

DOI: 10.11766/trxb202103310173

杨安富, 胡玉麟, 林天, 李德成, 王登峰, 章明奎, 卢瑛, 张甘霖. 中国西沙群岛土系的建立[J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 667–677.
YANG Anfu, HU Yulin, LIN Tian, LI Decheng, WANG Dengfeng, ZHANG Mingkui, LU Ying, ZHANG Ganlin. Establishment of Soil Series for Xisha Islands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 667–677.

中国西沙群岛土系的建立*

杨安富¹, 胡玉麟¹, 林天¹, 李德成², 王登峰³, 章明奎⁴, 卢瑛⁵,
张甘霖^{2, 6†}

(1. 海南省环境科学研究院, 海口 570100; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;
3. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海口 571101; 4. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 5. 华南农业大学资源环境
学院, 广州 510642; 6. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 我国南海岛屿土壤资源极为稀罕且珍贵, 但迄今对该区域海岛土壤研究尚不充分, 在土壤分类方面, 已建土系甚少或信息非常缺乏。本研究通过 2020 年对西沙群岛 13 个岛礁的土壤调查, 对确定的 7 个典型土壤剖面进行了详细鉴定, 7 个剖面的成土母质均来自死亡的珊瑚和贝壳, 2 个剖面仅有暗沃表层, 2 个剖面有淡薄表层和雏形层, 3 个剖面仅有淡薄表层。7 个剖面均为湿润土壤水分状况和高热土壤温度状况和具有珊瑚砂岩性特征, 6 个剖面有富磷特性。在高级分类单元上, 2 个剖面归属于磷质钙质湿润雏形土亚类、4 个剖面归属于磷质湿润正常新成土亚类, 1 个剖面归属于钙质湿润正常新成土亚类。在此基础上, 划分出 4 个土族, 建立了晋卿岛系、甘泉岛系、永兴岛系、赵述岛系、南沙洲系和甘泉堤系 6 个土系。其中, 晋卿岛系、甘泉岛系、永兴岛系、赵述岛系和南沙洲系分布于海岛中的蝶形洼地, 有植被覆盖, 为鸟类栖息地, 枯枝落叶和鸟粪较多, 土体中有机碳和磷的含量较高。甘泉堤系分布于环岛裸露海堤, 无植被, 鸟类活动甚少, 土体有机碳和磷含量极低。本研究结果不仅对认识南海诸岛土壤有借鉴意义, 还可为海岛土壤资源可持续利用和生态环境保护以及国土资源有效管控提供基础信息。

关键词: 南海; 西沙群岛; 土壤系统分类; 土系

中图分类号: S159 **文献标志码:** A

Establishment of Soil Series for Xisha Islands

YANG Anfu¹, HU Yulin¹, LIN Tian¹, LI Decheng², WANG Dengfeng³, ZHANG Mingkui⁴, LU Ying⁵, ZHANG Ganlin^{2, 6†}

(1. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou 570100, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210018, China; 3. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China; 4. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 5. College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 6. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

* 海南省自然科学基金(2019RC355)资助 Supported by the Natural Science Foundation of Hainan Province (No. 2019RC355)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 杨安富(1982—), 男, 贵州贵阳人, 高级工程师, 主要从事土壤学研究。E-mail: 179838757@qq.com

收稿日期: 2021-03-31; 收到修改稿日期: 2021-09-06; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-01-24

Abstract: 【Objective】 The soil resources in islands of the South China Sea are very scarce and precious. However, limited studies have been conducted on the island soils in this region to establish soil series. Thus, the purpose of this study was to systematically setup soil series for this region. 【Method】 A systematic soil survey was conducted in 2020 on 13 islands of the Xisha Islands, which has the most abundant soil resources in the South China Sea. Specifically, one typical soil profile was selected from the islands of Yongxing, Zhaoshu, Beidao, Nanshazhou and Jinqing, while two typical soil profiles were selected from Ganquan. Information on soil formation factors, profile morphological characteristics, and soil physicochemical properties was observed or measured. 【Result】 The parent materials of the seven soil profiles were dead corals and shells. Of all the soils studied, twopedons only had Mollicepedon, threepedons had Ochric epipedon, and twopedons had Orchric and Cambic horizons. All the sevenpedons had Udic moisture regime, Hyperthermic temperature regime and Lithological characteristics of coral debris sands while sixpedons had Phosphic property. Thus, (i) the pedon in Jinqing and onepedon in Ganquan islands were classified as soil subgroup Phosphic Carbonati-Udic Cambosols, (ii) the pedons in the islands of Yongxing, Zhaoshu, Nansha and North were classified as subgroup Phosphic Udic-Orthic Primosols, and (iii) the second soil profile in the Ganquan island was classified as subgroup Carbonatic Udic-Orthic Primosols. Finally, four soil families were identified and six soil series were established which included Jinqingdao Series, Ganquandao Series, Yongxingdao Series, Zhaoshudao Series, Nanshazhou Series, and Ganquandaodi Series. In brief, Jinqingdao Series, Ganquandao Series, Yongxingdao Series, Zhaoshudao Series and Nanshazhou Series are distributed in the lacustrine depression in the islands, covered by vegetation and is the habitats of birds, where soil organic carbon and phosphorus contents are high due to the accumulation of plant litters and bird droppings. Similarly, Ganquandi Series is distributed in the bare sea dike around the islands where soil organic carbon and phosphorus contents are very low due to limited vegetation coverage and little bird droppings. 【Conclusion】 The seven typical soil profiles belonged to two soil orders, two soil suborders, two soil groups and three soil subgroups, and could be divided into four soil families and six soil series. These results can provide basic information for guiding sustainable utilization of soil resources and eco-environmental protection, and also offer support for effective natural resource governance over Xisha Islands.

Key words: South China Sea; Xisha Islands; Soil taxonomy; Soil series

中国南海领域总面积约 210 万 km^2 , 南海诸岛包括东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛和南沙群岛, 其中, 西沙群岛分为永乐群岛和宣德群岛 2 个群岛, 有 22 个岛屿, 7 个沙洲, 陆地总面积约 10 km^2 , 在南海诸岛中土壤资源最为丰富, 但由于岛小土少, 因此其土壤资源尤为稀缺和珍贵。

中国对南海岛屿土壤资源的调查一直没有间断^[1], 早在 1947 年, 中华民国经济部中央地质调查所的陆发熹和席连之^[2-3]分别登上了西沙群岛的永兴岛、石岛、东岛和南沙群岛的太平岛开展了土壤调查, 并初步建立了南沙系、长岛系、太平岛系、林岛系和永兴岛系 5 个土系。1974 年, 我国对西沙群岛自然资源进行了系统的调查研究^[4-5], 中国科学院南京土壤研究所龚子同、蒋柏藩、张绍德、吴志东和王振荣等^[5]在西沙群岛的永兴岛、石岛、珊瑚岛、金银岛、琛航岛、晋卿岛和赵述岛等 9 个岛屿开展了为期两个月的土壤调查, 对岛上土壤的成土环境、成土过程、剖面形态与理化性质进行了系统

详细的研究, 并将岛上富磷高钙的土壤首次命名为“磷质石灰土”, 该土名被第二次土壤普查和教科书广泛采用。之后中国又开展了南沙群岛及其邻近海域自然地理的考察和研究^[6], 南海岛屿土壤研究的报道也不断出现^[7-16]。

依据已有的研究报道^[4-5, 10], 南海岛屿土壤的主要成土过程包括有机质积累和分解、盐渍和脱盐以及磷的富集与淋溶, 其土壤特点主要是砂性重, 砂粒主要是磨圆度很小的珊瑚砂和贝壳屑; 黏土矿物以水云母为主, pH 8.5 左右, 磷 (P_2O_5) 最高可达 250 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碳酸钙相当物含量在 30%~90%。在中国土壤系统分类上属于均腐土、锥形土、盐成土和新成土^[17]。

但迄今基于中国土壤系统分类的南海岛屿土壤定量研究开展的较少, 标准化土系建设不足, 主要表现在一是 20 世纪 40 年代建立的 5 个土系缺乏影像资料和系统的理化性质信息支撑^[2-3], 二是近年完成的海南土系调查成果^[18]未建南海岛屿的土系。土

系是土壤系统分类的最基层单元，是土壤的“全息身份证”，其信息直接服务于各类相关科学研究和生产实践。为此，为弥补这一缺憾，本研究于 2020 年对西沙群岛开展了系统的土壤调查，旨在对现有土壤系统分类归属的基础上，建立规范的土系，为南海岛屿土地资源可持续利用及生态环境保护提供基础信息。

1 材料与方 法

1.1 成土环境概况

鉴于西沙群岛土壤的成土因素已有文献进行了详细报道^[4-5, 10]，西沙群岛属热带海洋性气候，高温多雨，无四季之分，年均日照时数为 2 901 h，气温 26.5℃，降雨量约为 1 497 mm。岛礁海拔介于 2.5~10 m，成土母质主要来自死亡的珊瑚和贝壳，兼有枯枝落叶和鸟粪；岛上活动鸟类有 60 余种，以红脚鲼鸟最多；植物有 200 余种，主要建群植物乔木有抗风桐 (*Pisonia grandis* R. Br.)、海岸桐 (*Guettarda speciosa* L.)、海棠果 (琼崖海棠、红厚壳) (*Calophyllum inophyllum* L.) 等。灌木有银毛树 (*Messerschmidia argentea* (L.f.) Johnston.)、草海桐 (*Scaevola sericea* Vahl)、海巴戟 (*Morinda citrifolia* L.)、水芫花 (*Pemphisacidula* J. R. et Forst.) 等。草本植物有锥穗纯叶草 (*Stenotaphrum subulatum* Trin.)、厚藤 (马鞍藤) (*Ipomoea pes-caprae* (L.)

Sweet)、海马齿 (*Sesuvium portulacastrum* L.) 等。此外，还有大量的栽培植物，主要是椰子 (*Cocos nucifera* L.)、木麻黄 (*Casuarina equisetifolia* Forst.) 以及各种蔬菜。

1.2 调查、采样与测定方法

依据 2009、2015 和 2018 年对西沙群岛的土壤考察结果，2020 年对 13 个岛礁进行了土壤调查，并在 6 个岛礁上合计确定了 7 个典型土壤样点，其中宣德群岛的永兴岛、赵述岛、北岛、南沙洲以及永乐群岛的晋卿岛各 1 个样点，永乐群岛的甘泉岛 2 个样点 (表 1 和图 1)。

依据野外土壤调查标准程序^[19]，在每个样点位置挖掘土壤剖面，观察记录经纬度、成土因素信息和剖面形态特征，划分发生层并采集发生层土样。其中土壤颜色的确定依据《中国土壤标准色卡》^[20]。

采集的发生层土样在室内经自然风干、去杂和研磨过不同孔径筛后，用于土壤理化性质的测定^[21]，其中，颗粒组成采用吸管法测定；pH 采用电位法测定；有机碳采用重铬酸钾外加加热法测定；全磷采用钼锑抗比色法测定；CEC 采用乙酸铵 (pH 7.0)-EDTA 交换法测定。

1.3 土壤类型鉴定和土系建立方法

土壤系统分类高级单元 (土纲-亚纲-土类-亚类) 的确定依据《中国土壤系统分类检索 (第三版)》^[22]，基层单元的土族划分和土系建立依据“中国土壤系统分类土族和土系划分标准”^[23]。

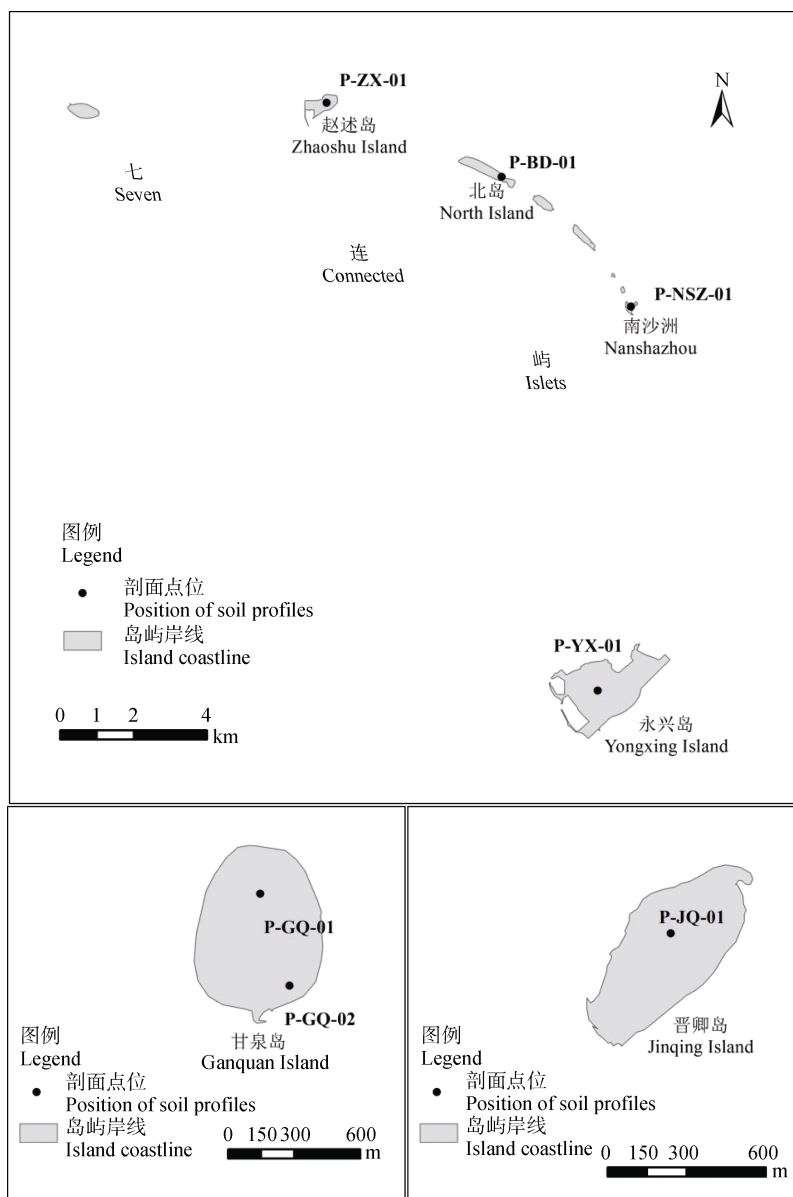
表 1 土壤剖面基本信息

Table 1 Information of surveyed 7 soil profiles

编号 No.	岛礁 Island/reef	位置 Location	海拔 Altitude /m	地形 Landform	母质 Parent material	植被 Vegetation	发生分类 ¹⁾ Genesis classification
P-YX-01	永兴岛	112.33788E, 16.83539N	4.2	蝶形盆地	珊瑚砂/贝壳屑	草海桐等	磷质石灰土
P-ZS-01	赵述岛	112.27143E, 16.97980N	3.8	蝶形盆地	珊瑚砂/贝壳屑	草海桐等	磷质石灰土
P-BD-01	北岛	112.31435E, 16.96159N	2.7	蝶形盆地	珊瑚砂/贝壳屑	草海桐	磷质石灰土
P-NSZ-01	南沙洲	112.34601E, 16.92972N	2.5	蝶形盆地	珊瑚砂/贝壳屑	草甸	磷质石灰土
P-JQ-01	晋卿岛	111.74159E, 16.46397N	3.2	蝶形盆地	珊瑚砂/贝壳屑	草海桐等	磷质石灰土
P-GQ-01	甘泉岛	111.58568E, 16.50812N	3.5	蝶形盆地	珊瑚砂/贝壳屑	草海桐等	磷质石灰土
P-GQ-02	甘泉岛	111.58706E, 16.50292N	1.8	砂堤	珊瑚砂/贝壳屑	裸地	滨海砂土

¹⁾ 各剖面的土壤发生分类类型基于参考文献[5]中土壤图提取。

¹⁾ The data are quoted from “Soils and guano phosphate ore in Xisha Islands of China”, 1977 [5].



注：岛屿岸线非实际边界。Note: The island coastline is not the actual boundary.

图 1 土壤剖面点位空间示意图

Fig. 1 Spatial distribution of soil profiles

2 结果

2.1 土壤剖面形态与物理性质

图 2 和表 2 分别为 7 个土壤剖面的照片和形态特征及物理性质。

GQ-01 (甘泉岛) 和 JQ-01 (晋卿岛) 剖面土体构型为 A-B-C, 其余剖面土体构型为 A-C。A 层厚度介于 10~20 cm, 为弱发育的松散团粒状结构或稍紧实的小块状结构, B 层厚度介于 20~40 cm, 为弱发育的稍紧实小块状结构。

不同剖面色调有所差异, BD-01、GQ-01 和 GQ-02 剖面为 2.5Y, YX-01 和 NSZ-01 剖面为 7.5YR, ZS-01 和 JQ-01 剖面为 10YR。YX-01 和 ZS-0 剖面的 0~20 cm 土层颜色偏暗, 干态明度为 4, 润态明度为 3, 彩度均为 1。

土体中可见大量的珊瑚残体或珊瑚砂、贝壳残体或贝壳碎屑, 其中, YX-01、JQ-01 和 GQ-01 剖面主要是小的珊瑚砂、残体和贝壳屑 (< 2 mm), 体积占 20%~40%, 其余剖面主要是大的珊瑚残体和贝壳残体 (≥ 2 mm), 体积占 50%~90%。

7 个剖面的细土 (< 2 mm) 组成主要是砂粒

表 2 土壤剖面形态和物理性质

Table 2 Morphological characteristics and physical properties of the studied soil profiles

剖面编号 Profile No.	发生层 Genetic layer	深度 /cm Depth /cm	颜色 Color	土壤结构 Structure	岩屑* Rock debris/ (≥2 mm, V%)	颗粒组成 Particle size composition/ (g·kg ⁻¹)		质地 Texture	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	
						2~0.05 mm	0.05~0.002 mm <0.002 mm			
YX-01	Ah	0~20	7.5YR4/1 (干), 7.5YR3/1 (润)	团粒, 弱发育团粒	30	725	244	31	砂壤土	0.77
	AC	20~40	7.5YR8/2 (干), 7.5YR7/2 (润)	团粒, 弱发育团粒	30	959	21	20	砂土	1.02
	C	40~120	7.5YR7/6 (干), 7.5YR7/4 (润)	散块(粒)状, 无结构	30	967	11	22	砂土	1.09
ZS-01	Ah	0~20	10YR4/1 (干), 10YR3/1 (润)	小块状, 弱发育	50	719	250	30	砂壤土	/
	AC	20~30	10YR6/4 (干), 10YR5/3 (润)	小块状, 弱发育	80	775	183	42	壤砂土	/
	C	30~100	10YR7/3 (干), 10YR6/2 (润)	散块(粒)状, 无结构	90	988	8	4	砂土	/
BD-01	Ah	0~13	2.5Y7/1 (干), 2.5Y6/1 (润)	小块状, 弱发育	50	988	10	2	砂土	/
	AC	13~30	2.5Y7/1 (干), 2.5Y6/1 (润)	小块状, 弱发育	90	993	3	4	砂土	/
	C	30~100	2.5Y6/2 (干), 2.5Y5/1 (润)	散块(粒)状, 无结构	90	942	43	14	砂土	/
NSZ-01	Ah	0~20	7.5YR6/4 (干), 7.5YR5/3 (润)	小块状, 弱发育	50	985	3	12	砂土	1.11
	AC	20~33	7.5YR6/4 (干), 7.5YR5/3 (润)	小块状, 弱发育	80	959	33	8	砂土	1.22
	C	33~100	7.5YR7/4 (干), 7.5YR6/3 (润)	散块(粒)状, 无结构	80	960	35	5	砂土	/
JQ-01	Ah	0~10	10YR6/6 (干), 10YR5/4 (润)	小块状, 弱发育	20	924	54	22	砂土	0.96
	Bw	10~30	10YR6/6 (干), 10YR5/4 (润)	小块状, 弱发育	30	946	42	11	砂土	1.25
	C	30~100	10YR8/1 (干), 10YR7/1 (润)	小块状, 弱发育	30	968	21	11	砂土	1.26
GQ-01	Ah	0~20	2.5Y8/2 (干), 2.5Y7/1 (润)	小块状, 弱发育	40	886	77	37	壤砂土	1.19
	Bw	20~60	2.5Y8/4 (干), 2.5Y7/3 (润)	小块状, 弱发育	40	854	103	44	壤砂土	1.06
	C	60~100	2.5Y8/4 (干), 2.5Y7/3 (润)	散块(粒)状, 无结构	40	929	49	22	砂土	1.19
GQ-2	AC	0~30	2.5Y8/4 (干), 2.5Y7/3 (润)	小块状, 弱发育	70	985	8	7	砂土	/
	C	30~120	2.5Y8/4 (干), 2.5Y7/3 (润)	散块(粒)状, 无结构	90	/	/	/	/	/

注: *岩屑, 指土体中≥2 mm 的物质, 为珊瑚残体、粗珊瑚砂、贝壳残体和碎屑。Note: *, Refers rock debris (≥2 mm), mainly are coral debris and sands, shell debris and fragments.

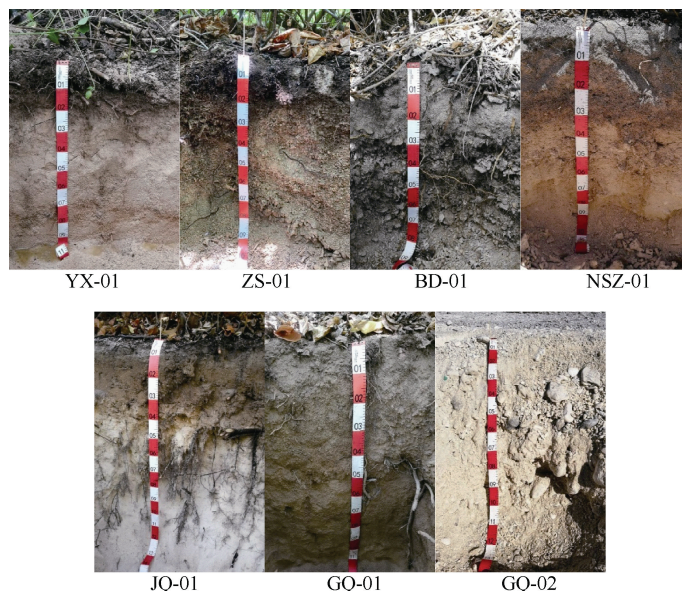


图2 典型土壤剖面照片

Fig. 2 Images of 7 typical soil profiles

(> 0.05 mm), 占细土总量的 71.9%~99.3%, 细土质地主要为砂土, 其次为壤质砂土和砂质壤土。

用 10%稀盐酸测试石灰反应表明, 7 个剖面的各层次均有强烈的石灰反应, 表明均有石灰性, 且石灰反应越向下越强, 一定程度上表明了碳酸钙含量向下越来越高。

2.2 土壤剖面化学性质

表 3 为 7 个剖面有关的土壤化学性质。pH 较高, 介于 8.0~9.6, 所有剖面的每个层次均具有强烈的石灰反应。除南沙洲 (NSZ) 剖面的 pH 呈现随深度增加而降低的趋势外, 其余剖面的 pH 变化复杂不规则, 无递增或递减的趋势。

甘泉岛 GQ-02 剖面无植被覆盖, 其表层有机碳很低, 仅为 $1.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其余剖面均有植被覆盖, A 层有机碳含量较高, 介于 $12.24\sim 77.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。此外, 观察到植被物种越多, 其乔灌木立体结构越好, 地表枯枝落叶层也越厚, 表层有机碳含量就越高, 如 YX-01、ZS-01 和 GQ-01 剖面。就有机碳随深度变化的趋势来看, 除 GQ-02 剖面外, 其他剖面有机碳由表层向下均表现出陡降的特点。

GQ-02 剖面地表和表层土中未观察到鸟粪残留, 其全磷很低, 仅为 $0.39 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其他剖面地表和表层均观察到鸟粪残留, 其全磷 (P) 含量较高, 介于 $22.11\sim 99.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与有机碳随深度变化的趋势一致, 除 GQ-02 剖面外, 其他剖面全磷由表层向下均也表现出陡降的特点。

CEC 的剖面分布特点与有机碳类似, 表层明显高于下部层次, 且随深度增加也出现陡降的特点。此外, 可溶性盐含量不高, 均低于 $5.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且大致存在随深度增加而升高的趋势。

2.3 诊断层、诊断特性与系统分类高级单元

7 个剖面的诊断层包括暗沃表层、淡薄表层和锥形层, 诊断特性包括湿润土壤水分状况、高热土壤温度状况、珊瑚砂岩性特征和富磷特性 (表 4)。

(1) 诊断层。YX-01 和 ZS-01 剖面表层厚度, 也是土体厚度 (A+B), 为 20 cm (> 18 cm), 干态和润态明度分别为 4 (< 5.5) 和 3 (< 3.5), 彩度均为 1 (< 3.5), 符合暗沃表层的要求^[22]。其余剖面的表层干态和润态的明度介于 5~8, 为淡薄表层^[22]。JQ-01 剖面的 10~30 cm 和 GQ-01 剖面的 20~60 cm 土层, 为弱发育的稍紧实小块状结构, 细土 (< 2 mm) 体积占 60%~70%, 为锥形层^[22], 其余剖面 A 层之下即为母质, 无锥形层。不同剖面的各层次均有剧烈石灰反应, 无钙积层^[22]。不同剖面各层含盐量较低, 最高仅为 $5.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (< $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 无盐积层^[22]。

(2) 诊断特性。7 个剖面由土表至 100 cm 范围内, $\geq 2 \text{ mm}$ 的物质为珊瑚残体、粗珊瑚砂和贝壳残体等, < 2 mm 物质为细珊瑚砂和贝壳细屑, 均富含碳酸钙相当物^[5, 15], 均具有珊瑚砂岩性特征^[22]。由鸟粪分解释放的磷酸盐与来自珊瑚和贝壳中的钙结合在土壤中富集。除 GQ-02 剖面外, 其余 6 个剖面的表层全磷含量介于 $22.11\sim 99.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\geq 15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),

表 3 土壤剖面基本化学性质

Table 3 General chemical properties of the studied soil profiles

剖面编号 Profile No.	深度 Depth /cm	pH (H ₂ O)	有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	CEC/(cmol·kg ⁻¹)	可溶性盐 Soluble salt/(g·kg ⁻¹)
YX-01	-10~0	8.0	74.25	53.93	36.30	0.80
	0~20	9.1	5.53	7.80	1.58	0.90
	20~40	9.6	4.34	2.55	0.46	0.70
	40~120	9.1	2.41	2.42	0.71	0.60
ZS-01	0~20	9.1	177.40	25.61	66.70	0.20
	20~30	9.4	93.87	1.17	1.36	0.60
	30~100	9.1	2.66	58.83	0.19	5.20
BD-01	0~13	8.0	38.40	75.74	15.10	1.40
	13~30	9.4	8.82	3.51	0.78	0.30
	30~100	8.8	2.10	1.43	1.83	0.50
NSZ-01	0~20	9.2	21.69	48.72	6.76	0.60
	20~33	8.7	5.92	5.88	1.27	1.60
	33~100	8.3	2.37	1.23	0.24	0.90
JQ-01	0~10	8.6	12.24	22.11	4.73	0.40
	10~30	9.3	8.24	12.60	2.04	0.90
	30~100	8.6	2.26	4.51	0.35	1.10
GQ-01	0~20	8.5	30.68	99.05	16.20	0.04
	20~60	9.0	4.72	64.93	2.14	0.40
	60~100	9.6	1.60	0.47	0.09	1.40
GQ-02	0~30	9.5	1.45	0.39	0.01	5.10

表 4 诊断层与诊断特性 (+表示存在该诊断层或诊断特性)

Table 4 Diagnostic horizons and diagnostic characteristics of the pedons surveyed (+ denotes confirmed diagnostic horizons or diagnostic characteristics)

剖面编号 Profile No.	诊断层 Diagnostic horizon			诊断特性 Diagnostic characteristics				
	暗沃表层 Mollic epipedon	淡薄表层 Ochric epipedon	雏形层 Cambic horizon	湿润土壤 水分状况 Udic moisture	恒高热土壤 温度状况 Isohyperthermic temperature	珊瑚砂 岩性特征 L.C. of coral sands	富磷特性 Phosphic property	石灰性 Calcaric property
	YX-01	+			+	+	+	+
ZS-01	+			+	+	+	+	+
BD-01		+		+	+	+	+	+
NSZ-01		+		+	+	+	+	+
JQ-01		+	+	+	+	+	+	+
GQ-01		+	+	+	+	+	+	+
GQ-02		+		+	+	+		+

加之前文提到石灰反应向下越来越强,表明具有富磷特性^[22]。GQ-02 表层全磷含量仅为 $0.39 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,不符合富磷现象(全磷 $> 1.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),但符合钙碳酸盐岩性特征中的珊瑚砂岩性特征^[22]。

(3) 土壤系统分类高级单元归属。按上述诊断层和诊断特性信息,依次进行土壤系统分类检索^[22],确定 JQ-01 和 GQ-01 剖面为磷质钙质湿润锥形土亚类, YX-01、ZS-01、BD-01 和 NSZ-01 剖面为磷质湿润正常新成土亚类, GQ-02 剖面为钙质湿润正常新成土亚类。

2.4 土族划分与土系设定

(1) 土族划分。根据中国土壤系统分类基层单元土族和土系的划分标准^[23],由于 7 个样点土体中均未出现石质接触面或障碍层,因此土族控制层段均为 25~100 cm,土系的控制层段均为 0~150 cm^[23]。7 个剖面的细土通体砂粒(0.05~2 mm)含量介于 72.5%~98.8% ($\geq 55\%$),为砂质; YX-01、JQ-01 和 GQ-01 剖面通体岩屑($> 2 \text{ mm}$ 的物质)体积介于 30%~40%,其土族控制层段的颗粒大小级别为粗骨砂质, ZS-01、BD-01、NSZ-01 和 GQ-01 剖面表层之下土体中岩屑($> 2 \text{ mm}$)体积在 80%以上($\geq 75\%$),其土族控制层段的颗粒大小级别为粗骨质。7 个剖面所有土层 pH 介于 7.1~9.8,有剧烈石灰反应,为石灰性。依据适用于所有颗粒大小级别的矿物学类别^[23],考虑到 7 个剖面的物质来源为富含碳酸盐的死亡珊瑚和贝壳,碳酸盐含量很高^[4-5, 15],可满足碳酸盐矿物类型的要求(碳酸盐类矿物 $\geq 26\%$)^[23]。西沙群岛年均气温为 26.5°C ,其 50 cm 深度土壤温度为高热($> 23^\circ\text{C}$)。由此确定 JQ-01 和 GQ-01 剖面均属粗骨砂质碳酸盐型高热性-磷质钙质湿润锥形土土族, YX-01 剖面为粗骨砂质碳酸盐

型高热性-磷质湿润正常新成土土族, ZS-01、NSZ-01 和 BD-01 剖面为粗骨质碳酸盐型高热性-磷质湿润正常新成土土族, GQ-02 剖面为粗骨质碳酸盐型高热性-钙质湿润正常新成土土族(表 5)。

(2) 土系设定。粗骨砂质碳酸盐型高热性-磷质钙质湿润锥形土土族包括 2 个剖面(JQ-01 和 GQ-01),考虑到 JQ-01 剖面通体质地为砂土,而 GQ-01 剖面质地构型为壤质砂土-砂土,将其分别划分晋卿岛系和甘泉岛系。粗骨砂质碳酸盐型高热性-磷质湿润正常新成土土族现仅有 1 个剖面(YX-01),划分永兴岛系。粗骨质碳酸盐型高热性-磷质湿润正常新成土土族包括 ZS-01、NSZ-01 和 BD-01 剖面共 3 个剖面,其中 ZS-01 剖面具有暗沃表层, NSZ-01 和 BD-01 剖面为淡薄表层,故将 ZS-01 剖面划分赵述岛系; NSZ-01 和 BD-01 剖面分布于蝶形盆地,有植被覆盖,淡薄表层,通体质地为砂土,难于区分,暂统定为南沙洲系(之所以不用北岛系,是因为考虑到北岛命名的地方很多)。粗骨质碳酸盐型高热性-钙质湿润正常新成土土族中现仅有 1 个剖面(GQ-02),划为甘泉堤系(因前文已有甘泉岛系,故这里按样点所处的海堤命名土系)。

(3) 土系特征简述。晋卿岛系、甘泉岛系、永兴岛系、赵述岛系和南沙洲系分布于海岛中的蝶形洼地,其形成时间相对较久,环境也较稳定,地形有利于降雨和物质的蓄积以及植被生长,因此多有茂密的植被,为鸟类的栖息地,枯枝落叶和鸟粪积累较多,因此其土体中有机碳和磷的含量较高。甘泉堤系分布在海岛四周的裸露海堤部位,无植被,栖息的鸟类也甚少,土体主要由 $\geq 2 \text{ mm}$ 的粗珊瑚残体和贝壳残体组成,仅表层有少量 $< 2 \text{ mm}$ 的珊瑚砂或贝壳细屑(30%左右),成土年龄最短,土壤发育

表 5 西沙群岛土族和土系划分

Table 5 Determination of soil families and series of Xisha Islands

剖面 Profile	土族 Soil family	土系 Soil series	主要差异 Main difference between soil series
JQ-01	粗骨砂质碳酸盐型高热性-磷质钙质湿润锥形土	晋卿岛系	通体质地为砂土
GQ-01		甘泉岛系	质地构型为壤质砂土-砂土
YX-01	粗骨砂质碳酸盐型高热性-磷质湿润正常新成土	永兴岛系	暗沃表层,质地构型为砂壤土-砂土
ZS-01	粗骨质碳酸盐型高热性-磷质湿润正常新成土	赵述岛系	暗沃表层,质地构型为砂质壤土-壤质砂土-砂土
NSZ-01, BD-01		南沙洲系	淡薄表层,通体质地为砂土
GQ-02	粗骨质碳酸盐型高热性-钙质湿润正常新成土	甘泉堤系	砂堤,无植被, A 层有机碳和全磷很低

最弱，由于缺乏植被和鸟粪，其土体的有机碳和磷含量极低，CEC 也极低。

3 讨 论

由于南海中的岛礁均很小，本研究仅在每个岛礁中的蝶形洼地大致中心位置确定了 1 个样点以建立本岛礁的代表性土系，考虑所有岛礁海堤位置的土壤差异甚小，仅在面积较大、海堤较长、且人为影响较小的甘泉岛海堤上确定了 1 个样点。此外，对于南海岛礁的盐成土和砂质新成土^[15]，在本次研究中发现其面积太小，故未设置样点。

本次土系命名遵循土系命名规则^[23]，以典型样点所在的岛礁名称命名，其中的永兴岛系是继承已建土系的名称^[2-3]，这也是体现了对前辈的敬意。本研究为之补充了影像和基本理化性质信息。本研究进一步表明，7 个剖面均包括有机质积累与分解、盐渍与脱盐过程，而除甘泉堤系外，其余 6 个剖面还存在磷的富集与淋溶过程。鉴于西沙群岛土壤的成土过程和相关发生层的形成机理已有文献进行了详细报道^[4-5, 10]，本文就不再累述。

为便于与历史资料对比，下面列出了文献[4]和文献[5]中典型土壤剖面信息（化学性质见表 6）。

(1) 硬盘磷质石灰土。编号 W7-土 2，位于东岛旧灯塔 N15°W 约 800 m，麻疯桐林中，下有草海桐和海岸桐，地表覆以禾本科的锥穗纯叶草，有白色新鲜鸟粪，母质为珊瑚灰岩粗砾。剖面形态如下：
A₀: 0~2 cm，未腐解和半腐解的枯枝落叶及鸟粪层。
A₁: 2~15 cm，暗棕色砂壤质片状结构的有机质层，有大量黑色疏松胶结的鸟粪块。
A₂: 15~25 cm，暗棕色砂壤质粒状结构的腐殖质层，有直径 5~8 cm 黑色松胶结的鸟粪块。
B_p: 25~40 cm，暗棕色砾质硬盘层（磷磐），胶结紧密，硬盘内部以鲜棕色为主。
B: 40~55 cm，棕色砂砾质碎屑状结构，在珊瑚、贝壳碎块表明有大量棕色胶磷矿淀积。
BC₁: 55~76 cm，浅棕色粗骨碎屑状结构，逐渐向母质过渡。
BC₂: 76~100 cm，灰白色珊瑚、贝壳碎块母质，可见浅棕色胶磷矿淀积于碎块表面。

从剖面描述和表 6 中化学性质来看，该剖面在中国土壤系统分类中为磷质钙质湿润锥形土亚类^[22]，

但为突出“磷磐”的存在以有别于现有的磷质钙质湿润锥形土亚类，建议新增“M5.2.1 磷磐钙质湿润锥形土”亚类，定义为“钙质湿润锥形土中在矿质土表至 125 cm 范围内有磷磐（≥10 cm）”，其他亚类依次顺延。但本研究调查的剖面中均没有发现磷磐，应是由于历史原因，磷磐被开采主要用作肥料。

(2) 普通磷质石灰土。剖面编号为 W6-土 2，位于永兴岛信号台 N55°E 约 300 m 麻疯桐林下，为硬盘磷质石灰土采掘后演变而来，剖面形态上没有 B_p 层，土体中磷含量也相应较低。依据简单的剖面描述信息和表 6 中对应的理化性质来看，该剖面在中国土壤系统分类中应为磷质钙质湿润锥形土亚类^[22]。与本研究的 JQ-01 和 GQ-01 剖面类似。

(3) 粗骨磷质石灰土。剖面编号为 W12-土 2，位于琛航岛，草海桐灌丛下，土层浅薄，一般 20 cm 以下即为粗大的珊瑚灰岩碎块或珊瑚贝壳残体，20 cm 以上的土层也多石砾。依据简单的剖面描述信息和表 6 中对应的理化性质来看，该剖面在中国土壤系统分类中应为磷质湿润正常新成土亚类^[22]。与本研究的 ZS-01、BD-01 和 NSZ-01 剖面大致类似。

(4) 幼年磷质石灰土。剖面编号为 W6-土 5，距永兴岛三沙市政府大楼 S37°E 约 450 m，距海平面 24.7 m，以盐地鼠尾草为主的禾本科草类，珊瑚贝壳碎屑砂母质，有机质含量低，有机质层浅薄，向下很快过渡至母质。剖面形态如下：

A: 0~5 cm，浅灰色砂质碎屑状结构，有大量植物根。
AC: 5~16 cm，略呈灰色的砂质碎屑状过渡层，有大量植物根系分布。

C: 16~110 cm，珊瑚贝壳碎屑砂母质，由于沉积时间不同，砂体有粗有细，层状相间分布于剖面内。

依据剖面描述信息和表 6 中对应的理化性质来看，该剖面在中国土壤系统分类中应为磷质湿润正常新成土亚类^[22]。与本研究的 GQ-2 剖面大致类似。

此外，文献[4]和文献[5]中还有潜育磷质石灰土、耕种磷质石灰土、盐渍磷质石灰土、滨海盐土的信息，由于本研究没有调查相应的剖面信息，故这里不再列出。

与有关历史资料相比，本研究没有发现富磷岩性均腐土^[15, 24]。据历史资料表明，此类土壤上部有机质含量高的暗色土层（包括腐殖质土层 A 和其下的鸟粪磷矿层 B）厚度最高可达 58 cm^[4, 5]。由于岛礁面积甚小，本研究中 YX-01 和 ZS-01 剖面样点，

表 6 磷质石灰土的基本化学性质

Table 6 General chemical properties of the historical soil profiles^[4-5]

土壤类型 Soil type	发生层 Genetic layer	深度 Depth/cm	pH (H ₂ O)	有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	N (g·kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (g·kg ⁻¹)	K ₂ O (g·kg ⁻¹)	CaCO ₃ (g·kg ⁻¹)	CEC (cmol·kg ⁻¹)
硬盘磷质石灰土 (W7-土2)	A ₁	2~15	5.1	194.95	24.7	238.4	0.52	—	37.60
	A ₂	15~25	7.5	39.50	5.17	279.0	0.40	374.2	21.72
	Bp	25~40	8.1	32.77	4.96	160.3	0.21	587.6	20.46
	B	40~55	8.4	19.55	2.76	102.9	0.23	655.4	11.56
	BC ₁	55~76	8.9	3.654	0.59	18.0	0.35	925.5	1.25
	BC ₂	76~100	9.3	2.09	0.36	11.4	0.29	968.2	0.54
普通磷质石灰土 (W6-土2)	A ₁	2~10	8.8	50.64	6.00	64.9	0.18	689.5	20.96
	A ₂	10~30	9.2	27.03	3.26	68.3	0.21	747.1	12.60
	B	30~42	9.7	6.03	0.65	167	0.27	935.2	2.76
	C	95~110	10.0	1.74	0.18	43	0.15	974.2	0.48
粗骨磷质石灰土 (W12-土2)	A ₁	0~18	8.5	52.32	6.12	103.8	0.30	640.4	23.15
	A ₂	18~30	8.3	17.00	2.38	72.1	0.40	763.0	7.83
	AC	30~50	9.6	3.60	0.41	8.5	0.30	919.2	1.33
	C	50~90	9.7	3.07	0.37	5.4	0.20	952.3	1.16
幼年磷质石灰土 (W6-土6)	A	0~5	9.4	2.49	0.31	1.3	0.29	942.1	0.50
	AC	5~16	9.4	1.86	0.25	1.4	0.22	950.6	0.38
	C	16~110	9.4	2.03	0.24	0.9	0.34	943.5	0.43

其位置与富磷岩性均腐土的历史样点^[4-5]基本一致,但本研究发现,虽然其现在仍有暗色土层,但其厚度仅为 20 cm 左右,紧邻其下的土层有机碳含量明显低于表层,分别减少了 92.6%和 47.1%,属于锐减,因此不是均腐殖质特性要求的“逐渐减少”。造成这一变化的根本原因在于后来强烈的人类活动(如鸟类受扰飞离而失去了鸟粪补充、原枯枝落叶层和暗色土层作为好土或磷肥资源被剥离它用),此外,也与当地高温高湿环境下土壤腐殖质的快速矿化分解有关。这也警示南海岛屿建设过程中,应尽可能少扰动植被生长和鸟类活动,切实注意保护稀缺珍贵的土壤资源。

4 结论

本研究通过对西沙群岛 13 个岛礁上土壤的系统调查,确定了晋卿岛、甘泉岛、永兴岛、赵述岛、南沙洲和北岛 7 个典型样点的土壤系统分类归属,其中 2 个样点属于磷质钙质湿润锥形土亚类,4 个样点属于磷质湿润正常新成土亚类,1 个样点属于钙质湿润

正常新成土亚类;在此基础上,划分出 4 个土族,建立晋卿岛系、甘泉岛系、永兴岛系、赵述岛系、南沙洲系和甘泉堤系 6 个土系,为我国土系清单提供了重要的类型和区域补充。

参考文献 (References)

- [1] Zhang G L. Deep-love of Chinese soil scientists on South China[N]. China Science Daily, 2016-12-05. [张甘霖. 我国土壤学家的南海情结[N]. 中国科学报, 2016-12-05. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/12/362618.shtm>.]
- [2] Lu F X. Soil and guano phosphate ore in Xisha Islands, Guangdong [J]. Soil Quarterly, 1947, 6(3): 67-75. [陆发熹. 广东西沙群岛之土壤及鸟粪磷矿[J]. 土壤季刊, 1947, 6(3): 67-75.]
- [3] Xi L Z. Soil summary of Nansha Islands, Guangdong [J]. Soil Quarterly, 1947, 6(3): 77-81. [席连之. 广东南沙群岛土壤纪要[J]. 土壤季刊, 1947, 6(3): 77-81.]
- [4] Survey Group of Guangdong Institute of Botany. Natural environmental conditions and main soil types of Xisha Islands [J]. Soils, 1975, 7(2): 57-60. [广东省植物研究所考察组. 西沙群岛自然环境条件和主要土壤类型[J]. 土壤, 1975, 7(2): 57-60.]

- [5] Soil Survey Group of Xisha Islands, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soils and guano phosphate ore in Xisha Islands of China[M]. Beijing: Science Press, 1977. [中国科学院南京土壤研究所西沙群岛土壤考察组. 我国西沙群岛的土壤和鸟粪磷矿[M]. 北京: 科学出版社, 1977.]
- [6] Nansha Comprehensive Scientific Survey Team. Physical geology of Nansha Islands [M]. Beijing: Science Press, 1996. [南沙综合科学考察队. 南沙群岛自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [7] Gong Z T, Liu L W, Zhou R R, et al. Soils in islands of South China Sea and their ages[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1995 (S) : 247—250.
- [8] Gong Z T, Huang B. Geochemical characteristics of soils in islands of South China Sea[J]. *Pedosphere*, 1995, 5 (4) : 333—342.
- [9] Zhang S R, Liang J X, Lin D. Distribution form and property of soil phosphorus in Xisha archipelago[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 1995, 16(1): 48—54. [张少若, 梁继兴, 林电. 西沙群岛土壤磷的分布、形态和性质[J]. *热带作物学报*, 1995, 16(1) : 48—54.]
- [10] Gong Z T, Liu L W, Zhou R R. Formation of the soils in the South China Sea Islands and their ages[J]. *Quaternary Sciences*, 1996, 16 (1) : 88—95. [龚子同, 刘良梧, 周瑞荣. 南海诸岛土壤的形成和年龄[J]. *第四纪研究*, 1996, 16 (1) : 88—95.]
- [11] Zhu R B, Sun L G, Zhao S P, et al. Preliminary studies on nitrous oxide emissions from the ornithogenic soils on Xi-Sha atoll, South China Sea [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17 (4) : 551—556.
- [12] Zhu R B, Sun L G, Zhao S P, et al. Preliminary studies on methane flux from the ornithogenic soils on Xi-sha atoll, South China Sea [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17 (5) : 789—793.
- [13] Liu X D, Zhao S P, Sun L G, et al. P and trace metal contents in biomaterials, soils, sediments and plants in colony of red-footed booby (*Sula sula*) in the Dongdao Island of South China Sea[J]. *Chemosphere*, 2006, 65 (4) : 707—715.
- [14] Wang R. Analysis characteristic and quality evaluation of soil environment in Xisha Islands[D]. Haikou: Hainan University, 2011. [王瑞. 西沙群岛土壤环境特征分析及质量评价[D]. 海口: 海南大学, 2011.]
- [15] Gong Z T, Zhang G L, Yang F. Soils and the soil ecosystem in the South China Sea Islands[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (2) : 183—188. [龚子同, 张甘霖, 杨飞. 南海诸岛的土壤及其生态系统特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (2) : 183—188.]
- [16] Wang S H, Zhu Y J, Wang Y F, et al. Effect of vegetation types on soil physicochemical property in East Island and Yongxing Island of Xisha Islands[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2019, 27 (4) : 383—390. [王森浩, 朱怡静, 王玉芳, 等. 西沙群岛主要岛屿不同植被类型对土壤理化性质的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27 (4) : 383—390.]
- [17] Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C. Pedogenesis and soil taxonomy[M]. Beijing: Science Press, 2007. [龚子同, 张甘霖, 陈志诚. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [18] Qi Z P, Wang D F, Wei Z Y. Soil series of China ·Hainan volume [M]. Beijing: Science Press, 2018. [漆智平, 王登峰, 魏志远. 中国土系志海南卷[M]. 北京: 科学出版社, 2018.]
- [19] Zhang G L, Li D C. Manual of soil description and sampling[M]. Beijing: Science Press, 2016. [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.]
- [20] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences & Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. New Standard soil colour charts[M]. Nanjing: Nanjing Press, 1989. [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.]
- [21] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [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.]
- [22] Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001. [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.]
- [23] Zhang G L, Wang Q B, Zhang F R, et al. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese Soil Taxonomy[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4) : 826—834. [张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (4) : 826—834.]
- [24] Gong Z T, Huang B, Zhou R R. Pedogeochemistry and bioavailability of soils in South China Sea Islands[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34 (1) : 10—27. [龚子同, 黄标, 周瑞荣. 南海诸岛土壤的地球化学特征及其生物有效性[J]. *土壤学报*, 1997, 34 (1) : 10—27.]

(责任编辑: 檀满枝)