

海南岛北部玄武岩区土壤母质均一性及 相对年龄判定

罗原骏^{1,2}, 黄来明^{2,3*}, 袁大刚^{1*}

(1. 四川农业大学资源学院, 四川 成都 611130; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:【目的】时间序列法是定量研究土壤发生过程、演变速率及其变化阈值的重要手段, 构建可靠的土壤时间序列需对土壤母质均一性和相对年龄进行判定。【方法】以海南岛北部不同喷发期玄武岩发育土壤所构成的成土时间序列(0.09、0.146、0.64、1.12、1.81、2.30 Ma B. P.)为对象, 利用各种土壤属性参数(包括剖面形态、颗粒组成、稳定元素含量、风化发育指数和元素变化率等)对该时间序列母质均一性和土壤相对年龄进行判定。【结果】各剖面颜色、质地、结构等形态总体呈均一、渐变的特征, 去除黏粒后的粗粉粒含量、稳定元素 Ti/Zr 比值在剖面内和剖面间变化均较小, 表明时间序列土壤的起源母质相同。随着成土年龄的增加, 黏粒含量和剖面发育指数呈线性增加的趋势, 土壤风化强度指标(*B* 指数、*CIW* 指数、*CIA* 指数和 *ba* 值)服从对数函数变化规律, 在土壤相对年龄的判定中具有较好的指示意义。【结论】研究区土壤母质来源相同, 土壤相对年龄可通过相关土壤属性体现出来, 为定量研究土壤发生阈值奠定了基础。

关键词: 热带土壤; 土壤时间序列; 母质均一性; 土壤相对年龄; 土壤发生阈值

中图分类号: S151+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)01-0001-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022022304

罗原骏, 黄来明, 袁大刚. 海南岛北部玄武岩区土壤母质均一性及相对年龄判定 [J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 1-10

LUO Yuan-jun, HUANG Lai-ming, YUAN Da-gang. Parent Material Uniformity and Relative Age Identification of Soil Chronosequence Derived from Basalt in Northern Hainan Island[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1): 1-10

【研究意义】土壤是地球表层系统最活跃、最核心的组成部分, 其形成和演化过程对于陆地生态系统生态服务功能与可持续发展具有重要影响^[1]。揭示并量化土壤演化轨迹及其关键元素变化速率和阈值, 有助于深入理解和预测土壤发生过程和未来发展趋势, 并为实现土壤资源可持续利用和管理提供理论依据。由于土壤发生演化过程极其漫长, 难以进行原位观测, 因此时间序列法为研究成土过程的方向、速率和阈值及土壤关键属性动态演变特征提供了有力手段^[2-4]。

【前人研究进展】在构建土壤时间序列的过程中, 为了准确反映土壤属性随时间的变化, 必须对土壤母质均一性和土壤相对年龄进行判定^[5]。其中母质均一性是研究土壤发生过程的先决条件, 只有保证剖面内和剖面间的土体是由同种母质发育而来, 土壤属性随时间的变化才能归因于土壤发育年龄^[6]。

母质均一性的判定指标主要包括野外土壤剖面形态特征以及基于室内分析测得的土壤中抗风化、不易移动或不易发生变化的组分随剖面深度的变化特征^[6]。此外, 时间序列中土壤相对年龄的验证, 可以选择在土壤发育过程中能指示土壤发育年龄, 且在一定时间尺度下呈系统、单向变化规律的土壤属性参数^[5]。Schaez 和 Anderson^[7]将用于判定土壤相对年龄的方法总结为 4 类, 包括单个性质或属性、土壤性质的加权、土壤发育指数以及土壤发生的质量平衡。

海南岛北部是我国第四纪火成岩分布面积最大的地区之一, 属热带季风气候区, 有利于风化过程的进行, 土壤元素生物地球化学循环迅速。海南岛北部由于分布有不同时期喷发的玄武岩, 其相似的成土环境和成土时间差异使其成为构建土壤时间序列的理想场所。目前许多学者采用时间序列法对海南岛玄武岩发育土壤的成土过程^[8]、黏土矿物组成^[9]、

收稿日期: 2022-02-23; 修订日期: 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977004)、中国科学院青年创新促进会会员项目(2019052)和中国科学院地理科学与资源研究所兼维优秀青年人才项目(2017RC203)资助

作者简介: 罗原骏(1994-), 男, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事土壤养分循环研究。E-mail: 3856lyj@sina.cn

*通讯作者: E-mail: huanglm@igsnr.ac.cn; E-mail: 690654034@qq.com

元素地球化学特征^[10]、胶体稳定性^[11]和磁性矿物学^[12]等开展了研究。【本研究切入点】以往研究均假定土壤发育于下伏基岩，且土壤年龄与下伏基岩年龄一致^[13-15]，并未对土壤母质均一性和土壤相对年龄进行判定和验证。【拟解决的问题】本研究选取海南岛北部不同喷发期玄武岩发育土壤构成的成土时间序列为对象，通过比较土壤形态、颗粒组成及稳定元素在剖面内和剖面间的变化，判断研究区土壤是否具有相同的母质来源，并在此基础上选取部分对土壤发育年龄具有指示意义的土壤属性参数验证土壤相对年龄，以期构建可靠的土壤时间序列提供数据支撑，为后续相关研究获得准确、可靠的结果提供保障。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海南岛地处中国南海西北部（18°10′~20°10′N，108°37′~111°03′E），是我国热带地区最大的岛屿，与雷州半岛隔海相望。海南岛属热带季风气候，全年高温，冬春干旱，夏秋多雨；年均气温 22.5~25.60℃，年降水量 1500~2500 mm。海南岛北部为第四纪火

成岩分布区，火成岩以基性玄武岩为主。该地区地形主要为平缓的台地，土壤由不同喷发期玄武岩风化发育而来。

1.2 土壤样品采集

在查阅有关海南岛北部玄武岩的形成、分布、年龄等文献资料的基础上^[13-15]，选取不同喷发期（分别距今 0.09、0.146、0.64、1.12、1.81、2.30 Ma B. P.）玄武岩风化发育土壤为研究对象，各采样点位置如图 1 所示，基本信息见表 1。在每个样点用 GPS 记录坐标信息后，选取 20 m × 20 m 的样方进行环境调查，包括地形、土地利用方式、植被等，再在每个样方内选择具有代表性的点位，进行土壤剖面准备、层次划分与描述以及土壤与岩石样品采集。

土壤剖面层次划分与描述以及样品采集按照《野外土壤描述与采样手册》^[16]进行，同时参考《中国标准土壤色卡》^[17]记录土壤颜色。土样采集时，去除植物根系、动物残体等，将各土层的土样按四分法缩分至 1.5 kg 左右，同时采集土壤剖面底部或附近玄武岩母岩样品。土壤和岩石样品于室内风干、磨细后分别过 10 目（2 mm）、60 目（0.25 mm）和 100 目（0.15 mm）筛，保存于密封袋内备用。

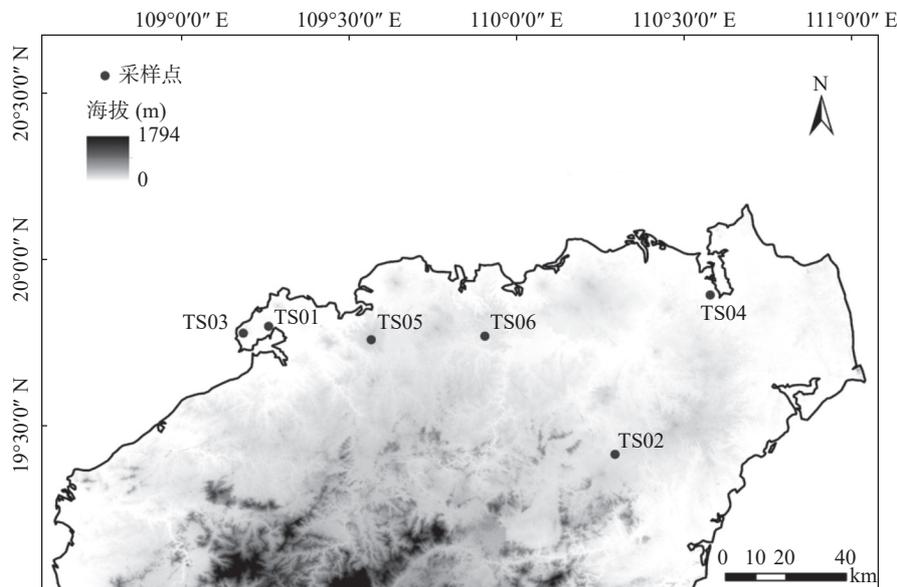


图 1 研究区采样点分布图

Fig.1 Location of the sampling sites in study area

1.3 指标测定方法

基础理化指标参考《土壤调查实验室分析方法》^[19]，其中颗粒组成为激光粒度仪法；pH（土水比 1:2.5）为电位法；阳离子交换量（CEC）为乙酸铵（pH = 7.0）交换法；全硅（Si）为 NaOH 熔融法，其他矿

质元素全量为 HNO₃-HF-HClO₄ 消煮法，所有矿质元素均用 ICP-OES（Agilent 5900 SVDV ICP-OES）法测定。

1.4 数据计算与处理

1.4.1 剖面发育指数 参考 Harden（1982）^[20]和 Harden and Taylor（1983）^[21]的研究，本研究选择土

表 1 采样点基本信息
Table 1 Basic information of the sampling sites

剖面 Profile	经纬度 Coordinate	海拔 Altitude (m)	优势树种 Dominant species	土地利用方式 Land use type	土壤类型 Soil type	成土年龄 Soil age (Ma B. P.)	测年方法 Dating method	参考文献 Reference
TS01	19°47'5" N 109°13'26" E	21	细叶桉 <i>Eucalyptus tereticornis</i> Smith	林地	普通湿润正常新成土	0.09	K-Ar法	[13]
TS02	19°24'60" N 110°17'36" E	83	槟榔树 <i>Areca catechu</i> Linn	林地	普通筒育湿润锥形土	0.146	热释光法	[14]
TS03	19°46'48" N 109°11'06" E	26	大叶桉 <i>Eucalyptus robusta</i> Smith	林地	红色铁质湿润淋溶土	0.64	K-Ar法	[15]
TS04	19°53'42" N 110°34'38" E	12	菜豆树 <i>Radermacherasinica</i> (Hance) Hemsl.	林地	普通筒育湿润淋溶土	1.12	K-Ar法	[13]
TS05	19°45'38" N 109°33'59" E	165	橡胶树 <i>Hevea brasiliensis</i> (Willd. ex A. Juss.) Muell. Arg.	林地	普通暗红湿润铁铝土	1.81	K-Ar法	[13]
TS06	19°46'17" N 109°54'19" E	102	相思树 <i>Acacia confuse</i> Merr.	林地	普通暗红湿润铁铝土	2.3	K-Ar法	[15]

注: 土壤类型根据《中国土壤系统分类检索》(第三版)^[18]进行划分。

壤红度、土壤暗度、土壤质地、土壤结构、土壤结持性(润)及土壤 pH 来计算土壤剖面发育指数(PDI)。首先对土壤各发生层的属性特征进行赋值(每相差一个单位得分为 10), 随后计算各发生层属性赋值数据与基岩的差值(基岩除颜色外, 其余属性特征均不发育, 得分为 0), 然后, 按照公式(1)对数据进行标准化。

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

式中, x' 为标准化后的土壤属性数据, x 为土壤属性数据, x_{min} 与 x_{max} 分别为该土壤属性的最小值与最大值。各发生层标准化后的数据取平均值得到土层指数(HI), 最后, 按照公式(2)计算各剖面的 PDI 值。

$$PDI = \sum_{i=1}^n (HI_i \times h_i) \quad (2)$$

式中, PDI 为土壤剖面发育指数, HI_i 为第 i 层土层指数, h_j 为第 i 层土层厚度(cm)。

1.4.2 土壤风化强度指标 本研究采用土壤中大量元素含量的分子比率, 包括硅铝率(Sa)、硅铁铝率(Saf)、风化淋溶系数(ba)、A 指数和 B 指数、化学风化指数(CIW)和化学蚀变指数(CIA)作为判断土壤风化强度的指标。各指标计算见公式(3)~公式(9)。

硅铝率(Sa)、硅铁铝率(Saf)^[22-23]:

$$Sa = SiO_2 / Al_2O_3 \quad (3)$$

$$Saf = SiO_2 / (Fe_2O_3 + Al_2O_3) \quad (4)$$

风化淋溶系数(ba)^[24]:

$$ba = (Na_2O + K_2O + CaO + MgO) / Al_2O_3 \quad (5)$$

A 指数和 B 指数^[22-23]:

$$A = (SiO_2 + Na_2O + K_2O + CaO) / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO) \quad (6)$$

$$B = (Na_2O + K_2O + CaO) / (SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO) \quad (7)$$

化学风化指数(CIW)和化学蚀变指数(CIA)^[22-23]:

$$CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO)] \times 100 \quad (8)$$

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO)] \times 100 \quad (9)$$

式中, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 代表土壤中该氧化物的分子数。

1.4.3 元素变化率 本研究以 Ti 作为非移动元素^[25], 计算大量元素在土壤剖面内的变化率, 见公式(10)。

$$X(\%) = [(X_s / I_s) / (X_r / I_r) - 1] \times 100 \quad (10)$$

式中, ΔX 表示 X 元素在土壤剖面内的变化率, $\Delta X > 0$ 表示该元素发生富集, $\Delta X < 0$ 表示该元素发生亏损或迁移; X_s 、 X_r 分别为 X 元素在土壤和岩石中的含量; I_s 、 I_r 分别为 Ti 在土壤和岩石中的含量。

1.4.4 统计分析 采用 SPSS 19.0 对试验数据进行统计分析; 采用 Origin 2021 和 Excel 2016 对试验数据进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 土壤母质均一性判定

2.1.1 剖面形态特征 土壤剖面记录了土壤发育过程中的历史印记, 因此剖面形态特征的野外观测与

描述是判定土壤母质均一性的最直观方法^[5]。如表 2 所示,各剖面土壤颜色以黄棕色和红棕色为主,随着风化成土过程的进行,润态、干态色调分别从 7.5YR、10YR 向 10R、5YR 过渡。除 TS05 剖面润态色调在 182 cm 处从 2.5YR 过渡为 10R 外,其余剖面内部不同发生层色调基本统一,明度和彩度随土层深度呈不变或渐变。从土壤质地来看,各剖面土

壤质地较为均一,除 TS01 剖面为砂壤外,其余剖面以粉黏壤或黏土为主。土体结构以粒状、块状结构为主,部分剖面内部存在棱柱状结构。各剖面润态结持性自上而下从疏松向坚实过渡。综上所述,各剖面形态总体呈均一、渐变的发生学特征,因此可以初步判定研究区土壤母质来源相同,不过仍需结合室内分析指标来做进一步判定。

表 2 土壤剖面描述
Table 2 Description of the studied soil profiles

剖面 Profile	发生层 Horizon	深度(cm) Depth	颜色(润) Color (moist)	颜色(干) Color (dry)	质地 Texture	结构 Structure	结持性(润) Consistence (moist)	新生体 New growth
TS01	A	0~3	7.5YR 4/3	7.5YR 5/6	砂壤土	团粒状	疏松	无
	Bw	3~10	7.5YR 4/4	7.5YR 5/6	砂壤土	亚角块状	疏松	无
	BC	10~15	7.5YR 4/4	10YR 5/4	砂壤土	亚角块状	稍坚实	无
TS02	A	0~12	7.5YR 3/2	10YR 6/2	粉黏壤土	团粒状	疏松	无
	Bts1	12~32	7.5YR 3/3	10YR 6/2	粉壤土	亚角块状	稍坚实	少量铁锰斑纹
	Bts2	32~60	7.5YR 3/3	10YR 6/2	粉黏壤土	亚角块状	稍坚实	少量铁锰斑纹
	BC	60~86	7.5YR 3/3	10YR 6/2	粉黏壤土	亚角块状	稍坚实	少量铁锰斑纹
	C	86~110	7.5YR 3/3	10YR 6/2	粉黏土	无	稍坚实	无
TS03	Ah	0~9	2.5YR 4/6	5YR 5/4	粉黏壤土	团粒状	疏松	无
	Bs1	9~26	2.5YR 4/8	5YR 5/4	粉黏壤土	棱柱状	稍坚实	很少铁锰斑纹、少量铁锰结核
	Bts2	26~55	2.5YR 4/8	5YR 5/4	黏土	棱柱状	坚实	少量黏粒胶膜、少量铁锰结核
	Bts3	55~95	2.5YR 4/8	5YR 5/4	黏土	棱柱状	坚实	少量黏粒胶膜、少量铁锰结核
	Bts4	95~136	2.5YR 4/8	5YR 5/4	黏土	棱柱状	坚实	中量黏粒胶膜、中量铁锰斑纹、中量铁锰结核
	Bts5	136~158	2.5YR 4/8	5YR 5/4	黏土	棱柱状	坚实	中量黏粒胶膜、中量铁锰斑纹、中量铁锰结核
	Bs2	158~180	2.5YR 5/8	5YR 5/4	粉黏壤土	棱柱状	坚实	中量铁锰胶膜、中量铁锰结核
	C	180~200	2.5YR 5/8	7.5YR 6/4	砂壤土	无	坚实	无
TS04	Ah	0~25	5YR 4/3	7.5YR 5/4	壤土	团粒状	疏松	无
	Bts1	25~55	5YR 4/3	7.5YR 5/4	粉黏土	亚角块状	稍坚实	中量黏粒胶膜、中量铁锰斑纹、中量铁锰结核
	Bts2	55~90	5YR 4/4	7.5YR 5/6	黏土	亚角块状	稍坚实	中量黏粒胶膜、中量铁锰斑纹、中量铁锰结核
	Bts3	90~120	5YR 4/6	7.5YR 5/4	粉黏土	亚角块状	稍坚实	中量黏粒胶膜、中量铁锰斑纹、中量铁锰结核
	Bts4	120~165	5YR 4/6	7.5YR 5/6	粉黏土	亚角块状	稍坚实	少量黏粒胶膜、中量铁锰斑纹、中量铁锰结核
	Bts5	165~200	5YR 4/6	7.5YR 5/6	黏土	亚角块状	稍坚实	少量黏粒胶膜、中量铁锰斑纹、中量铁锰结核
	C	200~220	5YR 4/6	7.5YR 5/6	黏土	无	稍坚实	无
TS05	Ah	0~12	2.5YR 3/4	5YR 5/4	粉黏壤土	团粒状	疏松	无
	B1	12~30	2.5YR 4/6	5YR 5/4	粉黏壤土	亚角块状	疏松	少量铁锰结核
	B2	30~62	2.5YR 4/8	5YR 5/4	粉黏壤土	亚角块状	稍坚实	少量铁锰结核
	B3	62~98	2.5YR 4/8	5YR 5/4	粉黏土	棱柱状	坚实	少量铁锰结核
	B4	98~130	2.5YR 4/6	5YR 5/4	黏土	棱柱状	坚实	少量铁锰结核
	B5	130~182	2.5YR 4/6	5YR 5/6	黏土	棱柱状	坚实	少量铁锰结核
	Bts1	182~208	10R 2/3	5YR 5/3	黏土	亚角块状	坚实	中量黏粒胶膜、中量铁锰结核
	Bts2	208~218	10R 2/3	5YR 5/4	黏土	亚角块状	很坚实	中量黏粒胶膜、中量铁锰结核
	Bts3	218~270	10R 2/3	5YR 5/4	黏土	亚角块状	坚实	中量黏粒胶膜、中量铁锰结核
	Bts4	270~310	10R 2/3	5YR 5/6	黏土	亚角块状	坚实	少量黏粒胶膜、少量铁锰结核
TS06	Ah	0~20	2.5YR 4/4	5YR 5/6	黏土	团粒状	疏松	无
	AB	20~40	2.5YR 4/4	5YR 5/6	黏土	角块状	疏松	中量铁锰斑纹
	Bts1	40~60	2.5YR 4/4	5YR 6/6	黏土	角块状	稍坚实	中量铁锰斑纹、中量黏粒胶膜
	Bts2	60~100	2.5YR 4/4	5YR 5/6	黏土	角块状	坚实	中量铁锰斑纹、中量黏粒胶膜
	Bts3	100~140	2.5YR 4/4	5YR 5/6	黏土	角块状	坚实	少量铁锰斑纹、中量黏粒胶膜
	Bts4	140~170	2.5YR 4/4	5YR 5/6	黏土	角块状	很坚实	少量铁锰斑纹、中量黏粒胶膜
	Bts5	170~230	2.5YR 4/4	5YR 5/6	黏土	角块状	很坚实	少量铁锰斑纹、中量黏粒胶膜
Bts6	230~400	2.5YR 4/4	5YR 5/6	黏土	角块状	很坚实	少量铁锰斑纹、少量黏粒胶膜	

注:土壤质地根据美国农业部(USDA)制进行划分。

2.1.2 土壤颗粒组成 土壤颗粒组成被广泛用于剖面母质均一性的判定^[6],然而在土壤发育过程中,黏粒的淋溶与淀积可能导致其在剖面内的重新分配^[5,23]。因此,通常使用去除黏粒后的颗粒组成来判定剖面母质均一性^[5-7,23]。研究区土壤剖面颗粒组成主要以黏粒和粉粒为主,考虑到部分层次砂粒含量为 0,因此本研究选择去除黏粒后(以下均是)的粉粒、粗粉粒、中粉粒以及粗粉粒/中粉粒的比值作为母质均一性判定指标。

从表 3 可以看出,粉粒含量在 6 个样点剖面内分布较为均一,其变异系数在 3.84%~14.91%之间,属于弱变异(C.V.<10%)到中等变异(10%<C.V.<100%)水平,说明研究区土壤母质在剖面内没有显著差异。对比剖面之间,粉粒含量从 43.82%

(TS01)增加至 80.33%(TS02),随后在 75.06%~92.16%之间小幅波动,表明风化作用在成土初期阶段(<0.15 Ma B.P.)就开始迅速进行,随后达到相对稳定状态。各剖面间的粗粉粒含量在 21.96%~25.61%之间,变异系数仅为 6.54%,属于弱变异。因此去除黏粒后的粗粉粒含量能够作为研究区土壤均发育于同一母质的判定依据。中粉粒含量和粗粉粒/中粉粒比值在 6 个剖面内的差异总体较小,处于弱变异到中等变异水平。然而,由于 TS01 颗粒组成与其余剖面差异较大,导致中粉粒含量和粗粉粒/中粉粒比值在 6 个剖面之间的变异系数较高,其数值分别为 24.79%和 33.12%(表 3),但这种差异是热带地区土壤发育过程中的正常变化。

表 3 各土壤剖面去除黏粒的粉粒、粗粉粒、中粉粒及粗粉粒/中粉粒比值

Table 3 Variation of clay-free silt, coarse silt (CS), medium silt (MS), fine silt (FS) and CS/MS in the studied soil profiles

剖面 Profile	去除黏粒的粉粒 (%) Clay-free silt			去除黏粒的粗粉粒 (%) Clay-free coarse silt			去除黏粒的中粉粒 (%) Clay-free medium silt			去除黏粒的粗粉粒/中粉粒 Clay-free fine silt		
	平均值	标准差	变异系数 (%)	平均值	标准差	变异系数 (%)	平均值	标准差	变异系数 (%)	平均值	标准差	变异系数 (%)
	Mean	S. D	C. V	Mean	S. D	C. V	Mean	S. D	C. V	Mean	S. D	C. V
TS01	43.82	1.68	3.84	22.17	1.54	6.95	13.1	0.34	2.56	1.69	0.09	5.56
TS02	80.33	4.11	5.11	23.26	1.75	7.52	28.01	1.62	5.79	0.83	0.05	6.6
TS03	76.14	3.66	4.81	25.61	3.75	14.63	24.49	1.17	4.78	1.05	0.18	17.43
TS04	75.06	11.19	14.91	22.43	1.16	5.17	24.5	3.79	15.48	0.93	0.11	11.36
TS05	90.67	3.66	4.04	24.9	4.34	17.42	30.19	1.57	5.19	0.83	0.17	21.05
TS06	92.16	9.77	10.6	21.96	6.37	29.02	28.24	4.33	15.34	0.81	0.3	37.05
Total	76.36	17.49	22.91	23.39	1.53	6.54	24.76	6.14	24.79	1.02	0.34	33.12

2.1.3 Ti、Zr 含量及其比值 判定母质均一性的另一个有效参数是抗风化、不易移动的矿物或元素含量,最常用的是金红石与锆石,或与这些矿物相对应的稳定元素 Ti 与 Zr^[5-7,23]。如表 4 所示,各土壤剖面 Ti、Zr 含量分别为 17.61~59.38 g kg⁻¹、0.17~0.48 g kg⁻¹,Ti/Zr 比值在 76.39~124.26 之间。各样点

剖面内变异系数除 TS04 的 Ti 含量(C.V.=13.20%)外均小于 10%,说明 Ti、Zr 分布在不同层次间没有明显差异,因此研究区土壤各样点剖面内不存在因地质原因造成的母质不均一。因此,根据土壤剖面 Ti、Zr 的分布状况,可以认为研究区土壤起源母质相同,为海南岛土壤时间序列的构建提供了数据支撑。

表 4 各土壤剖面 Ti、Zr 含量及其比值

Table 4 Variation of Ti, Zr contents and Ti/Zr ratio in the studied soil profiles

剖面 Profile	Ti (g kg ⁻¹)			Zr (g kg ⁻¹)			Ti/Zr		
	平均值	标准差	变异系数 (%)	平均值	标准差	变异系数 (%)	平均值	标准差	变异系数 (%)
	Mean	S. D	C. V	Mean	S. D	C. V	Mean	S. D	C. V
TS01	19.83	0.45	2.27	0.26	0.01	5.5	76.39	5.88	7.7
TS02	59.38	4.89	8.24	0.48	0.03	6.34	124.26	3.98	3.2
TS03	17.61	1.04	5.92	0.17	0.01	6.61	103.84	8.56	8.25
TS04	29.43	3.88	13.2	0.27	0.02	6.19	106.88	8.35	7.81
TS05	27.21	0.92	3.37	0.35	0.02	5.86	78.23	4.11	5.25
TS06	22.82	0.59	2.59	0.27	0.01	5.47	85.79	3.21	3.74

2.2 土壤相对年龄判定

2.2.1 土壤基础性质与剖面发育指数 土壤单一属

性、土壤发育指数和质量平衡等土壤参数能够直观反映成土过程中留下的痕迹,因此在土壤相对年

龄判定中具有重要价值^[5,7]。其中土壤基础性质随成土年龄的变化如图 2 所示。土壤 pH 和阳离子交换量 (CEC) 的变化范围分别为 4.38 ~ 6.65、8.31 ~ 38.82 cmol kg⁻¹，随成土过程呈先增加后降低的变化趋势。土壤黏粒含量在 13.87% ~ 97.10% 之间，随着成土过程而增加，与土壤发育年龄呈线性关系 ($R^2 = 0.859, P < 0.01$)。可以看出，使用单一土壤属性来

判定土壤相对年龄具有很大的不确定性，因此本研究还选取了基于土壤形态特征的剖面发育指数 (PDI) 来判定土壤相对年龄。如图 2 所示，PDI 值变化范围在 6.55 ~ 350.19 之间，随成土年龄的增加呈线性增加的趋势 ($R^2 = 0.973, P < 0.001$)，与前人玄武岩测年数据基本吻合，因此可以作为土壤相对年龄的判定依据。

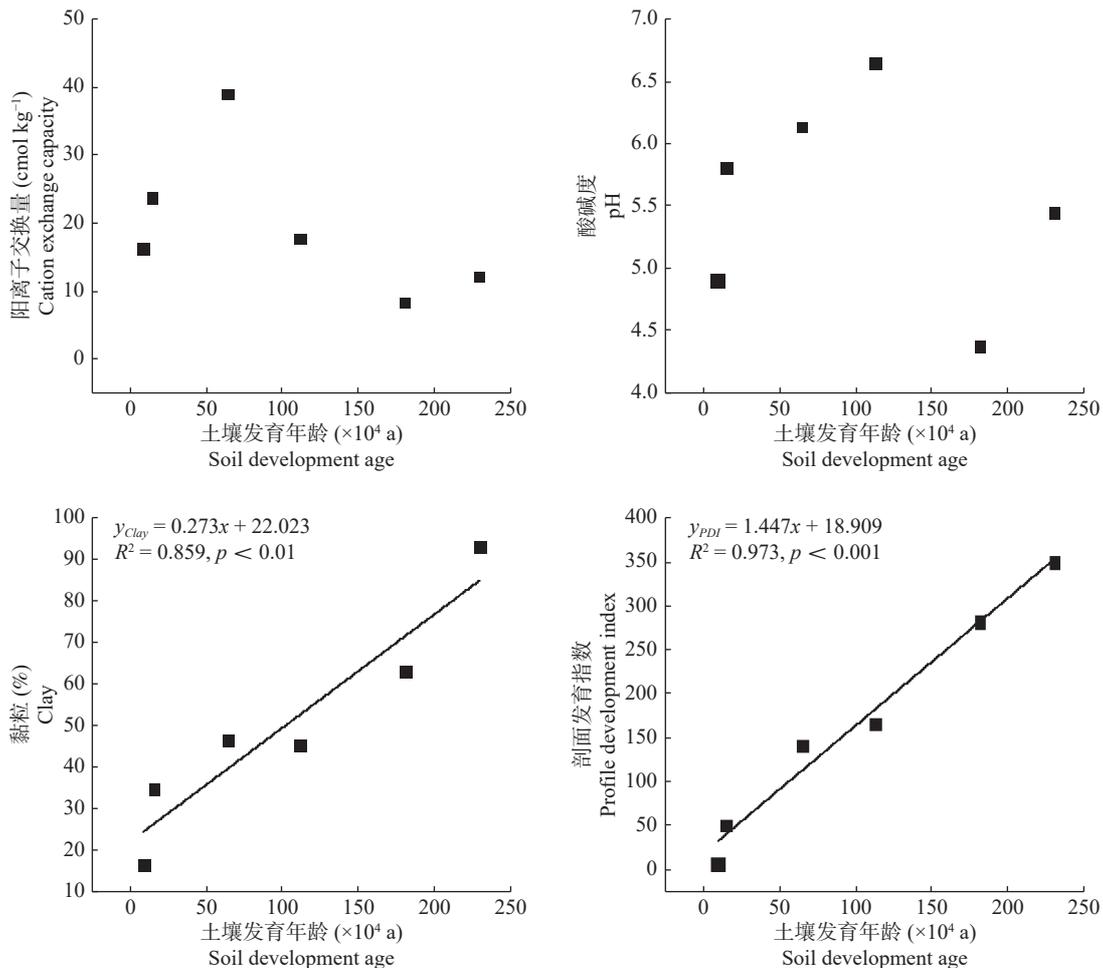


图 2 土壤剖面基础性质和剖面发育指数随风化成土时间的变化
Fig.2 Variation of soil basic properties and profile development index with soil weathering time

2.2.2 土壤风化强度指标 本研究选择常用的土壤风化强度指标，如硅铝率 (Sa)、硅铁铝率 (Saf)、 A 指数、 B 指数、化学风化指数 (CIW) 和化学蚀变指数 (CIA)、风化淋溶系数 (ba)^[25] 来探讨其与土壤风化程度的关系，进而对研究区土壤相对年龄进行判定。如图 3 所示， Sa 和 Saf 的变化范围分别为 1.07 ~ 2.46、0.76 ~ 1.55，随着风化成土过程的进行，二者的变化规律较为一致，均表现为在土壤发育 0.64 Ma B. P. 内呈上下波动趋势，随后迅速降低，在土壤发育 1.12 ~ 2.30 Ma B. P. 内，其值分别在 1.07 ~

1.37 和 0.76 ~ 0.94 之间。 A 指数是反映土壤发育过程中 Al、Si 氧化物富集的指标，而 B 指数反映长石破坏和次生矿物形成的程度^[26]。 A 指数和 B 指数的变化范围分别为 1.06 ~ 2.28、0.012 ~ 0.051。其中 A 指数在土壤发育 0.64 Ma B. P. 内变化不大，因此难以对风化成土早期的土壤相对年龄进行验证； B 指数在土壤发育 0.64 Ma B. P. 内迅速降低，之后随着土壤进一步发育其下降速率放缓，其值在整个土壤发育阶段 (0.09 ~ 2.30 Ma B. P.) 呈对数函数变化 ($R^2 = 0.986, P < 0.001$)。 CIW 指数和 CIA 指数主要用于反映岩

石风化,以及成土过程中K、Na、Ca的相对损失量^[27-28]。 CIW 指数和 CIA 指数分别在87.99~97.65和85.90~97.42之间,随着风化成土过程的进行,呈逐渐增加的趋势,均符合对数函数变化规律($R^2_{CIW}=0.992, P<0.001$; $R^2_{CIA}=0.990, P<0.001$)。 ba 值反映土壤发生层的淋溶程度,其值越小,表明K、Na、Ca等盐基

离子淋溶损失越多,淋溶作用越强。随着土壤发育, ba 值同 B 指数一样,呈对数函数降低($R^2=0.974, P<0.001$) (图3)。综上所述, CIW 指数、 CIA 指数、 B 指数和 ba 值的对数与风化成土年龄相关性较好,能够作为研究区土壤相对年龄的判定依据。

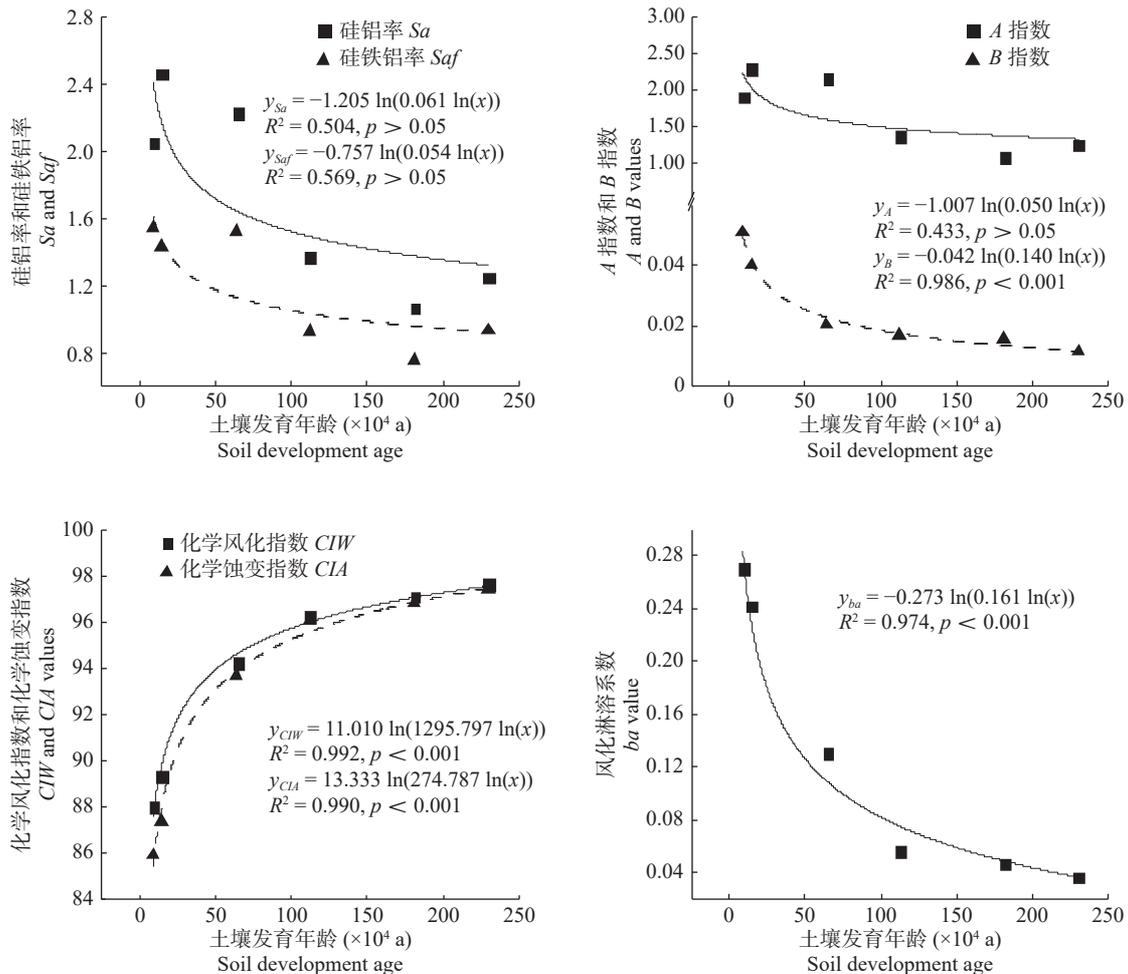


图3 硅铝率(Sa)、硅铁铝率(Saf)、 A 指数、 B 指数、化学风化指数(CIW)、化学蚀变指数(CIA)、风化淋溶系数(ba)随风化成土时间的变化

Fig.3 Variation of Sa and Saf values, A and B values, chemical weathering index (CIW), chemical alteration index (CIA) and ba values with soils weathering time

2.2.3 元素变化率 土壤大量元素均随着风化成土过程发生了不同程度的富集或迁移(图4)。其中,Fe、Al在土壤发育1.12 Ma B. P.内发生不同程度富集,变化率在18%~28%之间,随着土壤进一步演化,二者的变化率趋近于0。在土壤发育初期(<0.09 Ma B. P.),Si、P和Mn的变化率分别为-36.82%、-42.96%和-22.16%,随着风化成土过程的进行,Si和P的变化率在-40%~-80%之间浮动,与风化成土年龄无明显相关性;Mn的变化情况在成土后期阶段(>1.00 Ma B. P.)

与P类似,但Mn在TS03剖面(0.64 Ma B. P.)发生富集,平均变化率为43.10%(图4)。作为土壤盐基离子,Na、K、Ca、Mg的迁移程度较高,且这4种元素的迁移主要集中在土壤发育0.146 Ma B. P.内。土壤发育0.146 Ma B. P.时,Na、Ca、Mg的变化率达到-90%~-95%,K的变化率达到-82%,随后其迁移速率放缓,并且均在土壤发育1.12 Ma B. P.时趋于稳定。综上所述,土壤大量元素中,仅Na、K两种元素的迁移率在土壤发育0.146 Ma B. P.内与土壤

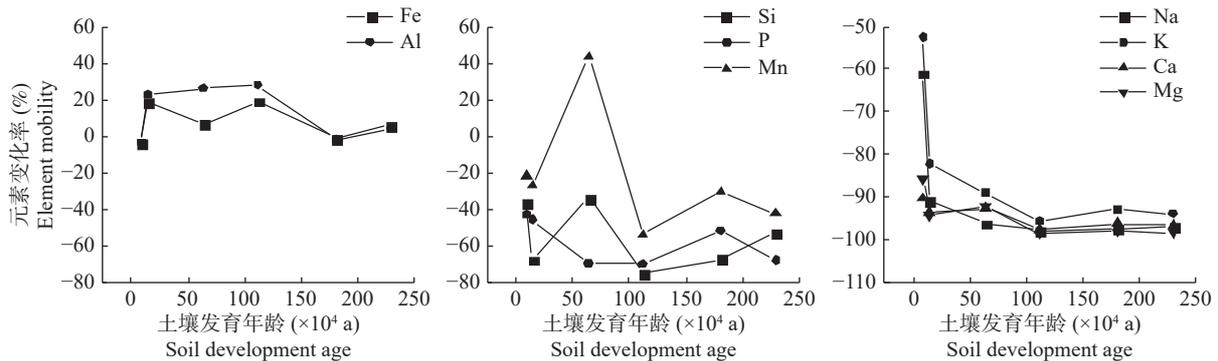


图 4 土壤大量元素变化率随风化成土时间的变化
Fig.4 Change of macro-elements with soil weathering time

年龄具有较好的线性关系，因此仅能对土壤发育早期的相对年龄判定具有较好的指示意义。在土壤长期演化 ($> 1.00 \text{ Ma B. P.}$) 条件下，元素迁移率对研究区土壤相对年龄的判定较为困难。

3 讨论

时间序列法已被证明是定量研究土壤发生方向、速率及其阈值的理想工具^[2-4]，因此构建可靠的土壤时间序列对于获得准确研究结果具有重要意义。本研究对土壤母质均一性的判定结果表明，各剖面内部形态特征总体呈均一或渐变，尽管剖面间土壤颜色、质地等存在差异，但这是土壤长期发生过程的正常体现。Schaeztl^[6]认为去除黏粒后、不易移动的土壤颗粒含量是判定土壤母质均一性最有效的参数之一。尽管 TS03、TS05、TS06 剖面内粗粉粒变异系数较高，属于中等变异，究其原因可能是热带地区由于强风化作用，细粉粒在淀积层积累，从而导致该层次颗粒组成与其他土层之间产生差异，因此这种差异不足以说明这些剖面母质不均一。各剖面内 Ti、Zr 分布在层次间没有明显差异，然而对比剖面之间，随着成土年龄增加，土壤 Ti、Zr 含量及 Ti/Zr 比值总体呈先增加后降低的趋势。其中 TS02 剖面显著高于其余剖面，原因可能是 TS02 样点距离农田较近，受到人为扰动的影响较大所致。尽管剖面间变异较大，但 Chapman 和 Horn^[29]认为 Ti/Zr 比值的变异系数大于 100% (强变异) 才能说明母质不均一。因此，根据各土壤剖面形态特征、颗粒组成及 Ti、Zr 分布状况，可以认为研究区土壤均由相同母质 (玄武岩风化物) 发育而来。

在相对年龄的判定中，土壤黏粒含量、PDI 值与土壤发育年龄的线性关系较好 ($R^2_{clay} = 0.859, P <$

$0.01; R^2_{PDI} = 0.973, P < 0.001$)，可以作为土壤相对年龄的判定依据。然而 pH、CEC 随成土过程呈先增加后降低的趋势，与前人研究中“pH、CEC 随土壤发育不断降低”的结果不一致^[30]，其原因可能是地形、植被等环境因素的差异导致土壤发育存在不同的方向和速率。随着风化成土年龄的增加，土壤风化强度指标如 *B* 指数、*CIW* 指数、*CIA* 指数和 *ba* 值服从对数函数变化规律，而 *Sa* 和 *Saf* 均表现为在土壤发育 0.64 Ma B. P. 内呈上下波动趋势，随后迅速降低，这与黄成敏和龚子同^[30]的研究结果相似，即 *Sa* 和 *Saf* 对于风化成土早期土壤年龄的指示作用不明显，这可能是不同发育阶段由于土壤质地分异的影响所致^[30]，因此 *Sa* 和 *Saf* 在判定研究区土壤相对年龄的作用不大。综上所述，土壤黏粒含量、PDI 值、*B* 指数、*CIW* 指数、*CIA* 指数和 *ba* 值在土壤相对年龄判定中具有较好的指示意义。然而，尽管 *B* 指数在整个土壤发育阶段 (0.09 ~ 2.30 Ma B. P.) 呈对数函数变化 ($R^2 = 0.986, P < 0.001$)，但由于其计算式中作为分子的 K、Na、Ca 等盐基离子在风化成土后期被淋溶殆尽，导致 *B* 值接近 0，土壤间差异小，因此在判定高度风化土壤 ($> 1.00 \text{ Ma B. P.}$) 相对年龄时还需谨慎。

4 结论

母质均一性和土壤相对年龄判定是构建可靠土壤时间序列、定量研究土壤发生阈值的基础。通过对海南岛北部玄武岩发育土壤时间序列剖面的母质均一性和相对年龄的判定中发现：

(1) 组成时间序列的 6 个剖面母质来源均一，即研究区土壤均由相同母质 (玄武岩风化物) 发育而来。

(2) 土壤剖面均一、渐变的形态特征, 以及去除黏粒后的粗粉粒含量、稳定元素 Ti/Zr 比值是研究区土壤母质同源性的较好判定依据。

(3) 随着风化成土年龄的增加, 土壤黏粒和 PDI 值呈线性增加的趋势, B 指数、CIW 指数、CIA 指数和 *ba* 值服从对数函数变化规律, 在土壤相对年龄的判定中具有较好的指示意义。

参考文献:

- [1] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, 70(12): 1859 – 1869.
- [2] Walker L R, Wardle D A, Bardgett R D, et al. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(4): 725 – 736.
- [3] Huang L M, Thompson A, Zhang G L, et al. The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: A review[J]. *Geoderma*, 2015, 237/238: 199 – 210.
- [4] 张甘霖, 朱阿兴, 史舟, 等. 土壤地理学的进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 57 – 65.
- [5] 陈留美, 张甘霖. 土壤时间序列的构建及其在土壤发生研究中的意义[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 419 – 428.
- [6] Schaetzl R J. Lithologic discontinuities in some soils on drumlins: Theory, detection, and application[J]. *Soil Science*, 1998, 163(7): 570 – 590.
- [7] Schaetzl R J, Anderson S. *Soils: Genesis and geomorphology* [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [8] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发育过程的定量研究[J]. *地理科学*, 2000, 20(4): 337 – 342.
- [9] He Y, Li D C, Velde B, et al. Clay minerals in a soil chronosequence derived from basalt on Hainan Island, China and its implication for pedogenesis[J]. *Geoderma*, 2008, 148(2): 206 – 212.
- [10] Jiang K, Qi H W, Hu R Z. Element mobilization and redistribution under extreme tropical weathering of basalts from the Hainan Island, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 158: 80 – 102.
- [11] Huang L M, Zhang X H, Shao M A, et al. Pedogenesis significantly decreases the stability of water-dispersible soil colloids in a humid tropical region[J]. *Geoderma*, 2016, 274: 45 – 53.
- [12] Ouyang T P, Tang Z H, Zhao X, et al. Magnetic mineralogy of a weathered tropical basalt, Hainan Island, South China[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2015, 240: 105 – 113.
- [13] 葛同明, 陈文寄, 徐行, 等. 雷琼地区第四纪地磁极性年表——火山岩钾—氩年龄及古地磁学证据[J]. *地球物理学报*, 1989, 32(5): 550 – 558.
- [14] 冯锦江, 胡碧茹. 琼北第四纪玄武岩化学风化速率的初步研究[J]. *地质科学*, 1992, 27(S1): 295 – 301.
- [15] 冯国荣. 华南沿海晚新生代玄武岩基本特征及其与构造环境的关系[J]. *中山大学学报论丛*, 1992, 12(1): 93 – 103.
- [16] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所, 中国科学院西安光学精密机械研究所. 中国标准土壤色卡[M]. 南京: 南京出版社, 1989.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索(第三版)[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [19] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] Harden J W. A quantitative index of soil development from field descriptions: Examples from a chronosequence in central California [J]. *Geoderma*, 1982, 28(1): 1 – 28.
- [21] Harden J W, Taylor E M. A quantitative comparison of soil development in four climatic regimes[J]. *Quaternary Research*, 1983, 20(3): 342 – 359.
- [22] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究Ⅲ. 元素地球化学特征[J]. *土壤学报*, 2002, 39(5): 643 – 652.
- [23] 陈留美, 张甘霖. 滨海沉积物发育的水稻土时间序列母质均一性判定与特性演变[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 753 – 763.
- [24] 王秋兵, 李岩, 韩春兰, 等. 宽甸盆地火山喷出物发育土壤特性研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(2): 257 – 265.
- [25] 杨艳芳, 李德成, 张甘霖, 等. 雷州半岛玄武岩发育的时间序列土壤的发生演变[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5): 817 – 825.
- [26] Guggenberger G, Baumler R, Zech W. Weathering of soils developed in eolian material overlying glacial deposits in Eastern Nepal[J]. *Soil Science*, 1998, 163(4): 325 – 337.
- [27] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715 – 717.
- [28] Harnois L. The CIW index: A new chemical index of weathering [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55: 319 – 322.
- [29] Chapman S L, Horn M E. Parent material uniformity and origin of silty soils in northwest arkansas based on zirconium-titanium contents[J]. *Soil Science Society of America*, 1968, 32(2): 265 – 271.
- [30] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生的化学特性研究[J]. *热带地理*, 2001, 21(3): 207 – 212.

Parent Material Uniformity and Relative Age Identification of Soil Chronosequence Derived from Basalt in Northern Hainan Island

LUO Yuan-jun^{1,2}, HUANG Lai-ming^{2,3*}, YUAN Da-gang^{1*}

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Soil chronosequence is a valuable tool for investigating the processes, rates and thresholds of pedogenesis. In order to establish reliable soil chronosequence, it is necessary to identify the soil parent material uniformity and its relative age. [Method] A soil chronosequence (0.09, 0.146, 0.64, 1.12, 1.81, 2.30 Ma B. P.) derived from basalt in northern Hainan Island was selected to identify the soil parent material uniformity and its relative age by using various soil attribute parameters, including profile morphology, particle compositions, stable elements, soil development index and element mobility. [Result] Results showed that the morphological characteristics of soil profile, such as soil color, texture, and structure exhibited uniform and gradual characteristics. Clay-free coarse silt and Ti/Zr ratio had a low variation coefficient either between soil horizons or among different profiles, suggesting the studied soils derived from a relatively homogeneous parent material. With the increase of soil weathering age, soil clay and profile development index (*PDI*) showed a linear increasing trend, and the weathering index (*B* value, chemical weathering index (*CIW*), chemical alteration index (*CIA*), as well as *ba* value) all showed a logarithmic change trend, indicating that these parameters could be used for identifying soil relative age. [Conclusion] The conclusion indicated that all soil profiles in the studied region derived from the same parent material, and soil relative age is consistent with the time gradient, providing a prerequisite for the quantitative study of pedogenic thresholds.

Key words: Tropical soil; Soil chronosequence; Parent material uniformity; Soil relative age; Pedogenic threshold

[责任编辑: 韩春兰]