农业资源与环境学报 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

基于土壤地球化学特征的茶叶适生模式及种植区划研究——以浙江余杭为例

吴峰， 王永， 向武， 谢淑云， 黄宁， 张润秋， 马明

引用本文:
吴峰, 王永, 向武, 等. 基于土壤地球化学特征的茶叶适生模式及种植区划研究——以浙江余杭为例[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 909–918.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0506

吴峰，王永，向武，等. 基于土壤地球化学特征的茶叶适生模式及种植区划研究——以浙江余杭为例[J]. 农业资源与环境学报，2021, 38(5): 909-918.

WU F, WANG Y, XIANG W, et al. Establishment of a suitable model and planting division of tea: A case study based on soil geochemical characteristics in Yuhang, Zhejiang Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 909-918.

开放科学 OSID

基于土壤地球化学特征的茶叶适生模式及种植区划研究——以浙江余杭为例

吴峰[1]，王永[2]，向武[1,3*]，谢淑云[1]，黄宁[1]，张润秋[1]，马明[3]

(1.中国地质大学(武汉)地球科学学院，武汉 430074；2.浙江省地质矿产研究所，杭州 310007；3.中国地质大学(武汉)浙江研究院，杭州 311305)

摘　要：我国土壤地球化学调查资料丰富，但其科技成果转化水平还有待进一步提高。为了提高杭州市余杭区土地质量地球化学调查成果的科技转化潜力，本研究针对余杭区名优茶叶，综合运用层次分析法及模糊数学评判法，建立了区域土壤种植区划适生模型，并结合地理信息系统，提出了种植区划建议。结果表明：茶多酚、游离氨基酸以及水浸出物是影响茶叶品质的主要营养成分；土壤类型、海拔高度、土壤pH和坡度是影响茶叶适生的主要宏观因子，而N、P、K以及微量元素Zn是影响茶叶品质的主要微观影响因子。基于此，将余杭区茶叶品质分为优、良及一般三类，并建立了余杭区茶叶土壤适生模型。利用适生模型，将余杭区茶叶种植区域划分为四个类型：高度适宜区、中度适宜区、低度适宜区以及不适宜区。研究表明，余杭区百丈镇和鸬鸟镇是提高余杭区茶叶产量的重点区域，建议适宜扩大该区域径山茶叶种植面积。

关键词：余杭区；茶叶；土壤适生模型；种植区划；层次分析法

中图分类号：S571.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-6819(2021)05-0909-10　　**doi**: 10.13254/j.jare.2020.0506

Establishment of a suitable model and planting division of tea: A case study based on soil geochemical characteristics in Yuhang, Zhejiang Province

WU Feng[1], WANG Yong[2], XIANG Wu[1,3*], XIE Shuyun[1], HUANG Ning[1], ZHANG Runqiu[1], MA Ming[3]

(1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resources, Hangzhou 310007, China; 3.Zhejiang Institute, China University of Geosciences(Wuhan), Hangzhou 311305, China)

Abstract: Although soil geochemical survey data are abundant in China, the transformation level of its scientific and technological achievements needs to be further improved. To improve the potential of scientific and technological transformation of geochemical survey results of land quality in Yuhang District, Hangzhou, Zhejiang, a suitable model of regional soil planting regionalization of the famous and excellent quality tea in Yuhang District was established using an analytic hierarchy process and a fuzzy mathematical judgment method. Combined with GIS, suggestions for planting regionalization were put forward. The results showed that: tea polyphenols, free amino acids, and water extracts were the main nutrients affecting tea quality; soil type, altitude, soil pH, and slope were the main macroscopic factors affecting the fitness of tea, while N, P, K, and trace elements such as Zn were the main microscopic factors. Based on this, three types of tea quality were established: excellent, good, and genera. In addition, a suitable model of tea soil in Yuhang District was also established. Using the fitness model, the tea planting area in Yuhang District was divided into four types: a highly suitable area, a moderately suitable area, a lowly suitable area, and an unsuitable area. The results showed that the Baizhang and Luniao towns in Yuhang District were key areas for increasing tea production in Yuhang District. It is recommended that the area of Jingshan tea planting in this region should be expanded.

Keywords: Yuhang District; tea; soil suitable model; planting division; analytic hierarchy process

收稿日期：2020-09-09　　**录用日期**：2020-11-30

作者简介：吴峰(1996—)，男，湖北武汉人，硕士研究生，研究方向为环境地球化学。E-mail：wufeng9616@163.com

*__通信作者__：向武　E-mail：xiangw@cug.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金(41977263)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41977263)

农作物适宜性评价和种植区划是合理利用自然资源、提高现代农业收益的重要途径。目前,在适宜性评价指标体系方面,尚无统一标准[1-3];在适宜性定量化方面,常见的有生态距离、生态位、隶属度等方法[4-9],但也未形成统一规范。在计算适宜性程度方法方面,最常用的有线性函数、抛物线以及"S"形函数[10-12];在权重的确定方面,常见的为层次分析(AHP)与专家打分(EGM)的组合,也有研究基于生态因子的限制原理,采用变动赋权方法[13-14],以及生态适宜性模糊综合评判中权重矩阵量化的方法[15]。此外,一些研究简单利用回归分析确定权重。目前,有关评价方式和种植区划研究,主要存在两方面的问题:①不同作物生长要素和适生条件差异巨大,尚无统一的评价指标体系。此外,大多数作物适宜性评价都是从适宜生长和提高产量的角度开展的,没有考虑农作物本身一些特色营养成分,缺乏鲜明的地域特色;②数据来源方面,大多采用气象站点观测数据或遥感数据,从气象和土壤类型等方面进行评价和种植区划,而基于土壤地球化学调查数据的作物适生模式和种植区划研究还相对不足。

我国土壤地球化学特征受生物、气候、母质、地形及人为作用等多种因素影响。根据土壤地球化学特征和类型,因地制宜、因土种植、合理施肥,对我国农业的可持续发展具有重要意义[16]。近年来,我国开展了国家-省级-县级-镇级-组级五个层次的农业地质调查[17]。在总结以往农业地质调查的基础上,主要采用区域地球化学调查方法,将工作重心聚焦于土壤,将调查-评价-评估-预测预警的总体技术思路[18-21]应用于农业土壤质量评价、农业地质环境适宜性评价工作中,最终建立特色化、优质化的农业地质地球化学模式,为区域农业经济发展提供科学依据[22]。近年来,随着多目标地球化学工作的推广,已开展了一些基于土壤地球化学调查数据的评价工作,主要是利用土壤采样点数据,将点状数据插值到各评价单元,按常规模式进行评价,缺乏针对特色农作物的评价体系,不能很好地突出地域性特色。

浙江杭州余杭区地处杭嘉湖平原和浙西丘陵山地的过渡地带,位于北纬30°09′~30°34′、东经119°40′~120°23′,山地丘陵占总面积的39.17%,平原面积占45%,江河水域占15.83%。该区属北亚热带季风气候,温暖湿润,雨量充沛,土壤以红壤为主,矿物质和微量元素丰富,pH呈弱酸性,十分有利于茶叶种植[23-24],这使余杭区成为浙江优质茶叶产区。其中,以径山茶最为出名,至今已有1 200多年历史。径山茶叶种植区主要分布在以余杭区径山镇为主的9个乡镇现辖行政区域。目前径山茶叶种植面积仅3 515 hm^2,年产茶量10 000 t,茶叶产值达6.4亿元,茶叶每亩(667 m^2)产值超过万元,是余杭区重要的农业经济来源[25-26]。

2002—2005年,农业地质调查项目覆盖余杭区,2018—2019年,浙江省地质矿产研究所联合杭州市国土资源、农业、环保等部门,完成余杭区农业耕地质量补充调查,取得了较多的调查成果。充分利用这些土壤地球化学调查成果,针对性挖掘余杭区土地资源利用潜力,可为推动地方特色农业经济的高质量发展提供科学指导,助力成果转化。

本研究以余杭区径山茶叶为主要对象,综合考虑茶叶特色营养成分因素,尝试利用土壤地球化学调查资料,建立地质地球化学适生模型并制定余杭区种植区划方案,旨在为杭州市余杭区土地地球化学调查成果的转化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集及测试

1.1.1 茶叶样品采集及测试

2019年4月,在浙江余杭区西部丘陵地区多个有一定规模的径山茶叶种植园中进行布点,每个采样点多株茶树随机采样,组成混合样,并收集茶树种类、生长年限以及产量等信息。最终,采集以鸠坑为主的生长状况良好的茶叶样品30件,每件样品采摘500 g。由中国地质大学(武汉)浙江研究院根据我国茶叶成分检测的现行标准《茶叶中茶氨酸的测定 高效液相色谱法》(GB/T 23193—2017)、《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》(GB/T 8313—2018)以及《茶叶中铁、锰、铜、锌、钙、镁、钾、钠、磷、硫的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法》(GB/T 30376—2013)的规定检测分析茶叶中有益的微量元素和营养物质等指标。

1.1.2 土壤样品采集及测试

本研究所用土壤地球化学数据主要来源于2002—2005年浙江省农业地质环境调查,2018—2019年浙江省地质矿产研究所联合杭州市国土资源、农业、环保等部门完成的余杭区耕地质量补充调查,以及1个农业粮食生产功能区和1个现代农业园区耕地质量调查。数据资料包括余杭区3.69×10^8 m^2 1∶50 000耕地质量调查结果以及农业粮食生产功能区和现代农业园区2.63×10^7 m^2 1∶10 000耕地质量调查结

果。本研究分析测试了土壤中Hg、I、Se、TOC(总有机碳)等54项指标含量,以及有机质和有效B、Mo、Fe、Zn等12种元素的有效态含量(主要为土壤养分元素),查明了耕地土壤污染状况和土壤养分肥力状况。

补充土壤样品30件,与茶叶样品一一对应,在每件茶叶样品采集区多点采样,先除去表面的杂物,均匀采集0~30 cm土柱,保证过20目筛总样量为400 g。记录土壤采样点GPS坐标信息、海拔高度等信息。送样到中国地质大学(武汉)浙江研究院,根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中规定的土壤质量检测方法检测分析影响土壤污染程度的重金属元素Cd、Cr、Hg、As、Pb、Ni、Cu、Zn,影响土壤肥力的P、K、Ca、Na、pH,以及影响茶叶品质的Se、Mn、Fe等元素的含量。

1.2 研究方法

1.2.1 茶叶品质评价指标的选定

茶叶中的主要化学成分包括芳香物质、游离氨基酸、茶多酚、咖啡碱、茶叶色素、维生素等[27]。其中茶多酚是茶叶中多酚类物质的总称,其主体成分是儿茶素及其衍生物,是茶叶中具有保健功能的主要化学成分,茶多酚占茶叶干质量的20%~30%,是决定茶汤颜色及味道的主要成分[28];以茶氨酸为主的游离氨基酸占茶叶干质量的2%~4%,是茶叶中生津润甜的主要成分,能对茶汤的香味和鲜味起到积极的作用[29];水浸出物是茶叶水溶物质的总和,主要由咖啡碱、糖类、果胶等组成,是决定茶叶滋味的主要指标[30]。茶多酚、游离氨基酸以及水浸出物是决定茶叶内在品质的关键因素,其中茶多酚含量与茶叶品质的相关性最强,游离氨基酸含量次之,水浸出物在三者中最弱[31]。因此,选用茶多酚、游离氨基酸以及水浸出物作为茶叶品质评价的指标。

1.2.2 茶叶品质评价模型的建立

以茶叶品质评价为目标层,以茶多酚、游离氨基酸以及水浸出物作为茶叶品质的主要评价指标层,基于层次分析法,首先建立茶叶品质评价判别矩阵,参考相关文献,以各个指标与茶叶品质的相关系数为基础[31],对各因子进行打分(表1)。

判别矩阵CR=0.008 8(<0.1),表明判别矩阵通过了一致性检验,具有满意的一致性。利用Yaahp软件对判别矩阵进行特征向量计算,最终获得茶叶品质评价因子特征向量权重(图1)。

影响茶叶品质的茶多酚、游离氨基酸以及水浸出物指标在一定范围内与茶叶品质呈正相关,超过或低于此范围,评价指标值的变化对茶叶品质影响很小,均属于"S"型指标[32]。依据国家供销合作行业标准《径山茶》(GH/T 1127—2016)、西湖龙井茶国家标准《地理标志产品 龙井茶》(GB/T 18650—2008)以及我国茶叶产品成分的相关文献[33-34],确定茶叶品质评价各因子的隶属度(表2)。

表1 茶叶品质评价判别矩阵

Table 1 Discriminant matrix of tea quality evaluation

指标 Index	水浸出物 Water extract	游离氨基酸 Free amino acid	茶多酚 Tea polyphenol
水浸出物	1	1/2	1/3
游离氨基酸	2	1	1/2
茶多酚	3	2	1

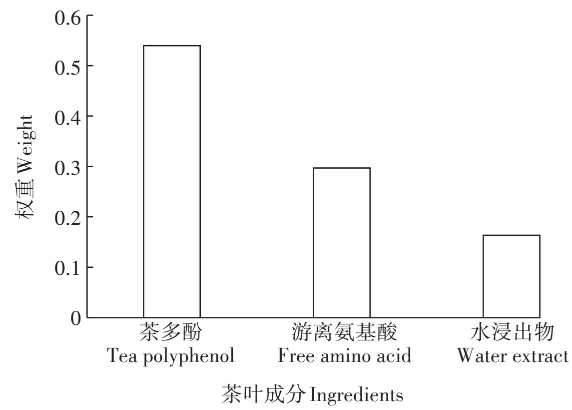

图1 茶叶品质评价因子权重

Figure 1 Weight of evaluation factor for tea quality

利用层次分析加权指数,结合隶属度函数公式,得到茶叶品质评价模型。

$$Y=\sum_{i=1}^{m} W_i \times I_i \tag{1}$$

式中:Y为茶叶品质评价综合指数;W_i为第i个指标的权重;I_i为第i个指标的隶属度。权重之和为1,隶属度在0.1~1之间。

1.2.3 茶叶适生模式相关指标的选定

土壤类型、海拔、坡度、坡向对光、热、水、土、气有着重要的制约和调解作用。pH不仅影响土壤养分有效性,还影响土壤微生物的活动、有机质的合成与分

表2 茶叶品质评价指标隶属度

Table 2 Evaluation index of tea quality

指标 Index	隶属度函数 Membership function	下限 Lower limit	上限 Upper limit
水浸出物	"S"型	0.36	0.51
游离氨基酸	"S"型	0.02	0.06
茶多酚	"S"型	0.18	0.35

解。TOC是植物、动物及微生物的遗体、排泄物、分泌物及其部分分解产物和土壤腐殖质中的碳，TOC对土壤物理、化学和生物学性质都有显著的影响[35-37]。N、P、K是茶树生长过程中不可或缺的元素，不仅影响茶树的生长和产量，还影响茶叶的品质[38-39]；Zn、Cu等微量元素能提高茶树活性，增加光合作用，也有利于N、P的吸收和利用。此外，Al、Fe等也对茶树生长有一定影响[40-42]。最后，结合区域特色和茶叶品质评价的结果，选取与区域茶叶品质相关性强的指标。

1.2.4 茶叶适生模式的建立

采用AHP法，对选定的土壤理化性质、土壤立地条件两个层次的多个土壤适宜性评价指标建立判断矩阵。通过专家打分以及文献查阅，确定各个指标的特征向量权重及隶属度。最后得到茶叶土壤适生模式。

$$Y_s = \sum_{m=1}^{n} W_m \times I_m \qquad (2)$$

式中：Y_s为茶叶土壤适宜性综合指数；W_m为第m个指标的权重；I_m为第m个指标的隶属度。权重之和为1，隶属度在0.1~1之间。

2 结果与讨论

2.1 茶叶品质评价

茶叶品质评分结果显示，所采茶叶样品的品质评分在0.12~0.48范围内变化，为便于样品茶叶内部对比，根据综合评分结果，利用等距离法，将本区茶叶品质划分为优（0.32<茶叶品质评分≤0.48）、良（0.16<茶叶品质评分≤0.32）、一般（茶叶品质评分≤0.16）三级，得到各样品品质评价分级结果（图2）。

如图2所示，区域中样品以优质茶叶居多，且优质茶叶主要分布于径山镇西北部。据前期余杭1∶10 000耕地质量调查结果显示，该区域属丘陵地区，海拔50~350 m，山体坡度25°~35°，土壤pH呈弱酸性，有着极好的茶叶种植立地条件，这与茶叶品质评价结果相吻合。

2.2 茶叶种植土壤适生模式分析

2.2.1 影响茶叶品质的土壤地球化学指标

（1）微量元素

许多研究表明，土壤中微量元素全量不能很好地反映其对农作物的影响，而作物中微量元素含量与土壤中活性微量元素含量有一定的相关性。因此，植物中微量元素含量能较好地反映土壤微量元素活性部分。将茶叶品质评分结果与茶叶中微量元素进行相关性分析，结果表明茶叶中的微量元素Zn在0.01的置信水平下，对提升茶叶品质有显著促进作用，而茶叶中As和Hg分别在0.01和0.05的置信水平下对茶叶品质有抑制作用（表3）。

由于研究区As、Hg含量水平较低，几乎不存在污染，故不将其选为评价该区茶叶土壤种植适宜性的关键指标。而茶叶中Zn元素含量与茶叶品质评分的线性拟合度较好（图3），优质茶叶中Zn含量明显高于一般茶叶，且品质随Zn含量的增加而增加。茶叶中

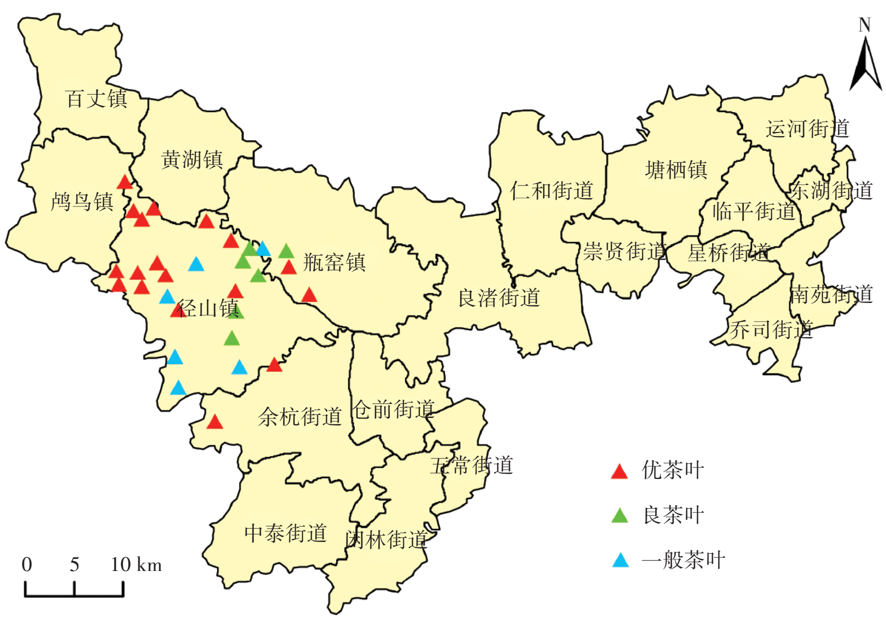

图2 茶叶品质分类样点分布图

Figure 2 Distribution of tea quality classification samples

表3 茶叶品质评分与茶叶中微量元素相关性分析

Table 3 Correlation analysis of tea quality and trace elements in tea

Se	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn	As	Hg	Ge
-0.223	-0.332	-0.270	0.189	0.267	-0.331	0.560**	-0.573**	-0.403*	-0.194

注:* 表示在0.05水平(双侧)上显著相关;**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。下同。

Notes: * indicates significant correlation at 0.05 level(bilateral); ** indicates significant correlation at the 0.01 level(bilateral). The same below.

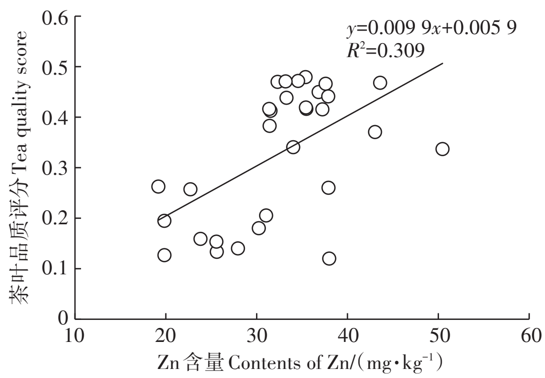

图3 茶叶Zn元素含量与茶叶品质关系图

Figure 3 Relationship between tea Zn contents and tea quality

Zn元素含量与茶叶中水浸出物及茶多酚的含量呈正相关(图4),表明茶叶中Zn元素含量的增加一定程度上促进了茶叶中水浸出物及茶多酚的生成。大量研究证实Zn一般输送到植物生长旺盛的尖端组织,因此名优茶往往含锌较高,茶叶品级与含锌量呈正相关[43]。研究表明,茶叶中的锌有60%~80%可以溶于茶汤中,茶叶是补锌的良品[44-45]。这也证明了Zn对茶叶品质提升的重要性。因此,Zn是影响茶叶品质的关键微量元素。

(2)主量元素

将茶叶品质评分结果与茶叶中主量元素进行相关性分析(表4),结果表明土壤中的Al、Na元素在0.01的置信水平下与茶叶品质呈显著正相关;Ti元素在0.01的置信水平下与茶叶品质呈显著负相关;Si、Fe元素在0.05的置信水平下与茶叶品质呈显著负相关。另外,土壤中的N、P、K元素能影响茶树的生长,是决定茶叶品质的关键主量元素,且土壤中K元素与Al、Si、Fe、Ti、Na元素间存在显著的相关性(表5),考虑到选取指标的独立性原则,只选择土壤中的N、P、K作为评价茶叶种植土壤适宜性的关键主量元素指标。

2.2.2 茶叶土壤种植适生模式

建立茶叶适生模式的实质是确定影响茶叶生长的主要因子、影响权重和变化范围。

(1)按照茶叶生长对自然环境的一般要求,考虑

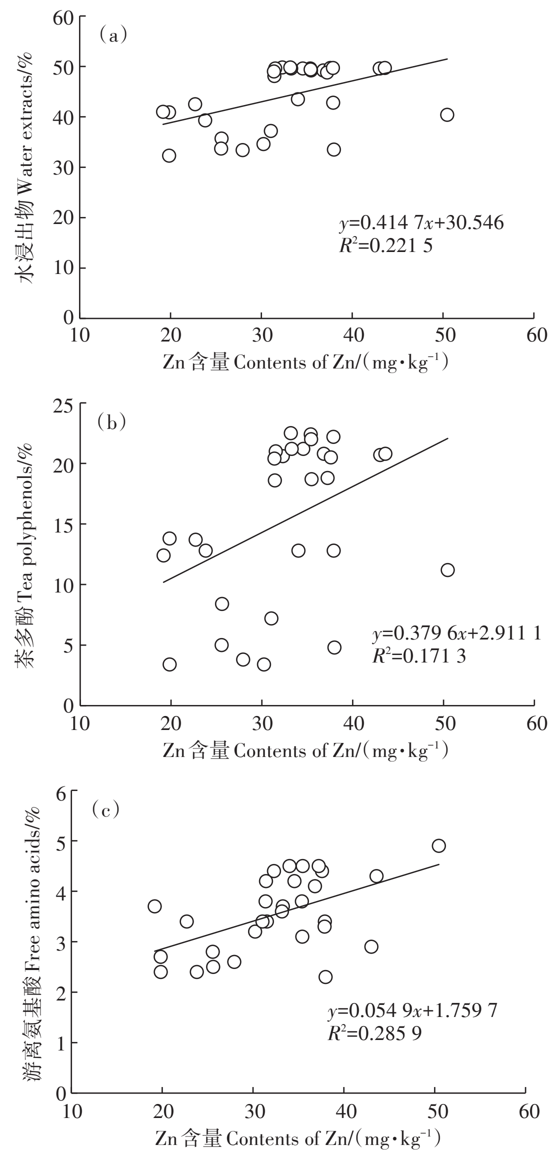

图4 茶叶Zn元素含量与茶叶水浸出物、茶多酚及游离氨基酸含量关系

Figure 4 Relationship between tea Zn contents and tea water extracts, tea polyphenols and free amino acid contents

到研究区污染水平较低,本研究选取土壤类型、海拔、坡度、坡向、pH、TOC、N、P、K和Zn 10项指标作为评价茶叶土壤种植适宜性的关键指标,并将其划分为土壤理化性质和土壤立地条件两大类别。

表4 茶叶品质评分与土壤主量元素Pearson相关系数矩阵

Table 4 Correlation analysis of tea quality and soil principal elements

元素 Element	评分 Score	Al	Si	Fe	Ti	Na
评分	1					
Al	0.513**	1				
Si	-0.372*	-0.935**	1			
Fe	-0.389*	-0.181	-0.099	1		
Ti	-0.483**	-0.496**	0.225	0.891**	1	
Na	0.564**	0.594**	-0.479**	-0.515**	-0.602**	1

表5 土壤K元素与部分主量元素Pearson相关系数矩阵

Table 5 Correlation analysis between soil K element and partial principal elements

元素 Element	K	Al	Si	Fe	Ti	Na
K	1					
Al	0.832**	1				
Si	-0.724**	-0.935**	1			
Fe	-0.458*	-0.181	-0.099	1		
Ti	-0.639**	-0.496**	0.225	0.891**	1	
Na	0.721**	0.594**	-0.479**	-0.515**	-0.602**	1

（2）采用AHP法，以该10项指标为决策层，土壤理化性质和土壤立地条件为中间层，茶叶土壤种植适宜性为目标层建立判断矩阵。根据德尔菲法，结合文献查阅获得农业领域专家12名，对各土壤适宜性因子重要性进行打分，确定各因子之间的相对重要性，最后形成各因子特征向量权重（图5），经过一致性检验各个层级的CR值都小于0.1，均通过一致性检验。结果显示，土壤类型、海拔高度、土壤pH和坡度是茶叶适生模式主要宏观影响因子。主量营养元素N、P、K权重相近，微量元素Zn对茶叶品质影响较大。

（3）通过隶属度函数确定各项指标的最佳变化范围。在所确定的主要因子中，土壤类型属于概念型指标；TOC、N、P、K、Zn等含量属于“S”型指标；海拔、坡度、坡向、pH为抛物线型指标。依据茶叶种植区土壤研究的相关分析结果，结合实际调查结果，最终建立了余杭区茶叶适生模式（表6）。

2.3 余杭区径山茶叶种植区划

基于余杭区土壤地质调查的4 461个调查点的地球化学数据，结合遥感解译获得的海拔、坡度和坡向等立地参数，利用已建立的适生模型，通过ArcGIS空间插值法，得到余杭区茶叶种植土壤适宜性评分结果。按照茶叶土壤适宜性评分结果的自然断点分级法，将区域土壤分为茶叶种植的高度适宜区（0.56<土壤评分≤1）、中度适宜区（0.44<土壤评分≤0.56）、低度适宜区（0.33<土壤评分≤0.44）以及不适宜区（0<土壤评分≤0.33），完成了基于层次分析法绘制的茶叶种植

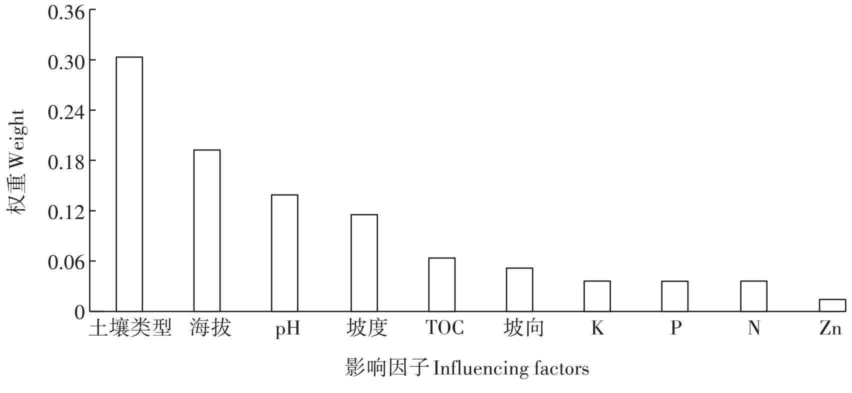

图5 茶叶适生模式中各影响因子的权重

Figure 5 Weight of the influence factor in tea growth pattern

表6 余杭区茶叶适生模式

Table 6 Tea survival pattern in Yuhang District

类别 Category	适生因子 Factor	隶属函数类型 Membership function type	下限 Lower limit	上限 Upper limit	最适范围 Optimum range	土壤类型 Soil type	适宜性 Suitability	隶属度 Membership	影响权重 Weight
立地条件	海拔/m	“︵”型	500	1 600	800~1 400				0.196 2
	坡度/(°)	“︵”型	5	35	15~25				0.116 9
	坡向/(°)	“︵”型	45	315	135~225				0.053 8
	土壤类型	概念型				红壤	适宜	1	0.303 4
						岩性土	较适宜	0.67	
						潮土	一般适宜	0.33	
						水稻土	一般适宜	0.33	
土壤理化性质	pH	“︵”型	4.0	6.5	4.5~5.5				0.139 4
	N/%	“S”型	0.03	0.35					0.037 5
	P/%	“S”型	0.01	0.15					0.037 5
	K/%	“S”型	0.25	2.70					0.037 5
	Zn/%	“S”型	0.004	0.010					0.016 2
	TOC/%	“S”型	0.6	4.0					0.065 2

适宜性评价图(图6)。

结合前期已有的区域内梅罗综合污染指数评价结果(图7),将轻度污染和中度污染的区域划归为不适宜区域,以此得出区域茶叶种植土壤适宜性区划。

从区划结果(图8)来看,百丈镇和鸬鸟镇大部分区域、黄湖镇北部及东南部、瓶窑镇西部、径山镇西部、中泰街道南部、闲林街道南部、余杭街道中部偏西南部为径山茶叶种植的高度适宜区域,占余杭区总面积的14.3%。百丈镇、鸬鸟镇及黄湖镇三镇接壤处、中泰街道中南部、闲林街道中南部、余杭街道西南部为径山茶叶种植的中度适宜区,占总面积的13.4%。而目前径山茶叶种植区主要集中在径山镇西北部,仍有大面积茶叶种植高度适宜区域可进一步开发利用。余杭区百丈镇及鸬鸟镇将会是扩大径山茶叶种植面积、提高余杭区茶叶产量的重点开发区域。

3 结论

本研究以余杭区径山茶叶为主要对象,考虑茶叶特色营养成分,充分利用余杭区土壤地球化学调查数据,建立了适生模型并提出了种植区划建议。主要结

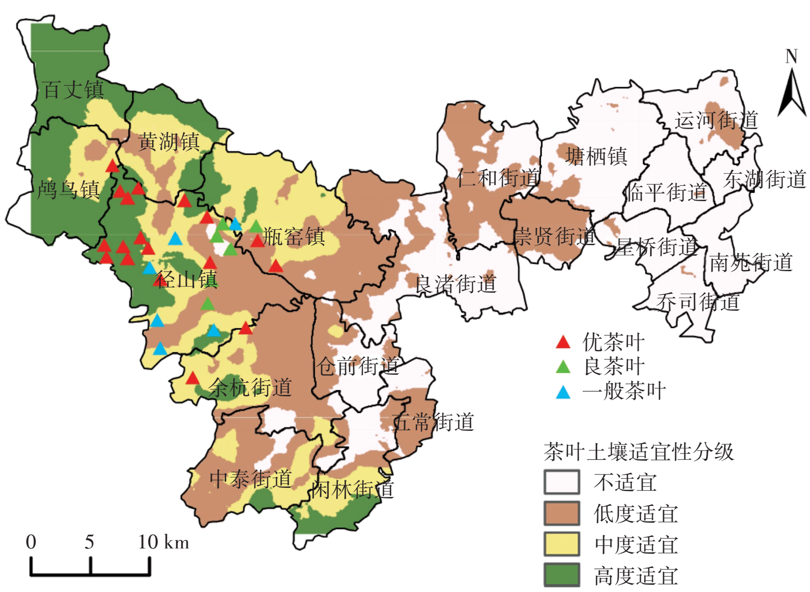

图6 茶叶种植适宜性评价图

Figure 6 Evaluation of tea planting suitability

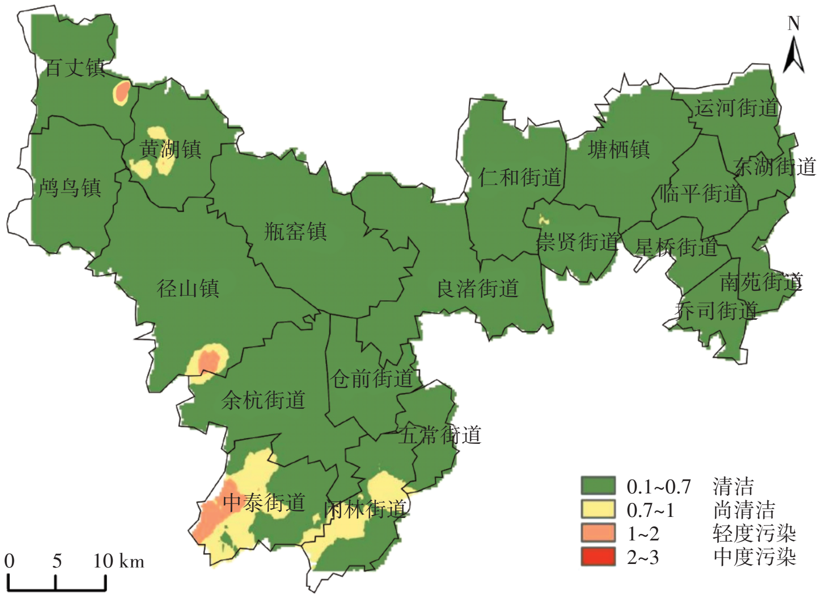

图7 余杭区内梅罗综合污染指数评价图

Figure 7 Evaluation of Nemerow comprehensive pollution index in Yuhang District

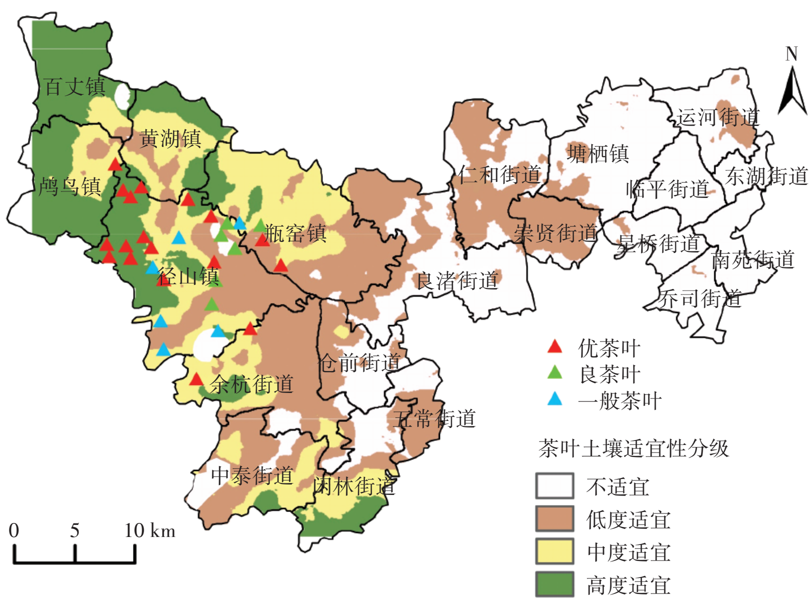

图8 余杭区茶叶种植区划图

Figure 8 Regional chart of tea planting in Yuhang District

论如下：

（1）以茶叶中茶多酚、游离氨基酸及水浸出物为茶叶品质的主要评价指标，将径山茶叶样品分为优、良、一般三级。样品中以优质茶叶居多，且优质茶叶主要分布于径山镇西北部丘陵地区。

（2）采用层次分析法，以土壤类型、海拔、坡度、坡向、pH、TOC、N、P、K、Zn这10项指标为决策层，土壤理化性质和土壤立地条件为中间层，茶叶土壤种植适宜性为目标层建立判断矩阵。通过德尔菲法、文献查阅法以及专家打分，确定土壤类型、海拔高度、土壤pH、坡度、土壤TOC及坡向是茶叶适生模式主要宏观影响因子，N、P、K、Zn元素的影响次之。

（3）余杭区茶叶种植区划结果表明，百丈镇和鸬鸟镇适宜扩大径山茶叶种植面积，有望成为提高余杭区茶叶产量的重点区域。

参考文献

[1] BRISSON N, KING D, NICOULLAUD B, et al. A crop model for land

suitability evaluation: A case study of the maize crop in France[J]. *European Journal of Agronomy*, 1992, 1(3): 163-175.

[2] WAZIR J S. Evaluation of *Eustoma/Lisianthus* cultivars for assessing their suitability as prominent new cut flower crop under mid hill conditions of H. P.[J]. *International Journal of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine*, 2014, 2(1): 105-110.

[3] 石淑芹, 陈佑启, 李正国, 等. 基于空间插值分析的指标空间化及吉林省玉米种植区划研究[J]. 地理科学, 2011, 31(4): 408-414. SHI S Q, CHEN Y Q, LI Z G, et al. Spatial simulation of indices based on spatial interpolation technique and regional planning for planting maize in Jilin Province[J]. *Scientia Geographical Sinica*, 2011, 31(4): 408-414.

[4] KUO M S, TZENG G H, HUANG W C. Group decision-making based on concepts of ideal and anti-ideal points in a fuzzy environment[J]. *Mathematical & Computer Modelling*, 2007, 45(3/4): 324-339.

[5] 千怀遂, 焦士兴, 赵峰. 河南省冬小麦气候适宜性变化研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 503-507. QIAN H S, JIAO S X, ZHAO F. Climate suitability change of winter wheat in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 503-507.

[6] 赵峰, 千怀遂, 焦士兴. 农作物气候适宜度模型研究——以河南省冬小麦为例[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 77-82. ZHAO F, QIAN H S, JIAO S X. The climatic suitability model of crop: A case study of winter wheat in Henan Province[J]. *Resources Science*, 2003, 25(6): 77-82.

[7] 杜红悦, 李京. 土地农业适宜性评价方法研究与系统实现——以攀枝花为例[J]. 资源科学, 2001, 23(5): 41-45. DU H Y, LI J. Agricultural land suitability evaluation: Model and system implementation: A case study of Panzhihua[J]. *Resources Science*, 2001, 23(5): 41-45.

[8] RARICK R, SIMON D, VILLASECA F E, et al. Biogeography-based optimization and the solution of the power flow problem[C]. IEEE International Conference on Systems, 2009.

[9] AHAMED T R N, RAO K G, MURTHY J S R. GIS-based fuzzy membership model for crop-land suitability analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2000, 63(2): 75-95.

[10] BEZDEK J C, CHRISTIAN J. Fuzzy mathematics in pattern classification[D]. Columbia: University of Missouri, 1973.

[11] BUCKLEY J J. The fuzzy mathematics of finance[J]. *Fuzzy Sets & Systems*, 1987, 21(3): 257-273.

[12] 张静, 冯金侠, 卞新民, 等. 作物生态适宜性变权评价方法[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(1): 13-17. ZHANG J, FENG J X, BIAN X M, et al. Variable weight approach in evaluation of crops ecological adaptability[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(1): 13-17.

[13] HOLZKÄMPER A, CALANCA P, FUHRER J. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2013, 168: 149-159.

[14] 卢恩双, 孙全敏, 梁晓茹. 作物生态适宜性模糊综合评判中权重矩阵量化方法及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(6): 70-76. LU E S, SUN Q M, LIANG X R. Quantification method of weight matrix in fuzzy synthetically judgment for corps ecology suitability and its application[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2004, 34(6): 70-76.

[15] 詹向雯, 杨永侠, 李绍明. 玉米新品种适宜性评价方法研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(1): 303-304. ZHAN X W, YANG Y X, LI S M. Study on suitability evaluation method of new maize varieties[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(1): 303-304.

[16] 龚子同, 黄标. 我国土壤地球化学及其在农业生产中的意义[J]. 地理科学, 1998, 18(1): 1-9. GONG Z T, HUANG B. Pedogeochemistry of China and its significance in agriculture[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(1): 1-9.

[17] 武春林, 王瑞廷, 丁坤, 等. 中国土壤质量地球化学调查与评价的研究现状和进展[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 240-252. WU C L, WANG R T, DING K, et al. Geochemical survey and evaluation on soil quality in China: Research status and advances[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(3): 240-252.

[18] 张洪涛. 浅论地质工作的发展趋势[J]. 西部资源, 2004(1): 14-17. ZHANG H T. A brief discussion on the development trend of geological work[J]. *Western Resources*, 2004(1): 14-17.

[19] 杨忠芳, 成杭新, 奚小环, 等. 区域生态地球化学评价思路及建议[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 687-693. YANG Z F, CHENG H X, XI X H, et al. Regional ecological geochemical assessment: Ideas and prospects[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(8): 687-693.

[20] 刘爱华, 杨忠芳, 张本仁, 等. 生态地球化学评价中建立土壤元素地球化学背景方法研究:以太原盆地潮土中Hg、Cd、Pb、As为例[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 273-280. LIU A H, YANG Z F, ZHANG B R, et al. On evaluation of elemental background in topsoil: With Hg, Cd, Pb and As in fluvio aquatic soil of Taiyuan basin as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 273-280.

[21] 奚小环. 生态地球化学与生态地球化学评价[J]. 物探与化探, 2004, 28(1): 10-15. XI X H. Eco-geochemical research and eco-geochemical evaluation[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 28(1): 10-15.

[22] 王平, 奚小环. 全国农业地质工作的蓝图——"农业地质调查规划要点"评述[J]. 中国地质, 2004, 31(增刊): 11-15. WANG P, XI X H. The blueprint of national agricultural geology work[J]. *Geology in China*, 2004, 31(Suppl): 11-15.

[23] 王传琛. 杭州市城市土地类型划分[J]. 地理研究, 1991, 10(2): 92-98. WANG C C. An analysis of geographical environment and land-type classification in the city of Hangzhou[J]. *Geographical Research*, 1991, 10(2): 92-98.

[24] 王传琛, 刘际松. 杭州城市气候[J]. 地理学报, 1982, 37(2): 164-173. WANG C C, LIU J S. The climate of the city of Hangzhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1982, 37(2): 164-173.

[25] 陈静, 陈林. 杭州径山茶文化旅游深度开发初探[J]. 农业考古, 2008(5): 85-90. CHEN J, CHEN L. A preliminary study on the in-depth development of Hangzhou Jingshan tea culture tourism[J]. *Agricultural Archaeology*, 2008(5): 85-90.

[26] 薛杨晨, 熊孟秋, 李泰奇, 等. 价值链视角下茶叶产业链现状调查及分析——以浙江省径山茶为例[J]. 贵州民族大学学报(哲学社会科学版), 2013(2): 171-175. XUE Y C, XIONG M Q, LI T Q, et al. The industry chain of tea from the perspectives of value chain: Present situation and analysis: A case study of Jingshan tea of Zhejiang

Province[J]. *Journal of Guizhou Minzu University*(*Philosophy and Social Science*), 2013(2):171-175.

[27] 杜继煜, 白岚, 白宝璋. 茶叶的主要化学成分[J]. 农业与技术, 2003, 23(1):53-55. DU J Y, BAI L, BAI B Z. The main chemical components of tea[J]. *Agriculture & Technology*, 2003, 23(1):53-55.

[28] 胡思, 李华, 陆启玉. 茶多酚在食品工业中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(7):1-4. HU S, LI H, LU Q Y. Application progress of tea polyphenols in the field of food industry[J]. *Cereals & Oils*, 2015, 28(7):1-4.

[29] 帅玉英, 张涛, 江波, 等. 茶氨酸的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(11):117-123. SHUAI Y Y, ZHANG T, JIANG B, et al. Research progress of L-theanine[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2008, 34(11):117-123.

[30] 徐准盾, 龚淑英. 茶汤浓度对绿茶水浸出物含量及其感官审评的影响[J]. 茶叶, 2005, 31(3):166-169. XU Z D, GONG S Y. Effects of infusing time and water temperature on the water extracts and the sensory evaluation of green tea[J]. *Journal of Tea*, 2005, 31(3):166-169.

[31] 陆锦时, 魏芳华, 李春华. 茶树品种主要化学成分与品质关系的研究[J]. 西南农业学报, 1994(增刊):1-5. 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(Suppl):1-5.

[32] 王季方, 卢正鼎. 模糊控制中隶属度函数的确定方法[J]. 河南科学, 2000, 18(4):348-351. WANG J F, LU Z D. The determine method of membership function in fuzzy control[J]. *Henan Science*, 2000, 18(4):348-351.

[33] 郭桂义, 王广铭. 我国茶叶产品国家标准理化指标分析[J]. 中国茶叶加工, 2014(3):45-52. GUO G Y, WANG G M. Analysis of physical and chemical indicators in Chinese tea product national standards [J]. *China Tea Processing*, 2014(3):45-52.

[34] 何青元, 张亚萍, 王平盛. 云南普洱茶感官品质与内含成分关系研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(11):38-41. HE Q Y, ZHANG Y P, WANG P S. Study on the relationship between sensory quality and inner components of Puerh tea in Yunnan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(11):38-41.

[35] 李玲, 冯新伟, 路婕, 等. 基于不同标准的郑州市农产品产地土壤环境质量评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8):89-94. LI L, FENG X W, LU J, et al. Evaluation of soil environmental quality in agricultural production areas based on different standards in Zhengzhou City[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(8):89-94.

[36] 李润林, 姚艳敏, 唐鹏钦. 农产品产地土壤环境质量评价研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6):296-300. LI R L, YAO Y M, TANG P Q. Research progress on evaluation of soil environmental quality in agricultural production area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(6):296-300.

[37] 李东坡, 武志杰, 梁成华. 土壤环境污染与农产品质量[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4):172-177. LI D P, WU Z J, LIANG C H. Soil environmental pollution and agricultural product quality[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4):172-177.

[38] 李相楹, 张维勇, 刘峰, 等. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3):19-24. LI X Y, ZHANG W Y, LIU F, et al. The distribution characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus at different altitudes in Fanjingshan Mountain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3):19-24.

[39] 李相楹, 张珍明, 张清海, 等. 茶园土壤氮磷钾与茶叶品质关系研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, 41(23):56-60. LI X Y, ZHANG Z M, ZHANG Q H, et al. Research progress of relationship among nitrogen, phosphorus, potassium and tea quality[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(23):56-60.

[40] 莫治雄. 茶树微量元素营养研究综述[J]. 广东茶业, 1995(1):6-14. MO Z X. Summary of research on tea tree trace element nutrition [J]. *Guangdong Tea*, 1995(1):6-14.

[41] 李丹, 曹潘荣. 浅谈微肥对茶树高产优质的影响[J]. 广东茶业, 2014(3):9-12. LI D, CAO P R. Talking about the influence of trace fertilizer on the high yield and quality of tea trees[J]. *Guangdong Tea*, 2014(3):9-12.

[42] 马慧群, 阮宇成. 锌与茶树生长代谢的关系及田间喷锌效果[J]. 茶叶科学, 1987, 7(1):35-40. MA H Q, RUAN Y C. Relationship between zinc and the metabolism of tea plant[J]. *Journal of Tea Science*, 1987, 7(1):35-40.

[43] 阮建云, 吴洵. 钾、镁营养供应对茶叶品质和产量的影响[J]. 茶叶科学, 2003, 23(增刊):21-26. RUAN J Y, WU X. Productivity and quality response of tea to balanced nutrient management including K and Mg[J]. *Journal of Tea Science*, 2003, 23(Suppl):21-26.

[44] 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. ZHAO M. Effect of copper and zinc nutrition on the biochemical quality of tea[D]. Kunming:Yunnan Agricultural University, 2016.

[45] 段继春. 锌对茶树生长发育的影响及其与茶叶品质关系的研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2005. DUAN J C. Effects of zinc on tea plant growth and tea leaf quality[D]. Changsha:Hunan Agricultural University, 2005.