doi: 10.11720/wtyht.2026.0049
蒙勇. 广西三江洋溪—同乐地区土壤与典型茶园地球化学特征[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 804-814. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0049
Meng Y. Geochemical characteristics of soils and representative tea gardens in the Yangxi-Tongle area, Sanjiang, Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 804-814. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0049

广西三江洋溪—同乐地区土壤与典型茶园地球化学特征

蒙 勇
(广西壮族自治区三〇五核地质大队, 广西 柳州 545005)

摘 要: 为了解广西三江洋溪—同乐地区土壤酸碱度、土壤营养有益元素丰缺程度、根系土—茶叶系统元素迁聚特征, 基于广西三江洋溪—同乐地区 315 km^2 范围内 881 件农用地表层土壤地球化学数据以及 14 组茶叶—根系土数据, 统计分析得出本区表层土壤为酸性—强酸性, 茶树根系土均为强酸性土壤, 土壤中 Mn、Se、Mo 分异性较强, 土壤元素具有明显的 N-Corg-S 组合和 Cu-Mo-Se 组合特征。研究结果表明, 本区全氮、全钾、有机质、硫、硼、钼等养分主要处于较丰富—丰富等级, 全磷、钙、镁、铁、锰、铜、锌、氟等养分主要处于较缺乏—缺乏等级, 土壤硒含量丰富; 茶叶对土壤 Zn、Cu、Cd、B、Ni、F 的生物富集能力相对较强, 对 As、Pb、Cr、Ge 的生物富集能力相对较弱。研究指出, 本区茶叶 Se 含量适中, Cd、As、Hg 含量低, Pb 含量未超标, 茶叶质量总体安全, 该研究成果可进一步为当地茶叶产业健康发展提供地球化学依据。

关键词: 土壤; 茶叶; 地球化学; 洋溪—同乐地区; 三江; 广西
中图分类号: X142; X825; P632; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0804-11

0 引言

洋溪—同乐一带是广西三江县茶叶主要种植区, 处于东南地洼区地槽构造层分布区块中[1], 具有“高山出好茶”的有利自然生态环境[2]。茶叶含有丰富的微量元素和有机营养成分, 具有清心明目、美容减肥、抗衰老、防癌、降血压等多重独特功效[3], 在促进农业增效、农民增收, 推动乡村全面振兴中扮演着重要角色。茶叶生长和品质不仅受降雨量、光照、温度等气候条件以及施肥管理等因素影响, 而且受成土地质和地球化学背景的制约[4-5]。本文对洋溪—同乐地区 315 km^2 农用地及其典型茶园开展了系统的地球化学调查, 查明了表层土壤酸碱度、营养有益元素含量特征, 评价了土壤养分丰缺现状, 探讨了根系土与茶叶之间微量元素的迁聚规律, 旨在为当地茶叶种植规划、茶叶生产提供地球化学支撑。

1 研究区概况

1.1 自然地理

研究区位于广西北部三江县洋溪乡至同乐乡一带(图 1), 面积约 315 km^2。该区属低山丘陵地貌, 地貌类型分为山地、丘陵、V 形谷、河谷、山前梯地等。水系纵横交错, 水能资源丰富, 其中浔江、都柳江两主干河流由北向南于老堡汇入融江。该区属亚热带南岭湿润区、山地谷地气候区, 雨量充沛, 寒暑分明, 四季宜耕。区内发育天然植被和人工植被, 其中天然植被主要有常绿阔叶林、阔叶林、水源林、灌木林、次生林等, 林下植物以蕨类的黑白科为主, 间有小竹类分布; 人工植被主要是人工林, 主要有杉木林、竹林等。土地利用类型以林地和耕地(水田、旱地和园地)为主, 土壤类型有水稻土、红壤、黄壤、冲积土等, 成土母质有洪积物、河流冲积物、砂岩类残积物、硅质岩类残积物。农业以种植业为主, 粮食作

收稿日期: 2026-02-25; **修回日期**: 2026-04-21
基金项目: 广西壮族自治区自然资源厅项目“广西三江县土地质量地球化学评价”(桂国土资函〔2017〕1915 号)
作者简介: 蒙勇(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事土壤地球化学、环境地球化学研究工作。Email: my5183@163.com

物以水稻为主, 玉米、大豆、红薯等为辅; 经济作物以茶叶为主, 罗汉果、花生、药材等为辅; 其他作物有蔬菜、食用菌等。

1.2　地质背景

区内发育寒武系(Є)、震旦系(Z)、南华系(Nh)地层。寒武系主要为清溪组建造, 岩性为黑色炭质页岩、页岩夹砂岩、粉砂岩、灰岩、白云质灰岩。震旦系主要有陡山沱组和老堡组建造, 其中陡山沱组岩性为灰黑色、灰绿色页岩、硅质页岩、炭质页岩夹白云岩透镜体, 局部有结核状磷、锰及石煤层; 老堡组岩性为灰白—灰黑色薄—中厚层状硅质岩, 局部夹少量炭质页岩、炭质硅质页岩, 顶部夹含磷层。南华系主要有长安组、富禄组、黎家坡组建造, 其中长安组岩性下部为灰绿色砂质板岩、板岩夹中厚层变质砂岩、含砾砂岩, 上部为灰绿色块状含砾泥岩、含砾砂岩夹砂泥岩; 富禄组岩性为灰绿色厚层状岩屑质砂岩、长石石英砂岩、泥岩, 局部夹含砾砂岩、透镜状白云岩, 底部为含铁页岩, 顶部为灰黑色页岩; 黎家坡组岩性主要为灰绿、浅紫色块状砾质砂泥岩、含砾泥岩, 中上部夹浅紫色泥岩、长石砂岩、含锰白云岩。研究区发育一套趋于 NE—NNE 向的构造体系, 未见岩浆岩出露。

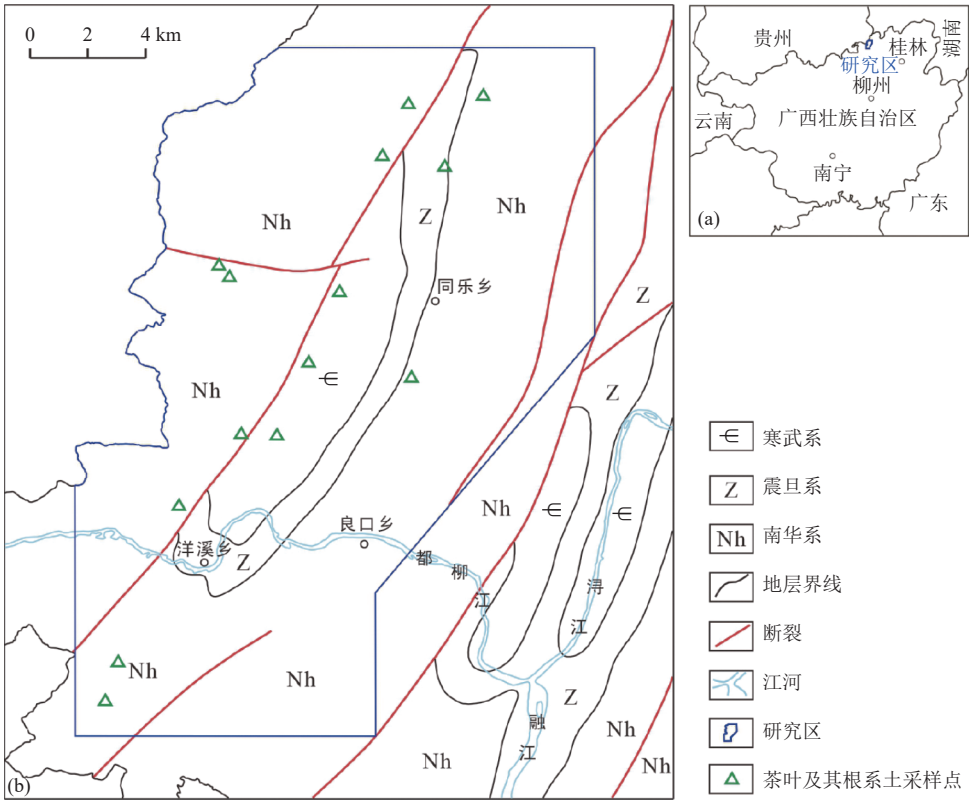


图 1　研究区位置示意(a)及采样点位分布(b)

Fig. 1　Location illustration of the study area (a) and distribution of sampling points (b)

2　样品采集与分析

2.1　表层土壤和根系土样品采集

本次区域调查控制面积约 315 km^2, 共采集了 881 件表层土壤样品。表层土壤样多布设在农用地中, 按照 4 个点/km^2 布设, 采集地表 0～20 cm 的垂向连续土壤柱, 以代表性为原则, 以 GPS 定位点为中心, 向四周辐射在 20～50 m 范围内采集 4～6 个分样, 等份组合成一个混合样, 样重 1～2 kg; 采集茶叶样品时配套采集根系土样品, 采集地表 0～20 cm 的垂向连续土壤柱, 样重 1～2 kg。土壤样品经自然晾晒风干, 期间用木棒破碎, 充分过 10 目尼龙筛后, 取 200 g 送华北有色地质勘查局燕郊中心实验室, 取 50 g 采用电极法测定 pH 值, 取在小于 60 ℃ 恒温干燥箱内充分烘干后的 70 g 样品, 采用玛瑙球磨机研磨至 200 目, 测试 N、P、K_2O、Corg、CaO、MgO、S、TFe_2O_3、Mn、Cu、Zn、Mo、B、Se、F、Ge 等 16 项指标。土壤样品分析配套方法见表 1, 各项指标分析方法检出限、准确度、精密度等符合《多目标区域地球化学调查规范(1∶250 000)》(DZ/T 0258—2014)要求。

2.2　茶叶样品采集

选择典型茶园布设采集茶叶样品, 样点大致均

表 1 表层土壤、根系土样品元素分析配套方法

Table 1 The supporting analytical methods for elemental analysis of topsoil and rhizosphere soil samples

测试指标	处理方法	测定方法
TFe_2O_3、Mn、P	4.0 g样品, 粉末压片法	X射线荧光光谱法(XRF)
CaO、K_2O、MgO	0.1 g样品三酸溶样, 定容25 mL后直接测定	电感耦合等离子体光谱法(ICP-AES)
Cu、Zn、Mo、Ge	0.1 g样品三酸溶样, 定容25 mL后直接测定	电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)
Se	0.5 g样品硝酸、氢氟酸处理溶样, KBH_4还原、氢化法	原子荧光光谱法(AFS)
B	样品和缓冲剂1∶1混合, 垂直对电极摄谱法	发射光谱法(ES)
Corg	0.1 g样品盐酸处理, 温度控制在60～80 ℃, 溶样2 h以上	红外碳硫法
N	0.5 g样品, 硫酸分解加浓碱蒸馏	酸碱滴定容量法(VOL)
F	0.5 g样品碱熔分解、水浸洗, pH调节至6.8～7.2, 加柠檬酸三乙醇胺	离子选择电极法(ISE)
S	0.2 g样品经王水溶解, 定容25 mL后直接测定	电感耦合等离子体光谱法(ICP-AES)
pH	10 g样品水浸取, 直接测定	pH计电极法(ISE)

匀分布于研究区(图 1)。茶叶样品采集方法为: 在 0.1～0.2 hm^2 的采样单元内选取 15～20 个植株, 每株茶树主要采集一芽三叶、一芽二叶、一芽一叶等嫩叶组成混合样, 鲜重约 1 000 g。样品采集后, 及时送广西地质矿产测试研究中心实验室, 用自来水冲净泥沙, 再用去离子水洗净, 自然晾干, 称量并记录湿重, 放入干净托盘中, 于 55 ℃ 烘箱中烘干至恒重, 称量并记录下干重, 计算含水率。先取少量烘干后的干基茶叶样品放入手提式中药粉碎机中破碎约 2 min 后弃掉, 再取不超过 300 g 的样品进行破碎。将样品充分破碎至小于 20 目后, 过筛, 装入塑料瓶, 盖上盖子, 于干燥通风环境中保存, 送实验室测试 As、B、Cd、Cr、Cu、F、Ge、Hg、I、Mo、Ni、Se、Pb、Zn 等 14 项指标, 各指标分析配套方法见表 2, 分析方法的检出限、精密度、准确度满足《生态地球化学评价样品分析方法和技术要求》(DD 2005-03)、《区域生态地球化学评价样品分析技术要求补充规定》要求。

表 2 茶叶样品分析方法配套方案

Table 2 Analytical method package for tea samples

测试指标	样品处理方法	分析方法
As、B、Cd、Cr、Pb、I、Cu、Zn、Ni、Mo、Ge	微波消解法	电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)
Se、Hg	微波消解法	原子荧光光谱法(AFS)
F	扩散法	F试剂分光光度法

3 表层土壤地球化学特征

3.1 土壤酸碱度

按照土壤酸碱度分级标准[6], 分类统计研究区表层土壤 pH 值(表 3)。结果表明, pH 值介于<5.0 的强酸性土壤面积为 94.39 km^2, 占研究区总面积的 29.97%; pH 值介于 5.0～6.5 之间的酸性土壤面积为 218.82 km^2, 占研究区总面积的 69.47%; pH 值介于 6.5～7.5 之间的中性土壤面积为 1.79 km^2, 占研究区总面积的 0.57%。

总之, 本区表层土壤 pH 值介于 3.68～7.15 之间, 以酸性为主, 强酸性次之, 个别地段出现中性土壤。

3.2 土壤营养有益元素

3.2.1 土壤营养有益元素含量特征

表层土壤 N、P、K_2O、Corg、CaO、MgO、S、TFe_2O_3、Mn、Cu、Zn、Mo、B、Se、F、Ge 等原始分析数据的最小值、最大值、算术平均值、标准离差、变异系数等参数统计见表 4。由此可见:

1)表层土壤中 K_1>1 的有 N、P、Corg、CaO、MgO、S、Fe_2O_3、Mn、Cu、Zn、Mo、Se、F、Ge, 其中 K_1≥1.2 的有 P、S、Mn、Cu、Mo、Se, 表明本区土壤中这些元素含量均值明显高于广西三江县表层土壤

表 3 研究区土壤酸碱度分级统计

Table 3 The Statistical classification of soil pH in the study area

参数	分级				
	强酸性	酸性	中性	碱性	强碱性
pH标准值	<5.0	5.0～<6.5	6.5～<7.5	7.5～<8.5	≥8.5
pH值变化范围	3.68～4.99	5.0～6.15	6.5～7.15		
样本数	264	612	5		
面积/km^2	94.39	218.82	1.79		
面积占比/%	29.97	69.47	0.57		

表 4　研究区土壤元素含量参数统计 (*n*=881)

Table 4　The Statistical parameters of soil element contents in the study area(*n*=881)

指标	最小值	最大值	算术平均值	标准离差	变异系数 (C_V)	K_1	K_2	广西三江县表层土壤背景值[7]	广西表层土壤背景值[8]
N	593	5 806	2 157	790	0.37	1.17	1.54	1844	1 403
P	86	6 244	466	408	0.88	1.21	0.69	385	674
K_2O	0.28	4.11	2.46	0.48	0.19	0.97	1.96	2.55	1.256
Corg	0.4	5.1	2.0	0.78	0.39	1.16	1.45	1.7	1.38
CaO	0.07	1.17	0.16	0.08	0.48	1.14	0.76	0.14	0.211
MgO	0.25	2.24	0.75	0.23	0.31	1.12	1.45	0.67	0.521
S	85	4 516	446	331	0.74	1.29	1.72	346	259
TFe_2O_3	1.43	11.15	4.04	1.36	0.34	1.05	0.72	3.86	5.62
Mn	43	3 691	252	282	1.12	1.43	0.92	177	274
Cu	5.1	234.0	23.8	20.3	0.85	1.35	0.94	17.6	25.37
Zn	21.5	871.3	72.3	50.9	0.70	1.10	1.02	65.5	71
Mo	0.30	87.13	2.04	6.11	2.99	3.65	1.81	0.56	1.13
B	13	150	59	20.92	0.35	0.98	0.95	61	62.27
Se	0.16	14.41	0.87	1.46	1.68	1.93	1.47	0.45	0.59
F	175	1 655	515	190.9	0.37	1.18	1.05	438	491
Ge	0.6	3.0	1.6	0.22	0.14	1.02	1.12	1.6	1.45

注: 氧化物及Corg含量单位为%, 其他元素为10^{-6}; K_1为本区元素含量均值与广西三江县表层土壤背景值的比值; K_2为本区元素含量均值与广西表层土壤背景值的比值。

背景值。

2)表层土壤中 K_2>1 的有 Zn、F、Ge、MgO、Corg、Se、N、S、Mo、K_2O, 其中 K_2≥1.2 的有 N、K_2O、Corg、MgO、S、Mo、Se, 表明本区土壤中这些元素含量均值明显高于广西表层土壤背景值。

3)变异系数(C_V)是描述土壤特性参数空间变异性程度的指标[9], 按照 Nielsen 分级标准[10], C_V<0.1 为弱变异性、0.1≤C_V≤1 为中等变异性、C_V>1 为强变异性。由表 4 可见, 研究区表层土壤 Ge、K_2O、MgO、TFe_2O_3、B、N、F、Corg、CaO、Zn、S、Cu、P 具有中等变异性, Mn、Se、Mo 具有强变异性。总体上, C_V 值反映研究区中这些指标存在不同程度的富集现象, 其中 Mn、Se、Mo 变异性较强, 受环境影响程度较大。

3.2.2　元素组合及相关性

1)元素相关性特征

相关分析主要是研究相关系数的表现形式和密切程度[11], 元素之间相关性是判断地质介质中元素组合关系的重要依据。为了研究表层土壤元素之间的内在联系, 利用 SPSS 软件对原始数据进行变量间的 Pearson 相关分析(表 5), 按照相关系数 r 的判别标准[11]: 无相关(|r|<0.3)、低度相关(0.3≤|r|<0.5)、中度相关(0.5≤|r|<0.8)、高度相关(0.8≤|r|<1)进行统计分析, 结果表明: 大量、中量植物营养指标 N、Corg、S 之间呈中度—高度正相关, 微量营养元素与健康有益元素 Cu、Mo、Se 之间呈中度—高度正相关, 反映了这些元素之间存在显著的伴生关系。此外, 其他大量、中量、微量营养元素及健康有益元素之间也存在不同程度的相关性, 表明其在次生地球化学作用过程中的共、伴生特性。

2)元素组合特征

一般情况下, 某变量在某主成分上载荷的相对值越大, 说明该变量与该主成分的相关性越强[12]。显然, 与某个土壤主成分显著相关的一组元素表征其是该主成分的元素组合。利用 SPSS 软件, 采用主成分最大方差法进行因子分析, 提取 5 个因子的旋转成分矩阵(表 6)。其中, F1 因子的正载荷指标主要是 N、Corg、CaO、S, 主要反映了土壤中大量与中量营养元素组合; F2 因子的元素组合代表是 Cu、Mo、Se, 主要反映了土壤中微量营养元素与健康元素组合; F3 因子的元素组合代表是 Mn、Zn、P, 主要反映了土壤中微量营养元素与大量营养元素组合; F4 因子的元素组合代表是 MgO、F、Ge, 主要反映了土壤中健康元素与中量营养元素组合; F5 因子主成分仅与 B 显著正相关。

综上可见, 土壤中养分元素之间存在一定程度的相关性, 其中存在显著相关性的两个元素组合为 N、Corg、S 和 Cu、Mo、Se。

3.3　土壤养分指标丰缺程度

土壤养分是由土壤提供且能直接或经转化后被植物根系吸收的矿质营养成分[12], 是土壤肥力的物质基础[13]。土壤养分主要包括植物大量营养元素(氮、磷、钾、有机质)、中量营养元素(钙、镁、硫)、微量营养元素(铁、锰、铜、锌、硼、钼)。此外, 与动

表 5 研究区土壤地球化学指标相关系数(n=881)

Table 5 The correlation coefficients of soil geochemical indicators in the study area (n=881)

指标	N	P	K_2O	Corg	CaO	MgO	S	TFe_2O_3	Mn
N	1	0.371**	−0.091**	0.934**	0.533**	0.250**	0.676**	−0.319**	0
P	0.371**	1	−0.189**	0.267**	0.406**	0.361**	0.236**	0.140**	0.265**
K_2O	−0.091**	−0.189**	1	−0.151**	−0.008	0.161**	−0.128**	0.152**	0.117**
Corg	0.934**	0.267**	−0.151**	1	0.461**	0.146**	0.630**	−0.306**	−0.044
CaO	0.533**	0.406**	−0.008	0.461**	1	0.479**	0.470**	−0.142**	0.204**
MgO	0.250**	0.361**	0.161**	0.146**	0.479**	1	0.259**	0.249**	0.305**
S	0.676**	0.236**	−0.128**	0.630**	0.470**	0.259**	1	−0.264**	−0.061
TFe_2O_3	−0.319**	0.140**	0.152**	−0.306**	−0.142**	0.249**	−0.264**	1	0.491**
Mn	0.000	0.265**	0.117**	−0.044	0.204**	0.305**	−0.061	0.491**	1
Cu	0.361**	0.742**	−0.165**	0.213**	0.399**	0.614**	0.384**	0.261**	0.340**
Zn	0.368**	0.586**	0.045	0.234**	0.403**	0.498**	0.303**	0.126**	0.429**
Mo	0.188**	0.461**	−0.369**	0.126**	0.055	0.271**	0.232**	0.110**	0.053
B	0.264**	0.208**	0.173**	0.145**	0.188**	0.281**	0.240**	0.156**	0.204**
Se	0.314**	0.535**	−0.400**	0.245**	0.187**	0.326**	0.364**	0.093**	0.051
F	0.220**	0.253**	0.192**	0.115**	0.393**	0.707**	0.225**	0.312**	0.303**
Ge	−0.100**	−0.077*	0.305**	−0.120**	−0.089**	0.276**	−0.040	0.496**	0.143**
pH	0.168**	0.146**	0.134**	0.131**	0.599**	0.191**	−0.010	−0.258**	0.151**

指标	Cu	Zn	Mo	B	Se	F	Ge	pH
N	0.361**	0.368**	0.188**	0.264**	0.314**	0.220**	−0.100**	0.168**
P	0.742**	0.586**	0.461**	0.208**	0.535**	0.253**	−0.077*	0.146**
K_2O	−0.165**	0.045	−0.369**	0.173**	−0.400**	0.192**	0.305**	0.134**
Corg.	0.213**	0.234**	0.126**	0.145**	0.245**	0.115**	−0.120**	0.131**
CaO	0.399**	0.403**	0.055	0.188**	0.187**	0.393**	−0.089**	0.599**
MgO	0.614**	0.498**	0.271**	0.281**	0.326**	0.707**	0.276**	0.191**
S	0.384**	0.303**	0.232**	0.240**	0.364**	0.225**	−0.040	−0.010
TFe_2O_3	0.261**	0.126**	0.110**	0.156**	0.093**	0.312**	0.496**	−0.258**
Mn	0.340**	0.429**	0.053	0.204**	0.051	0.303**	0.143**	0.151**
Cu	1	0.648**	0.657**	0.395**	0.705**	0.512**	0.135**	0.019
Zn	0.648**	1	0.232**	0.348**	0.331**	0.390**	−0.06	0.172**
Mo	0.657**	0.232**	1	0.259**	0.865**	0.160**	0.014	−0.183**
B	0.395**	0.348**	0.259**	1	0.281**	0.395**	0.185**	−0.079*
Se	0.705**	0.331**	0.865**	0.281**	1	0.190**	0.043	−0.189**
F	0.512**	0.390**	0.160**	0.395**	0.190**	1	0.429**	0.144**
Ge	0.135**	−0.060	0.014	0.185**	0.043	0.429**	1	−0.155**
pH	0.019	0.172**	−0.183**	−0.079*	−0.189**	0.144**	−0.155**	1

注: “*”表示置信度为95%时, 显著相关; “**”表示置信度为99%时, 显著相关。

物和人体健康密切相关的健康元素(硒、碘、氟)常常是评价土壤质量的重要指标[14-16]。

3.3.1 大量营养元素

按照土壤养分分级标准[6], 研究区土壤中全氮、全磷、全钾、有机质丰缺分级结果见表 7, 主要表现为: 土壤全氮主要处于较丰富—丰富现状, 以一等(丰富)、二等(较丰富)为主; 土壤全磷主要处于较缺乏—缺乏现状, 以四等(较缺乏)、五等(缺乏)为主; 土壤全钾主要处于中等—较丰富现状, 以二等(较丰富)、三等(中等)为主; 土壤有机质主要处于中等—丰富现状, 以一等(丰富)、二等(较丰富)、三等(中等)为主。总之, 研究区土壤全氮、全钾、有机质养分等级主要处于中等—丰富现状, 全磷养分主要为较缺乏—缺乏现状。

3.3.2 中量营养元素

按照土壤养分分级标准[6], 对研究区土壤的中量营养元素钙、镁、硫进行丰缺评价, 结果见表 8, 主要表现为: 土壤钙处于缺乏现状, 绝大多数为五等(缺乏); 土壤镁处于较缺乏—缺乏现状, 绝大多数为四等(较缺乏)和五等(缺乏); 土壤硫主要处于较丰富—丰富现状, 以一等(丰富)和二等(较丰富)为主。此外还发现, 局部地区土壤硫超过上限值。综上可见, 研究区土壤硫主要处于较丰富—丰富现状, 土壤钙、镁处于较缺乏—缺乏现状。

3.3.3 微量营养元素

按照土壤养分分级标准[6] 对研究区土壤中 Fe、Mn、Cu、Zn、B、Mo 等微量营养元素进行评价分级, 结果见表 9。主要特征为: 土壤铁主要处于缺乏现

表 6　研究区土壤地球化学指标的主成分旋转矩阵

Table 6　The rotated component matrix of principal components for soil geochemical indicators in the study area

指标	主成分				
	F1	F2	F3	F4	F5
N	0.90	0.14	0.15	0.01	0.15
P	0.21	0.51	0.64	0.02	−0.03
K_2O	−0.07	−0.62	0.08	0.32	0.39
Corg	0.88	0.10	0.04	−0.05	0.08
CaO	0.63	−0.02	0.47	0.24	−0.24
MgO	0.22	0.16	0.44	0.70	−0.09
S	0.79	0.23	0.02	0.12	0.10
TFe_2O_3	−0.55	0.10	0.29	0.48	0.21
Mn	−0.21	−0.07	0.74	0.17	0.16
Cu	0.20	0.64	0.55	0.34	0.11
Zn	0.25	0.17	0.79	0.08	0.17
Mo	0.04	0.91	0.07	0.09	0.14
B	0.19	0.15	0.22	0.18	0.81
Se	0.18	0.90	0.12	0.12	0.12
F	0.19	0.05	0.32	0.79	0.08
Ge	−0.19	−0.02	−0.20	0.79	0.26

状, 以四等(较缺乏)和五等(缺乏)为主; 土壤锰主要处于缺乏现状, 绝大多数为五等(缺乏); 土壤铜主要处于缺乏现状, 以四等(较缺乏)和五等(缺乏)为主; 土壤锌主要处于缺乏现状, 以四等(较缺乏)和五等(缺乏)为主; 土壤钼主要处于中等—丰富现状, 以一等(丰富)、二等(较丰富)和三等(中等)为主; 土壤硼主要处于中等—丰富现状, 以一等(丰富)、二等(较丰富)、三等(中等)为主。此外, 局部地区锰、铜、锌、钼超过上限值。总之, 研究区土壤硼、钼养分主要处于中等—丰富现状, 氧化铁、锰、铜、锌养分主要处于缺乏现状。

3.3.4　健康元素

按照土壤健康元素分级标准[6], 对研究区土壤中硒、氟的分级统计结果见表 10。主要特征为: 研究区 74.69% 面积的土壤硒含量介于(0.401～2.81)×10^{-6}, 大面积分布富硒土地资源; 有 21.00% 面积的土壤硒含量介于(0.196～0.40)×10^{-6}, 处于中等等级; 仅有极少数面积土壤硒含量处于边缘和过剩等级。土壤氟含量较低, 含量等级以边缘—缺乏为主, 次之为中等、高等和过剩等级。

4　根系土—茶叶系统元素地球化学研究

4.1　根系土元素含量特征

研究区根系土样品中 As、B、Cd、Cr、Cu、F、Ge、Hg、I、Mo、Ni、Pb、Se、Zn、pH 等指标的地球化学统计参数见表 11, 叙述如下:

1)按照土壤酸碱度分级标准[5], 研究区茶园根系土 pH 值介于 3.79～4.94 之间, 属于强酸性土壤。

2)根系土重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量均值明显低于农用地土壤污染风险筛选值, 仅个别茶园 Cu 超出筛选值, 说明茶园土壤环境质量总体优良。

3)根系土 Se 含量介于(0.39~1.38)×10^{-6}, 均值为 0.68×10^{-6}, 绝大多数样本达到富硒土壤标准(0.40×10^{-6}<w(Se)≤3.0×10^{-6})。

4)根系土元素含量与表层土壤元素含量的比值

表 7　研究区土壤大量营养元素丰缺分级统计

Table 7　The statistical classification of macronutrient element abundance and deficiency in soils of the study area

指标		分级				
		一等(丰富)	二等(较丰富)	三等(中等)	四等(较缺乏)	五等(缺乏)
全氮	标准值/10^{-3}	>2	>1.5～2	>1～1.5	>0.75～1	≤0.75
	含量变化范围/10^{-3}	2.002～5.806	1.500～1.996	1.014～1.497	0.842～0.990	
	面积/km^2	159.47	93.68	53.99	7.15	0.72
	面积占比/%	50.62	29.74	17.14	2.27	0.23
全磷	标准值/10^{-3}	>1	>0.8～1	>0.6～0.8	>0.4～0.6	≤0.4
	含量变化范围/10^{-3}	1.007～6.244	0.801～0.991	0.601～0.785	0.401～0.599	0.086～0.400
	面积/km^2	12.87	10.01	21.10	112.63	158.39
	面积占比/%	4.09	3.18	6.70	35.75	50.28
全钾	标准值/10^{-3}	>25	>20～25	>15～20	>10～15	≤10
	含量变化范围/10^{-3}	25.004～34.097	20.010～24.973	15.252～19.977	10.463～14.958	2.342～9.894
	面积/km^2	33.97	152.32	102.26	21.10	5.36
	面积占比/%	10.78	48.35	32.46	6.70	1.70
有机质	标准值/10^{-3}	>40	>30～40	>20～30	>10～20	≤10
	含量变化范围/10^{-3}	40.01～88.68	30.07～40	20.13～29.99	12.10～19.88	6.4～9.1
	面积/km^2	89.03	87.24	108.69	29.32	0.72
	面积占比/%	28.26	27.70	34.51	9.31	0.23

表 8 研究区土壤中量营养元素丰缺分级统计

Table 8 The statistical classification of secondary nutrient element abundance and deficiency in soils of the study area

指标		分级					上限值
		一等(丰富)	二等(较丰富)	三等(中等)	四等(较缺乏)	五等(缺乏)	
氧化钙	标准值/%	>5.54	>2.68～5.54	>1.16～2.68	>0.42～1.16	≤0.42	
	含量变化范围/%			1.17	0.424～0.779	0.068～0.405	
	面积/km^2			0.36	2.86	311.78	
	面积占比/%			0.11	0.91	98.98	
氧化镁	标准值/%	>2.15	>1.7～2.15	>1.2～1.7	>0.7～1.2	≤0.7	
	含量变化范围/%	2.24		1.217～1.677	0.701～1.199	0.249～0.700	
	面积/km^2	0.36		13.94	166.26	134.44	
	面积占比/%	0.11		4.43	52.78	42.68	
硫	标准值/10^{-6}	>343	>270～343	>219～270	>172～219	≤172	≥2 000
	含量变化范围/10^{-6}	343.33～1 709.32	270.06～342.96	219.09～269.13	172.29～218.55	85.13～171.67	2 010.4～4 515.82
	面积/km^2	181.28	65.43	40.05	19.67	5.72	2.86
	面积占比/%	57.55	20.77	12.71	6.24	1.82	0.91

表 9 研究区土壤微量营养元素含量分级统计

Table 9 The statistical classification of micronutrient element contents in soils of the study area

指标		分级					上限值
		一等(丰富)	二等(较丰富)	三等(中等)	四等(较缺乏)	五等(缺乏)	
氧化铁	标准值/%	>5.3	>4.6～5.3	>4.15～4.6	>3.4～4.15	≤3.4	
	含量变化范围/%	5.31～11.15	4.61～5.29	4.15～4.60	3.41～4.14	1.43～3.4	
	面积/km^2	58.28	33.61	23.96	69.72	129.43	
	面积占比/%	18.50	10.67	7.60	22.13	41.09	
锰	标准值/10^{-6}	>700	>600～700	>500～600	>375～500	≤375	≥1 500
	含量变化范围/10^{-6}	706.81～1 481.79	600.5～693.06	593.54～597.7	378.15～497.85	42.95～374.76	1 568.57～3 691.25
	面积/km^2	12.16	7.15	7.51	17.88	267.09	3.22
	面积占比/%	3.86	2.27	2.38	5.68	84.79	1.02
铜	标准值/10^{-6}	>29	>24～29	>21～24	>16～21	≤16	≥50
	含量变化范围/10^{-6}	29.04～48.95	24.04～28.92	21.01～23.96	16.06～20.91	5.06～15.99	50.35～234.02
	面积/km^2	23.60	32.89	33.97	88.67	111.91	23.96
	面积占比/%	7.49	10.44	10.78	28.15	35.53	7.60
锌	标准值/10^{-6}	>84	>71～84	>62～71	>50～62	≤50	≥200
	含量变化范围/10^{-6}	84.01～199.6	71.02～83.65	62.04～70.98	50.06～62	21.54～49.95	200.64～871.25
	面积/km^2	144.00	161.00	149.00	220.00	191.00	16.00
	面积占比/%	16.35	18.27	16.91	24.97	21.68	1.82
钼	标准值/10^{-6}	>0.85	>0.65～0.85	>0.55～0.65	>0.45～0.55	≤0.45	≥4
	含量变化范围/10^{-6}	0.85～3.84	0.65～0.849 6	0.55～0.649 6	0.45～0.549 8	0.297～0.448	4.15～87.13
	面积/km^2	62.21	61.14	68.29	49.70	48.98	24.67
	面积占比/%	19.75	19.41	21.68	15.78	15.55	7.83
硼	标准值/10^{-6}	>65	>55～65	>45～55	>30～45	≤30	≥3 000
	含量变化范围/10^{-6}	65.12～150.18	55.06～64.99	45.11～54.99	30.25～44.94	13.13～29.97	
	面积/km^2	109.77	66.86	56.85	64.36	17.16	
	面积占比/%	34.85	21.23	18.05	20.43	5.45	

ER>1 的元素有 As、B、Cr、Cu、F、Ge、Ni, 表明长期的茶园种植管理使土壤中这些元素呈现一定的富集趋势; *ER*<1 的元素有 Cd、Hg、Mo、Pb、Se、Zn, 表明茶园土壤中这些元素呈现贫化趋势。这种元素贫化和富集并存的现象, 可能是种植管理与元素生物地球化学行为协同影响下元素活化迁移的结果。

5)依据 Nielsen 分级标准[10], 由表 11 可见, 根系土中 As、Mo、Ni、Cu、F、I、Zn、Se、Pb、Cr、Hg、B、Cd、Ge 变异系数 C_V 介于 0.124～0.759 之间, 均表现为中等变异特征, 反映根系土中这些指标受外界影

表 10　研究区土壤健康元素含量分级统计

Table 10　The statistical classification of health element contents in soils of the study area

指标		等级				
		缺乏	边缘	中等	高	过剩
硒	标准值/10^{-6}	≤0.125	>0.125～0.175	>0.175～0.40	>0.40～3.0	>3.0
	含量变化范围/10^{-6}		0.16	0.196～0.40	0.401～2.81	3.04～14.41
	面积/km^2		0.36	66.15	235.27	13.23
	面积占比/%		0.11	21.00	74.69	4.20
氟	标准值/10^{-6}	≤400	>400～500	>500～550	>550～700	>700
	含量变化范围/10^{-6}	175～399.91	400.23～499.95	500.45～549.24	550.4～696.52	704.39～1 655
	面积/km^2	70.79	133.72	26.46	46.84	37.19
	面积占比/%	22.47	42.45	8.40	14.87	11.80

表 11　茶园根系土地球化学指标统计参数

Table 11　The statistical parameters of geochemical indicators of tea garden root-zone soil

元素	样本数	最小值	最大值	算术平均值	标准离差	变异系数(C_V)	根系土均值与研究区表层土均值的比值(ER)	研究区表层土含量均值	风险筛选值[17]
As	14	3.2	20.7	8.6	6.56	0.759	1.25	6.9	40
B	14	43	114	70	23.36	0.335	1.18	59	
Cd	14	0.040	0.140	0.090	0.03	0.328	0.39	0.220	0.3
Cr	14	44.2	122.0	64.9	23.95	0.369	1.11	58.7	150
Cu	14	13.8	56.1	27.7	13.78	0.498	1.17	23.8	50
F	14	421	1 403	655	325.70	0.498	1.27	515	
Ge	14	1.7	2.6	2.1	0.26	0.124	1.26	1.6	
Hg	14	55	144	83	28.84	0.347	0.67	125	1 300
I	14	1.0	11.6	6.8	3.02	0.446			
Mo	14	0.51	2.99	1.07	0.71	0.661	0.53	2.04	
Ni	14	11.0	50.8	20.5	10.44	0.508	1.01	20.3	60
Pb	14	17.9	53.5	27.6	10.26	0.371	0.92	30.1	70
Se	14	0.39	1.38	0.68	0.26	0.384	0.78	0.87	
Zn	14	38.5	144.0	65.2	28.44	0.436	0.90	72.3	200

注: 氧化物及Corg含量单位为%, Hg含量单位为10^{-9}, 其他元素含量单位为10^{-6}。

响程度一般。

4.2　茶叶元素含量特征

研究区茶叶样品中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn、I、B、Mo、Se、Ge、F 的最小值、最大值、算术平均值、标准离差、变异系数等地球化学参数统计见表 12, 叙述如下:

1)相关研究表明[5], 茶树嫩叶相对富含 Cu、Ni、Zn 等元素。本研究采集的茶叶样品为嫩叶, 其元素含量顺序为 F>Zn>Cu>B>Ni>Cr>I>Pb>Cd>Se>As>Mo>Hg>Ge, 其中 F、Zn、Cu、B、Ni 含量相对较高, 可能是茶树嫩叶特征元素的具体反映。

2)茶叶元素变异系数呈现 F>Hg>Ge>Pb>Ni>Cd>Mo>Se>As>Zn>Cr>B>Cu>I, 按照变异系数 C_V>1(强变异)、0.1≤C_V≤1(中等变异)、C_V<0.1(弱变异)划分 3 个等级, 结果发现茶叶中 I 呈现弱变异特征, Hg、Ge、Pb、Ni、Cd、Mo、Se、As、Zn、Cr、B、Cu 具中等变异性特征, F 表现为强变异特征。

3)茶叶硒含量介于(0.034～0.13)×10^{-6}, 均值为 0.065×10^{-6}。对照中国农业行业标准《富硒茶》(NY/T 600—2002)[18]、广西地方标准《富硒农产品硒含量分类要求》(DB 45/1 061—2014)[19], 发现本区茶叶 Se 含量明显低于富硒茶叶要求((0.25～0.40)×10^{-6})。

4)茶叶 Pb 含量介于(0.066～0.25)×10^{-6}, 均值为 0.123×10^{-6}。对照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)标准要求[20], 发现本区茶叶中 Pb 含量明显低于 Pb 含量限量值(5×10^{-6}), 说明茶叶中 Pb 含量未超标。

4.3　土壤—茶叶系统元素迁聚特征

4.3.1　根系土与茶叶元素相关性分析

研究表明[21-22], 作物与根系土元素含量呈正相关反映交互关系以协同作用为主, 负相关则反映交互关系以拮抗作用为主。为探究根系土与茶叶之间微量元素含量的内在联系, 揭示根系土对茶叶微量元素的影响, 利用 SPSS 软件进行了根系土与茶叶元素含量的 Pearson 相关分析, 结果表明(表 13): 根系土 Cd 与茶叶 I 呈显著负相关, 反映根系土 Cd 对茶叶

表 12 茶叶微量元素含量统计参数

Table 12 The statistical parameters of trace element contents in tea leaves

元素	样本数	最小值/10^{-6}	最大值/10^{-6}	算术平均值/10^{-6}	标准离差	变异系数
As	14	0.035	0.074	0.044	0.011	0.257
B	14	13.80	27.30	18.06	3.726	0.206
Cd	14	0.009	0.090	0.056	0.024	0.434
Cr	14	0.13	0.27	0.195	0.043	0.220
Cu	14	12.50	23.90	18.21	3.213	0.176
F	14	5.14	242	55.53	80.08	1.442
Ge	14	0.001 4	0.009 4	0.003 1	0.002 4	0.758
Hg	14	0.001 2	0.016	0.005	0.004 1	0.874
I	14	0.120	0.170	0.135	0.013	0.095
Mo	14	0.018	0.050	0.025	0.009 1	0.363
Ni	14	1.85	6.67	3.57	1.631	0.457
Pb	14	0.066	0.25	0.123	0.057	0.462
Se	14	0.034	0.084	0.051	0.015	0.303
Zn	14	26.90	62.80	45.96	10.47	0.228

表 13 茶园根系土与茶叶微量元素相关系数(n=14)

Table 13 The correlation coefficients of trace elements between tea garden root-zone soil and tea leaves (n=14)

元素		根系土													
		As	B	Cd	Cr	Cu	F	Ge	Hg	I	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
茶叶	As	−0.173	−0.026	−0.3	−0.105	−0.062	−0.056	0.104	−0.222	0.171	−0.068	−0.246	−0.186	−0.012	−0.18
	B	−0.066	−0.309	−0.351	−0.149	−0.228	−0.225	−0.064	−0.323	0.216	−0.024	−0.116	−0.165	−0.005	−0.171
	Cd	0.081	0.248	0.363	−0.3	−0.01	0.07	−0.314	0.266	−0.143	−0.134	0.112	0.216	−0.312	0.295
	Cr	−0.117	0.065	0.063	−0.086	0.067	−0.043	−0.046	−0.193	0.309	−0.124	−0.114	0.176	−0.182	−0.123
	Cu	0.378	0.244	0.093	0.04	0.026	−0.05	−0.2	−0.069	−0.022	0.238	−0.087	0.259	0.007	−0.047
	F	−0.282	−0.136	−0.331	−0.127	−0.108	−0.098	0.059	−0.175	0.014	−0.203	−0.229	−0.173	−0.134	−0.318
	Ge	−0.278	−0.044	−0.262	−0.14	−0.069	−0.063	0.063	−0.193	0.069	−0.195	−0.222	−0.177	−0.122	−0.113
	Hg	−0.085	0.042	−0.308	−0.095	−0.134	0.102	0.115	−0.22	0.083	−0.023	−0.081	−0.155	−0.005	0.347
	I	−0.24	−0.196	−0.533*	0.005	−0.137	−0.004	0.281	−0.256	0.159	−0.051	−0.214	−0.274	0.113	−0.248
	Mo	0.116	0.107	0.088	−0.13	−0.059	−0.225	−0.332	−0.12	−0.215	0.037	−0.101	0.145	−0.237	−0.025
	Ni	0.288	0.550*	0.806**	0.454	0.688**	0.590*	0.355	0.780**	−0.068	0.297	0.818**	0.680**	0.101	0.742**
	Pb	−0.166	−0.258	−0.438	−0.19	−0.187	−0.168	−0.008	−0.405	0.37	−0.197	−0.26	−0.2	−0.064	−0.241
	Se	0.45	0.289	0.297	−0.065	0.064	0.004	−0.333	0.155	0.163	0.211	0.101	0.324	0.033	0.163
	Zn	0.409	0.27	0.247	0.197	0.157	0.057	−0.103	0.079	0.089	0.379	0.179	0.246	0.2	0.179

注: “*”表示置信度为95%时, 显著相关; “**”表示置信度为99%时, 显著相关。

I 吸收具有一定的拮抗作用; 根系土中 B、Cd、Cu、F、Hg、Ni、Pb、Zn 与茶叶 Ni 呈显著正相关, 表明根系土中这些元素对茶叶 Ni 吸收具有一定的协同作用。此外, 根系土 Ge、I 与茶叶 F 呈一般正相关, 根系土 As、B、Cd、Cu、F、Hg、I、Mo、Ni、Pb、Se、Zn 与茶叶 Se、Zn 呈一般正相关, 反映根系土中这些元素某种程度上能够驱使 Se、Zn、F 向茶叶的迁移富集。多数情况下, 根系土与茶叶元素间相关性较差, 反映根系土—茶叶系统中元素迁移富集可能受多种复杂因素的影响。

4.3.2 根系土—茶叶系统中元素迁聚

生物富集系数(*BCF*)是表征化学物质被生物吸收累积程度的指标[23], 元素生物富集系数是生物体内某元素含量与环境(本研究为根系土)中该元素含量的比值[24]。据此, 计算得到研究区茶叶元素生物富集系数见表 14。可见本区茶叶对土壤元素的生物富集系数排序为 Zn>Cu>Cd>B>Ni>F>Se>Hg>Mo>I>As>Pb>Cr>Ge。按照生物富集系数(*BCF*/%)>10(吸收富集能力较强)、1≤(*BCF*/%)≤10(吸收富集能力一般)、(*BCF*/%)<1(吸收富集能力较弱)可将茶叶元素 *BCF* 划分为 3 个等级, 结果表明吸收富集能力较强元素有 Zn、Cu、Cd、B、Ni、F, 吸收富集能力一般的元素有 Se、Hg、Mo、I, 吸收富集能力较弱的元素有 As、Pb、Cr、Ge。

表 14 茶叶元素生物富集系数平均值

Table 14 The average value of the biological enrichment coefficient for tea elements

元素	Zn	Cu	Cd	B	Ni	F	Se	Hg	Mo	I	As	Pb	Cr	Ge
BCF/%	78.56	78.35	69.82	28.89	17.91	10.1	8.35	6.53	2.98	2.87	0.78	0.51	0.33	0.15

5　结论与认识

基于广西三江洋溪—同乐地区 315 km^2 范围内 881 件农用地表层土壤地球化学调查以及 14 组茶叶—根系土采集分析数据资料, 获得研究区以下主要的地球化学特征:

1)表层土壤酸碱度以酸性为主, 强酸性次之。茶园根系土均为强酸性土壤, 反映长期种植茶树有促进土壤酸化的趋势。表层土壤 Mn、Se、Mo 含量较高, 离散程度大, 表明这些元素存在局部富集的可能性。表层土壤存在两组显著相关元素组合: N、Corg、S 和 Cu、Mo、Se。

2)表层土壤全氮、全钾、有机质总体为中等—丰富等级, 全磷多处于较缺乏—缺乏水平, 土壤硫总体处于较丰富—丰富等级, 土壤钙、镁为较缺乏—缺乏状态; 土壤硼、钼总体为中等—丰富水平, 铁、锰、铜、锌多为缺乏等级。区内富硒土壤广泛分布, 尽管区内富 Se 土地资源丰富, 但由于茶叶对土壤 Se 吸收能力一般, 茶叶 Se 含量低于富硒茶标准。

3)研究表明茶叶对根系土 Pb 的吸收富集能力弱, 茶叶 Pb 含量很低, 未发现茶叶 Pb 超标现象, 茶叶质量安全。

致谢: 本研究依托"广西三江县土地质量地球化学评价"项目, 由衷感谢为该项目工作付出努力的参与者。

参考文献(References):

[1] 陈国达. 地洼学说——活化构造及成矿理论体系概论 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996.
Chen G D. Diwa theory—Outline on activated tectonics and metallogenic theoretic system[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996.

[2] 唐莉越. 发展三江茶产业 精彩演绎茶经济 [J]. 中国茶叶, 2014, 36(2): 16−17.
Tang L Y. Developing Sanjiang tea industry and performing tea economy brilliantly[J]. China Tea, 2014, 36(2): 16−17.

[3] 吴清德. 无公害茶园建设与管理技术规程 [J]. 四川农业科技, 2008(4): 33−34.
Wu Q D. Technical specification for construction and management of pollution-free tea garden[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2008(4): 33−34.

[4] 黄炎, 陈国光, 李雪平. 武夷山茶叶品质与土壤地球化学背景特征关系探讨 [J]. 华东地质, 2020, 41(2): 166−176.
Huang Y, Chen G G, Li X P. Discussion on the relationship between Wuyishan tea quality and geochemistry background characteristics[J]. Resources Survey & Environment, 2020, 41(2): 166−176.

[5] 周国华, 曾道明, 贺灵, 等. 福建铁观音茶园生态地球化学特征 [J]. 中国地质, 2015, 42(6): 2008−2018.
Zhou G H, Zeng D M, He L, et al. Eco-geochemical characteristics of the Tieguanyin tea gardens in Fujian Province[J]. Geology in China, 2015, 42(6): 2008−2018.

[6] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295—2016 Determination of land quality geochemical evaluation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[7] 罗海怡, 蒙勇, 马明亮, 等. 广西三江县土地质量地球化学评价报告 [R]. 广西壮族自治区三〇五核地质大队, 2020.
Luo H Y, Meng Y, Ma M L, et al. Geochemical assessment report on land quality in Sanjiang County, Guangxi[R]. No. 305 Nuclear Geological Brigade of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 2020.

[8] 张起钻, 杨忠芳, 吴天生, 等. 广西土地质量地球化学调查研究报告 [R]. 广西壮族自治区地质矿产开发局, 2021.
Zhang Q Z, Yang Z F, Wu T S, et al. Research report on the geochemical investigation of land quality in Guangxi[R]. Guangxi Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, 2021.

[9] 沈洪艳, 安冉, 师华定, 等. 湖南省某典型流域农用地土壤重金属污染及影响因素 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(3): 715−724.
Shen H Y, An R, Shi H D, et al. Heavy metal pollution and influencing factors of agricultural land in a typical watershed in Hunan Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(3): 715−724.

[10] Nielsen. Soil spatial variability[M]. Wageningen: Pudoc, 1985: 2-30.

[11] 龚曙明, 朱海玲. 应用统计学 [M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
Gong S M, Zhu H L. Applied statistics[M]. 3rd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2010.

[12] 缪璐, 雷向荣, 温立香. 基于 ICP-MS 法比较广西不同产地虫茶无机元素的差异 [J/OL]. 现代食品科技. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0219.
Miao L, Lei X R, Wen L X. Analysis of the differences in inorganic elements of insect tea from different producing areas in Guangxi by ICP-MS method[J/OL]. Modern Food Science and Technology. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0219.

[13] 刘立芬, 栾欣婷. 寒地黑土养分元素地球化学特征及丰缺评价——以抚远市为例 [J]. 土壤, 2024, 56(3): 681−688.
Liu L F, Luan X T. Geochemical characteristics and assessment of nutrient elements in the cold region black soil: A case study of Fuyuan City[J]. Soils, 2024, 56(3): 681−688.

[14] 蒙勇, 马明亮. 广西三江梦石岭片区农用地土壤地球化学特征及其质量评价 [J]. 矿产与地质, 2018, 32(5): 933−942.
Meng Y, Ma M L. Soil geochemical characteristics and quality evaluation of farmlands in Mengshiling, Sanjiang, Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2018, 32(5): 933−942.

[15] 陈玉茹, 胡江龙, 胡绍祥, 等. 随州北部土地质量地球化学评价及空间分布研究 [J]. 资源环境与工程, 2019, 33(S1): 22−26.
Chen Y R, Hu J L, Hu S X, et al. Research on geochemical assessment and space distribution in northern Suizhou[J]. Resources Envi-

ronment & Engineering, 2019, 33(S1): 22−26.

[16] 张文强, 李常锁, 刘金鑫, 等. 聊城市典型农业区耕地土壤养分元素地球化学特征 [J]. 物探与化探, 2025, 49(5): 1232−1242.
Zhang W Q, Li C S, Liu J X, et al. Geochemical characteristics of soil nutrient elements in cultivated land within a typical agricultural area, Liaocheng City, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(5): 1232−1242.

[17] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Ministry of Ecology and EnvironmentMinistry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. GB 15618—2018 Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[18] 中华人民共和国农业部. NY/T 600—2002 富硒茶 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 600—2002 Rich-selenium tea[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.

[19] 广西壮族自治区土壤肥料工作站, 广西标准化协会. DB45/T 1061—2014 富硒农产品硒含量分类要求 [S]. 广西壮族自治区质量技术监督局, 2014.
Guangxi Zhuang Autonomous Region Soil and Fertilizer Station, Guangxi Association for Standardization. DB45/T 1061—2014 Classification Requirements for Selenium Content of Selenium-Enriched Agricultural Products[S]. Guangxi Zhuang Autonomous Region Bureau of Quality and Technical Supervision, 2014.

[20] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2762—2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Health Commission, State Administration for Market Regulation. GB 2762—2022 national standard for food safety—Limits of pollutants in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[21] 李云仙, 郑志峰, 刘琳, 等. 五种柑橘类水果矿质元素的测定 [J]. 食品工业, 2016, 37(7): 281−284.
Li Y X, Zheng Z F, Liu L, et al. Determination of mineral elements in 5 species of citrus fruit peel and pulp by ICP-OES[J]. The Food Industry, 2016, 37(7): 281−284.

[22] 潘少香, 孟晓萌, 郑晓冬, 等. 基于 ICP-MS 的不同品种柑橘中矿物元素的差异性分析 [J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 333−339.
Pan S X, Meng X M, Zheng X D, et al. Determination of trace elements in species of citrus from different growing areas by microwave digestion ICP-MS and their difference analysis[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 333−339.

[23] 方如康. 环境学词典 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 127-128.
Fang R K. Dictionary of environmental science[M]. Beijing: Science Press, 2003: 127-128.

[24] 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 等. 江苏典型地区水稻与小麦字实中元素生物富集系数(BCF)初步研究 [J]. 中国地质, 2013, 40(1): 331−340.
Liao Q L, Liu C, Cai Y M, et al. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 331−340.

Geochemical characteristics of soils and representative tea gardens in the Yangxi-Tongle area, Sanjiang, Guangxi Zhuang Autonomous Region

MENG Yong

(*No.* 305 *Nuclear Geological Team of Guangxi Zhuang Autonomous Region*, *Liuzhou* 545005, *China*)

Abstract: This study aims to gain insights into soil pH, the degree of abundance of beneficial nutritional elements in soils, and the characteristics of element migration and accumulation within the rhizosphere soil-tea leaf system in the Yangxi-Tongle area of Sanjiang Dong Autonomous County, Guangxi Province. This study conducted a statistical analysis of 881 sets of geochemical data from topsoil in agricultural land and 14 sets of data from the tea leaf - rhizosphere soil system across 315 km^2 in the study area. The analytical results indicate that topsoil in the study area is acidic to strongly acidic, while the rhizosphere soil of tea trees is strongly acidic. The soils exhibit strong heterogeneity of Mn, Se, and Mo, with soil elements demonstrating distinct N-Corg-S and Cu-Mo-Se associations. The results also show that soils in the study possess fairly abundant to abundant total N, total K, organic matter, S, B, and Mo; fairly deficient to deficient total phosphorus, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, and F; and abundant Se. Tea leaves exhibit relatively strong capacity for bioaccumulation of Zn, Cu, Cd, B, Ni, and F in soils, but relatively weak capacity for bioaccumulation of As, Pb, Cr, and Ge. This study concludes that tea leaves in the study area contain moderate Se content; low contents of Cd, As, and Hg; and a Pb content within regulatory limits, suggesting generally safe tea quality. The results of this study further provide a geochemical basis for the healthy development of the local tea industry.

Key words: soil; tea; geochemistry; Yangxi-Tongle area; Sanjiang; Guangxi

(本文编辑: 蒋实)