

doi: 10.12029/gc20180606

严洪泽, 周国华, 孙彬彬, 贺灵, 刘银飞, 侯树军. 2018. 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.
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).

福建龙海杨梅产地元素地球化学特征

严洪泽^{1,2,3} 周国华^{1,2} 孙彬彬^{1,2} 贺灵^{1,2} 刘银飞^{1,2} 侯树军^{1,2}

(1. 国土资源部地球化学探测重点实验室, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;
2. 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北 廊坊 065000; 3. 广东省佛山地质局, 广东 佛山 528000)

摘要:福建省是中国杨梅重要产地, 其中龙海市浮宫杨梅因其独特品质而名扬海外, 是当地的名特优农产品。以龙海杨梅产地为研究区, 系统采集了 35 套岩石-土壤-杨梅果实样品, 测定了主量组分、植物营养有益元素、有害元素以及土壤部分营养元素有效态含量。研究表明: 受地质背景影响, 浮宫镇及其周边杨梅产地土壤中植物营养有益元素的有效度及其有效量普遍高于东泗镇, 而有害元素含量较低, 为浮宫杨梅的优质高产、富硒杨梅产出提供了地质地球化学条件; 土壤中植物营养元素 P、Mn、Cu、Zn、S 有效态含量与其全量显著正相关; 研究区岩石、土壤 Se 含量均远高于全国平均水平, 采集的 35 件杨梅果实样品富硒率高达 74.3%; 植物营养有益元素的富集系数明显高于有害元素, 显示出杨梅对营养有益元素的选择性吸收以及对有害元素的阻遏作用。

关键词:地球化学特征; 岩石-土壤-杨梅; 营养有益元素; 有害元素; 富硒环境; 龙海

中图分类号: P595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)06-1155-12

Geochemical characteristics of the bayberry producing area in Longhai, Fujian

YAN Hongze^{1,2,3}, ZHOU Guohua^{1,2}, SUN Binbin^{1,2}, HE Ling^{1,2}, LIU Yinfei^{1,2}, HOU Shujun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. International Center on Global-scale Geochemistry, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Langfang 065000, China; 3. Guangdong Foshan Geology Bureau, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: Fujian Province is an important producing area of bayberry in China. Fugong bayberry, known overseas for its unique quality, is a high quality agricultural product. The main production area of bayberry in Longhai was selected for this study. Rocks, soils and fruits were sampled from this area, and the values of their main components and beneficial-nutritional as well as harmful elements were determined. The authors also measured the available values of some nutritional elements. Some conclusions have been reached: (1) The content of beneficial-nutritional elements is higher in Fugong Town than that in Dongsì Town. On the contrary, the content of harmful elements in the Dongsì Town is relatively higher than that in Fugong Town; (2) there is a certain

收稿日期: 2016-09-05; 改回日期: 2018-01-09

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201411091-2)资助。

作者简介: 严洪泽, 男, 1991 年生, 硕士, 主要从事环境地球化学工作; E-mail: 1033376202@qq.com。

通讯作者: 孙彬彬, 男, 1982 年生, 博士生, 高级工程师, 现从事应用地球化学研究工作; E-mail: sunbinbin@igge.cn。

correlation for the composition of elements between rocks, soils and fruits, reflecting the impact of geological setting on geochemistry; (3) the available values of P, Mn, Cu, and Zn have significantly positive correlation with their total content; (4) the content of Se in rocks and soils in the study area is obviously higher than the national average level, and the rate of Se-enriched is up to 74.3% for 35 bayberry fruits; (5) the Transfer Factor (TF) of beneficial-nutritional elements is significantly higher than that of harmful elements, indicating bayberry's active selective uptake of beneficial-nutritional elements and inhabitation of the intake of harmful elements.

Key words: geochemical characteristics; rock-soil-bayberry system; beneficial-nutritional elements; harmful elements; Se-enriched environment; Longhai

About the first author: YAN Hongze, male, born in 1991, master, majors in environmental geochemistry; E-mail: 1033376202@qq.com.

About the corresponding author: SUN Binbin, male, born in 1982, doctor candidate, senior engineer, majors in applied geochemistry; E-mail: sunbinbin@igge.cn.

Fund support: Supported by Ministry of Land and Resources Public Welfare Special Research Fund Program (No. 201411091-2).

1 引 言

杨梅是中国特产常绿果种,栽培历史悠久,耐酸、耐瘠,省工、省肥,管理要求粗放,经济效益高,适合栽种于中国长江以南的低山丘陵区(何新华等,2006)。杨梅果实富含纤维素、矿物质、维生素及锌、铁、钾等微量元素和8种对人体有益的氨基酸,越来越受到消费者的青睐,具有良好的市场发展前景。

福建处于适宜杨梅生长的中国东南沿海地区,杨梅种植面积及产量位居全国第二,仅次于浙江省,以龙海市浮宫镇杨梅最为有名,被冠以“福建省杨梅第一镇”。该镇自宋代以来就有杨梅种植,至今已有700多年栽种历史。现在浮宫杨梅的种植已经扩大到了周边几个镇,其产出的杨梅都称为“浮宫杨梅”。经过世代果农培育改良,浮宫杨梅成为当地名副其实的名特优农产品,先后获批“国家地理标志产品”和“中国地理证明商标”。在品牌效应和政府扶持带动下,龙海市杨梅产业蓬勃发展。

大量研究表明,名特优农产品的特殊品质除了与品种、气候、管理技术等因素有关外,还往往与当地特定的生态地质环境、地球化学条件有关,表现出与地质环境之间的相关性(李正积,1996;李丹权,2003)。例如,魏格纳等(张连昌等,1993)研究发现波尔多、香槟和布尔贡3个地区葡萄酒的醇厚香味与其产地发育的古新世、渐新世地层有关。国内对行唐大枣、四会砂糖桔、从化荔枝等(栾文楼等,2007;黎旭荣等,2012;陈恩等,2012)名优特产

地的调查研究表明,名特优农产品的品质与产地生态地球化学特征之间存在一定的关系。对浮宫杨梅的已有研究主要集中在地形、地貌、气候及施肥等方面(朱寿燕等,2011;兰雅萍等,2013;何桂娥等,2014),对杨梅产地地质地球化学背景研究较少,认识尚不清晰。

本文以福建龙海市杨梅种植规模较大、品质较好的浮宫镇及其周边地区(白水镇、港尾镇)作为主研究区(以下简称浮宫镇),以杨梅种植规模较小、品质较差的东泗镇为对照区,系统采集了岩石、土壤、杨梅果实的配套样品,测定元素全量及土壤样品部分元素有效态含量,据此研究杨梅产地岩石、土壤地球化学特征及其与杨梅生长的关系,评价当地富硒杨梅产出情况,以期指导浮宫杨梅产业发展、提升种植杨梅的经济效益。

2 研究方法

2.1 样品采集与预处理

选取浮宫镇和东泗镇有较好代表性的杨梅种植园,在杨梅采摘期采集了杨梅果实及对应的根系土壤样品,同时采集了周边出露的岩石样品,采样点位分布见图1。共采集35套样品,其中浮宫镇采集了31套样品,东泗镇采集了4套样品。

土壤样品采集与野外处理。在选定的杨梅园内,在方圆30 m范围内,开挖5个浅坑,采集0~40 cm土壤,构成1件土壤样。土壤样品重量大于2000 g,装于洁净布样袋内。回野外驻地,风干,用木棒敲碎,充分过10目筛(小于2 mm),混匀,备

用。送实验室后,取适量小于2 mm的土壤样品,直接测定pH以及营养元素有效态。取100 g小于2 mm的土壤样品,研磨至200目后,测定各种化学元素含量。

岩石样品采集与加工。在杨梅园内土壤采样点及其附近,采集出露的原地基岩样品。原则上要求敲打出新鲜岩石面后采集基岩样品,部分点位由于出露基岩经受了一定程度的风化,尽可能采集风化程度较低、相对新鲜的岩石。在基岩出露面积较大的点位,采集5处以上基岩碎块组成一件样品。回实验室后,将岩石样晒干,经无污染粗碎、细碎至小于0.5 cm的岩块后,混匀,用四分法缩分出100 g左右样品,在恒温干燥箱中45℃烘干,用高铝瓷球磨机研磨至200目筛(小于0.074 mm),测定各种化学元素含量。

杨梅样品采集与预处理。在土壤样采集范围内,采摘不同朝向、不同高度及枝条不同部位的杨梅果实不少于50个,装入干净塑料袋,组成1件样品。回野外驻地,称取鲜重。用自来水快速冲洗3遍,再用去离子水快速冲洗2遍,沥干水分,去核,用

均浆机打成浆液,装入250 mL水样瓶,密封,编号,冷冻保存,并于半月内送实验室分析测试。在野外工作前,按相关规范要求使用10%HNO₃浸泡并清洗样瓶。

2.2 样品分析测试

岩石样品,采用发射光谱法测定B,原子荧光法测定As、Hg、Se,电感耦合等离子体质谱法测定Pb、Cd、Cr、Cu、Mo、Ni、Zn、REE,粉末压片X荧光法测定Mn、P、S、Zr及SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、K₂O、Na₂O、CaO,电感耦合等离子体发射光谱法测定MgO。

土壤样品,除MgO采用粉末压片X荧光法测定外,其他主微量组分的测定方法同岩石样品。另外,采用电位法测定土壤pH;B、Cu、P、Mn、Mo、S、Zn的有效态测定方法参见LY/T1210-LY/T1275《森林土壤中元素有效态分析方法》。分析时插入国家一级标准物质控制分析准确度,按样品总数的5%抽取检查样品编成密码进行重复分析以及对异常点进行再次重复分析,以控制分析测试精密度,分析结果的检出限、准确度、精密度、报出率等指标都满足或优于《地质矿产实验室测试质量管理规范》

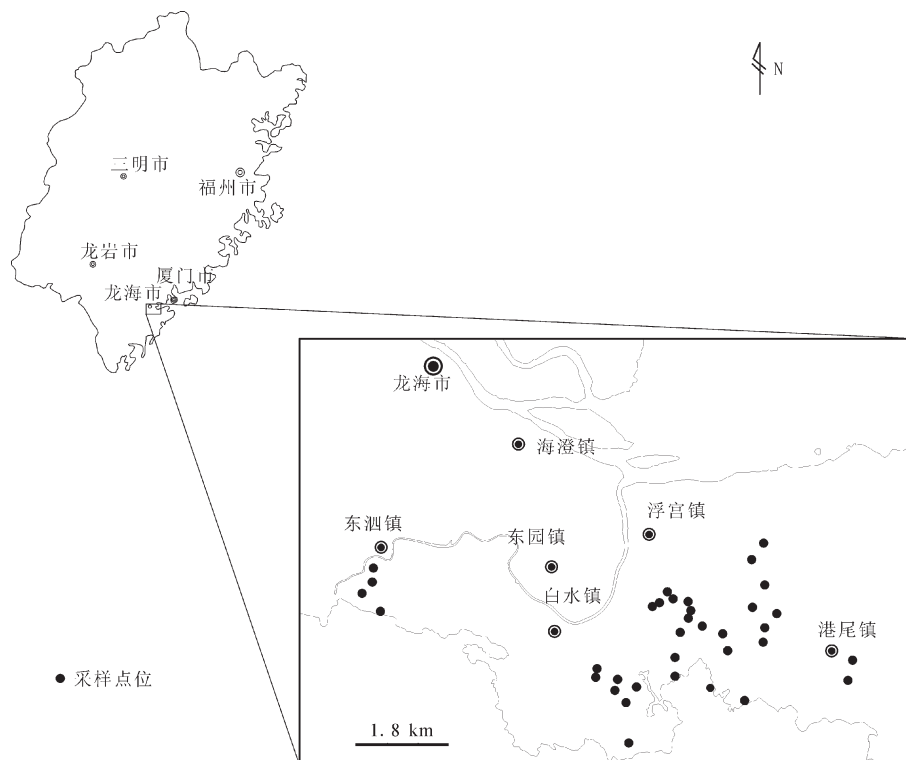


图1 研究区位置与采样点位示意图

Fig.1 Location of the study area and sampling points

表1 龙海杨梅产地岩石和土壤元素含量均值
Table 1 Average content of elements in rocks and soils in bayberry producing area, Longhai

元素	岩石					土壤			
	浮宫镇	东泗镇	全部	华南褶皱系	中国花岗岩	浮宫镇	东泗镇	全部	全国
	31/件	4/件	35/件			31/件	4/件	35/件	
As	0.88	57.24	10.8	0.9	1.2	1.89	14.67	5.55	8.20
B	4.02	7.95	4.47	3.8	5.5	8.48	12.82	8.98	48
Cd	30.13	19.25	28.89	70	57	21.58	38.5	23.51	120
Cr	2.60	3.35	3.03	4	6.6	10.59	18.78	11.53	51.80
Cu	6.06	4.76	5.91	4.9	5.5	6.99	4.90	6.75	18.20
Hg	14.26	17.79	14.66	5.6	6.4	37.46	51.73	39.09	33.0
Mn	362.7	217.75	346.1	365	320	338.6	212	324.1	586
Mo	0.49	0.63	0.88	0.97	0.7	1.20	1.59	1.52	2.00
Ni	5.08	6.10	5.20	5.5	5.2	7.43	7.85	7.48	21.7
P	72.00	97.00	99.91	330	345	366.0	273.5	386.2	573
Pb	24.35	36.44	27.23	30	26	37.37	27.85	36.28	23.3
REE	194.3	120.9	185.9	235.4	202.67	185.2	153.1	178.6	186.2
S	86.74	106.7	89.03	150	90	194.5	182.8	193.2	261
Se	0.06	0.18	0.08	0.022	0.03	0.37	0.62	0.40	0.29
Zn	32.67	24.08	34.12	47	40	41.81	37.39	41.30	53.9
SiO ₂	72.19	72.33	72.2	72.75	72.4	59.25	70.41	60.52	65.3
Al ₂ O ₃	13.11	15.89	13.42	13.57	13.83	20.98	15.75	20.38	12.75
TFe ₂ O ₃	1.65	3.32	1.84			2.81	3.42	2.88	4.2
CaO	1.03	0.35	0.96	1.06	1.34	0.22	0.17	0.21	2.77
MgO	0.11	0.18	0.15	0.75	0.64	0.22	0.19	0.22	1.31
Na ₂ O	2.69	0.29	2.32	3.02	3.55	0.57	0.36	0.55	1.99
K ₂ O	4.68	4.29	4.64	3.02	4.34	4.06	1.93	3.82	2.64
pH						4.59	4.55	4.59	

注:含量单位:SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、CaO、MgO、Na₂O、K₂O为10⁻²;Cd、Hg为10⁻⁹;pH无量纲;其他元素为10⁻⁶;华南褶皱系和中国花岗岩数据来自迟清华,鄢明才著《应用地球化学元素丰度数据手册》;全国土壤数据来自魏复盛著《中国土壤元素背景值》。

和中国地质调查局颁布的《DD2005-03生态地球化学评价样品分析技术要求》中的相关要求。

杨梅样品,采用氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定As、Se,采用冷蒸气-原子荧光光谱法(CV-AFS)测定Hg,采用高分辨等离子体质谱法(HR-ICP-MS)测定B、Ca、Cd、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Mo、Ni、P、Pb、REE、S、Zn。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中国地质调查局颁布的《DD2005-03生态地球化学评价样品分析技术要求》中生物样品的分析质量要求。

岩石、土壤样品分析测试工作由河南省岩石矿物测试中心完成。杨梅样品测试工作由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室完成。

3 岩石、土壤元素含量特征

3.1 岩石元素含量

龙海杨梅主产区浮宫镇广泛分布花岗岩类岩石,而对照区东泗镇主要为凝灰岩和砂岩。表1给出了研究区岩石和土壤样品元素含量均值。均值确定方法是,当数据服从正态分布时选用算术平均

值作为其均值,否则以中位数作为均值(张利田等,2007)。文章中其他表格中均值的确定方法同表1。由表可见,受岩石类型影响,浮宫镇岩石主成分 Na_2O 、 CaO 含量明显高于东泗镇, TFe_2O_3 、 MgO 则低于东泗镇,两地岩石中 SiO_2 、 K_2O 、 Al_2O_3 含量相近;东泗镇岩石中重金属元素As、Cr、Hg、Ni、Pb高于浮宫镇,尤其是As,高达浮宫镇的65倍,而浮宫镇岩石中Cd含量较高;浮宫镇岩石中作物营养有益元素Cu、Mn、REE、Zn含量高于东泗镇,B、Mo、P、S、Se含量则低于东泗镇。

与华南褶皱系、中国花岗岩元素平均值对比可见,浮宫镇花岗岩中 SiO_2 、 Al_2O_3 平均值与华南褶皱系、中国花岗岩基本一致; CaO 、 MgO 、 Na_2O 低于华南褶皱系和中国花岗岩,其中 MgO 显著偏低; K_2O 则高于华南褶皱系和中国花岗岩;重金属元素As与华南褶皱系中As含量基本一致,但低于中国花岗岩;重金属元素Cd、Cr、Pb低于华南褶皱系和中国花岗岩,Cd明显偏低;Ni与中国花岗岩相近,低于华南褶皱系;Hg明显高于华南褶皱系和中国花岗岩;植物营养有益元素方面,B与华南褶皱系相近,低于中国花岗岩;S与中国花岗岩相近,低于华南褶皱系;Mn高于中国花岗岩而低于华南褶皱系;Mo、P、REE、Zn低于华南褶皱系和中国花岗岩,P仅为其 $1/4\sim 1/3$;Cu、Se高于华南褶皱系和中国花岗岩,其中Se显著偏高。

3.2 土壤元素含量

杨梅园土壤样品中元素及理化指标的平均值列于表2。由表可见,研究区土壤pH值总体较低,呈明显的酸性特征;与全国表层土壤元素平均值相比,研究区土壤中常量组分Ca、Mg、Na含量低,而富含Al,与地理气候控制下地带性红壤化学组成特征相吻合;研究区土壤中微量元素As、B、Cd、Cr、Cu、Mn、Mo、Ni、P、S、Zn含量偏低,Hg、Pb、Se含量较高。

对比发现,浮宫镇与东泗镇土壤元素组成特征有较大差异。东泗镇土壤中 SiO_2 、 TFe_2O_3 含量高于浮宫镇,而 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 则低于浮宫镇,两地土壤中 CaO 、 MgO 含量相近;东泗镇土壤中重金属元素As、Cd、Cr、Hg含量明显高于浮宫镇,其中As是浮宫镇的近8倍,与两地岩石As含量特征相对应,反映东泗镇土壤高As主要是由基岩地球化学特征所决定,而非人为污染;浮宫镇土壤Pb含量较高,两

地土壤中Ni含量相近;东泗镇土壤中作物营养有益元素B、Mo、Se含量较高,Cu、Mn、P、S、REE、Zn则在浮宫镇土壤中含量较高。整体来看,土壤微量元素含量受成土母岩影响较大,两地土壤与岩石中微量元素含量特征基本一致。

3.3 岩石-土壤元素含量关系

土壤是由岩石经过长期风化作用形成的,土壤元素组成与含量很大程度上继承了成土母岩地球化学特征,除后期农业生产、污染排放等人为因素对土壤组成的叠加影响外,土壤中绝大部分元素都来自于成土母岩。因此,土壤地球化学特征往往与成土母岩具有相似性。

图2为研究区部分元素在岩石、土壤中的关系。从图中可以看出,这些元素在岩石和土壤中共消长的趋势,呈现出较好的正相关特征,表明土壤元素组成对母岩有很强的依赖性。在研究名特优农产品产地生态地球化学特征时,不能只着眼于土壤-作物系统,还需查明产地基岩的元素分布特征,构建岩石-土壤-作物的立体系统,以便依据地质背景指导名特优种植布局规划。

在成土母岩(母质)经历风化作用形成土壤的过程中,不仅伴随着原生矿物的分解和次生矿物的形成过程,而且元素组成也会发生很大的变化。在东南沿海湿热气候条件下,表生环境中活动性强的组分,如Ca、Mg、Na等金属阳离子大量淋失贫化,而表生环境下相对稳定的组分,如Al、Fe等则相对富集,造成从岩石-土壤物质总量和元素浓度的协同变化。

土壤与岩石元素浓度比值(K_1 =土壤中某元素浓度/岩石中某元素浓度)可以在一定程度上反映成土过程元素的相对富集贫化程度。考虑到成土过程物质总量的变化,更多研究者基于质量平衡原理采用富集系数来表征风化成土过程中元素的相对富集贫化,即 $K_2=(\text{土壤中某元素浓度}/\text{土壤中参比元素浓度})/(\text{岩石中某元素浓度}/\text{岩石中参比元素浓度})$ 。本文选择表生环境中稳定元素Zr作为参比元素。依据龙海市杨梅产地调查数据, K 值计算结果见表2。根据富集系数(K_2)的大小,将 $K_2>2.0$ 定为强富集, K_2 在 $1.5\sim 2.0$ 定为富集, K_2 在 $1.1\sim 1.5$ 定为弱富集, $K_2\leq 0.5$ 属于强贫化, K_2 在 $0.5\sim 0.76$ 定为贫化, K_2 在 $0.77\sim 0.91$ 定为弱贫化, $0.91<K_2\leq 1.1$ 作为

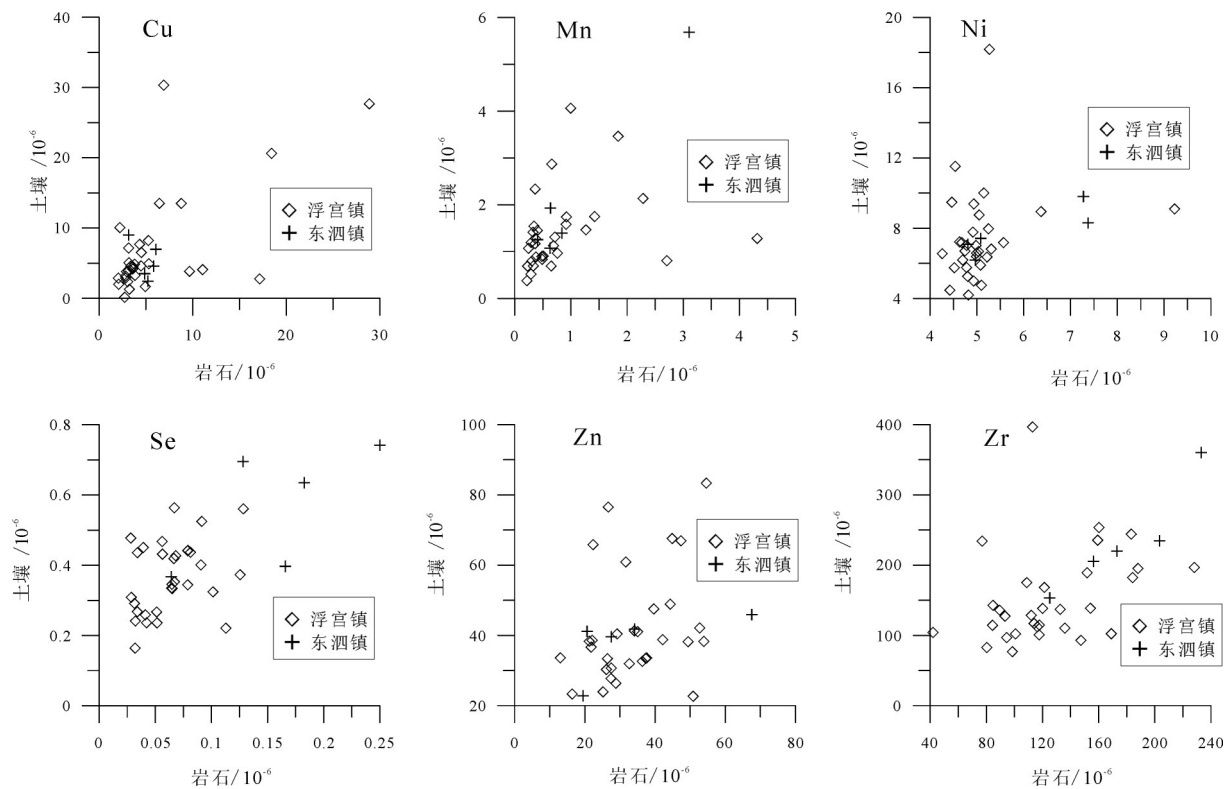


图2 岩石-土壤部分元素含量关系

Fig. 2 Content relationship of some elements in rock-soil system

无显著变化区间(芦长明,2010)。

由表2可见,各元素的K2值均小于K1值,说明引入参比元素可有效降低因成土过程中物质总量下降对富集系数的影响。土壤和母岩中Cu、Pb和Zn含量基本接近,说明其在成土过程中未发生明显的淋失贫化或淀积富集,也没有受到显著的人为作

用影响;Cr、Hg、P、Se表现为强富集,尤其是Se元素,富集系数高达4.11;B、S表现为富集特征;Mo、Ni、Al₂O₃、TF₂O₃、MgO等为弱富集;As、Mn、REE表现为弱贫化;Cd、SiO₂、K₂O呈贫化特征;CaO、Na₂O展现出强贫化特征。其中P、S的强富集或富集可能与农业施肥有关;重金属元素中仅Cr、Hg表现为强

表2 龙海杨梅产地土壤元素富集系数(N=35)

Table 2 Enrichment coefficients of elements in soils in bayberry producing area, Longhai

元素	K1	K2	贫化富集水平	元素	K1	K2	贫化富集水平
As	0.51	0.41	富集	REE	0.96	0.77	弱贫化
B	2.01	1.62	强贫化	S	2.17	1.75	富集
Cd	0.81	0.65	贫化	Se	5.10	4.11	强富集
Cr	3.80	3.06	强富集	Zn	1.21	0.97	正常
Cu	1.14	0.92	正常	SiO ₂	0.84	0.67	贫化
Hg	2.67	2.15	强富集	Al ₂ O ₃	1.52	1.22	弱富集
Mn	0.94	0.75	弱贫化	TF ₂ O ₃	1.56	1.26	弱富集
Mo	1.73	1.39	弱富集	CaO	0.22	0.18	强贫化
Ni	1.44	1.16	弱富集	MgO	1.47	1.18	弱富集
P	3.87	3.11	强富集	Na ₂ O	0.24	0.19	贫化
Pb	1.33	1.07	正常	K ₂ O	0.82	0.66	强贫化

富集,研究表明,Hg有在表层土壤中富集的趋势,尤其是在花岗岩母质区(张明等,2007),另外,工业、生活污染排放会增加土壤中Hg的含量,需要引起人们的警惕。其他重金属元素均未达到富集等级,一方面反映了这些元素自身的地球化学特征,另一方面也说明研究区土壤未受到显著的重金属污染;表层土壤中生命元素Se的强富集特征为富硒土壤形成提供了有利条件。

3.4 土壤元素有效量特征

土壤中元素以复杂多样的形态存在,并非所有形态的元素都可以被植物吸收利用,一般将能够直接被植物吸收利用的部分称为元素有效态。通常情况下,元素有效态含量与作物生长的关系更为直接。龙海市杨梅产地土壤中植物营养有益元素有效量特征统计结果见表3。其中有效度为土壤元素有效态含量与全量的比值,用百分数表示,反映土壤元素活性及其可被植物吸收利用的程度(杨大强等,2009)。

从表3可以看出:(1)无论是在浮宫镇还是东泗镇,元素有效态含量变化范围都比较大,体现了微量元素有效态受多种因素影响,包括含水率、土壤pH、有机质、氧化还原电位、土壤质地、成土母质、植物吸收、微生物活动以及人类活动等(马扶林等,2009),在不同土壤采样点,由于上述影响因素的差异,元素有效态含量表现出很大的差异;(2)除B、Se有效态含量在东泗镇中含量高于浮宫镇,其他元素有效态含量均在浮宫镇中含量较高,其中P、Mn、S的有效态含量显著高于东泗镇;(3)有效度数据表

明,S、Cu、Mn的有效态转化程度较高,可达强烈转化,P、Mo、Zn、B为中等转化,Se为微弱转化,这与南方红壤中Se有效态含量偏低的特征基本一致。总体上看,浮宫镇元素有效度普遍高于东泗镇,仅Zn的有效度在东泗镇较高;(4)除B外,研究区其他元素有效态都与其全量显著正相关,尤其是P、Mn、S,呈极显著正相关,相关系数分别达0.881、0.848、0.834。施宪等(2010)在研究吉林西部土壤微量元素时发现Mn、Cu、Mo等元素有效量明显受其全量控制,另外也有研究表明土壤Se全量是影响Se有效量的重要因素之一(方金梅,2008;孙朝等,2010)。

3.5 土壤有害元素超标状况

浮宫镇和东泗镇杨梅产区均为低山丘陵地貌,虽然成土母岩类型不同,但风化形成的土壤类型均为红壤,呈酸性或强酸性。将两地测得的表层土壤重金属元素含量与《绿色食品产地土壤环境质量标准》(采用pH小于6.5的标准限值)进行对比,土壤重金属元素超标情况见表4。从表中可以看出,两地表层土壤中As、Cd、Cr、Hg、Pb的均值都低于标准要求,共35件土壤样品中仅有1件出现As超标、3件出现Pb超标。说明龙海市杨梅种植区土壤环境质量达到绿色食品产地质量标准。

4 杨梅元素含量特征及食用安全性

表5给出了全部35件杨梅果实的元素含量统计结果。由此可见,杨梅果实中元素含量变化范围较大,说明不同地质环境、管理水平及植株个体影

表3 部分元素土壤有效量及其与全量相关性
Table 3 Available content of some elements and the connection with total content

	浮宫镇 (N=31)			东泗镇 (N=4)			与全量相 关系数
	含量范围	均值	有效度/%	含量范围	均值	有效度/%	
有效 B	0.37~0.95	0.57	6.97	0.51~0.74	0.64	5.93	0.163
有效 Cu	0.25~11.2	0.92	17.91	0.27~1.35	0.72	14.51	0.612**
有效 Mn	5.53~78.5	40.76	11.86	1.1~16.8	9.79	4.38	0.848**
有效 Mo	0.038~0.31	0.111	8.32	0.048~0.15	0.083	3.92	0.603**
有效 P	1.71~121.6	29.06	9.38	2.1~189	6.45	6.34	0.881**
有效 S	16.92~110.5	45.32	22.12	21.09~49.07	30.66	17.86	0.834**
Se 有效态	0.002~0.04	0.014	3.91	0.014~0.025	0.019	3.45	0.338*
有效 Zn	1.18~33.14	1.83	6.32	1.03~9.17	1.77	9.20	0.544**

注:含量单位 10^{-6} ;相关系数无量纲;**0.01水平显著相关;*0.05水平显著相关。

表4 土壤重金属含量超标情况
Table 4 Excessive situation of heavy metal elements in soils

元素	浮宫镇 (N=31)		东泗镇 (N=4)		绿色食品产地	超标样品数
	含量范围	均值	含量范围	均值		
As	0.98~2.98	1.89	11.01~95.52	14.67	25	1
Cd	0.002~0.07	0.02	0.01~0.08	0.04	0.3	0
Cr	0.20~44.40	10.59	10.80~28.10	18.78	120	0
Hg	0.018~0.105	0.037	0.036~0.07	0.052	0.25	0
Pb	19.60~74.87	37.37	17.85~36.77	27.85	50	3

注:含量单位 10^{-6} 。

响下杨梅元素含量差异较大。对比浮宫镇和东泗镇各元素含量均值发现,东泗镇杨梅果实中Cd、Hg、Ni等重金属元素含量明显高于浮宫镇,这与东泗镇岩石和土壤中重金属元素含量高于浮宫镇相对应;而B、Mo、Mn、REE、Se等营养有益元素在浮宫镇杨梅果实中含量较高,与相关元素土壤全量、有效态含量及有效度较高有关。例如,虽然东泗镇土壤B、Se全量明显高于浮宫镇,但由于其有效度较低,导致东泗镇土壤B、Se有效量与浮宫镇相近,而杨梅果实中B、Se含量反而明显低于浮宫镇。以上

特征体现了地质背景、土壤地球化学特征对杨梅果实中元素含量的制约作用。

4.1 杨梅硒含量特征

硒是人体必需的一种微量元素,对人体和动物有多方面的生物功能,包括抗氧化功能、增强人体免疫力、重金属解毒作用和抗癌作用(王爱国等, 2005; 刘俊秋等, 2007; 彭耀湘等, 2007; Hurwitz et al., 2007)。人体缺硒会造成重要器官的功能失调,导致多种严重疾病的发生(彭安等, 1995)。调查发现,中国有72%的县(市)存在不同程度的缺Se,

表5 杨梅果实元素含量统计参数
Table 5 Statistical parameters of element content in bayberry, Longhai

元素	浮宫镇 (N=31)				东泗镇 (N=4)				食品安全标准
	最大值	最小值	中位数	平均值	最大值	最小值	中位数	平均值	
As	0.006	0.001	0.003	0.003	0.005	0.003	0.004	0.004	0.5
B	1.488	0.555	0.885	0.952	1.03	0.712	0.787	0.83	
Cd	2.28	0.795	1.5	1.507	3.48	1.65	2.085	2.325	50
Cr	0.066	0.057	0.059	0.059	0.067	0.058	0.061	0.062	0.5
Cu	0.926	0.095	0.263	0.275	0.419	0.228	0.354	0.339	
Fe	6.125	2.347	3.484	3.688	3.721	2.654	3.391	3.289	
Hg	0.6	0.036	0.429	0.436	0.845	0.507	0.546	0.611	10
Mn	12.5	2.77	5.549	6.335	7.97	1.481	2.086	3.406	
Mo	0.047	0.006	0.015	0.019	0.017	0.004	0.014	0.012	
Ni	0.151	0.049	0.085	0.086	0.404	0.134	0.166	0.218	
P	0.009	0.003	0.006	0.006	0.009	0.004	0.007	0.007	
Pb	0.04	0.009	0.013	0.014	0.019	0.011	0.015	0.015	0.2
REE	13.02	3.285	6.204	6.626	3.766	1.947	2.814	2.835	
S	0.018	0.01	0.012	0.013	0.014	0.011	0.012	0.012	
Se	0.055	0.004	0.015	0.021	0.011	0.003	0.009	0.008	
Zn	1.86	0.528	0.804	0.857	0.827	0.669	0.785	0.766	

注:含量单位: Cd、Hg为 10^{-9} ,其他元素为 10^{-6} ;食品安全标准中: Cd、Pb为水果标准, As、Cr、Hg参考新鲜蔬菜标准。

其中1/3为严重缺Se区,近7亿人生活在缺硒环境中。人体内的硒主要来源于土壤,通过植物、微生物等食物链进入人体。因此,因地制宜的开发富硒农产品是实现人体补硒的重要途径。按照谭见安等(1989)研究提出的硒生态景观分级标准,表层土壤总硒达0.4~3.0 mg/kg的土壤为富硒土壤。李家熙等(2000)研究认为中国的黄壤和红壤属于高硒土壤,多目标区域地球化学调查发现中国南方地区广泛分布富硒红壤,开发利用富硒红壤资源前景广阔。福建龙海市杨梅产地土壤类型主要为红壤,土壤硒含量较高。此次采集的土壤样品中硒含量均值为0.4 mg/kg,明显高于全国表层土壤硒平均含量0.29 mg/kg(表1),达到了富硒土壤标准。

参考富硒农产品标准(DB36T 566-2009及DB42/211-2002等),杨梅等水果Se含量≥0.01 mg/kg即属于富Se水果。本次采集的龙海市杨梅样品Se含量统计结果见表6。由表可知,全部样品中Se元素含量范围为0.003~0.055 mg/kg,平均含量0.019 mg/kg,超过了富硒水果标准0.01 mg/kg。浮宫镇杨梅Se含量均值明显高于东泗镇,如前所述,可能是与浮宫镇土壤Se有效态含量较高有关。在35件杨梅样品中共有26件达到富Se标准,富Se率高达74.3%。其中,浮宫镇杨梅富硒率为77.42%,东泗镇为50%。

4.2 杨梅食用安全性

为了了解龙海市杨梅中有害元素含量水平,将部分重金属元素含量与食品安全国家标准(GB 2762-2012)中规定的限量值进行了比较(表5)。结果表明,无论是浮宫镇还是东泗镇,这些元素在杨梅中的含量都远低于标准中的限量值。可见,龙海市杨梅未受到重金属的显著污染影响,食用安全。

5 土壤-杨梅元素含量关系

5.1 富集系数

一般采用土壤-植物系统中元素富集系数来表征植物对土壤元素的吸收积聚能力。本文采用如下公式计算富集系数:

$$\text{富集系数} = [\text{植物元素浓度(鲜重计)}] / [\text{土壤元素浓度(干重计)}] \times 100$$

表7给出了土壤-杨梅系统中各重金属元素及营养元素的富集系数。由此可见:(1)各种元素的

表6 龙海富硒杨梅产出情况
Table 6 Se-enriched bayberry output in Longhai

	Se 含量范围	Se 均值	>0.01	富硒率/%
浮宫镇 (N=31)	0.004~0.055	0.021	24	77.42
东泗镇 (N=4)	0.003~0.011	0.008	2	50.00
合计 (N=35)	0.003~0.055	0.019	26	74.29

注:含量单位10⁻⁶。

富集系数变化范围很大。大量研究表明,植物品种、土壤理化性质以及土壤元素浓度、成因来源和有效量等因素均可影响植物对土壤元素的吸收(李正文等,2003;粟银等,2008);(2)杨梅对土壤元素的吸收积聚能力表现为:S>P>REE>Cd>B>Cu>Se>K>Mg>Ca>Zn>Mn>Ni>Mo>Hg>Cr>As>Pb。整体来看,营养有益元素的富集系数明显大于重金属元素,显示杨梅对营养有益元素主动选择性吸收,而对有毒有害元素则限制其在果实中积累。S元素的富集系数高达69.41%,有研究曾表明,杨梅对S有较强的吸收能力(何新华等,2004),S在植物生长、解毒、防卫和抗逆等过程中起重要作用,是固氮酶的组成成分之一(Singh,1995)。重金属元素Cd在本次

表7 杨梅-土壤元富集系数及相关系数
Table 7 Transfer factors and correlation coefficients of elements in bayberry-soil system

元素	富集系数/%			相关系数
	最大值	最小值	均值	
As	0.28	0	0.16	0.162
B	18.16	4.47	11.09	0.233
Ca	5.76	0.62	3.16	0.069
Cd	44	2.57	7.89	0.298
Cr	28.7	0.13	0.6	0.208
Cu	89.28	1.13	6.41	0.363*
Hg	3.2	0.09	1.31	-0.148
K	22.27	1.87	4.81	-0.481
Mg	9.19	1.32	4.73	0.083
Mn	4.31	0.4	2.02	0.360*
Mo	3.23	0.25	1.37	0.357*
Ni	5.7	0.58	1.4	0.222
P	65.01	5.27	20.6	0.227
Pb	0.11	0.01	0.04	-0.112
REE	54.22	3.87	9.78	0.048
S	116.79	38.21	69.41	0.334*
Se	18.3	0.47	5.19	0.017
Zn	4.59	0.87	2.31	-0.114

注:*0.05水平显著相关。

研究中也表现出较高的富集系数,这是由于Cd元素不同于其他重金属元素,其在土壤中生物有效性较高(崔那涛等,2015),容易被植物根系吸收并迁移进入果实中。重金属元素Pb表现为极低的富集系数,大量研究显示Pb在植物体内的迁移能力很弱(White et al.,2009;杨树华等,1986),与之类似的还有Hg、As,杨梅对这些重金属元素的吸收积聚能力弱,为杨梅果实的食用安全性提供了天然生物屏障。

5.2 相关关系

研究区杨梅果实与对应果园土壤元素的相关系数见表7。可以看出,杨梅与土壤元素含量关系十分复杂,除Cu、Mn、Mo、S在95%置信区间内表现为显著正相关外,大部分元素相关性较差或不相关,这种情况在前人相关研究中经常遇到(Azibar Rodriguez-Irretagoiena et al.,2015;周国华等,2015)。究其原因可能有:一是作物从土壤中吸收的元素在不同器官间的分布并不均匀,通常植物生长部位如叶、茎和根中的矿质元素含量比果实、块茎和种子中要高(Siegel et al.,1987),如此一来,仅分析杨梅果实与土壤元素的相关性可能得不到理想的结果。有研究表明,与单一器官相比,植株整体元素含量与土壤元素的相关性更好(Veronika Raguz et al.,2013)。二是作物根系主要吸收土壤中元素有效态组分。在各种土壤理化条件的影响下,土壤元素有效量与全量关系极为复杂(栗银等,2008),元素全量常常难以客观反映其有效量水平。三是作物对元素的吸收和元素在作物体内的运移还受作物品种及其基因类型(李正文等,2003)、土壤元素形态(White et al.,2009;Agata Kot et al.,2000)、以及元素来源(Kabata-Pendias A.,2004)等因素的影响,这些因素都会对调查结果产生影响。

6 结 论

(1) 龙海杨梅种植区岩石-土壤间植物营养有益元素Cu、Mn、Zn、Se等具有显著正相关性,显示地质背景(成土母岩类型)对土壤微量元素含量具有制约作用。浮宫花岗岩中植物营养元素Cu、Mn、Zn相对富集,重金属元素含量较低,由花岗岩风化形成的土壤中植物营养有益元素B、Cu、Mn、Mo、P、S、Se、Zn有效度及其有效量普遍高于东泗镇凝灰岩和砂岩,为浮宫杨梅的优质高产、富硒杨梅产出提供

了地质地球化学条件。

(2) 研究区土壤中P、Mn、Cu、Zn、S等元素有效态含量与其全量呈显著正相关,其中P、Mn、S达到极显著正相关。

(3) 研究区土壤环境质量达到绿色食品产地质量标准,杨梅中重金属元素含量远低于食品安全国家标准中规定的限量值。但相对于浮宫镇,东泗镇杨梅中重金属元素含量较高,营养有益元素则偏低,明显受到岩石、土壤中元素全量及土壤元素有效态含量的影响。

(4) 研究区成土母岩和表层土壤中Se平均含量均远高于全国平均水平,达到富硒土壤要求。35件杨梅样品中有26件达到富Se标准,富Se率高达74.3%,浮宫杨梅的富硒率高于东泗镇。

(5) 杨梅中营养有益元素的富集系数普遍高于有害元素,尤其是Pb、Hg、As等重金属元素的富集系数极低,显示杨梅对营养有益元素的主动吸收,而抑制对有害元素的吸收。受多种因素的影响,大部分元素在杨梅和土壤间的相关性较差,仅Cu、Mn、Mo、S在95%置信区间内表现为显著正相关。

References

- Agata Kot, Jacek Namiesik. 2000. The role of speciation in analytical chemistry[J]. *Trac Trends in Analytical Chemistry*, 19: 69-79.
- Azibar Rodriguez-Irretagoiena, Josu Trebolazabala, Irantzu Martinez-Arkarazo. 2015. Metals and metalloids in fruits of tomatoes (*Solanum lycopersicum*) and their cultivation soils in the Basque Country: Concentrations and accumulation trends[J]. *Food Chemistry*, 173:1083-1089.
- 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).
- Chi Qinghua, Yan Mingcai. 2007. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 3, 6(in Chinese with English abstract).
- Cui Xingtao, Wang Xueqiu, Luan Wenlou. 2015. An analysis of modes of occurrence and biological availability of the heavy metal elements in soil of the central and southern plain in Hebei[J]. *Geology in China*, 42(2): 655-663(in Chinese with English abstract).
- Fang Jinmei. 2008. Selenium speciation analysis and its transformation and enrichment in soils of Fuzhou city[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 27 (2): 103-107(in Chinese with English abstract).

- He Guie, He Fengjie, Gao Hongqin, Xu Chunyan. 2014. Distribution of mineral elements and fertilizer countermeasures of Dongkui Bayberry[J]. *Xiandai Horticulture*, (4):9-10(in Chinese).
- He Xinhua, Chen Ligeng, Guo Changlu. 2004. Distribution and effect of sulphur and cobalt in *Myrica rubra* Sieb. et Zucc[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 31(5):641-643(in Chinese with English abstract).
- He Xinhua, Pan Hong, She Jincai, Guo Yongze. 2006. Research Progress of Bayberry[J]. *Fujian Fruits*, (4): 16-23 (in Chinese).
- Hurwitz B E, KLAUS J R, LLABRE M M. 2007. Suppression of human immune-deficiency virus type 1 viral load with selenium supplementation—A randomized controlled trial[J]. *Arch Intern Med*, 167(2):148-154.
- Kabata-Pendias A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue[J]. *Geoderma*, 122: 143-149.
- Lan Yaping, Zhou Lizhen, Hong Yuyun, Li Lirong. 2013. Effect of climatic conditions on the planting Bayberry, Longhai[J]. *Fujian Science & Technology of Tropical Crops*, 38 (4) : 65-67 (in Chinese).
- Li Danquan. 2003. The development and application of the agricultural geology study in modern agricultural field[J]. *Jilin Geology*, 22(3) : 46-51, 61(in Chinese with English abstract).
- Li Jiayi, Zhang Guangdi, Ge Xiaoli. 2000. Geochemical Characteristics and Environmental Prediction of Human Selenium Deficiency and Excess[M]. Beijing: Geological Publishing House, 5-8(in Chinese).
- Li Xurong, Zhu Xin, Zhang Gaoqiang, Wen Jun. 2012. Eco-geochemical characteristics of the high-quality Shatang Citrus producing area in Sihui, Guangdong[J]. *Geoscience*, 26 (1) : 125-130(in Chinese with English abstract).
- Li Zhengji. 1996. Large-Scale system of Rock-Soil-Plant[J]. *Geology Review*, 42(4) : 369-372 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengwen, Zhang Yanling, Pan Genxing, Li Jiuhai, Huang Xiaomin, Wang Jifang. 2003. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 24(3): 112-115(in Chinese with English abstract).
- Liu Junqiu, Luo Guimin, Shen Jiacong. 2007. Progress in selenoenzyme mimics[J]. *Progress in Chemistry*, 19(12): 1928-1937(in Chinese with English abstract).
- Lu Changming. 2010. Rock-Soil geochemical features for the Dashan area, Shitai, Anhui[J]. *Geology of Anhui*, 20(2):120-125(in Chinese with English abstract).
- Luan Wenlou, Zhao Jinying, Cui Xingtiao, 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 Fulin, Song Liming, Wang Jianmin. 2009. Overview of soil trace elements[J]. *Qinghai Science and Technology*, (3): 32-36(in Chinese).
- Peng An, Wang Zijian. 1995. The Environmental Bioinorganic Chemistry of Selenium[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 39(in Chinese).
- Peng Yaoxiang, Chen Zhengfa. 2007. Physiological function of selenium and development utilization of rich selenium fruits[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 28(3): 381-384(in Chinese with English abstract).
- Shi Xian, Wang Dongyan, Li Yuefang, Jin Ke, Guo Zhen. 2010. Study on the available contents of trace nutrient element and factors affecting their availability in the west of Jilin Province[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 38 (23) : 12503-12508(in Chinese with English abstract).
- Siegel K, Kerr Kebe E A. 1987. Plant Nutrition Principles[M]. Zhang Yichun, translation. Beijing: Agriculture Press, 50(in Chinese with English abstract).
- Singh M V. 1995. A review of the sulphur research activities of the ICAR-AICRP micro-and secondary nutrients project[J]. *Sulphur in Agriculture*, 19:35-46.
- Su Yin, Yuan Xinzong, Zeng Guangming, Li Huimeng, Li Lian. 2008. Study on influence factors of transport and transformation of Pb in soil-plant system[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 36(16): 6953-955(in Chinese with English abstract).
- Sun Chao, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yang Xiaoyan, Huang Yong, Chen Enke. 2010. Factors controlling the transport and transformation of selenium in typical soil environments: a case study of the Chengdu economic zone in Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 37 (6) : 1760-1768(in Chinese with English abstract).
- Tan Jianan. 1989. People's Republic of China Endemic and Environment Portfolio[M]. Beijing: Science Press.
- Veronika Raguz, Jerker Jarsjö, Sara Grolander, Regina Lindborg, Rodolfo Avila. 2013. Plant uptake of elements in soil and pore water: Field observations versus model assumptions[J]. *Journal of Environmental Management*, 126:147-156.
- Wang Aiguo, Xia Tao, Chu Qilong, Chen Xuemin, Yang Kedi. 2004. Effects of selenium on lipid peroxidation, DNA damage, and apoptosis induced by fluoride in human hepatocyte[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 21(3): 205-207(in Chinese with English abstract).
- White P J, Broadley M R. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. *New Phytologist*, 182 (1): 49-84(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, Jiayou City[J]. *Acta Geologica Sinica*, 29 (2) : 220-223(in Chinese).

- Chinese with English abstract).
- Yang Shuhua, Qu Zhongxiang, Wang Huanxiao. 1986. The migration and accumulation of lead in rice and its influence on the growth land development of rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 6(4): 312-323 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Li Ying. 1993. Research progress of foreign "Agriculture Geology"[J]. *Foreign Geology and Prospecting*, (2) : 47-49(in Chinese).
- Zhang Litian, Bu Qingjie, Yang Guihua, Liu Xiulan. 2007. Proper use of commonly used mathematical statistics methods in papers in the field of environmental science[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(1) : 171-173(in Chinese).
- Zhang Ming, Yang Zhongfang, Chen Yuelong, Chen Guohua, Liu Hongying. 2007. Sources of Hg in soils of the Dongting Lake area, Hunan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(11) : 1463-1469(in Chinese with English abstract).
- Zhou Guohua, Zeng Daoming, He Ling, Zhu Xiaoting, Sun Binbin, Bai Jinfeng, Zhou Ziqi. 2015. Eco-geochemical characteristics of the Tieguaqin tea gardens in Fujian Province[J]. *Geology in China*, 42(6):2008-2018(in Chinese with English abstract).
- Zhu Shouyan, Yin Xianlong, Jin Zhifeng, Huang Jingfeng. 2011. GIS-based Eco-climatic zoning of Taizhou Bayberry[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 32(Add 1) : 165-168(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.
- 崔邢涛, 王学求, 栾文楼. 2015. 河北中南部平原土壤重金属元素存在形态及生物有效性分析[J]. *中国地质*, 42(2): 655-663.
- 方金梅. 2008. 福州市土壤硒形态分析及其迁移富集规律[J]. *岩矿测试*, 27(2) : 103-107.
- 格尔·K, 克尔克贝·E A. 1987. 植物营养原理[M]. 张宜春, 译. 北京: 农业出版社, 50.
- 何桂娥, 何风杰, 高洪勤, 徐春燕. 2014. 东魁杨梅矿质元素分布与施肥对策[J]. *现代园艺*, (4) : 9-10.
- 何新华, 陈力耕, 郭长禄. 2004. 硫和钴在杨梅植株体内的分布及对生长的影响[J]. *园艺学报*, 31(5) : 641-643.
- 何新华, 潘鸿, 余金彩, 郭永泽. 2006. 杨梅研究进展[J]. *福建果树*, (4):16-23.
- 兰雅萍, 周丽珍, 洪玉芸, 李丽容. 2013. 龙海市气候条件对杨梅种植的影响[J]. *福建热作科学*, 38(4) : 65-67.
- 黎旭荣, 朱鑫, 张高强, 文俊. 2012. 广东四会砂糖桔产地生态地球化学特征[J]. *现代地质*, 26(1) : 125-130.
- 李丹权. 2003. 农业地质研究在现代农业领域中的开发应用[J]. *吉林地质*, 22(3) : 46-51, 61.
- 李家熙, 张光第, 葛晓亮著. 2000. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京: 地质出版社, 5-8.
- 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.
- 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 李久海, 黄敏敏, 王吉方. 2003. 不同水稻品种籽粒Cd、Cu和Se的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. *环境科学*, 24(3): 112-115.
- 刘俊秋, 罗贵民, 沈家骢. 2007. 仿硒酶研究进展[J]. *化学进展*, 19(12): 1928-1937.
- 芦长明. 2010. 安徽石台大山地区岩石-土壤地球化学特征[J]. *安徽地质*, 20(2):120-125.
- 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.
- 马扶林, 宋理明, 王建民. 2009. 土壤微量元素的研究概述[J]. *青海科技*, (3):32-36.
- 彭安, 王子健. 1995. 硒的环境生物无机化学[M].北京:中国环境科学出版社, 239.
- 彭耀湘, 陈正法. 2007. 硒的生理功能及富硒水果的开发利用[J]. *农业现代化研究*, 28(3):381-384.
- 施宪, 王冬艳, 李月芬, 靳克, 郭珍. 2010. 吉林西部土壤微量营养元素有效量及其影响因素[J]. *安徽农业科学*, 38(23) : 12503-12508.
- 粟银, 袁兴中, 曾光明, 李惠萌, 李莲. 2008. 土壤-植物系统中铅的迁移转化影响因素研究进展[J]. *安徽农业科学*, 36(16): 6953-6955.
- 孙朝, 侯青叶, 杨忠芳, 杨晓燕, 黄勇, 陈恩科. 2010. 典型土壤环境中硒的迁移转化影响因素研究——以四川省成都经济区为例[J]. *中国地质*, 37(6) : 1760-1768.
- 谭见安. 1989. 中华人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京: 科学出版社.
- 王爱国, 夏涛, 褚启龙, 陈学敏, 杨克敌. 2004. 硒对氟致人肝细胞脂质过氧化物、DNA损伤及凋亡的影响[J]. *环境与职业医学*, 21(3): 205-207.
- 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]. *地质学报*, 29(2) : 220-223.
- 杨树华, 曲仲湘, 王焕校. 1986. 铅在水稻中的迁移积累及其对水稻生长发育影响[J]. *生态学报*, 6(4): 312-323.
- 张利田, 卜庆杰, 杨桂华, 刘秀兰. 2007. 环境科学领域学术论文中常用数理统计方法的正确使用问题[J]. *环境科学学报*, 27(1) : 171-173.
- 张连昌, 李英. 1993. 国外“农业地质”研究进展[J]. *国外地质与勘测*, (2) : 47-49.
- 张明, 杨忠芳, 陈岳龙, 陈国光, 刘红樱. 2007. 湖南洞庭湖地区土壤中Hg的来源[J]. *地质通报*, 26(11) : 1463-1469.
- 周国华, 曾道明, 贺灵, 朱晓婷, 孙彬彬, 白金峰, 周子琦. 2015. 福建铁观音茶园生态地球化学特征[J]. *中国地质*, 42(6) : 2008-2018.
- 朱寿燕, 尹先龙, 金志凤, 黄敬峰. 2011. 基于GIS的台州杨梅气候生态区划[J]. *中国农业气象*, 32(增1) : 165-168.