

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.01.09

引用格式: 孙志佳, 李保飞, 赵明杰, 等. 湛江市菠萝主产区基岩-土壤-菠萝元素迁聚特征[J]. 中国地质调查, 2023, 10(1): 83-90. (Sun Z J, Li B F, Zhao M J, et al. Element migration and accumulation characteristics of bedrock-soil-pineapple in main pineapple producing area of Zhanjiang City [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(1): 83-90.)

湛江市菠萝主产区基岩-土壤-菠萝元素迁聚特征

孙志佳, 李保飞, 赵明杰, 闫兴国, 袁庆政

(中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264004)

摘要: 为研究元素在基岩-土壤-作物系统的迁聚特征, 选取湛江市徐闻县菠萝主产区为研究区, 采集土壤和菠萝样品, 结合元素迁移系数、生物富集系数评价了基岩-土壤-菠萝系统元素的分布和迁聚特征。结果表明: 研究区土壤富含磷(TP)、土壤全铁(TFe_2O_3)、Co、Ge、S、Se 含量丰富, 土壤全氮(TN) 含量中等, 有机质含量以中等—较丰富为主, 土壤全钾(TK) 含量缺乏。基岩风化成土过程中, 土壤中 Pb、Cr、 TFe_2O_3 、Ni 相对基岩表现为富集, Al_2O_3 、Cu、Zn、Co、Mn、TP、 K_2O 相对基岩表现为流失; 土壤中 Co、Cr、Cu、Ge、Mn、Ni、Zn 主要来源于磁铁矿风化蚀变, Se 主要来源于黄铁矿风化蚀变。菠萝果实对 Cd、Hg 为微弱吸收, Cd 相对其他元素更容易在菠萝果实中富集。Ge、As、Cd、Se、Ni 在菠萝根部最为富集, Pb、Hg、Cr、Cu、Zn 在菠萝叶片最为富集, 菠萝果实对 Cu、Pb、Cr、Hg 的吸收存在协同作用。研究成果可为当地菠萝产业发展提供依据。

关键词: 元素迁移; 地球化学; 菠萝; 湛江

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2023)01-0083-08

0 引言

岩石是土壤形成的主要物质基础, 矿物风化为土壤提供了丰富的矿质元素, 土壤是植物吸收转移元素的主要来源^[1-2]。不同地质时代的岩石具有不同的特征, 风化形成的土壤亦具有不同的特点, 而不同的植物对矿质元素的需求也不尽相同^[3]。基岩-土壤-植物系统是一个有机联系的整体, 探寻系统内元素迁聚特征对提高农产品质量有重要意义。近年来, 众多学者研究了特色农产品与地球化学特征的关系, 徐小磊等^[4]对安徽宁国地区山核桃种植区农业地质环境进行了探讨, 曾其国等^[1]对广西罗汉果产区微量元素的迁聚特征进行了研究, 孙厚云等^[2]对承德杏仁产区元素迁聚特征进行了探讨, 对比了不同地质建造区元素迁聚特点。目前, 针对菠萝产区的研究多集中在对土壤重金属、养分现状的评价^[5-8], 论证元素在基岩-土壤-菠萝系统中元

素迁聚规律的研究尚不多见, 还存在很大的研究空间。我国是世界菠萝十大生产国之一, 湛江市徐闻县素有“中国菠萝之乡”的称号, “徐闻菠萝”被评为农产品地理标志公共标识, 菠萝产业为当地农民增收、乡村振兴作出了积极贡献。本研究选取湛江市南部菠萝主产区为研究区, 分析火山岩建造区基岩-土壤-菠萝中元素地球化学特征和迁聚规律, 以期当地菠萝产业高质量发展提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于湛江市徐闻县曲界镇, 地处雷州半岛南端, 气候炎热潮湿, 雨量充沛, 植被茂盛, 年平均气温为 23.5℃, 多年平均降雨量为 1 374.9 mm。徐闻县是我国重要的热带经济作物生产基地之一, 盛产菠萝、甘蔗、橡胶等, 是我国菠萝产业龙头县。菠萝在徐闻种植区域广泛, 其中以曲界镇最为集中, 有“菠萝的海”的美称。

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-05-23。

基金项目: 中国地质调查局“广东湛江地区海岸带自然资源综合调查(编号: DD20208062)”项目资助。

第一作者简介: 孙志佳(1991—), 男, 工程师, 主要从事自然资源调查研究工作。Email: vcszj@qq.com。

研究区地表广泛发育第四系,包括:桂州组、曲界组、陆丰组、田洋组、石茆岭组、湛江组,其中石茆岭组分布最为广泛,该组由喷溢为主的火山活动形成,喷发类型为陆相多火山口的中心式喷发,形成了具有多个亚旋回的玄武岩被;地表被风化的残坡积土覆盖,由于覆盖较厚,仅局部有零星露头。石茆岭组主要由玄武岩及玄武质凝灰岩组成,岩石种类主要为石英拉斑玄武岩、橄榄拉斑玄武岩和碱性玄武岩,造岩矿物主要由拉长石、橄榄石和辉石组成,副矿物主要包括磁铁矿、钛铁矿、黄铁矿和磷灰石等。

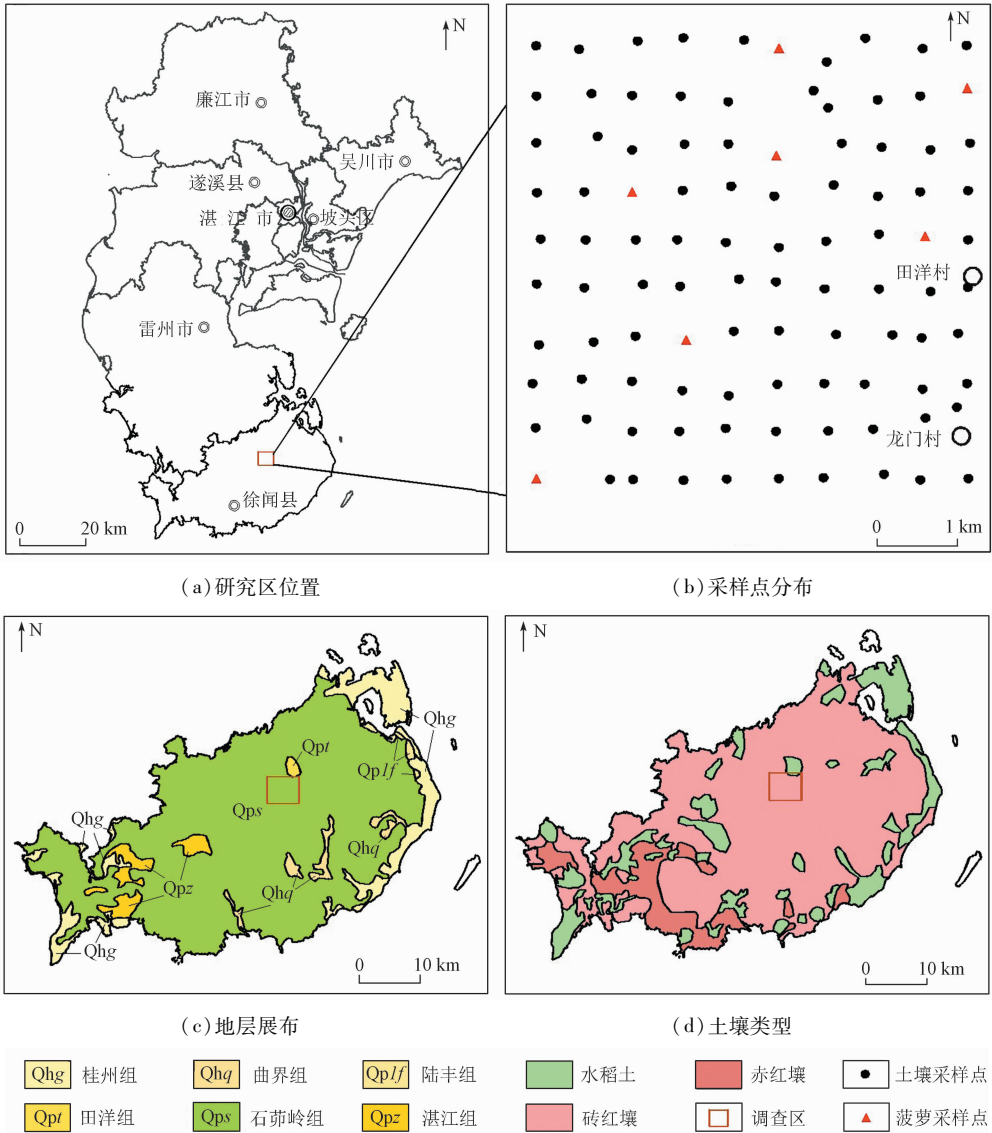
受地质建造、地形地貌等因素影响,徐闻县土壤

类型主要包括砖红壤、水稻土、赤红壤 3 类,砖红壤成土母岩为石茆岭组玄武岩,呈面状分布,土层深厚,是研究区农业种植的主要土壤类型。

2 技术方法

2.1 样品采集与测试

2021 年 5 月在徐闻县曲界镇采集土壤样品 100 件(图 1)。土壤样品采自 0~20 cm 耕作层,每个样点均采用梅花取样法采集 3~6 个子样点进行混合,去除杂质后装入棉布袋保存,自然风干过 100 目筛后送往实验室。



注:地质背景、土壤类型数据来源于地质云(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>)。

图 1 研究区地质背景、土壤类型与菠萝采样点分布

Fig.1 Geological background, soil type and location of pineapple sampling points in the study area

菠萝样品采自成熟的植株,采集根、茎、叶、果及根系土样品 7 组(图 1),每组样品以 0.1 hm² 为采样单元,选取 5~10 棵植株掰下菠萝的根、茎、叶和果实,每株菠萝纵向四分,从其中一份的上、中、下、内、外各侧均匀采摘,样品经蒸馏水冲洗并擦拭干净,装入聚乙烯塑料袋密封后送往实验室。将采集了菠萝样品的植株连根拔出,将根系周围的土壤装入棉布袋保存,自然风干过 100 目筛后送往实验室。

土壤(根系土)样品中 Al₂O₃、土壤全铁(TFe₂O₃)、K₂O、Cr、Mn、P、Zn 采用 X 射线荧光光谱仪(Axios)测试,Cd、Co、Cu、Pb、Ni 采用电感耦合等离子体质谱仪(iCAP 7400)测试,As、Se、Hg 采用原子荧光光谱仪(AFS 3000)测试,另外,采用凯氏定氮仪(K 1100)测试了 N,利用滴定管测定了 S 和有机质,用 pH 计测定 pH 值。

菠萝样品中 As、Cu、Cd、Cr、Ge、Ni、Pb、Zn 采用电感耦合等离子体质谱仪(iCAP 7400)进行测试,Se、Hg 采用原子荧光光谱仪(AFS 3000)测试。样品分析测试中加入了重复样与空白样控制,测试方法精确度采用国家标准物质控制,各项指标均在允许范围内。

由于研究区地表覆盖较厚,本次未采集基岩样品,基岩数据来源于广东省地矿局水文工程地质一大队 1996—1997 年的调查成果(未发表)。该调查利用钻探采集了研究区石茆岭组石英拉斑玄武岩、橄榄拉斑玄武岩和碱性玄武岩共计 46 件样品,并检测了主微量元素含量,数据具有一定的代表性。

2.2 研究方法

2.2.1 元素的迁移系数

迁移系数反映了元素在沉积过程中的变化,要

了解基岩-土壤系统的元素迁聚特征,需要以地质背景为基础,建立元素在风化成土过程中的一个对比标准,探索研究区中元素的富集和迁移程度^[9]。其计算公式为

$$W_i = N_i / G_i \quad (1)$$

式中:W_i 为元素 i 的迁移系数;N_i 为土壤样品中元素 i 的实测值;G_i 为元素 i 的地质背景值。迁移系数大于 1 时,表示元素在土壤中累积,小于 1 时表示元素在土壤中迁出。

2.2.2 生物富集系数

植物对元素的吸收能力受多种条件的影响,生物富集系数(BCF)反映了植物从土壤中吸收重金属的能力^[10-11],用植物某部位重金属含量与对应土壤中重金属含量的比值表示。其计算公式为

$$BCF = T_i / S_i \quad (2)$$

式中:BCF 为生物富集系数;T_i 为元素 i 在植物样品中的实测值;S_i 为对应土壤样品中元素 i 的实测值。BCF 越大,表明植物对重金属的富集能力越强。植物对土壤元素的吸收强度可分为 4 个等级:强烈吸收(BCF>1)、中等吸收(1≥BCF>0.1)、微弱吸收(0.1≥BCF>0.01)和极弱吸收(BCF≤0.01)。

3 结果与讨论

3.1 土壤元素地球化学特征

3.1.1 土壤元素含量特征

研究区土壤呈酸性,pH 值范围为 3.72~5.30,平均值为 4.29。土壤元素平均含量与石茆岭组基岩相比(表 1),TFe₂O₃、Cr、Pb 含量高于基岩,Al₂O₃、

表 1 研究区土壤元素含量特征
Tab.1 Elements content characteristics of soil samples

元素		$\omega_B/\%$					$\omega_B/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$				
		Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	TN	有机质	TP	As	Cd	Co	Cr
土壤	最小值	4.33	4.27	0.05	0.07	1.38	0.06	1.18	0.02	11.30	136.00
	最大值	16.92	15.67	0.54	0.21	4.59	0.24	57.80	0.11	78.70	397.00
	平均值	13.26	11.81	0.15	0.14	2.93	0.14	5.95	0.05	25.44	277.40
	变异系数	0.16	0.15	0.42	0.18	0.19	0.22	0.96	0.34	0.51	0.23
石茆岭组基岩		15.27	10.03	0.99	—	—	0.31	—	—	40.48	232.23
全国砖红壤背景值		17.03	5.88	1.98	0.03	0.48	0.04	5.40	0.05	13.30	77.00

元素		$\omega_B/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$								pH 值	
		Cu	Pb	Zn	Ge	Hg	Mn	Ni	S		Se
土壤	最小值	28.50	7.45	34.60	1.18	0.02	192.00	58.20	133.00	0.39	3.72
	最大值	115.00	22.70	126.00	2.20	0.32	1 438.00	362.00	1 191.00	2.35	5.30
	平均值	72.29	16.54	88.02	1.66	0.07	662.68	181.74	690.67	1.65	4.29
	变异系数	0.27	0.20	0.19	0.12	0.59	0.36	0.39	0.31	0.30	0.07
石茆岭组基岩		88.75	8.42	132.97	—	—	1 300.00	181.37	—	—	—
全国砖红壤背景值		23.00	26.00	53.00	1.50	0.04	401.00	35.00	311.00	0.32	—

注:“—”表示缺数据,石茆岭组基岩数据来源于 1:5 万曲界幅、山狗吼幅、龙塘幅区域地质调查报告(广东省地矿局水文工程地质一大队,1997)。

K₂O、土壤全磷(TP)、Co、Cu、Zn、Mn 含量低于基岩,Ni 含量与基岩大致持平。土壤元素平均含量与全国砖红壤背景值^[12]相比,TF₂O₃、土壤全氮(TN)、TP、As、Co、Cr、Cu、Zn、Ge、Hg、Mn、Ni、S、Se 含量高于背景值,Al₂O₃、K₂O、Pb 含量低于背景值,Cd 含量与背景值大致持平。土壤中 As、Hg、Co 含量变异系数相对较大,表明其含量波动变化较大,受外界干扰程度高于其他元素。

对照《GB 15618—2018 农用地土壤风险管控标准》^[13]划定的 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 风险筛选值,研究区土壤中 Cd、Hg、Pb、Zn 含量均低于风险筛选值(图 2),不存在超标情况,土壤中 As、Cr、Cu、Ni 含量超出风险筛选值的样品点数量分别为 1、97、86、99,超标率分别占样品总数的 1%、97%、86% 和 99%,Cr、Cu 和 Ni 的超标情况最为突出,对土壤生态环境可能存在风险。

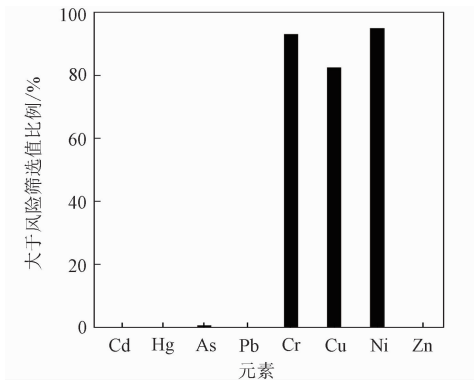


图 2 土壤重金属含量特征

Fig.2 Heavy metal content characteristics of soil samples

3.1.2 土地质量地球化学等级

参照《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》^[14]划定了表层土壤部分元素养分地球化学等级(图 3)。TN 地球化学等级以中等为主,样品数量占 73%。TP 以丰富为主,样品占 93%。TK(以 K₂O 计)为缺乏水平。土壤有机质等级以较丰富—中等为主,样品占比分别为 42%、49%。区内土壤 TF₂O₃、Co、Ge、S 总体为丰富水平,土壤中 Se 含量达高等级的样品占比 99%。总体而言,研究区土壤 TP、TF₂O₃、Co、Ge、S、Se 含量丰富,TK 含量缺乏。

按土壤单项污染指数评价了 Cd、Hg、As、Pb、

Cr、Cu、Ni、Zn 单元素环境地球化学等级(图 4)。区内土壤 Cd、Hg、Pb、Zn 均为清洁,As 以清洁为主,样品占比为 99%,Cr 以轻微污染和轻度污染为主,样品占比分别为 55% 和 42%,Cu 主要为轻微污染,样品占比为 78%,Ni 等级为轻微污染、轻度污染、中度污染和重度污染样品占比分别为 21%、31%、40% 和 7%。由于 Ni 的环境地球化学等级相对其他元素较差,受此影响,土壤环境地球化学综合等级主要为轻度污染和中度污染。

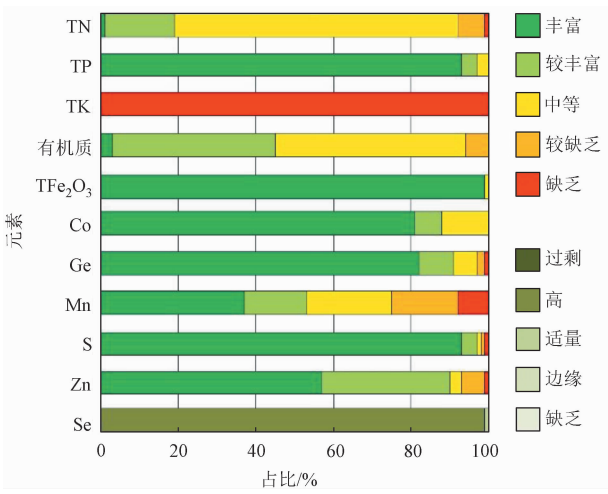


图 3 土壤养分地球化学等级

Fig.3 Geochemical grade of soil nutrient

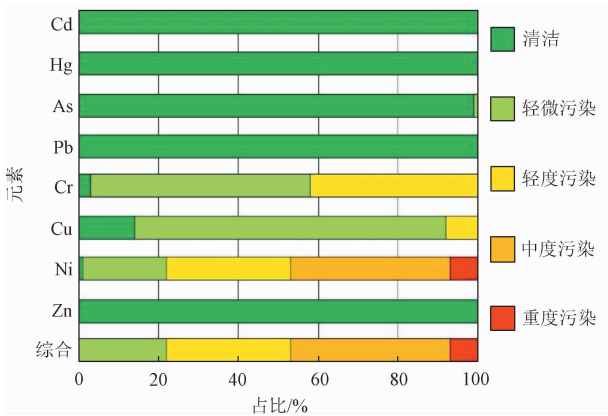


图 4 土壤环境地球化学等级

Fig.4 Geochemical grade of soil environment

对比《GB 2762—2017 食品安全国家标准》^[15]中 Cd、Pb 的限量值,菠萝果实中重金属不存在超标,说明研究区菠萝 Cd、Pb 安全性很高,不存在因食用菠萝而引起的健康风险。

3.2 基岩-土壤元素迁聚特征

3.2.1 基岩-土壤元素迁移系数

为研究区岩土系统元素迁移特征,了解风化成土过程中元素的富集和迁移程度,以石茆岭组基岩作为地质背景值计算迁移系数(图5)。土壤样品元素 W_i 平均值大小关系为 $Pb > Cr > TF_{Fe_2O_3} > Ni > 1 > Al_2O_3 > Cu > Zn > Co > Mn > TP > K_2O$ 。土壤中 Pb 、 Cr 、 $TF_{Fe_2O_3}$ 、 Ni 相对基岩表现为富集,其中 Ni 表现为较小程度的富集,基岩风化过程中含量相对稳

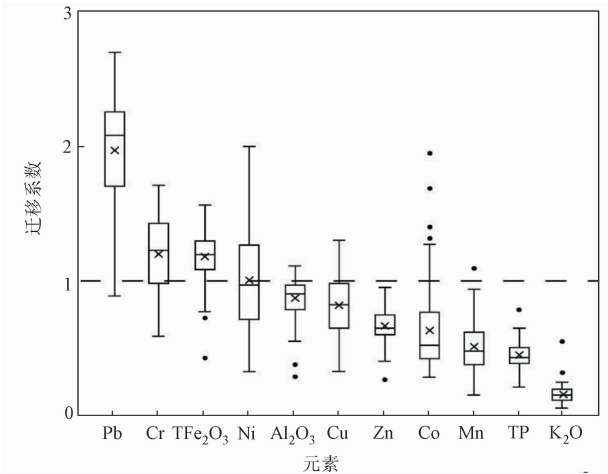


图5 土壤元素迁移系数

Fig.5 Elements migration coefficient of soil

定; Al_2O_3 、 Cu 、 Zn 、 Co 、 Mn 、 TP 、 K_2O 相对基岩表现为淋滤流失,并且流失强度依次增大,表明风化过程中元素活性依次增强。

3.2.2 元素相关性特征

微量元素常以类质同象的形式赋存于矿物当中,基岩风化成土过程矿物蚀变形成次生矿物,元素会产生流失或富集。矿物抗风化能力存在差异,在不同的风化阶段,黏土矿物呈现出不同组合特征,由此导致元素产生不同的迁移特点。通过主成分分析和系统聚类分析土壤元素相关性,探讨元素来源,指示研究区元素风化成土过程中的迁聚特征。

土壤元素主成分分析提取2个主成分PC1和PC2(表2),方差贡献率分别为40.80%和15.76%,具有较高的代表性。主成分1包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Co 、 Cr 、 Cu 、 Ge 、 Mn 、 Ni 和 Zn ,主成分2包括 S 和 Se 。聚类树图中(图6) Cu 、 Ni 、 Cr 、 Ge 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Co 、 Zn 和 Mn 为第一组, S 和 Se 为第二组,与主成分分析结果一致,元素同源性比较高。磁铁矿中 Fe 元素通常会被 Al 、 Co 、 Cr 、 Cu 、 Ge 、 Mn 、 Ni 、 Zn 等以类质同象替代,推测第一组元素与基岩中磁铁矿的风化蚀变有关。黄铁矿中 Fe 元素会被 Se 替代,推测第二组元素与黄铁矿的风化蚀变有关。

表2 主成分分析结果及各变量的主成分载荷

Tab.2 Results of principal component analysis and component loadings of the variables

主成分	特征值	贡献率/%		元素																	
		方差	累计	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ge	Hg	Mn	Ni	P	Pb	S	Se	Zn	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	N
PC1	7.34	40.80	40.80	-0.28	0.26	0.72	0.81	0.96	0.83	-0.21	0.63	0.95	0.18	-0.75	0.41	0.00	0.80	0.72	0.87	-0.63	-0.06
PC2	2.84	15.76	56.56	0.45	-0.46	-0.47	-0.08	-0.03	0.16	-0.19	0.00	-0.09	-0.11	0.31	0.71	0.94	-0.10	0.64	0.33	0.15	0.27

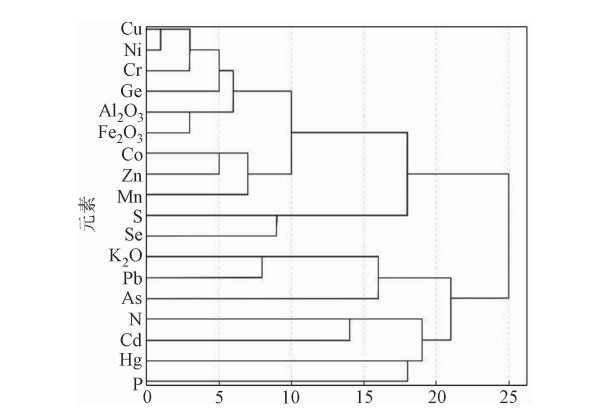


图6 土壤元素聚类分析树

Fig.6 Clustering dendrogram of soil elements

差异,菠萝植株中根、茎、叶、果实分布情况(元素在根、茎、叶、果中含量与这四部分含量总和的百分比)如图7所示,果实中元素含量均在20%以下。

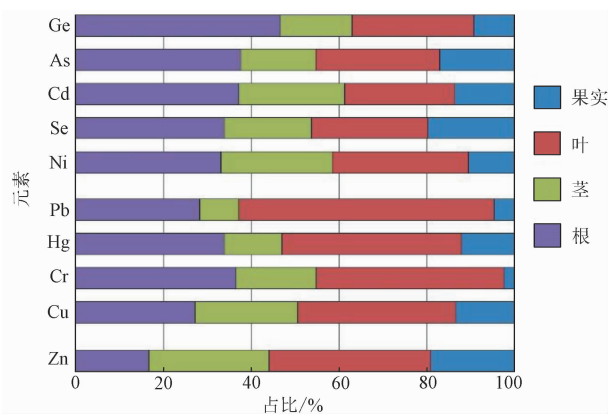


图7 植株元素分布

Fig.7 Distribution of plant elements

3.3 土壤-菠萝元素迁聚特征

3.3.1 菠萝植株元素分布特征

元素由土壤进入植物体后,在各器官分布存在

元素分布大体分为两类: Ge、As、Cd、Se、Ni 表现为根富集明显,按照根、叶、茎、果实的顺序含量依次降低; Pb、Hg、Cr、Cu、Zn 表现为叶富集明显,Pb、Hg、Cr、Cu 按照叶、根、茎、果的顺序含量依次降低,Zn 按照叶、茎、果、根的顺序含量依次降低。与根系土相比,元素在植株各器官的含量均低于在土壤中的含量。

3.3.3.2 土壤-菠萝元素生物富集特征

采用生物富集系数 BCF 表征菠萝果实中元素的富集程度,根据生物富集系数统计显示(表 3),

研究区内菠萝果实样品元素 BCF 平均值大小关系为: Cd > Hg > Zn > Cu > Se > Ni > As > Pb > Ge > Cr。其中, Cd 元素 BCF 值范围为 0.012 3 ~ 0.035 3, Hg 元素 BCF 值范围为 0.008 9 ~ 0.021 8, Cd 和 Hg 富集系数明显高于其他元素,总体为微弱吸收。Zn、Cu、Se、Ni、As、Pb、Ge、Cr 元素 BCF 平均值小于 0.01,总体为极弱吸收。重金属元素中 Cd 的吸收系数最大,表明 Cd 较其他重金属元素更容易在菠萝果实中富集。

表 3 元素生物富集系数
Tab.3 Bioconcentration factor of element

元素	Cr	Ge	Pb	As	Ni	Se	Cu	Zn	Hg	Cd
平均值	0.000 09	0.000 12	0.000 68	0.001 08	0.001 12	0.002 93	0.007 00	0.008 84	0.014 99	0.022 34
最小值	0.000 05	0.000 07	0.000 36	0.000 58	0.000 71	0.001 71	0.002 90	0.006 68	0.008 94	0.012 31
最大值	0.000 14	0.000 20	0.001 27	0.002 14	0.002 14	0.004 75	0.011 35	0.011 57	0.021 82	0.035 25

3.3.3.3 元素相关性特征

通过对菠萝果实、植株与根系土中 10 种元素相关性分析(表 4),结果表明:果实、植株与土壤元素在 $p < 0.05$ 水平上均无显著相关关系,这与叶信栋等^[6]研究结果基本一致,农作物对土壤元

素吸收富集具有一定的复杂性,与农作物品种、土壤理化性质、元素形态等多种因素有关^[16]。多数元素在植株与土壤之间存在较弱的正相关关系,表明植株对元素的吸收在一定程度上受土壤元素丰缺的影响。

表 4 元素相关系数
Tab.4 Correlation coefficients between elements

元素		As	Cd	Cr	Cu	Ge	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
果实与土壤	相关性	0.16	-0.26	0.29	0.30	-0.29	0.45	0.56	-0.67	-0.01	0.10
	显著性	0.73	0.58	0.54	0.51	0.52	0.32	0.19	0.10	0.99	0.83
植株与土壤	相关性	-0.34	0.58	0.38	0.37	-0.18	0.30	0.29	0.64	0.08	-0.02
	显著性	0.46	0.17	0.40	0.41	0.70	0.51	0.54	0.12	0.87	0.96

农作物对土壤中不同元素的吸收存在相互作用关系^[2],对菠萝果实的元素含量进行皮尔逊相关性系统聚类分析(图 8),样品中 Cu、Pb、Cr、Hg 相关程度较高,表明果实 Cu、Pb、Cr、Hg 的吸收表现为协同作用。

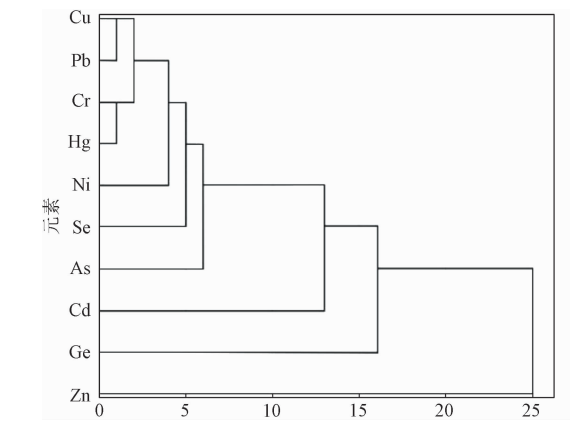


图 8 果实元素聚类分析树图

Fig.8 Clustering dendrogram of pineapple fruit elements

3.4 元素迁聚与菠萝生长关系讨论

3.4.1 土壤营养元素地球化学含量

土壤中的 N、P、K 是植物生长所必须的营养元素,在基岩风化过程中均表现为淋滤流失,而以石茆岭组玄武岩为背景的土壤呈现富 P 贫 K 的特征,一方面由于石茆岭组玄武岩是主要为拉斑玄武岩和碱性玄武岩,低 K₂O 是石茆岭组的显著特点,且 K₂O 含量会随着岩石碱度降低而减少,而基岩副矿物中磷灰石含量高,为土壤中 P 提供了丰富的来源;另一方面在风化过程中 K₂O 活性更高,会随着风化作用的加强而不断流失。受 K 元素缺乏的影响,研究区土壤养分地球化学等级以三等和二等为主,有研究表明 K 肥能使菠萝果实增大、果糖含量增加^[17],建议研究区在菠萝种植过程中,应适当施用钾肥。

3.4.2 土壤微量元素地球化学含量

植物生长所需的微量元素主要来源于土壤,研

究区土壤中 Cr、Cu 和 Ni 超标情况比较普遍,主要原因是石茆岭组元素含量偏高,风化过程中这 3 种元素的活动性差,迁聚特征比较接近,进而引起了土壤中元素富集。海南省文昌市以玄武岩区为背景的土壤中同样存在着 Cr、Cu、Ni 超标的现象^[5],与研究区较为一致,福建省龙海市以花岗岩为背景的土壤中 Cr、Cu、Ni 则明显偏低^[6]。由于菠萝对 Cu、Cr 和 Ni 表现为极弱吸收,况且植株和根系土中元素不存在显著相关关系,因此研究区元素超标对菠萝生长影响并不大。

研究区土壤 Se 含量高,绝大部分土地为富硒土地,但菠萝果实并未达到富硒水果含量要求,这与中山市神仙湾富硒土地产出的菠萝具有相同的结果^[7]。这是由于菠萝果实对 Se 表现为极弱吸收,而且菠萝吸收的 Se 主要分布在根和叶中,在果实中含量最低。

4 结论

(1)研究区土壤呈酸性,TP、 TFe_2O_3 、Co、Ge、S、Se 元素含量丰富,TN 含量中等,有机质含量以中等—较丰富为主,TK 含量缺乏,菠萝种植区应适当补充钾肥以提高菠萝品质。Cr、Cu、Ni 含量超出农用地土壤污染风险筛选值,由于菠萝植株对 Cr、Cu、Ni 的吸收能力偏弱,含量超标对菠萝生长影响不大。

(2)基岩风化成土过程中,土壤中 Pb、Cr、 TFe_2O_3 、Ni 相对基岩表现为富集, Al_2O_3 、Cu、Zn、Co、Mn、TP、 K_2O 相对基岩表现为流失;基岩副矿物风化蚀变对土壤元素含量影响明显,其中 Co、Cr、Cu、Ge、Mn、Ni、Zn 主要来源于磁铁矿,Se 主要来源于黄铁矿,TP 主要来源于磷灰石。

(3)菠萝植株对元素的吸收受土壤元素丰缺的影响,菠萝果实对 Cd、Hg 为微弱吸收,对 Zn、Cu、Se、Ni、As、Pb、Ge、Cr 为极弱吸收,Cd 相对其他元素更容易在菠萝果实中富集。Ge、As、Cd、Se、Ni 在菠萝根部最为富集,Pb、Hg、Cr、Cu、Zn 在叶片最为富集,果实对 Cu、Pb、Cr、Hg 的吸收存在协同作用。

参考文献 (References):

[1] 曾其国,任迎虹,何瑜,等. 罗汉果产区岩石-土-罗汉果微量元素分布与迁聚特征研究[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2015,38(3):428-432.

Zeng Q G, Ren Y H, He Y, et al. Distribution and migration characteristics of microelements in rock-soil-Siraitia grosvenorii system in Siraitia grosvenorii belt of Guangxi[J]. J Sichuan Norm Univ (Nat Sci), 2015, 38(3): 428-432.

[2] 孙厚云,卫晓锋,孙晓明,等. 承德杏仁产区关键带基岩-土壤-作物果实 BRSPC 系统元素迁聚特征[J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2621-2645.

Sun H Y, Wei X F, Sun X M, et al. Element migration and accumulation characteristics of bedrock-regolith-soil-fruit plant continuum of the earth's critical zone in Chengde almond producing area[J]. Earth Sci, 2021, 46(7): 2621-2645.

[3] 汪振立,邓通德,王瑞敏,等. 岩石-土壤-脐橙系统中稀土元素迁聚特征[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1382-1394.

Wang Z L, Deng T D, Wang R M, et al. Characteristics of migration and accumulation of rare earth elements in the rock-soil-navel orange system[J]. Geol China, 2009, 36(6): 1382-1394.

[4] 徐小磊,戴圣潜,刘家云,等. 安徽宁国地区岩-土系统元素迁移及其农业地质环境效应[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2005, 30(2): 168-176, 244.

Xu X L, Dai S Q, Liu J Y, et al. Movement of elements in a rock-soil system and the effects of a geological environment on agriculture in the Ningguo region, Anhui province[J]. Earth Sci - J China Univ Geosci, 2005, 30(2): 168-176, 244.

[5] 郭宇,吴国爱,杨奕,等. 海南菠萝种植地土壤重金属环境地球化学研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(4): 100-103, 205.

Guo Y, Wu G A, Yang Y, et al. Environmental-geochemical study of heavy metals in soils of Hainan island[J]. Environ Sci Technol, 2010, 33(4): 100-103, 205.

[6] 叶信栋,孙彬彬,周国华,等. 龙海市菠萝种植区生态地球化学特征研究[J]. 福建农业学报, 2017, 32(9): 1012-1020.

Ye X D, Sun B B, Zhou G H, et al. Ecological geochemistry of pineapple growing lands in Longhai city[J]. Fujian J Agric Sci, 2017, 32(9): 1012-1020.

[7] 顾涛,赵信文,江拓,等. 中山市神湾菠萝产区硒的地球化学分布特征[J]. 地质论评, 2020, 66(S1): 33-34.

Gu T, Zhao X W, Jiang T, et al. Geochemical characteristics of selenium distribution in the pineapple producing area of Shenwan, Zhongshan city[J]. Geol Rev, 2020, 66(S1): 33-34.

[8] 庞观胜,谭施北,吴浩,等. 广东、广西和海南菠萝主产区土壤养分状况调查[J]. 广东农业科学, 2013, 40(18): 40-42.

Pang G S, Tan S B, Wu H, et al. Investigation on the soil nutrient status of pineapples in Guangdong, Guangxi and Hainan province[J]. Guangdong Agric Sci, 2013, 40(18): 40-42.

[9] 葛文. 山东烟台地区土壤地球化学环境与优质苹果生产的适应性评价[D]. 武汉:中国地质大学, 2013.

Ge W. Geochemical Environment of Soil and Suitability Evaluation of High-Quality Apple Production in Yantai Area, Shandong Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.

[10] 马宏宏,彭敏,刘飞,等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 449-459.

- Ma H H, Peng M, Liu F, et al. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil – crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. Environ Sci, 2020, 41(1): 449 – 459.
- [11] 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 等. 钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤 – 玉米重金属迁移富集特征[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1166 – 1176.
- Sun H Y, Wei X F, Sun X M, et al. Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a soil – maize system in reclaimed land and surrounding areas of typical vanadium – titanium magnetite tailings[J]. Environ Sci, 2021, 42(3): 1166 – 1176.
- [12] 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 等. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 2020: 1052 – 1055.
- Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Soil Geochemical Dataset of China[M]. Beijing: Geology Press, 2020: 1052 – 1055.
- [13] 生态环境部. 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: 中国环境出版社, 2019.
- Ministry of Ecological Environment. GB 15618—2018. Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (Trial)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.
- [14] 全国国土资源标准化技术委员会. DZ/T 0295—2016. 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京: 地质出版社, 2016.
- National Technical Committee for Standardization of Land and Resources. DZ/T 0295—2016. Specification of Land Quality Geochemical Assessment[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [15] 国家卫生和计划生育委员会. GB 2762—2017. 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, 2017.
- National Health and Family Planning Commission. GB 2762—2017. National Food Safety Standard: Limits of Pollutants in Food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [16] 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]. Geol China, 2015, 42(6): 2008 – 2018.
- [17] 周迪, 张秀梅, 陈妹, 等. 菠萝花果发育研究进展[J]. 中国南方果树, 2020, 49(6): 174 – 181, 190.
- Zhou D, Zhang X M, Chen M, et al. Research progress on flower and fruit development of pineapple[J]. South China Fruits, 2020, 49(6): 174 – 181, 190.

Element migration and accumulation characteristics of bedrock – soil – pineapple in main pineapple producing area of Zhanjiang City

SUN Zhijia, LI Baofei, ZHAO Mingjie, YAN Xingguo, YUAN Qingzheng

(Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey, Shandong Yantai 264004, China)

Abstract: The main pineapple producing area of Xuwen Country in Zhanjiang City was chosen as the study area to evaluate the elements migration and accumulate characteristics of bedrock – soil – crop system. The soil and pineapple samples were collected to evaluate the elements distribution, migration and accumulation characteristics, combining with the element migration coefficient and bioconcentration factor. The results indicate that the soil elements TP, TFe₂O₃, Co, Ge, S and Se were categorized as rich level, and TN content was categorized as moderate level, with moderate to relatively rich level of organic matter content and depleted TK content. The Pb, Cr, TFe₂O₃ and Ni in soil are relatively enriched in soil, and Al₂O₃, Cu, Zn, Co, Mn, TP and K₂O are relatively lost during the weathering process of bedrock to soil. The Co, Cr, Cu, Ge, Mn, Ni and Zn in the soil are mainly derived from the weathering of magnetite, and Se is mainly derived from the weathering of pyrite. Cd and Hg were weakly absorbed by pineapple plants, while the Cd was easier to accumulate in pineapple fruits than other elements. Ge, As, Cd, Se and Ni were the most abundant in the roots of pineapple plants, and Pb, Hg, Cr, Cu and Zn were the most abundant in the leaves. There was a synergistic effect of pineapple fruits on the absorption of Cu, Pb, Cr and Hg.

Keywords: element migration; geochemistry; pineapple; Zhanjiang City

(责任编辑: 常艳)