

doi: 10.12029/gc20200620

刘孜, 黄行凯, 徐宏林, 张斌, 彭青松, 王晨昇, 王恒, 姜华. 2020. 湖北宜昌鸦鹊岭地区岩石-土壤元素迁移特征及柑橘种植适宜性评价[J]. 中国地质, 47(6): 1853-1868.

Liu Zi, Huang Xingkai, Xu Hongling, Zhang Bin, Peng Qingsong, Wang Chensheng, Wang Heng, Jiang Hua. 2020. Migration characteristics of elements in the rock-soil system and suitability evaluation of orange planting in Yaqueling area, Yichang, Hubei Province[J]. *Geology in China*, 47(6):1853-1868(in Chinese with English abstract).

湖北宜昌鸦鹊岭地区岩石-土壤元素迁移特征及柑橘种植适宜性评价

刘孜¹, 黄行凯¹, 徐宏林², 张斌³, 彭青松¹, 王晨昇¹, 王恒¹, 姜华²

(1. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

3. 宜昌市夷陵区耕地质量与肥料工作站, 湖北 宜昌 443000)

摘要:“宜昌蜜桔”久享盛誉, 鸦鹊岭地区是其典型产地之一。本文选取宜昌市鸦鹊岭地区柑橘基地开展岩石-土壤垂向剖面地球化学测量, 通过对植物营养有益元素、稀土元素等进行测试分析, 调查相关元素由岩石至土壤的迁移特征, 评价柑橘生长岩土环境适宜性。结果表明: 土壤元素多会继承其在母岩中的含量水平, 如相似的稀土元素配分模式, Si、Na、K、Ca、Mg、Mo、Sr 等元素相似的相对富集或贫化程度; 根据相关性分析及聚类分析, 识别出 Al-Fe-Ge-Ni-B-K-Si, S-N-Se-P, Cu-Zn-Mo 等 3 类正相关性元素组合; 选择种植柑橘土壤所对应的成土母岩适宜性优劣排序依次为, 红花套组(K₂h)长石英砂岩 > 牌楼口组(E₂p)钙质砂岩 > 掇刀石组(Nd)泥灰岩 > 罗镜滩组(K₂l)钙质砾岩, 并进一步提出种植优化建议。

关键词:蜜桔; 种植适宜性; 岩石-土壤; 元素迁移; 地球化学调查工程; 鸦鹊岭; 宜昌市; 湖北省
中图分类号: S153 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)06-1853-16

Migration characteristics of elements in the rock-soil system and suitability evaluation of orange planting in Yaqueling area, Yichang, Hubei Province

LIU Zi¹, HUANG Xingkai¹, XU Hongling², ZHANG Bin³, PENG Qingsong¹,
WANG Chensheng¹, WANG Heng¹, JIANG Hua²

(1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2. Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Cultivated Land Quality and Fertilizer Station of Yiling District, Yichang 443000, Hubei, China)

Abstract: "Yichang Orange" enjoys a long reputation, and Yaqueling area is one of its typical producing areas. In this paper, the geochemical survey of vertical profile of rock-soil was carried out in the center of orange production of Yaqueling area, Yichang City. Through the analysis of nutritive elements and rare earth elements, the migration characteristics of related elements from rock

收稿日期: 2020-06-09; 改回日期: 2020-09-22

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190315, DD20190823)资助。

作者简介: 刘孜, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要从事矿产地质和生态地质调查工作; E-mail: 384609259@qq.com。

通讯作者: 黄行凯, 男, 1985 年生, 博士, 高级工程师, 现从事矿产地质和生态地质调查工作; E-mail: jackyhua8626@163.com。

to soil were investigated, and the suitability of orange production was evaluated. The results show that most of the soil elements will inherit their content level in the parent rock, as shown by such phenomena as the similar REE distribution pattern and the similar degree of relative enrichment or dilution of Si, Na, K, Ca, Mg, Mo, Sr and other elements. According to correlation analysis and cluster analysis, three groups of elements of positive correlation such as Al-Fe-Ge-Ni-B-K-Si, S-N-Se-P and Cu-Zn-Mo were identified. The sequence of the suitability of the soil forming parent rock for planting orange soil is feldspathic quartz sandstone of Honghuatao Formation, calcareous sandstone of Pailoukou Formation, marl of Duodaoshi Formation, and calcareous conglomerate of Luojingtang Formation. In addition, some suggestions for planting optimization are put forward.

Key words: orange; planting suitability; rock-soil system; element migration; geochemical survey engineering; Yaqueling; Yichang, Hubei Province

About the first author: LIU Zi, male, born in 1988, master, engineer, majors in mineral geological and ecological geological survey; E-mail: 384609259@qq.com.

About the corresponding author: HUANG Xingkai, male, born in 1985, doctor, senior engineer, majors in mineral geological and ecological geological survey; E-mail: jackyhua8626@163.com.

Fund support: Supported by project of China Geological Survey (No. DD20190315; No. DD20190823).

1 引 言

湖北宜昌有悠久的柑橘种植历史,早在2000多年前,爱国诗人屈原就写下过《桔颂》名篇。宜昌蜜桔皮薄爽滑,酸甜适中,肉汁细腻无渣入口即化。2014年10月,“宜昌蜜桔”被湖北省工商局认定为“湖北省著名商标”,“晓曦红”牌宜昌蜜桔获“中国驰名商标”称号。根据宜昌市统计年鉴(2018年)资料显示,2017年,宜昌市全市种植柑橘面积124985 hm²,柑橘总产量2716649 t,是目前全国地州市中最大的宽皮柑橘生产基地。宜昌蜜桔作为宜昌市的新名片之一,其基地规模巨大,但普遍存在土壤肥力不足的问题(刘云等,2012;杨青等,2013),而且还需要在现有基础上通过岗地开发,优选出生态条件适宜区域扩大种植面积^①。

柑橘的生长依赖于土壤条件,而土壤又是由地表岩石经风化、成壤作用形成的。土壤是地质环境与生物之间联系的桥梁,地质环境中的许多性状都是通过土壤传递给植物,尤其是土壤继承了母岩中的地球化学元素(汪庆华等,2007)。近年来,国内学者越来越认识到成土母岩(母质)内元素的特征对土壤养分、特色农作物品质的形成具有决定性的影响(李正积,1996;陆景冈,1997;王萍等,2007;高琳等,2011),并得到大量研究的验证(冯群耀,2001;黄毓明,2007;栾文楼等,2007;陈恩等,2012;赵国宣等,2015;廖启林等,2016;严洪泽等,2018;董建华等,2018;王江南等,2018;廖启林等,2020;

陶春军等,2020;马雪梅等,2020)。目前,缺乏对宜昌柑橘基地成土母岩与土壤地球化学关系的研究,因此亟需开展相关工作,以摸清影响柑橘品质的营养有益元素由岩石至土壤的迁移规律,为柑橘产业的提质增效提供科学依据。

本文选择基岩与土壤类型均有差异的鸦鹊岭地区(图1a),开展岩石-土壤垂向剖面地球化学测量工作,系统采集了岩石、土壤的配套样品,测定营养有益元素、稀土元素及土壤样品部分营养元素有效态含量,据此研究宜昌蜜桔产地岩石、土壤地球化学特征及关系,评价柑橘宜植土壤及其母岩的产出环境,支撑宜昌鸦鹊岭及相似地区的柑橘产业发展、提升种植柑橘的经济效益。

2 有关地质背景

鸦鹊岭归属湖北省宜昌市辖镇,地处夷陵区东南端,位于鄂西山区向江汉平原过渡的丘陵地带。鸦鹊岭属中亚热带大陆性季风气候区,气候温暖湿润,雨量充沛,光照充足,四季分明。鸦鹊岭镇经济结构长期以工农业为主,2015年,全镇实现农业产值24亿元,其中柑桔产业收入占全镇农民人均纯收入的1/3以上(贺昌蓉等,2014)。

鸦鹊岭地区出露地层(图1b)由老至新依次为下白垩统五龙组(K_{1w}),上白垩统罗镜滩组(K_{2l})、红花套组(K_{2h})、跑马岗组(K_{2p}),始新统洋溪组(E_{2y})、牌楼口组(E_{2p}),以及第四系更新统(Qp)和全新统(Qh)。五龙组,分布在鸦鹊岭北部,小面积出露,主

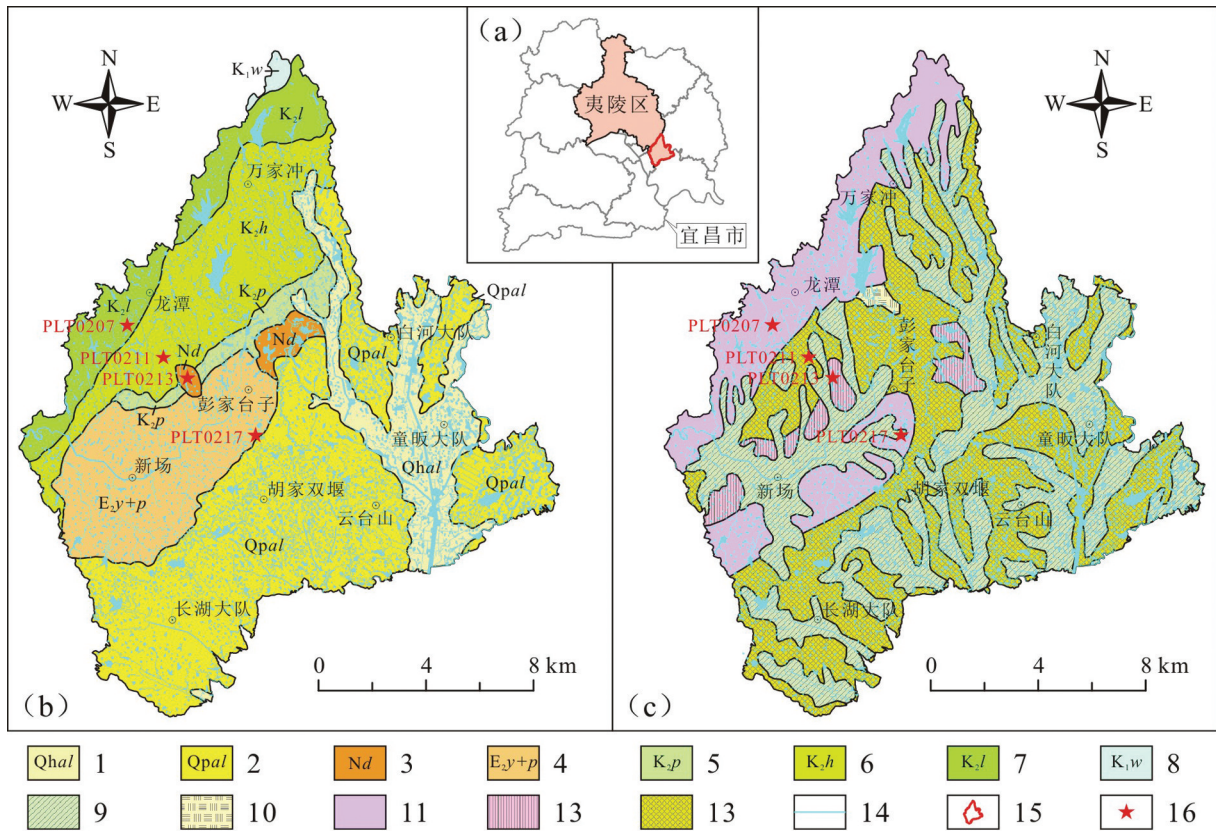


图1 (a)一鸦鹊岭地区地理位置图; (b)一鸦鹊岭地区地质简图; (c)一鸦鹊岭地区土壤类型分区图
 1—全新统冲积层; 2—更新统冲积层; 3—掇刀石组; 4—洋溪组、牌楼口组并层; 5—跑马岗组; 6—红花套组; 7—罗镜滩组; 8—五龙组; 9—水稻土; 10—潮土; 11—紫色土; 12—石灰土; 13—黄棕壤; 14—水系及沟渠; 15—鸦鹊岭位置; 16—岩石土壤剖面位置

Fig.1 (a)—Geographic location of Yaqueling area; (b)—Geological sketch map of Yaqueling area; (c)—The types of soil in Yaqueling area

1—Holocene alluvium; 2—Pleistocene aluvium; 3—Duodaoshi Formation; 4—Yangxi Formation and Pailoukou Formation; 5—Paomagang Formation; 6—Honghuatao Formation; 7—Luojingtan Formation; 8—Wulong Formation; 9—Paddy soil; 10—Chao soil; 11—Purple soil; 12—Limy soil; 13—Yellow-brown soil; 14— Water system and ditch; 15—Location of Yaqueling; 16—Location of rock-soil profile

要岩性为含砾粗砂岩;罗镜滩组,呈长条状分布在鸦鹊岭西北部,为一套灰红、紫红、灰色厚层至块状砂砾岩夹粉砂岩组合,整合覆盖在五龙组之上;红花套组,出露在鸦鹊岭西北部,为一套棕红色含砾砂岩、砂岩及粉砂岩组合,整合覆盖在罗镜滩组之上;跑马岗组,为一套棕红色或灰白色细砂岩、粉砂岩与紫红色砂质泥岩,夹灰绿色粉砂岩和泥灰岩组,整合覆盖在红花套组之上;洋溪组,为一套以灰褐、淡红、灰白色中—厚层灰岩为主夹杂杂泥岩的地层,不整合覆盖在下伏跑马岗组、红花套组之上;牌楼口组,为一套红色碎屑岩和泥质岩组成的河流相沉积,分布在鸦鹊岭地区中部,整合覆盖于洋溪组之上;掇刀石组为一套不整合于下伏红色砂岩之上的白色块状泥灰岩,出露面积较小,呈片状零星分布在彭家台子一带。

区内土壤类型有黄棕壤、紫色土、石灰土、水稻

土、潮土等5大类(图1c)。黄棕壤为鸦鹊岭地区发育范围最广的土壤,并根据成土母岩类型可细分为2类,一类是由白垩系红色砂岩风化形成的红砂岩黄棕壤,呈淡红棕至红棕色,土层厚薄不一,质地较轻,多为砂壤土-轻壤土;另一类是由第四系冲洪积物风化形成的第四系黏土黄棕壤,呈黄棕色-黄褐色,土层深厚,层次分明,质地黏重,特别是淀积层黏重紧实。紫色土主要分布在鸦鹊岭西北部,由白垩系钙质砂砾岩风化形成,土层厚度和质地受地形影响,低丘坡麓、台地的土层较厚,质地较黏重;坡地土层厚30~60 cm,陡坡及山顶部位土层厚度不足30 cm,质地偏轻。石灰土在区内发育受限,由新近系泥灰岩风化形成,为棕色石灰土,质地黏重,在槽型地形部位土层深厚。水稻土,广泛分布在区内地势低洼处,多为潴育型水稻土,以黄棕壤起源为主,

以紫色土起源次之。潮土,分布在龙潭村东一带,为砂土型潮土,土层较厚,分化不明显,耕作层厚12~18 cm,质地为砂土-砂壤土,多夹有卵石。

3 基本研究方法

3.1 剖面编录及样品采集

依据柑橘园土壤成土母岩岩性差异,在鸦鹊岭地区选取4条岩石-土壤垂向剖面(图1),按照土壤的自然发生分类编录,并在此基础上系统采集各种类型基岩样及其对应A/B/C层土壤样(图2)。

PLT0207剖面,土壤类型为紫色土,成土母岩为罗镜滩组钙质砾岩。淋溶层(0~40 cm)呈浅紫红色,轻壤土,夹杂着一些碎石;淀积层(40~200 cm)的颜色向下逐渐变成红棕色,中-轻壤土,碎石含

量减少。风化层(200~260 cm),呈紫红色,含灰岩砾石;基岩为钙质砾岩,颗粒支撑,钙质胶结,砾石含量超过60%,磨圆较好,主要为灰岩砾石。共采集样品8件,包括淋溶层2件、淀积层3件、风化层2件、基岩1件。

PLT0211剖面,土壤类型为(红砂岩)黄棕壤,成土母岩为红花套组长石石英砂岩。淋溶层(0~20 cm),呈黄棕色,轻壤土;淀积层(20~150 cm),红棕色,轻-中壤土;风化层(150~300 cm)界线明显,浅肉红色,砂化强烈;基岩为细砂状结构,主要由石英和长石组成,其中石英含量较高。共采集样品8件,包括淋溶层1件、淀积层3件、风化层3件、基岩1件。

PLT0213剖面,土壤类型为石灰土,由掇刀石组泥灰岩风化形成。淋溶层(0~80 cm)上部呈棕色,

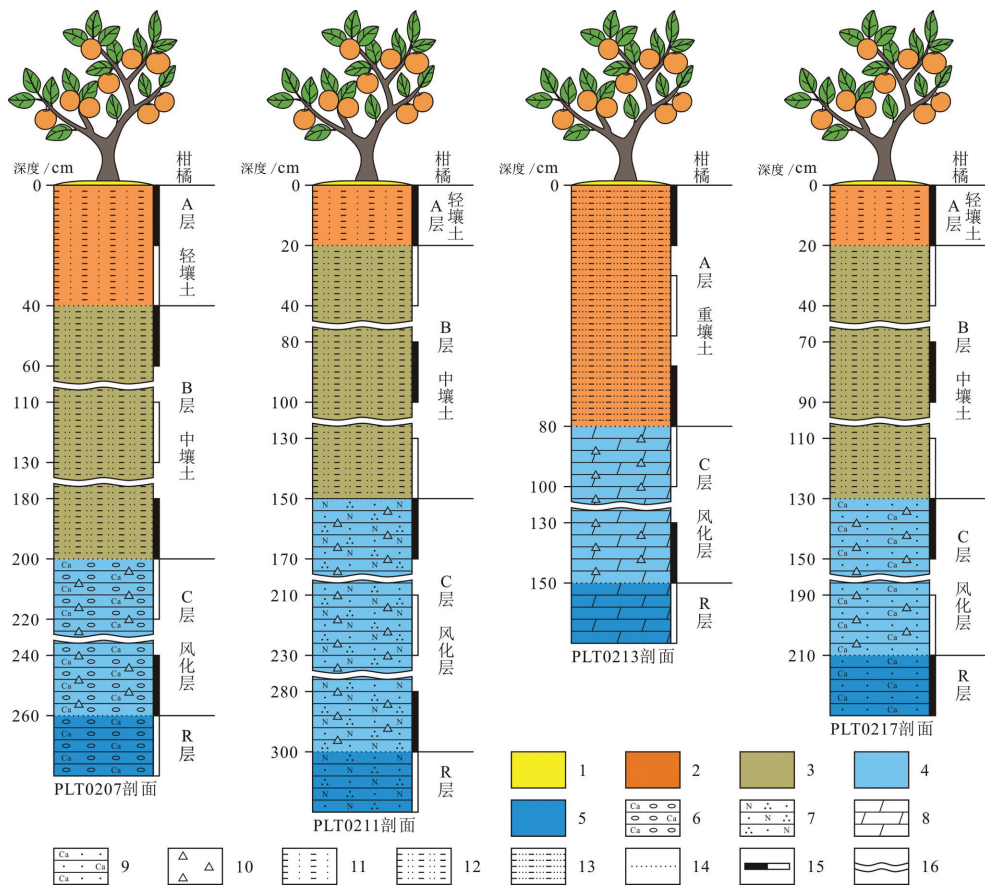


图2 鸦鹊岭地区岩石-土壤柱状图

1—腐殖质层(O); 2—淋溶层(A); 3—淀积层(B); 4—风化层(C); 5—岩石层(R); 6—钙质砾岩; 7—长石石英砂岩; 8—泥灰岩; 9—钙质砂岩; 10—风化碎屑物; 11—轻壤土; 12—中壤土; 13—重壤土; 14—分层界线; 15—采样位置; 16—省略部分

Fig.2 The column of rock and soil in Yaqueling area

1—Humus layer; 2—Leaching layer; 3—Deposition layer; 4—Weathering layer; 5—Rock layer; 6—Calcareous conglomerate; 7—Feldspathic quartz sandstone; 8—Marl; 9—Calcareous sandstone; 10—Weathering rock debris; 11—Light loam; 12—Middle loam; 13—Heavy loam; 14—Boundary line; 15—Sampling position; 16—Ellipsis part

颜色向下逐渐变浅,质地重黏。风化层(80~100 cm)分层明显,土壤颜色为黄棕色。基岩中可见钙质结核。共采集样品6件,包括淋溶层3件、风化层2件、基岩1件。

PLT0217剖面,土壤类型为紫色土,由牌楼口组钙质砂岩风化形成。淋溶层(0~20 cm),呈浅紫红色,轻一中壤土。淀积层(20~130 cm),浅紫红色,中一重壤土;风化层(130~210 cm),呈紫红色,分层明显;基岩为细砂状结构,钙质胶结。共采集样品7件,包括淋溶层1件、淀积层3件、风化层2件、基岩1件。

3.2 样品分析测试

本次研究共选择了41项指标(B、Br、Cl、Cu、I、Mn、Mo、N、Ni、P、Pb、S、Se、Zn、SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、TC、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、水解性氮、有效磷、速效钾、有效硅、交换性钙),分析测试工作由华北有色地质勘查局燕郊中心实验室完成。

测试过程中精心选择检测方法,采用电感耦合等离子体质谱仪、电感耦合等离子体发射光谱仪、原子荧光光谱仪、X射线荧光光谱仪、红外碳硫仪、离子选择电极、一米光栅平面摄谱仪、分光光度计、滴定管、pH酸度计等检查设备。分析时采用国家一级标准物质和密码重复样监控分析质量,经检验分析质量满足自然资源部发布的《区域地球化学样品分析方法》、工信部发布的《铝土矿石化学分析方法》、国家林业局发布的《森林土壤氮/钾/有效硅的测定》中岩石、土壤样品的分析质量要求。

3.3 数据处理分析

在样品分析测试基础上,利用EXCEL对岩石-土壤元素含量进行基本统计,并计算迁移系数,以及绘制主微量元素分布图、稀土元素球粒陨石配分模式图与主微量元素蛛网图,以摸清元素迁移特征。利用SPSS软件对岩石-土壤元素含量进行相关性分析及聚类分析(聚类方法为组间联接,度量标准区间为平方Euclidean,转化值标准化为Z得分),并绘制岩石-土壤剖面元素R型聚类分析谱系图,以揭示具有相似迁移特征的元素组合。

4 基本调查数据分析与讨论

4.1 主/微量元素地球化学特征

表1列出了各条剖面中岩石、土壤的元素含量,

可以看出,不同类型岩石、土壤的主、微量元素含量有很大的差异。

4.1.1 岩石样品元素地球化学特征

长石石英砂岩相对富Si、Al、N、K、Fe、Cu、Zn、B、Ni、Se、Ge,相对贫C、P、Ca、Mg、S、Mn、Sr。泥灰岩相对富Ca、C,相对贫Si、Al、Na、N、K、Fe、Cu、Zn、B、Mo、Ni、Se、Ge、Sr;钙质砾岩相对富C、P、Ca、Mg、S、Mo、Cl、Sr,相对贫Si、Al、Na、K、Mn、Zn;钙质砂岩相对富Na、P、K、Ca、Mn、Ni、Ge、Sr,相对贫Se。I元素在4类岩石中的含量相差不大。

4.1.2 土壤样品元素地球化学特征

除石灰土中未发生土壤B层外,紫色土、黄棕壤均有发生土壤B层,而且各层中主、微量元素含量也有一定差别(表1,图3)。

(1) 土壤淋溶层(A层)

根据表1和图3b可以看出:黄棕壤淋溶层相对富Na、C、N、P、S、Cu、Cl、Se,贫Ca、Mg、Fe、Mn、Ni、I;石灰土淋溶层相对富Ca、Fe、Mn、I,贫N、P、K、Mo、Sr;钙质砾岩紫色土淋溶层相对富Mo、Sr、I,贫C、Na、N、P、K、Cu、Zn、Se;钙质砂岩紫色土淋溶层相对富K、Mg、B、Ge、Ni,贫P、S、Cu、Se、I;而Si、Al、Zn等元素的含量在各类型土壤淋溶层中差异不明显(表2)。

(2) 土壤淀积层(B层)

黄棕壤淀积层中Na、N、S、Se、I含量最高,Ca、Mg、Zn、Cu、Ni、Sr含量最低;钙质砂岩紫色土淀积层中K、Mg、Ca、C、P、Ge、Sr含量最高,N、S、Mn、Mo、Se、I含量最低;钙质砾岩紫色土淀积层中Mn、Zn、Mo、Cu、Ni含量最高,Na、P、K、C、Ca、Se含量相对偏低;而Si、Al、Fe、B、Cl等元素在各类型土壤淀积层中的含量相差不多(表2)。

(3) 基岩风化层(C层)

黄棕壤C层土壤中Na、Cu、Zn、Mo、Se相对富集,Ca、Mg、P、C、Sr相对贫化;石灰土C层中N、Mn、S、I相对富集,N、K、B、Zn、Mo、Se、Sr相对贫化;钙质砂岩紫色土C层中K、Mg、Ca、C、P、S、Mo、Sr相对富集,N、Mn、Cu、Zn、Se相对贫化;钙质砾岩紫色土C层中Mn、B相对富集,C、Na、N、S、Cu、Se、I相对贫化;而Si、Al、Fe、Cl、Ni、Ge在各类型风化层中的含量变化不大(表2)。

4.1.3 土壤元素有效量特征

部分营养元素有效量特征统计结果见表3,其

表1 宜昌市鸦鹊岭地区岩石、土壤元素含量一览

Table 1 Element content of rock and soil in Yaqueling area, Yichang City

剖面编号	土壤分层	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TC	Na ₂ O	N	P	K ₂ O	CaO	MgO	S	TFe ₂ O ₃
PLT0207	A层	66.49	13.49	0.48	0.12	628	261	1.66	0.51	1.08	149.5	5.03
	B层	69.84	12.18	0.31	0.11	456	310	1.71	0.59	1.05	82.7	4.29
	C层	69.35	12.15	0.20	0.11	293	218	1.86	0.89	1.26	48.6	4.12
	R层	27.25	2.56	8.13	0.09	108	215	0.57	32.21	1.85	86.3	1.08
PLT0211	A层	71.79	12.65	1.14	0.31	1340	1312	1.73	0.35	0.75	224	4.26
	B层	71.70	12.88	0.46	0.33	608	324	1.82	0.36	0.79	128.7	4.57
	C层	70.80	13.35	0.18	0.22	336	127	1.72	0.31	0.67	69.3	4.56
	R层	80.41	8.98	0.11	0.17	139	48	1.46	0.21	0.39	38.4	2.22
PLT0213	A层	65.05	14.97	0.55	0.24	690	299	1.53	0.87	1.15	148.3	5.63
	C层	68.00	12.05	0.25	0.17	382	149	1.43	1.00	1.12	80.0	4.51
	R层	17.89	1.54	9.41	0.10	100	130	0.32	44.00	0.51	58.6	0.89
PLT0217	A层	66.59	14.55	0.61	0.20	778	332	3.05	0.56	1.44	98.9	5.08
	B层	59.67	14.38	1.26	0.15	394	514	3.42	4.60	1.70	66.4	5.14
	C层	58.21	12.86	1.95	0.14	297	397	3.12	7.98	1.58	77.3	4.75
	R层	57.90	4.70	3.87	0.32	120	172	1.62	15.69	0.49	46.9	1.32
剖面编号	土壤分层	Mn	Cu	Zn	B	Mo	Cl	Ni	Se	Ge	Sr	I
PLT0207	A层	461	25.90	60.7	49.7	0.89	20.4	33.4	0.178	1.44	83	3.18
	B层	1583	26.87	69.6	51.6	1.02	20.6	40.4	0.100	1.43	78	1.87
	C层	860	22.70	77.3	54.3	0.61	20.6	27.6	0.073	1.30	57	0.93
	R层	208	6.04	11.6	11.5	0.43	36.3	6.27	0.069	0.46	156	0.40
PLT0211	A层	336	34.7	71.8	46.8	0.81	29.8	26.8	0.25	1.45	49.2	1.03
	B层	578	21.57	52.7	54.4	0.68	20.6	28.3	0.187	1.41	50.4	3.09
	C层	656	49.03	118.6	43.0	1.06	20.8	26.6	0.178	1.45	49.6	1.43
	R层	153	9.44	37.4	23.3	0.40	20.2	9.50	0.074	1.11	46.7	0.42
PLT0213	A层	503	29.60	71.03	49.2	0.62	20.7	36.5	0.208	1.57	44.4	3.67
	C层	1031	23.95	58.85	30.9	0.41	20.7	33.2	0.073	1.41	42.8	3.11
	R层	282	4.37	8.39	3.05	0.33	20.3	4.22	0.042	0.31	60.8	0.41
PLT0217	A层	409	26.1	70.8	58.5	0.70	20.9	37.3	0.18	1.87	57.3	1.76
	B层	497	23.27	69.3	59.2	0.63	20.6	37.1	0.096	1.73	107	1.27
	C层	268	21.00	62.2	50.5	0.98	20.7	29.7	0.075	1.63	149	1.59
	R层	632	6.10	15.6	11.2	0.38	20.3	8.33	0.043	0.75	209	0.40

注: SiO₂、Al₂O₃、TC、Na₂O、K₂O、CaO、MgO、TFe₂O₃的单位是%, 其余的单位是10⁻⁶。

表2 宜昌市鸦鹊岭地区土壤元素贫富分布特征

Table 2 Distribution characteristics of rich and poor elements of soil in Yaqueling area, Yichang City

剖面编号	土壤分层	相对富集元素	相对贫瘠元素
PLT0207	A层	Mo、Sr、I	C、Na、N、P、K、Cu、Zn、Se
	B层	Mn、Zn、Mo、Cu、Ni	Na、P、K、C、Ca、Se
	C层	Mn、B	C、Na、N、S、Cu、Se、I
PLT0211	A层	Na、C、N、P、S、Cu、Cl、Se	Ca、Mg、Fe、Mn、Ni、I
	B层	Na、N、S、Se、I	Ca、Mg、Zn、Cu、Ni、Sr
	C层	Na、Cu、Zn、Mo、Se	Ca、Mg、P、C、Sr
PLT0213	A层	Ca、Fe、Mn、I	N、P、K、Mo、Sr
	C层	N、Mn、S、I	N、K、B、Zn、Mo、Se、Sr
PLT0217	A层	K、Mg、B、Ge、Ni	P、S、Cu、Se、I
	B层	K、Mg、Ca、C、P、Ge、Sr	N、S、Mn、Se、I
	C层	K、Mg、Ca、C、P、S、Mo、Sr	N、Mn、Cu、Zn、Se

中有效度为土壤元素有效态含量与其全量的比值,以百分数表示,反映土壤元素的活性程度或其可被植物吸收利用的水平(杨大强等,2009)。

从表3可以看出:①4条剖面表层土壤中Si、N、P、K、Ca等元素有效态含量变化范围都比较大,而且离散程度也比较高;②氮、磷、钾有效态在黄棕壤表层土中含量最高,在泥灰岩和钙质砂岩紫色土中含量次之,而在钙质砾岩紫色土中含量最低;③石灰土表层土中的交换性钙含量最高,紫色土次之,黄棕壤最低;④钙质砂岩紫色土表层土壤中有效硅含量最高,而黄棕壤表层土壤中有效硅含量中最低,明显有别于其全量在土壤中的分布规律,可能与由长石石英砂岩风化形成的土壤质地偏砂性、提供的可溶性硅酸少、且容易随水流失,以及由泥灰岩、钙质砂岩、钙质砾岩风化形成的土壤质地偏黏性、提供的硅酸量较多有关(李祖章等,1999);⑤除Si元素外,其他4个元素有效态均与其全量呈正相关,尤其是N、P、Ca元素呈极显著正相关,相关系数均超过0.9。

4.2 稀土元素地球化学特征

图4为母岩层、风化层、土壤层中各稀土元素球粒陨石标准化模式,各层中稀土元素均发生了一定程度的分异,都呈明显的右倾“V”字型配分模式,重稀土部分较为平坦,显示负Eu异常,均属轻稀土富集型。

在各类型成土母岩风化剖面上,各母岩及其对应风化层中稀土元素含量存在明显差异。稀土总量在各母岩中由高到低的次序为:钙质砂岩>钙质砾岩>长石石英砂岩>泥灰岩;除了长石石英砂岩外,其他成土母岩均具有负铈异常的特征,其中钙质砾岩和泥灰岩还具有负铈异常特征。各风化层中稀土总量差异趋于减小,与基岩相反,泥灰岩风化层中稀土总量最高;泥灰岩风化层和钙质砂岩风

化层还分别具有正铈、负铈异常特征。

各剖面中土壤稀土元素均发生了一定程度的分异,各类岩石-土壤剖面中稀土元素在土壤中的富集程度有一定差异,其中紫色土中各稀土元素含量最高,石灰土中各稀土元素含量次之,黄棕壤中各稀土元素含量最低。此外,钙质砾岩和长石石英砂岩在风化成土之后表现出各稀土元素在土壤B层的富集程度要高于土壤A层,尤其是PLT0207剖面土壤B层中存在大量稀土元素富集现象,而钙质砂岩风化形成的紫色土中各稀土元素在A层与B层中的富集程度基本无差异。

4.3 岩石-土壤元素迁移特征

4.3.1 主微量元素

(1) 元素迁移特征

不同类型基岩风化成土过程中同一元素表现出不同的迁移特征,为进一步揭示元素在岩石及土壤不同发生层中的迁移规律,本文以成土母岩元素含量为基础,计算岩石(R)-土壤(C/B/A)的迁移系数,其计算公式(宁晓波等,2009)为: $K=C_n/C_b$,其中K为迁移系数, C_n 为土壤各发生层元素含量, C_b 为母岩元素含量。

总体来看,在各剖面土壤各发生层中的大部分元素的迁移系数都大于1,显示出由岩石至土壤迁移富集的变化;部分元素的迁移系数普遍较大,如Al、Fe、B、Zn、Cu、Ni、I等,显示出极强的迁移富集特征;部分元素的迁移系数小于1,显示出明显贫化特征,如Ca、Mg、Na,可能与土壤淋溶作用有关;个别元素的迁移系数,如Cl,显示由岩石至土壤中的迁移活动不强烈;部分元素在土壤表层的迁移系数急剧变大,如N、P,可能与耕作施肥有关。

(2) 元素迁移的继承性

结合图3,比较4条剖面中岩石至土壤各发生层主微量元素含量的变化(表4,图5),可以发现同一元

表3 部分元素有效态含量水平及其与土壤全量的相关性

Table 3 Available content of some elements and the connection with total content

指标	PLT0207剖面		PLT0211剖面		PLT0213剖面		PLT0217剖面		变异系数/%	与全量相 关系数
	含量/ 10^{-6}	有效度/%	含量/ 10^{-6}	有效度/%	含量/ 10^{-6}	有效度/%	含量/ 10^{-6}	有效度/%		
有效硅	88.7	0.029	72.1	0.022	114.8	0.038	170.6	0.055	38.6	-0.447
水解性氮	61.9	9.033	133.1	9.93	83.4	9.418	63.8	8.204	38.8	0.993
有效磷	3.64	1.632	432	32.9	108	18.392	26.7	8.042	138.9	0.996
速效钾	70.4	0.520	178	1.24	105	0.816	164	0.648	39.0	0.521
交换性钙	3280	86.4	1462	58.4	4112	71.0	2966	74.2	37.4	0.945

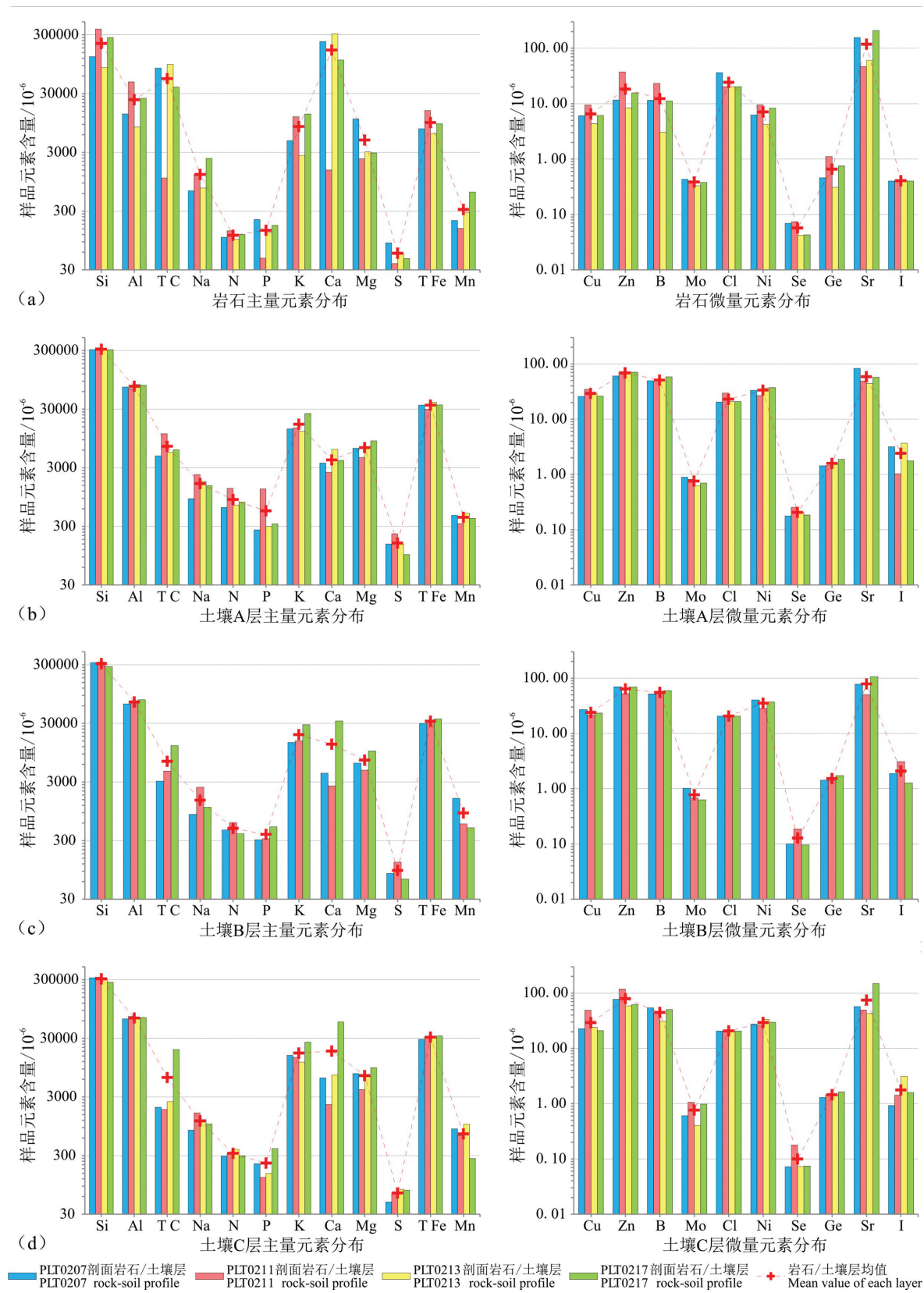


图3 岩石、土壤主/微量元素分布
 Fig.3 Distribution of major and rare elements in rock and soil

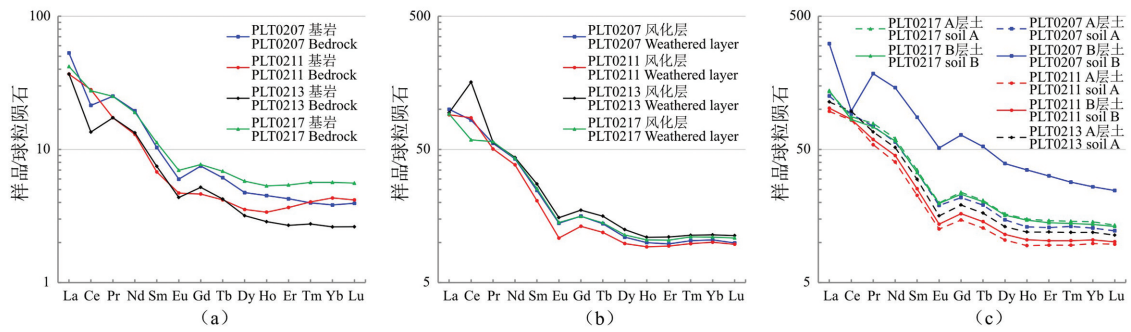


图4 鸦鹊岭地区岩石-土壤剖面稀土元素球粒陨石配分模式图

a—岩石;b—风化物;c—土壤

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of rock and soil from the profile in the area of Yaqueling

a- Bedrock; b- Weathered materials; c- Soil

表4 岩石-土壤元素迁移系数一览

Table 4 List of migration coefficient of rock and soil elements

剖面编号	土壤分层	Si	Al	TC	Na	N	P	K	Ca	Mg	S	TFe
PLT0207	A层	2.44	5.27	0.059	1.33	5.82	1.21	2.91	0.016	0.58	1.73	4.65
	B层	2.56	4.76	0.038	1.26	4.23	1.44	3.00	0.018	0.57	0.96	3.98
	C层	2.54	4.74	0.025	1.22	2.71	1.01	3.25	0.028	0.68	0.56	3.81
PLT0211	A层	0.89	1.41	10.364	1.82	9.67	27.56	1.18	1.667	1.92	5.83	1.92
	B层	0.89	1.43	4.182	1.94	4.39	6.81	1.25	1.714	2.03	3.35	2.06
	C层	0.88	1.49	1.667	1.27	2.43	2.67	1.18	1.492	1.72	1.80	2.06
PLT0213	A层	3.64	9.72	0.058	2.37	6.90	2.31	4.77	0.020	2.26	2.53	6.32
	C层	3.80	7.82	0.027	1.65	3.82	1.15	4.45	0.023	2.20	1.37	5.07
PLT0217	A层	1.15	3.10	0.158	0.63	6.48	1.93	1.88	0.036	2.94	2.11	3.85
	B层	1.03	3.06	0.326	0.47	3.29	2.98	2.11	0.293	3.46	1.42	3.89
	C层	1.01	2.74	0.503	0.44	2.48	2.30	1.93	0.509	3.22	1.65	3.60
剖面编号	土壤分层	Mn	Cu	Zn	B	Mo	Cl	Ni	Se	Ge	Sr	I
PLT0207	A层	2.21	4.29	5.23	4.32	2.07	0.56	5.33	2.57	3.12	0.53	7.95
	B层	7.60	4.45	6.00	4.49	2.36	0.57	6.44	1.45	3.10	0.50	4.68
	C层	4.13	3.76	6.66	4.72	1.41	0.57	4.39	1.05	2.82	0.37	2.31
PLT0211	A层	2.20	3.68	1.92	2.01	2.03	1.48	2.82	3.43	1.31	1.05	2.45
	B层	3.78	2.28	1.41	2.33	1.71	1.02	2.98	2.53	1.27	1.08	7.36
	C层	4.29	5.19	3.17	1.85	2.64	1.03	2.80	2.41	1.31	1.06	3.40
PLT0213	A层	1.78	6.77	8.47	16.14	1.89	1.02	8.66	4.94	5.06	0.73	8.96
	C层	3.66	5.48	7.01	10.13	1.23	1.02	7.86	1.74	4.53	0.70	7.57
PLT0217	A层	0.65	4.28	4.54	5.22	1.84	1.03	4.48	4.28	2.49	0.27	4.40
	B层	0.79	3.81	4.44	5.29	1.66	1.02	4.45	2.23	2.30	0.51	3.18
	C层	0.42	3.44	3.98	4.51	2.58	1.02	3.57	1.73	2.17	0.71	3.98

素在不同剖面上的含量变化有一定相似性,即这些元素表现出在各剖面岩石、土壤中的相对富集或贫化程度是一致的,其含量水平具有明显的继承性。

黄棕壤继承了长石石英砂岩中相对富 Si、Na、N、Se、Mo, 贫 Ca、Mg、Sr 的特征;石灰土继承了泥灰岩中相对富 Ca、Mn、I, 贫 Si、K、Mo、Sr 的特征;由钙

质砂岩风化形成的紫色土继承其相对富 Mg、K、Sr, 贫 Se 的特征;由钙质砾岩风化形成的紫色土继承了相对富 Mo、Sr, 贫 Na、Se 的特征。

Cl 元素在各类岩石至土壤中含量差别不大,而且变化幅度很小,仅在黄棕壤表层土壤中相对富集,但仍然养分贫瘠,远达不到柑橘生长需求。土

壤中Cl元素来源广泛,但大部分来自于包裹在土壤母质中的盐类,在土壤母质风化成土的过程中,这些含氯盐类被逐渐释放出来,以NaCl、MgCl₂、CaCl₂等可溶性盐的形式存在于土壤中(番绍玲,2018)

(3) 元素迁移的差异性

表4和图5显示,同一元素在不同剖面上的含量变化还有一定差异性,以主量元素为代表,表现为这些元素会在某些岩石风化形成的土壤中富集迁聚,而在其他岩石风化形成的土壤中贫化迁出,明显受控于基岩岩性差异。高Ca、低Si的泥灰岩、钙质砂岩、钙质砾岩风化之后,在石灰土、紫色土风化层-淋溶层中的Ca含量急剧减少,而Si的含量却逐渐增加;而且Si元素在这些土壤中的迁移系数大小与其在原岩中的含量呈负相关性,即基岩中Si含量越小,与其对应土壤中Si的迁移系数越大。相反,高Si、低Ca的长石石英砂岩风化之后,其黄棕壤中的Si含量逐渐减少,Ca含量却逐渐增加。

此外,不同元素在同一剖面上的迁移有一定的差异性。Ca、Mg、K等元素受到淋溶作用,表现出这些元素在土壤淀积层(B层),甚至风化层(C层)的含量明显高于其在淋溶层的含量;而Fe、Al等元素普遍表现出,由风化层至淋溶层逐渐迁移富集的特征。

(4) 元素迁移的相关性

通过R型聚类对岩石-土壤元素含量进行分类,可以识别由岩石迁移至土壤各发生层中具有相似迁移特征的元素组合。根据聚类分析谱系图(图6),在样本距离为10时,存在Al-Fe-Ge-Ni-B-K-Si、S-N-Se-P、Cu-Zn-Mo等3组相似元素组合。通过相关性分析,可以发现Al、Fe、Ge、Ni、B、K、Si等元素之间存在显著一极显著正相关性($R > 0.5$),但K、Si之间为例外($R < 0.3$);S、N、Se、P等元素间呈弱一显著正相关($0.9 > R > 0.3$),Cu、Zn、Mo等元素呈显著一极显著正相关($R > 0.7$)。也就是说,在岩石风化成土的过程中,这些呈正相关的元素组合富集或者贫化的趋势是一致的,尤其是具有显著一极显著正相关性的元素组合表现出的迁移特征最为相似;而呈负相关的元素组合之间则是相互制约的,即表现出相反的迁移状态。

4.3.2 稀土元素

稀土元素主要以颗粒态迁移,因其在岩石风化过程中组分变化较小,一般保留有源岩特征,因而

可用稀土元素作为一种重要的物源示踪物(杨守业等,1999)。在剖面样品的球粒陨石标准化稀土配分模式图中(图7),每条剖面从基岩→风化层→土壤的稀土配分模式都很相似,均显示出明显的继承性特征。因不同母岩风化形成的土壤稀土元素含量差异较大,岩石的稀土元素含量决定各土壤层的稀土元素含量,即表现出钙质母岩上发育土壤的稀土元素总量较高,而硅质母岩上发育土壤的稀土元素总量较低。所有剖面的稀土总量从岩石至土壤变化很大,其中多以岩石至风化层的稀土总量变化最明显,多以土壤B层的稀土总量最高。

在钙质砾岩-紫色土剖面(PLT0207)中,稀土总量从大到小依次为土壤淀积层(B层)、土壤淋溶层(A层)、风化层(C层)、底部基岩(R层),因在海南岛热带土壤、美国马萨诸塞州土壤及巴西湿润、半湿润气候条件下的土壤中均出现表层土相对贫稀土元素,下部土壤却更富含稀土元素的现象(王景华,1987;王中刚等,1989;Marker et al.,1990),故认为该剖面淀积层中稀土元素富集可能与成土过程中发生的淋溶作用有关(赵志忠等,2005)。Ce元素在风化过程中表现出不稳定的变化特征,基岩和土壤B层具有明显的负铈异常,因其氧化还原条件的变化,而与其他稀土元素分异(朱维晃等,2003)。

长石石英砂岩-黄棕壤剖面(PLT0211)中的土壤稀土总量是4条剖面中最低的,认为其原因为:(1)长石石英砂岩中稀土总量偏低,致使土壤中继承的稀土总量偏低;(2)土壤中石英含量较高,起到稀释了含稀土副矿物含量的作用(王中刚等,1989),致使土壤中稀土总量偏低。

泥灰岩-石灰土剖面(PLT0213)中,土壤淋溶层的稀土略高于风化层的稀土总量,而远高于基岩的稀土总量。土壤A层出现Eu亏损加剧现象,并不再具有母岩相似的负Ce异常特征,可能受土壤湿度、酸度增加的影响,Ce³⁺被氧化为Ce⁴⁺,发生水解而富集(Marker et al.,1990;李徐生等,2006),导致本应继承的负Ce异常特征消失,而Eu³⁺被淋溶到下层后被还原形成Eu²⁺淋失致使土壤上部Eu的亏损加剧(Kent et al.,1995;Duzgoren Aydin et al.,2009)。土壤B层出现明显的正Ce异常等现象,可能由土壤A层氧化的Ce⁴⁺被淋溶而富集所致。

钙质砂岩-紫色土剖面(PLT0217)中,由基岩至

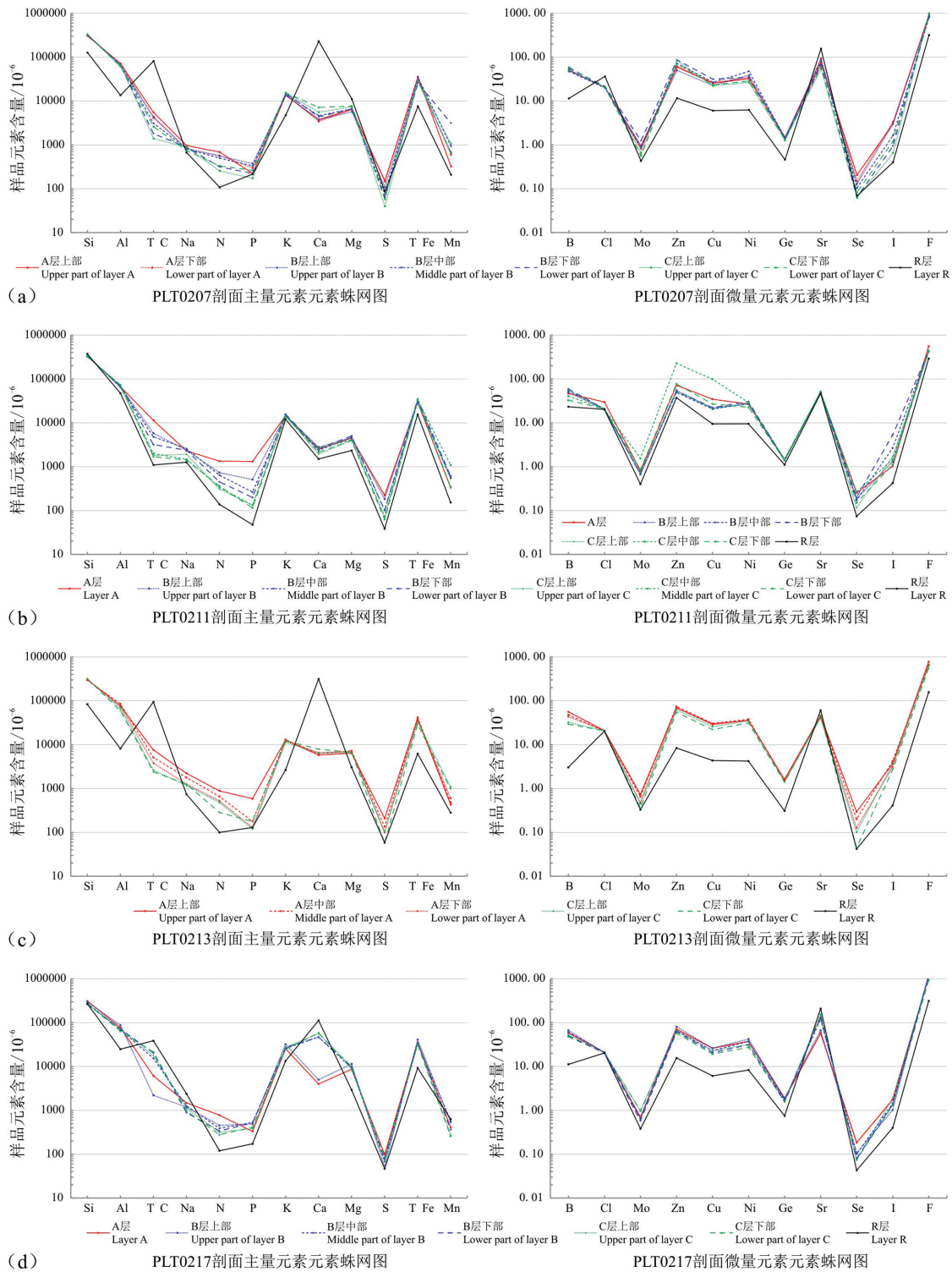


图5 鸦鹊岭地区岩石-土壤剖面主微量元素蛛网图

a—钙质砾岩-紫色土剖面;b—长石石英砂岩-黄棕壤;c—泥灰岩-石灰土剖面;d—钙质砂岩-紫色土剖面

Fig.5 Spider diagram of elements in rock and soil from the profile in the area of Yaqueling

a—Calcareous conglomerate to purple soil;b—Profile of feldspathic quartz sandstone to yellow brown soil;c—Profile of marl to lime soil;d—Profile of calcareous sandstone purple soil

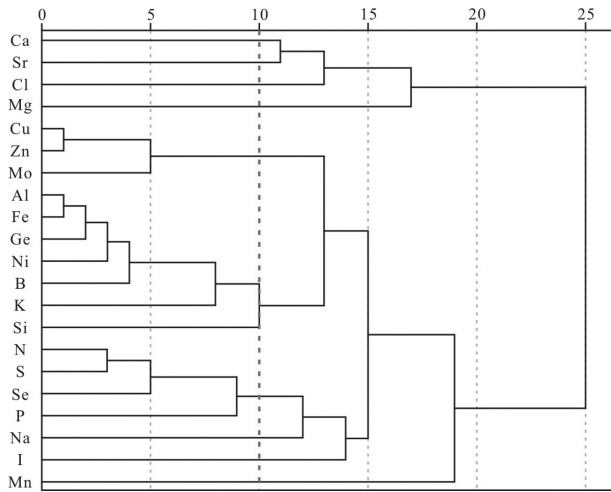


图6 鸦鹊岭地区岩石-土壤剖面元素R型聚类分析谱系图
Fig.6 R type cluster hierarchical diagram of elements in rock and soil from the profile in the area of Yaqueling

土层,稀土总量逐渐增大,有别与其他剖面的稀土多富集于土壤淀积层或风化层,可能是因为受到了较弱的化学风化作用及淋溶作用。

此外,根据岩石-土壤稀土元素相关性矩阵分析可知:除了Ce元素与其他稀土元素之间呈现出较弱的正相关性($0.65 > R > 0.45$)以外,其他各稀土元素之间均呈现出极好的正相关性($R > 0.95$)。

5 柑橘种植适宜性初步评价

5.1 剖面土壤养分对比

依据土壤养分分级标准^④(鲁剑巍等,2002;秦方锦等,2012),可以看出黄棕壤中交换性钙、水解性氮、速效钾、Cu含量最适宜柑橘生长,Zn、Mo适宜,有效磷过量,有效硅缺乏;石灰土中速效钾、Cu、Fe

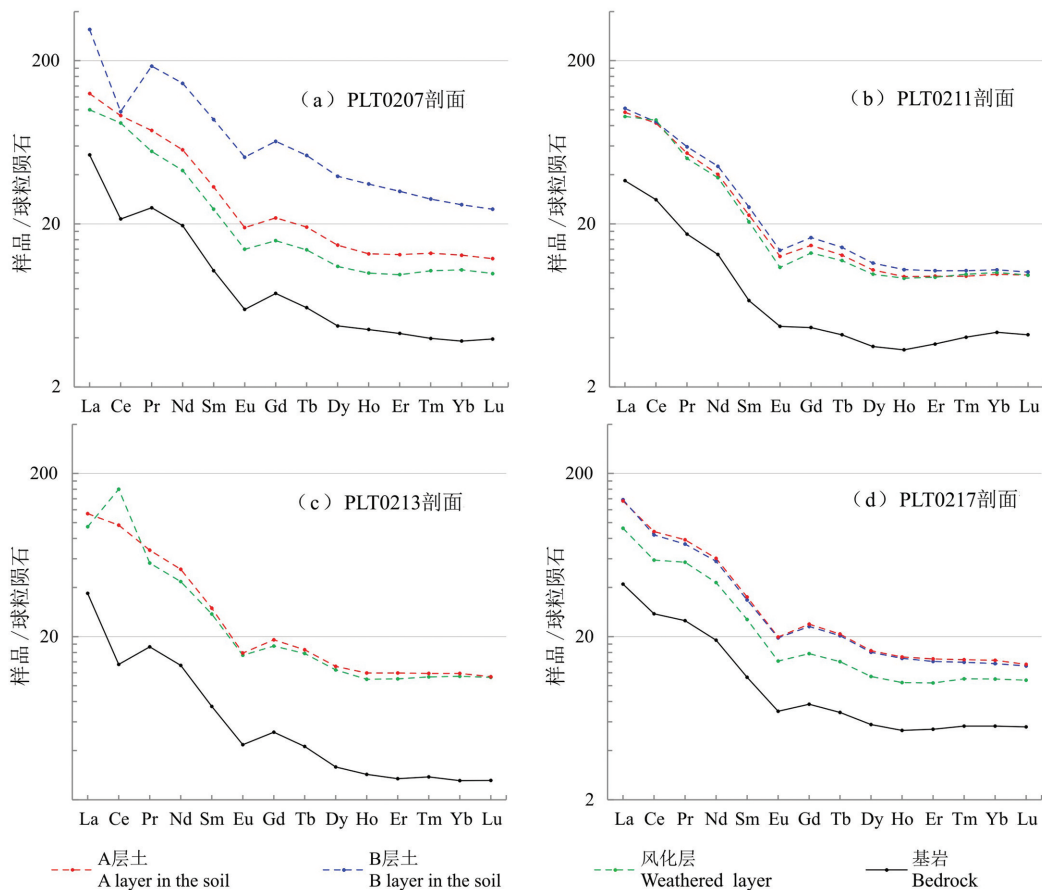


图7 鸦鹊岭地区岩石-土壤剖面稀土元素球粒陨石配分模式图
a—钙质砾岩-紫色土剖面;b—长石石英砂岩-黄棕壤剖面;c—泥灰岩-石灰土剖面;d—钙质砂岩-紫色土剖面
Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of rock and soil from the profile in the area of Yaqueling
a—Profile of calcareous conglomerate to purple soil;b—Profile of feldspathic quartz sandstone to yellow brown soil;c—Profile of marl to lime soil;d—Profile of calcareous sandstone purple soil

含量最适宜,有效硅、Zn含量适宜,交换性钙、有效磷过量,水解性氮含量偏低;钙质砂岩紫色土中有效硅含量最适宜,有效磷、速效钾、Mo、Fe、B、Cu含量适宜,交换性钙含量偏高,水解性氮含量偏低;钙质砾岩紫色土中Mo含量最适宜,Fe、Cu适宜,交换性钙过量,有效硅、水解性氮、速效钾含量缺乏,有效磷量极含缺。与石灰土、钙质砂岩紫色土相比,黄棕壤中的矿质组分略壤丰富些,而钙质砾岩紫色土中的综合养分差。

5.2 柑橘生长岩土环境适宜性评价

黄棕壤继承了长石石英砂岩中Ca、N、Mo等元素的含量特征,尤其是Ca,因为品质较好的柑橘园中的成土母质及其形成的土壤钙的含量明显优于一般橘园(汪庆华等,2007),说明土壤中适量钙对于柑橘品质的提高有一定的作用。另外,由长石石英砂岩风化形成的黄棕壤地质较轻,硅铝比值较高,相对而言,代换量较高,保肥性能较好,盐基丰富,耕性也好,这些都有利于柑橘等生长。综上,在不考虑地形地貌、气候等条件的情况下,选择由红花套组(K₂h)长石石英砂岩风化形成的土壤种植柑橘,会优于牌楼口组(E₂p)钙质砂岩和掇刀石组(Nd)泥灰岩风化形成的土壤,更优于罗镜滩组

(K₂l)钙质砾岩风化形成的土壤。

据此结合第二次、第三次全国土地调查数据,在摸清鸦鹊岭地区当前种植结构的基础上,提出鸦鹊岭柑橘种植区优化建议(图8):①红花套组覆盖面积4057.5 hm²,为柑橘最适宜种植区,其中耕地总面积1067.35 hm²,柑橘园面积1099.64 hm²,耕地可适当改建成柑橘园,并在土壤中适当施加Fe、B、Mn等元素;②牌楼口组覆盖面积2156.7 hm²,为柑橘较适宜种植区,其中耕地总面积832.77 hm²,柑橘园面积667.71 hm²,部分耕地可适当调整成柑橘园,并在土壤中适当施加N、Zn、Mn等元素,以及在橘园中适当套种等喜钙作物,降低橘园Ca含量超标问题;③掇刀石组覆盖面积393.7 hm²,为柑橘一般适宜种植区,其中耕地总面积82.13 hm²,柑橘园面积140.79 hm²,可以适当减少柑橘园面积、增加耕地面积,种植喜K、Fe的豆科作物,以及喜Cu的小麦或水稻;④罗镜滩组覆盖面积2159 hm²,为柑橘较不适宜种植区,耕地总面积167.31 hm²,柑橘园面积531.27 hm²,可以减少柑橘园面积、增加耕地面积,种植喜Mo的豆科作物。

6 结 论

(1)根据相关性分析及聚类分析,识别出Al-

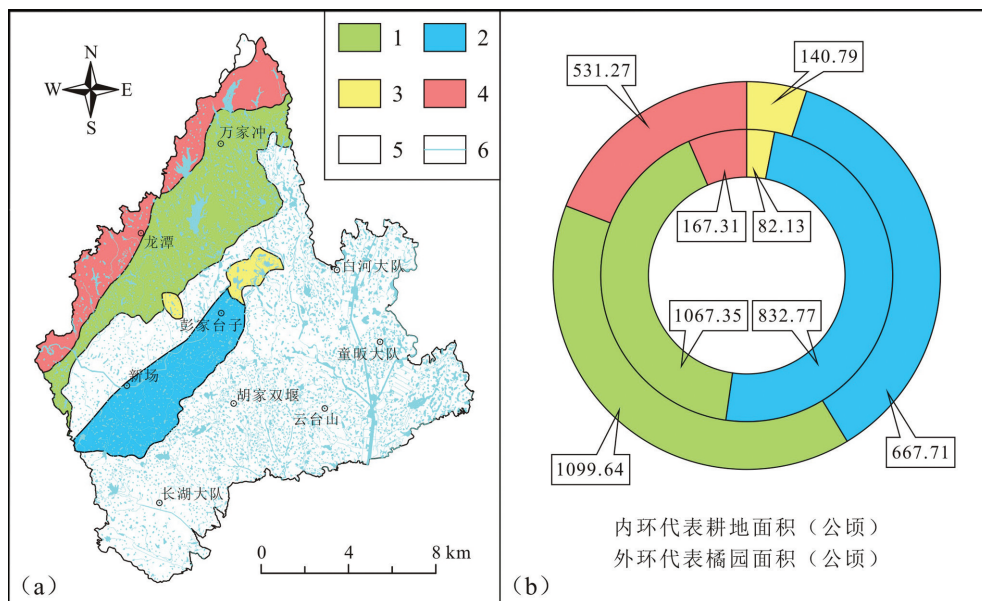


图8 鸦鹊岭柑橘种植区优化图(a)和鸦鹊岭地区各类适宜区种植现状(b)

1—最适宜种植区; 2—较适宜种植区; 3—一般适宜种植区; 4—较不适宜种植区; 5—未评价区; 6—水系及沟渠

Fig.8 Optimization map of orange planting in Yaqueling area (a) and planting status of various suitable areas in Yaqueling area (b)

1—The best suitable planting areas; 2—The second suitable planting areas; 3—General suitable planting areas; 4—Less suitable planting areas; 5—Areas not evaluated; 6—Water system and ditch

Fe-Ge-Ni-B-K-Si, S-N-Se-P, Cu-Zn-Mo 等3组相似元素组合,其中Al、Fe、Ge、Ni、B、K、Si等元素之间存在显著—极显著正相关性,S、N、Se、P等元素呈弱—显著正相关,Cu、Zn、Mo等元素呈显著—极显著正相关。

(2)元素在岩石—土壤中迁移的过程中,其含量水平具有一定继承性,黄棕壤继承了长石石英砂岩中相对富Si、Na、N、Se、Mo,贫Ca、Mg、Sr的特征;石灰土继承了泥灰岩中相对富Ca、Mn、I,贫Si、K、Mo、Sr的特征;由钙质砂岩风化形成的紫色土继承其相对富Mg、K、Sr,贫Se的特征;由钙质砾岩风化形成的紫色土继承了相对富Mo、Sr,贫Na、Se的特征。

(3)各剖面中由基岩→风化层→土壤的稀土配分模式均很相似,显示出明显的继承特征,即土壤为其下伏基岩原地风化的产物。因不同母岩风化形成的土壤稀土元素含量差异较大,岩石的稀土元素含量决定土壤各层位的稀土元素含量,即表现出钙质母岩上发育土壤的稀土元素总量较高,而硅质母岩上发育土壤的稀土元素总量较低。受控于化学风化作用,普遍存在稀土元素由土壤A层淋失,而在土壤B层富集的现象。因氧化还原条件的变化,Ce元素表现活跃,出现了与母岩趋势不一致的正Ce异常。

(4)黄棕壤中的矿质组分较其他土壤丰富,并继承了长石石英砂岩中Ca、N、Mo等元素的含量特征,建议在不考虑地形地貌、气候等条件的情况下,选择由红花套组(K_2h)长石石英砂岩风化形成的土壤种植柑橘,会略优于牌楼口组(E_2p)钙质砂岩风化形成的土壤,优掇刀石组(Nd)泥灰岩风化形成的土壤,更优于罗镜滩组(K_2l)钙质砾岩风化形成的土壤。

致谢:感谢湖北省地质调查院李定远教授级高级工程师、江苏省地质调查研究院廖启林研究员及审稿专家对论文撰写与修改提出的宝贵意见。

注释

- ①宜昌市规划局.2014.宜昌市柑橘产业发展规划2015—2020年.
- ②自然资源部.2016.土地质量地球化学评价规范.

References

Chen En, Jia Lei, Zhu Xin. 2012. Geochemical characteristics for

- growth and fruit quality of Conghua Litchi, Guangdong Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(3): 259–264(in Chinese with English abstract).
- Dong Jianhua, Zhao Weiming, Zhao Keli, Hu Junjing, Li Hao, Yuan Ziqian, Lei Yichen. 2018. Factor analysis of soil fertility under different geological background conditions in *Carya cathayensis* plantation[J]. *Nonwood Forest Research*, 36(4): 52–58(in Chinese with English abstract).
- Duzgoren Aydin N S, Aydin A. 2009. Distribution of rare earth elements and oxyhydroxide phases within a weathered felsic igneous profile in Hong Kong[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(1): 1–9.
- Fan Shaoling. 2018. Characteristics of chlorine nutrition in soil–plant system and rational application of chlorine fertilizer[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 5: 180–181(in Chinese).
- Feng Qun Yao. 2001. Shatian Pomelo's agrogeology of Guangxi[J]. *Guangxi Geology*, 14(1): 47–50(in Chinese with English abstract).
- Gao Lin, Long Huaiyu, Liu Mingda, Lei Qiuliang, Zhang Renlian. 2011. Review on the relationship between agro–geological background and crop quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 42(5): 1263–1267(in Chinese with English abstract).
- He Changrong, Chen Xifen, Xie Heping, Liu Qingbao, Zhong Jiacheng, Chen Shilin. 2014. Current situation, advantages and development countermeasures of citrus industry in Yiling District [J]. *China Fruit News*, (2): 16–17(in Chinese).
- Huang Yuming. 2007. Analysis of the agricultural geological environment for elite quality and high yield of Tianbao banana [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (6): 121–125(in Chinese with English abstract).
- Kent C, Condie J D, Robert L C. 1995. Behavior of rare earth elements in a paleow eathering profile on granodiorite in the front range, Colorado, USA[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(2): 279–294.
- Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Dayuan, Chen Yueyou. 2006. Ree geochemistry of Xiashu Loess in Zhengjiang, Jiangsu province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 43(1): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Li Zhengji. 1996. Large– scale system of rock – soil– plant[J]. *Geological Review*, 42(4): 369– 372(in Chinese with English abstract).
- Li Zuzhang, Tao Qixiang, Liu Guangrong, Zhang Hezhen, Liu Yiren. 1999. Investigation of available silicon content in cultivated soil in Jiangxi Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 11(3): 1– 9(in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Ren Jinghua, Xu Weiwei, Cui Xiaodan, Jin Yang, Li Wenbo, Fan Jian, Zhu Baiwan. 2016. Geological and geochemical background of Se– rich rice production in Yili area, Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 43(5): 1791–1802(in Chinese with English abstract).

- Liao Qilin, Cui Xiaodan, Huang Shunsheng, Huang Biao, Ren Jinghua, Gu Xueyuan, Fan Jian, Xu Hongting. 2020. Elemental geochemistry of Selenium-enriched soil and its main origin in Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1813-1825 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yun, Li Chunbin, Yang Qing, Hu Hairong, Yu Dandan, Li Jinpeng, Han Yuping, Yang Kongtao. 2012. Investigation on fertilization and soil fertility of citrus orchards in Yaowan Township of Yichang City[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 6: 286-287, 292(in Chinese with English abstract).
- Liu Yun. 2014. Evaluation and Improvement of Cultivated Land Capacity in Yichang City[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1-190(in Chinese).
- Liu Jianwei, Chen Fang, Wang Fuhua, Liu Dongbi, Wan Yunfan, Yu Changbing, Hu Fanglin, Wang Mingrui, Wang Yunhua. 2002. Study of classification of the soil nutrient status of citrus orchard in Hubei Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 8(4): 390-394(in Chinese with English abstract).
- Lu Jinggang. 1997. *Soil Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 11-27(in Chinese).
- Luan Wenlou, Zhao Jinying, Cui Xingtao, Song Zefeng, Chen Yuanyuan. 2007. Relationship between types of soil parent rock and Chinese date quality in Xingtang, Hebei[J]. *Geology in China*, 34(5): 935-941(in Chinese with English abstract).
- Ma Xuemei, Tian Dazheng, Li Wei, He Jin. 2020. Geochemical evaluation of land quality in Qiyang County[J]. *Geological Survey and Research*, 43(3): 230-239.
- Marker A, De Oliveira J J. 1990. The formation of rare earth elements scavenger minerals in weathering products derived from alkaline rocks of Se-bahia, Brasil[J]. *Chem. Geol.*, 84: 373-374.
- Ning Xiaobo, Xiang Wenhua, Fang Xi, Yan Wende. 2009. Chemical element concentration in calcite, calcareous soil and plants on the rocky desertification area in Huaxi, Guiyang[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(5): 34-41(in Chinese with English abstract).
- Qin Fangjin, Wang Fei, Lu Hong, Cen Tangxiao, Wang Bin, Han Hongxuan, Zhuang Yaqi, Zhang Huan. 2012. Study on available silicon contents in cultivated land and its influencing factors in Ningbo city[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 24(2): 263-267(in Chinese with English abstract).
- Tao Chunjun, Zhou Tianjian, Zhang Xiaorong, Luo Jiao, Jia Shijun, Chen Furong. 2020. Research on soil environmental quality and planting suitability evaluation of cuilan producing area in Yuexi, Anhui Province[J]. *Northwestern Geology*, 53(1):261-268(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiangnan, Feng Huoju, Li Baiqiu, Fang Kai, Shi Jianmin. 2018. Distribution, transportation and accumulation of mineral elements in a rock-soil-plant system of *Phyllostachys glauca* in limestone mountains[J]. *Carsologica Sinica*, 37(5): 770-776(in Chinese with English abstract).
- Wang Jinghua. 1987. *The Chemical Elements in the Soil and Plants in Hainan Island*[M]. Beijing: Science Press, 1-150(in Chinese).
- Wang Ping, Wang Tao, Lai Shuqin. 2007. Elements characteristics of parent rocks in the characteristic agriculture and their effects on crops[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 36(7): 417-421(in Chinese with English abstract).
- Wang Qinghua, Tang Gennian, Li Rui, Ma Yugao, Wei Xin. 2007. *Geological Background of Unique Farm-Products in Zhejiang*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-178(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhenli, Deng Tongde, Wang Ruimin, Shao Wenjun, Xu Ming, Liao Wanqi. 2009. Characteristics of migration and accumulation of rare earth elements in the rock-soil- navel orange system[J]. *Geology in China*, 36(6): 1382-1394(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. 1989. *Geochemistry of Rare Earth Elements* [M]. Beijing: Science Press, 1-535(in Chinese).
- Yan Hongze, Zhou Guohua, Sun Binbin, He Ling, Liu Yinfei, Hou Shujun. 2018. Geochemical characteristics of the bayberry producing area in Longhai, Fujian[J]. *Geology in China*, 45(6): 1155-1166(in Chinese with English abstract).
- Yang Daqiang, Liang Bin, Hu Li, Ren Zhidong, Tang Zhenjun, Yu Guangmo. 2009. The assessment of total and available content of minor elements in soil in the monkshood growing area, Hexi, Jiangyou City[J]. *Acta Geologica Sinica*, 29(2): 220-223(in Chinese with English abstract).
- Yang Qin, Liu Yun, Li Chunbin, Hu Guangcan, Zhou Bangguo, Li Chunhong, Chen Yu. 2013. Yichang Citrus orchard soil fertility survey[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, (5): 7-10, 224(in Chinese with English abstract).
- Yang Shouye, Li Congxian. 1999. Research progress in REE tracer for sediment source[J]. *Advance in Earth Sciences*, 14(2): 164-167(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guoxuan, Ren Mingqiang. 2015. Study of element migration and tea quality of rock-soil system in Yunguishan tea producing area of Meitan, Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 32(2): 142-146(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhizhong, Bi Hua, Liu Qiang. 2005. Spatial distribution of ree elements contents in latosol in the western part of the Hainan island[J]. *Soils*, 37(5): 506-511(in Chinese with English abstract).
- Zhu Weihuang, Yang Yuangen, Bi Hua, Liu Qiang. 2003. Progress in geochemical research of rare earth element in soils[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(3): 259-264(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈恩, 贾磊, 朱鑫. 2012. 影响从化荔枝生长及果实品质的地球化学

- 特征[J]. 华南地质与矿产, 28(3): 259-264.
- 董建华, 赵伟明, 赵科理, 胡俊靖, 李皓, 袁紫倩, 雷亦晨. 2018. 基于地质背景的山核桃林地土壤肥力因子分析[J]. 经济林研究, 36(4): 52-58.
- 番绍玲. 2018. 土壤-植物系统中的氮营养特点与含氮肥料的合理施用[J]. 现代农业科技, 5: 180-181.
- 冯群耀. 2001. 广西沙田柚农业地质[J]. 广西地质, 14(1): 47-50.
- 高琳, 龙怀玉, 刘鸣达, 雷秋良, 张认连. 2011. 农业地质背景与特色农作物品质相关性研究进展[J]. 土壤通报, 42(5): 1263-1267.
- 贺昌蓉, 陈西芬, 谢合平, 刘庆保, 钟家成, 陈世林. 2014. 夷陵区柑桔产业现状、优势与发展对策[J]. 中国果业信息, (2): 16-17.
- 黄毓明. 2007. 优质高产天宝蕉的农业地质环境分析[J]. 水文地质工程地质, (6): 121-125.
- 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 陈曰友. 2006. 镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究[J]. 土壤学报, 43(1): 1-7.
- 李正积. 1996. 时代前缘的全息探索——岩土植物大系统研究[J]. 地质评论, 42(4): 369-372.
- 李祖章, 陶其骧, 刘光荣, 章和珍, 刘益仁. 1999. 江西省耕地土壤有效硅含量调查研究[J]. 江西农业学报, 11(3): 1-9.
- 马雪梅, 田大争, 李伟, 何锦. 2020. 曲阳县土地质量地球化学评价[J]. 地质调查与研究, 43(03): 230-239.
- 廖启林, 任静华, 许伟伟, 崔晓丹, 金洋, 李文博, 范健, 朱伯万. 2016. 江苏宜溧富硒稻米产区地质地球化学背景[J]. 中国地质, 43(5): 1791-1802.
- 廖启林, 崔晓丹, 黄顺生, 黄标, 任静华, 顾雪元, 范健, 徐宏婷. 2020. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源[J]. 中国地质, 47(6): 1813-1825.
- 刘云, 黎纯斌, 杨青, 胡海荣, 余丹丹, 李金鹏, 韩玉萍, 杨孔涛. 2012. 宜昌市窑湾乡柑橘园施肥现状及土壤肥力调查研究[J]. 现代农业科技, 6: 286-287, 292.
- 刘云. 2014. 宜昌市耕地地力评价与改良[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1-190.
- 鲁剑巍, 陈防, 王富华, 刘冬碧, 万运帆, 余常兵, 胡芳林, 王明锐, 王运华. 2002. 湖北省柑橘园土壤养分分级研究[J]. 植物营养与肥料学报, 8(4): 390-394.
- 陆景冈. 1997. 土壤地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1-269.
- 栾文楼, 赵瑾瑛, 崔邢涛, 宋泽峰, 陈媛媛. 2007. 河北行唐大枣品质与成土母岩类型关系的探讨[J]. 中国地质, 34(5): 935-941.
- 宁晓波, 项文化, 方晰, 闫文德. 2009. 贵阳花溪石灰岩、石灰土与定居植物化学元素含量特征[J]. 林业科学, 45(5): 34-41.
- 秦方锦, 王飞, 陆宏, 岑汤校, 王斌, 韩红焯, 庄亚其, 张欢. 2012. 宁波市耕地有效硅含量及其影响因素[J]. 浙江农业学报, 24(2): 263-267.
- 陶春军, 周天健, 张芙蓉, 罗娇, 贾十军, 陈富荣. 2020. 安徽岳西翠兰产地土壤环境质量及种植适宜性评价研究[J]. 西北地质, 53(1): 261-268.
- 王江南, 冯火炬, 李百球, 方楷, 施建敏. 2018. 石灰岩山地淡竹林“岩石-土壤-植物”的元素分布与迁移积聚特征[J]. 中国岩溶, 37(5): 770-776.
- 王景华. 1987. 海南岛土壤和植物中的化学元素[M]. 北京: 科学出版社, 1-150.
- 王萍, 王涛, 赖树钦. 2007. 特色农业成土母质的元素特征及其对作物的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 36(7): 417-421.
- 汪庆华, 唐根年, 李睿, 马愈高, 卫新. 2007. 浙江省特色农产品立地地质背景研究[M]. 北京: 地质出版社, 1-190.
- 汪振立, 邓通德, 王瑞敏, 邵文军, 徐明, 廖万琪. 2009. 岩石-土壤-脐橙系统中稀土元素迁聚特征[J]. 中国地质, 36(6): 1382-1394.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1-535.
- 严洪泽, 周国华, 孙彬彬, 贺灵, 刘银飞. 2018. 候树军福建龙海杨梅产地元素地球化学特征[J]. 中国地质, 45(6): 1155-1166.
- 杨大强, 梁斌, 胡立, 任志栋, 唐桢俊, 余光模. 2009. 四川江油河西乡附子产地土壤中微量元素含量与有效性评价[J]. 四川地质学报, 29(2): 220-223.
- 杨青, 刘云, 黎纯斌, 胡光灿, 周帮国, 李春红, 陈玉. 2013. 宜昌市柑橘园土壤肥力调查研究[J]. 中国园艺文摘, (5): 7-10, 224.
- 杨守业, 李从先. 1999. REE示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展: 14(2): 164-167.
- 赵国宣, 任明强. 2015. 贵州湄潭云贵山优质茶叶产地岩-土系统元素分配迁移与茶叶品质关系研究[J]. 贵州地质, 32(2): 142-146.
- 赵志忠, 毕华, 刘强. 2005. 海南岛西部地区砖红壤中稀土元素含量的空间分异特征[J]. 土壤, 37(5): 506-511.
- 朱维晃, 杨元根, 毕华, 刘强. 2003. 土壤中稀土元素地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 22(3): 259-264.