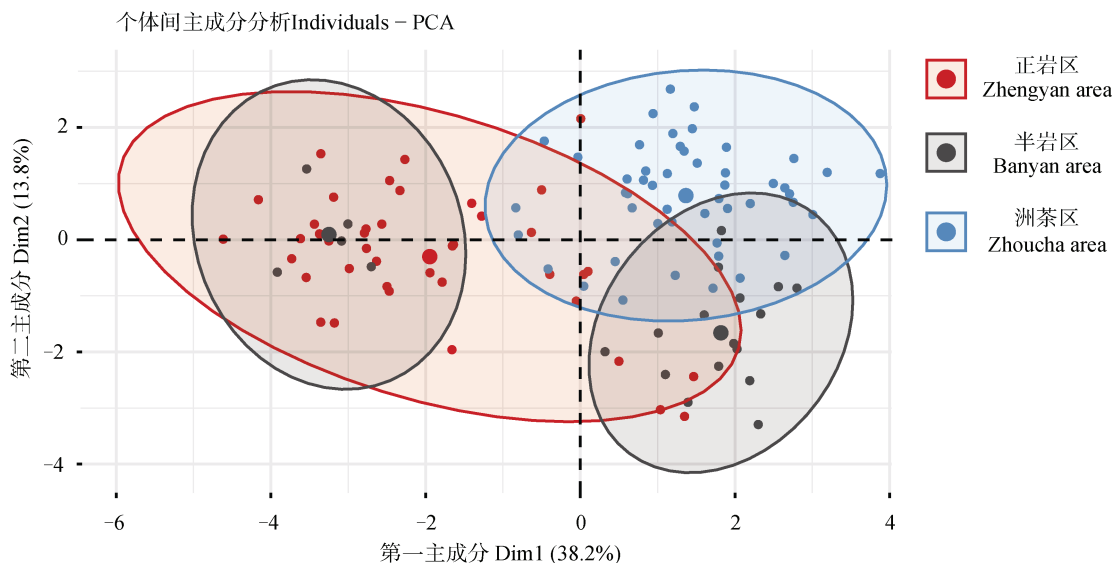


Fig. 2 Principal component analysis (PCA) of the mineral elements in tea leaves

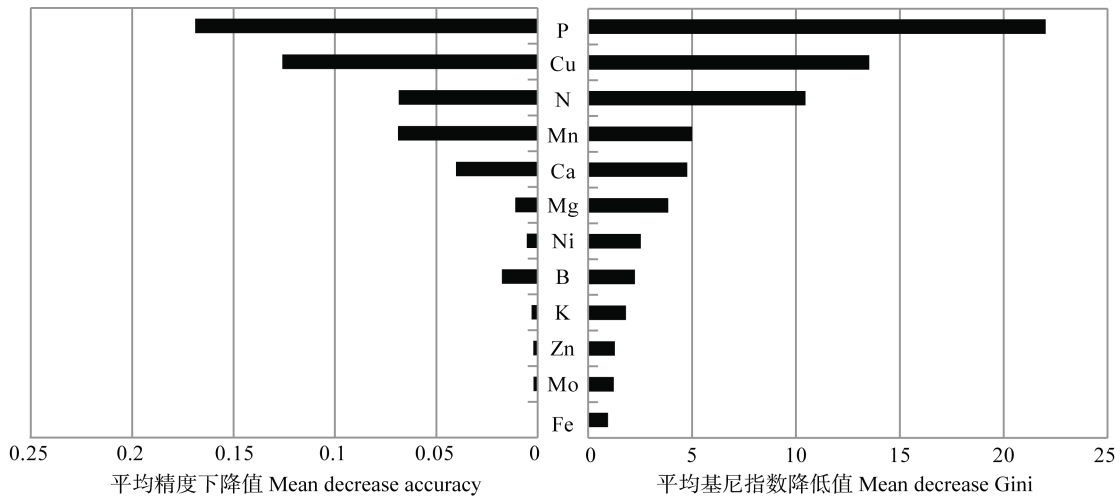
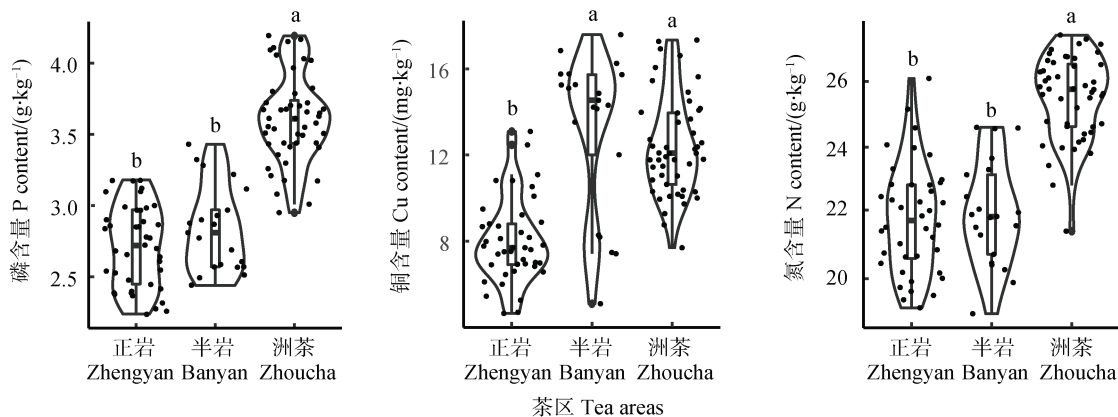


图3 不同产地茶青中矿质元素的随机森林分析

Fig. 3 Random forest analysis of the mineral elements in tea leaves relative to area



注：不同字母表示不同产地间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters indicate significant differences between areas at 0.05 level.

图4 不同产地茶青中磷、铜、氮的含量

Fig. 4 Contents of P, Cu and N in the tea leaves relative to area

氮含量与正岩茶无显著差异,铜则与洲茶无差异(图4)。以上结果表明,茶青中过高的磷、铜、氮含量可能不利于高品质茶叶的形成。

2.3 土壤肥力对茶青中主要贡献元素的影响

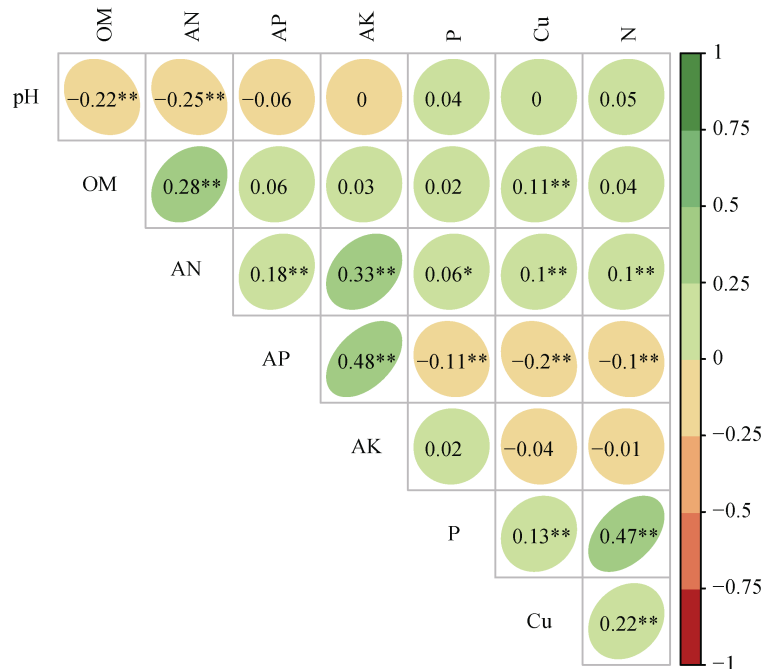
为了探究土壤肥力与茶青养分的关系,本研究将土壤肥力(pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾)与茶青矿质元素含量(磷、铜和氮)进行皮尔森相关性分析。结果发现,土壤pH与有效磷、速效钾不相关,而与有机质、碱解氮呈很弱的负相关,表明茶园土壤酸碱度与土壤养分关系不明显;土壤速效钾分别与碱解氮、有效磷的关系较为密切,这可能与茶农施用等配比氮磷钾肥的习惯有关(图5)。茶青中,磷与氮含量呈现较强的正相关,说明茶叶

中磷和氮的吸收存在协同效应(图5)。而就土壤与茶青的关系而言,相关系数的绝对值最高为0.11,表明二者几乎不相关,即土壤肥力对茶青中主要贡献元素磷、铜、氮的水平影响不明显(图5)。

3 讨论

3.1 武夷岩茶品质与茶青养分的相关性

武夷山的茶叶根据产地所在区域划分为正岩区(高品质)、半岩区(中等品质)和洲茶区(一般品质)^[5]。本研究在三个不同品质区域分别选取代表性茶园(图1),分析不同产地茶青中矿质元素的差异。通过主成分分析方法,发现正岩区与洲茶区的



注：pH、OM、AN、AP、AK 分别表示土壤酸碱度、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾。Note: pH, OM, AN, AP and AK stands for soil pH, organic matter, alkaline nitrogen, available phosphorus and available potassium, respectively. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

图 5 土壤肥力与茶青中磷、铜和氮含量的关系

Fig. 5 Relationships between soil fertility and contents of P, Cu and N in the tea leaves

茶青养分含量差异明显 (图 2); 此外, 利用随机森林分析方法中的平均精度下降值和平均基尼指数降低值作为判断指标, 来反映变量对决策树节点纯度的影响。一般而言, 两个指标的数值越大, 代表该变量在分类中的重要性越大。从图 3 结果可发现对产地差异贡献最大的三种矿质元素, 其中就包括大量元素氮和磷。氮和磷是茶树生长发育过程中需求量较大的两个矿质元素。Sun 等^[14]在对福建武夷山与安溪的茶叶样品进行养分测定后, 认为茶青中氮磷比例范围为 6 : 1~13 : 1, 磷含量显著低于氮。本研究发现, 武夷山肉桂茶青样品的总体氮磷比例较为恒定, 约为 7.5 : 1 (表 1), 符合前期研究比例范围。进一步对武夷山不同品质茶区洲茶区、半岩区和正岩区的茶青样品进行分析后, 得出这三个区域的氮磷比例分别为 6.8 : 1、7.7 : 1 和 8.0 : 1, 虽较为相近, 但存在一定的趋势, 随着品质的提高而逐渐增大, 即高品质的茶青中磷与氮的比例较低; 并且, 正岩茶青中的氮和磷含量均显著低于洲茶茶青, 分别为洲茶的 86.8%与 74.2% (图 4)。综合以上研究得出, 高品质的茶青中磷与氮的含量及其比例均较低。

3.2 土壤肥力与茶青矿质元素的关系

植物的养分主要通过根系从土壤中吸收获得, 通常情况下, 土壤养分状况能够影响植物体内的养分, 比如, 高磷处理能够分别提高柱花草与大豆中全磷或可溶性磷的含量^[21-22]。因此, 本研究对土壤主要肥力指标与茶青中对产地差异贡献最大的三种矿质元素进行皮尔森相关性分析, 结果发现, 土壤肥力对茶青中主要贡献元素磷、铜、氮的水平影响并不明显 (图 5)。周志等^[6]研究发现, 相比洲茶区土壤, 正岩区土壤为高磷低氮; 同样地, 早在 20 年前, 姚月明^[23]认为正岩茶园土壤的磷较洲茶区高, 而氮要低; 然而, 品质更优的名岩区土壤中的铜含量较品质一般的丹岩区低^[7]。本研究中正岩区茶青中的磷、铜、氮含量均低于洲茶区 (图 4), 说明土壤肥力部分影响茶青的矿质元素组成, 但不是决定因素。

武夷岩茶中的矿质养分与土壤养分的关系形成可能受两个因素的影响, 一是茶树自身的养分需求, 即不同茶区的茶树品种对矿质养分的需求存在差异。孙威江等^[24]研究发现, 不同产区的武夷岩茶鲜叶中营养元素存在显著差异, 这与本身的土壤营养

环境之间并不存在很好的相关性。因此,植物对养分的吸收和需求以植物自身的响应为判断标准,土壤状况仅能作为参考。二是不同岩区的地理环境差异。武夷山作为中国著名的风景旅游区,具有典型的丹霞地貌特征^[25]。与洲茶区相比,位于武夷山核心地段的正岩区,具有降水量多,湿度大,雾日长等气候特点,这些因素将综合影响茶树中离子组和代谢组的变化,并最终形成其独特的口感和品质^[5]。

4 结 论

不同产地的茶青中 12 种主要矿质元素存在一定的差异,尤其是磷、铜和氮元素,对不同岩区茶青中矿质元素的整体差异贡献最大,且均在正岩区茶青中浓度最低,洲茶中最高,而土壤肥力 5 项指标(pH、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质)与茶青养分的累积相关性较弱。

参考文献 (References)

- [1] Wei C, Yang H, Wang S, et al. Draft genome sequence of *Camellia sinensis* var. *sinensis* provides insights into the evolution of the tea genome and tea quality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(18): 4151—4158.
- [2] Xia E, Zhang H B, Sheng J, et al. The tea tree genome provides insights into tea flavor and independent evolution of caffeine biosynthesis[J]. Molecular Plant, 2017, 10(6): 866—877.
- [3] Zhuang W F. The initial using and origin of tea[J]. Agricultural Archaeology, 1981(2): 134—136, 139. [庄晚芳. 茶的始用及其原产地问题[J]. 农业考古, 1981(2): 134—136, 139.]
- [4] Liu B S, Lin H, Ge P Z. The historical origin, dissemination development and present situation of Wuyi Tea[J]. Tea in Fujian, 2014, 36(3): 41—44. [刘宝顺, 林慧, 戈佩贞. 武夷茶历史溯源、传播发展与现状[J]. 福建茶叶, 2014, 36(3): 41—44.]
- [5] Huang S B, Wu C J. The origin and rhyme of Wuyi rock tea [J]. China Tea, 2018, 40(11): 21—25. [黄绍斌, 吴成建. 浅谈武夷岩茶产地与岩韵[J]. 中国茶叶, 2018, 40(11): 21—25.]
- [6] Zhou Z, Xue J P, Zhuo Z P, et al. Unique region produces special tea: Metabolomic basis of the influence of production region on the quality of Wuyi rock tea[J]. Scientia Sinica Vitae, 2019, 49(8): 1013—1023. [周志, 薛俊鹏, 卓座品, 等. 一方水土养一方茶: 产地影响武夷岩茶品质的代谢组基础[J]. 中国科学: 生命科学, 2019, 49(8): 1013—1023.]
- [7] Chen R P, Liu A X, Wang W Z, et al. The relationships between the quality of Wuyi rock tea and the microenvironmental factors[J]. China Tea, 2020, 42(2): 35—39. [陈荣平, 刘安兴, 王文震, 等. 武夷岩茶品质与土壤等微域环境因子的关系研究[J]. 中国茶叶, 2020, 42(2): 35—39.]
- [8] Liu Y, Sun L L, Liao H. Effects of nutrient management on soil fertility and tea quality in Anxi tea plantation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 917—927. [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.]
- [9] 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.]
- [10] Ye J H, Zhang Q, Lin S, et al. Correlation of growth and fresh leaf quality of Dahongpao tea tree with soil characteristics[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(5): 488—496. [叶江华, 张奇, 林生, 等. 大红袍茶树生长及鲜叶品质与土壤特性的相关性[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(5): 488—496.]
- [11] Chen H K, Yang J F. Effect of soil's micronutrient element on the quality of Wuyi Rougui tea[J]. Subtropical Plant Science, 2014, 43(3): 216—221. [陈华葵, 杨江帆. 土壤微量营养元素对武夷肉桂茶品质的影响[J]. 亚热带植物科学, 2014, 43(3): 216—221.]
- [12] Zhao M. Effect of copper and zinc nutrition on the biochemical quality of tea[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2016. [赵萌. 铜、锌营养对茶叶生化品质的影响[D]. 昆明: 云南农业大学, 2016.]
- [13] Chang S Q. Effects of Mn on tea plant growth and tea leaf quality of Fudingdabai and Zhuyeqi[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006. [常硕其. 锰对福鼎大白茶和楮叶齐茶苗生长发育及茶叶品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006.]
- [14] 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.
- [15] Kováčik J, Klejdus B. Induction of phenolic metabolites and physiological changes in chamomile plants in relation to nitrogen nutrition[J]. Food Chemistry, 2014, 142: 334—341.
- [16] Liu M Y, Burgos A, Zhang Q F, et al. Analyses of transcriptome profiles and selected metabolites unravel the metabolic response to NH_4^+ and NO_3^- as signaling molecules in tea plant (*Camellia sinensis* L.) [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 218: 293—303.
- [17] Ruan J Y, Ma L F, Shi Y Z. Potassium management in tea plantations: Its uptake by field plants, status in soils, and efficacy on yields and quality of teas in China[J].

- Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176 (3): 450—459.
- [18] Sharma D K, Sharma K L. Effect of nitrogen and potash application on yield and quality of China hybrid tea (*Camellia sinensis*) grown in kangra valley of Himachal Pradesh[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 1998, 68 (6): 307—309.
- [19] Ren H B, Wan Z J, Xu J, et al. Effects of soil available mineral elements on the mineral elements and quality of tea leaves in Laoshan[J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2008 (2): 28—30. [任宏波, 万中杰, 许静, 等. 崂山茶产区土壤中有效态矿质元素对茶叶中矿质元素及其品质的影响[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2008(2): 28—30.]
- [20] Bao S D. Analysis for soil and agrochemistry [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25—188. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25—188.]
- [21] Qin L, Zhao J, Tian J, et al. The high-affinity phosphate transporter GmPT5 regulates phosphate transport to nodules and nodulation in soybean[J]. Plant Physiology, 2012, 159 (4): 1634—1643.
- [22] Sun L L, Chen Z J, Liu P D, et al. Cloning and analysis of the phosphate transporter protein *SgPT1* from *Stylosanthes* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4): 187—196. [孙丽莉, 陈志坚, 刘攀道, 等. 柱花草磷转运蛋白 *SgPT1* 的克隆和表达分析[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 187—196.]
- [23] Yao Y M. Factors related to the quality characteristics of Wuyi rock tea[J]. Tea in Fujian, 1997, 19 (3): 25—26. [姚月明. 形成武夷岩茶品质特征的相关因子[J]. 福建茶叶, 1997, 19 (3): 25—26.]
- [24] Sun W J, Chen Q B, Lin D L, et al. Differences of soils and nutrition elements between production areas of the tea of Wuyi Yancha[J]. Journal of Fujian Agricultural and Forestry University, 2008, 37 (1): 47—50. [孙威江, 陈泉宾, 林锻炼, 等. 武夷岩茶不同产地土壤与茶树营养元素的差异[J]. 福建农林大学学报, 2008, 37 (1): 47—50.]
- [25] Ye G S, Du Q Y, Chen H R, et al. Studies on tea geography of Wuyishan from the perspective of ecological civilization[J]. Agricultural Archaeology, 2019(2): 89—93. [叶国盛, 杜茜雅, 陈泓蓉, 等. 生态文明视野下武夷山茶叶地理研究[J]. 农业考古, 2019 (2): 89—93.]

(责任编辑：陈荣府)