

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.022

欧锦琼, 卢瑛, 胡丹心, 等. 广西岩溶地区水稻土发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属. 土壤, 2023, 55(6): 1336–1346.

# 广西岩溶地区水稻土发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属<sup>①</sup>

欧锦琼<sup>1</sup>, 卢瑛<sup>2\*</sup>, 胡丹心<sup>1</sup>, 周志军<sup>1</sup>, 秦海龙<sup>2</sup>, 熊凡<sup>1</sup>, 阳洋<sup>2</sup>

(1 广东省广州生态环境监测中心站, 广州 510006; 2 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

**摘要:** 为明确广西岩溶地区水稻土在中国土壤系统分类中的归属, 以该区域不同母质发育的水稻土为研究对象, 挖掘 20 个典型剖面, 通过野外观测、分层取样与分析, 依据《中国土壤系统分类检索(第三版)》进行分类检索。结果表明, 大多剖面出现明显的复钙现象。供试剖面的系统分类高级单元归属为人为土土纲; 水耕人为土亚纲; 潜育、铁聚和筒育水耕人为土 3 个土类; 复钙、铁聚和普通潜育水耕人为土, 复钙和普通铁聚水耕人为土, 复钙和普通筒育水耕人为土 7 个亚类; 在系统分类基层单元归属上, 可划归出 17 个土族和续分为 20 个土系。考虑广西地区水耕人为土耕作层 Ap1 碳酸钙相当物含量往往低于犁底层 Ap2 的现象, 而现行水耕人为土复钙亚类的检索中“表层土壤”的“表层”不尽明确而可能导致的亚类误判, 建议将其修改为“水耕表层(耕作层或犁底层)土壤”; 另外, 由于实际调查发现广西地区的一些铁聚水耕人为土也具有复钙特征, 建议在检索中增设复钙铁聚水耕人为土亚类。

**关键词:** 广西; 岩溶地区; 水稻土; 发生特性; 土壤系统分类

**中图分类号:** S155.3 **文献标志码:** A

## Genetic Characteristics of Paddy Soils in Karst Areas of Guangxi and Their Attribution in Chinese Soil Taxonomy

OU Jinqiong<sup>1</sup>, LU Ying<sup>2\*</sup>, HU Danxin<sup>1</sup>, ZHOU Zhijun<sup>1</sup>, QIN Hailong<sup>2</sup>, XIONG Fan<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>

(1 Guangzhou Sub-branch of Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510006, China; 2 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** To clarify the classification of paddy soils in Karst areas of Guangxi in Chinese Soil Taxonomy, 20 typical soil profiles of paddy soil with different parent materials were selected and classified according to *Chinese Soil Taxonomy* (3<sup>rd</sup> ed) by field observation, stratified sampling and analysis. Results showed that there was obvious recalcification in most of the paddy soils. The selected profiles were sorted into Anthrosols in order; Stagnic Anthrosols in suborder; Gleyic, Fe-accumulic and Hapli-Stagnic Anthrosol in group; Recalcatic, Fe-accumulic and Typic Gleyi-Stagnic Anthrosols, Recalcatic and Typic Fe-accumulic-Stagnic Anthrosols, Recalcatic and Typic Hapli-Stagnic Anthrosols in subgroup. They were classified as 17 soil families and 20 soil series. In consideration of that CaCO<sub>3</sub> equivalent content is lower in the cultivated layer of Stagnic Anthrosols in Guangxi than that in the plow pan, it is suggested to revise “the surface layer” of “topsoil” in the current classification of subgroup of Stagnic Anthrosols as Anthrostagnic epipedon (cultivated layer or plow pan) to prevent the misjudgment of subgroup. Meanwhile, it is suggested to add a subgroup of Recalcatic Fe-accumulic-Stagnic Anthrosols in Chinese Soil Taxonomy due to some of the artificial soils in Guangxi also have the characteristics of calcic evidence.

**Key words:** Guangxi; Karst areas; Paddy soils; Genetic characteristics; Chinese Soil Taxonomy

水稻土是在长期季节性淹水种稻条件下, 受人为活动和自然因素的双重影响, 经过水耕熟化过程和土壤周期性氧化还原交替形成的特殊土壤类型<sup>[1]</sup>, 其发

生与演变过程对土壤管理有重要意义<sup>[2-3]</sup>。水稻土占广西耕作土壤总面积的 64.2%, 是面积最大的耕作土壤<sup>[4]</sup>, 主要种植在岩溶地区地势平坦的峰丛和峰林

① 基金项目: 国家科技基础性工作专项重点项目(2014FY110200)、国家自然科学基金项目(41271233)和广州市科技计划项目(202103000018)资助。

\* 通讯作者(luying@scau.edu.cn)

作者简介: 欧锦琼(1992—), 女, 广西梧州人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为土壤发生与分类、土壤环境监测。E-mail: 528790014@qq.com

谷地、溶蚀平原和盆地等区域,大多分布于桂中、桂西和桂北<sup>[5]</sup>。由于岩溶水作用,或使用岩溶水灌溉,或过去农民长期施用石灰<sup>[6]</sup>,导致第四纪红土、砂页岩风化物等形成的酸性土壤呈现了明显的复钙作用,土体中出现了明显的石灰反应和碳酸钙积累,碳酸钙的向下淋溶迁移产生钙积,严重者使土壤板结,通透性减弱,不利于水稻扎根生长<sup>[6]</sup>,对土壤性质和土壤利用管理产生了显著影响,因此在土壤分类上必须加以区分。

土壤分类是土壤科学的理论基础和发展水平的重要标志。现在,以诊断层和诊断特性为基础,强调量化、标准化和具备检索功能的土壤系统分类正展现其强大活力<sup>[7]</sup>,并具有更强的土壤类型区分能力,可为土壤资源开发利用、保护与管理提供更加丰富的信息<sup>[8]</sup>,但有关广西地区的土壤系统分类研究仅有零星报道<sup>[9]</sup>。而岩溶地区是典型生态脆弱区<sup>[10]</sup>,石漠化治理、生态恢复已经成为岩溶地区亟待解决的问题,有必要对岩溶地区的土壤资源与利用调查,土壤

质量评价与退化、演化等深入研究。我国岩溶区有关土壤质量与退化、水土保持等方面研究比较多,但系统分类研究的报道还甚少<sup>[11]</sup>,且对于广西岩溶地区水稻土的系统分类研究尚未引起关注。为此,本文研究了20个发育在广西岩溶地区的水稻土土壤剖面,在理化性状的基础上对该地区水稻土的发生特性及分类进行研究,依据《中国土壤系统分类(第三版)》<sup>[12]</sup>对其进行土壤系统分类的检索,旨在明晰广西岩溶地区水稻土的性状,为研究区土壤利用管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤采集

基于第二次土壤普查获取的广西水稻土土种典型剖面信息<sup>[4, 6]</sup>,结合广西区级土壤图、土地利用现状图和地貌图,根据岩溶地区水稻土的成土环境与分布特点,在全区岩溶地带范围内选取了20个水稻土剖面。采样点位置和土壤剖面成土环境条件见表1。

表1 供试土壤剖面成土环境条件  
Table1 Soil formation conditions of studied soil profiles

编号	剖面编号	采样地点	采样年份	海拔(m)	经纬度	地形	成土母质	利用方式
GX01	45-072	百色市靖西市同德乡东球村	2015	744.5	23°07'20"N 106°32'01"E	峰丛谷地	石灰岩风化物	烟稻轮作
GX02	45-073	百色市靖西市武平镇巡马村	2015	716.5	23°11'53"N 106°32'23"E	峰丛谷地	石灰岩上覆第四纪红土	双季稻或水旱轮作
GX03	45-074	百色市靖西市地州镇大利村	2015	720.0	23°00'54"N 106°20'50"E	峰丛谷地	石灰岩风化洪积、冲积物	烟稻轮作
GX04	45-081	百色市平果县果化镇槐前村	2015	123.6	23°24'48"N 107°23'43"E	宽谷垌田	第四纪红土	双季稻
GX05	45-083	百色市平果县新安镇道峨村	2015	104.3	23°16'12"N 107°33'52"E	溶蚀平原	第四纪红土	双季稻
GX06	45-085	河池市南丹县芒场镇拉麻村	2016	873.8	25°14'51"N 107°27'22"E	峰丛谷地	石灰岩上覆第四纪红土	单季稻
GX07	45-090	河池市环江县大才乡新坡村	2016	223.8	24°44'47"N 108°20'49"E	岩溶低洼垌田	古相沉积物	水稻、桑树
GX08	45-091	河池市宜州市洛东镇洛东社区	2016	123.1	24°29'13"N 108°51'31"E	溶蚀盆地	石灰岩风化冲积物	双季稻,部分改种桑树
GX09	45-092	河池市宜州市北山镇塘利村	2016	244.1	24°16'27"N 108°28'29"E	丘陵谷地	洪积、冲积物	单季水稻
GX10	45-093	河池市金城江区东江镇长排村	2016	206.4	24°44'30"N 108°05'55"E	丘陵谷地	第四纪红土	水稻
GX11	45-101	河池市大化县大化镇鸣凤村	2016	160.1	23°46'18"N 107°56'10"E	山丘谷地	硅质岩的洪积、冲积物	单季稻

续表 1

编号	剖面编号	采样地点	采样年份	海拔(m)	经纬度	地形	成土母质	利用方式
GX12	45-102	河池市都安县大兴乡太阳村	2016	169.1	24°08'08"N 108°00'59"E	岩溶谷地	石灰岩洪积、冲积物	双季稻
GX13	45-112	柳州市柳江县三都镇里贡村	2016	161.4	24°12'52"N 109°11'41"E	岩溶盆地	石灰岩洪冲积物	植稻后为香葱生产基地
GX14	45-117	来宾市武宣县通挽镇花马村	2016	98.1	23°13'53"N 109°19'13"E	山丘谷地	洪积物	水稻
GX15	45-119	来宾市兴宾区三五镇古灯村	2016	70.8	23°30'15"N 109°14'00"E	山丘谷地	硅质页岩风化洪积、冲积物	水稻、甘蔗
GX16	45-123	来宾市忻城县城关镇隆光村	2016	94.6	23°58'11"N 108°39'32"E	峰林谷地	砂岩风化洪积、冲积物	水稻
GX17	45-137	玉林市博白县三滩镇守育村	2016	60.9	22°12'51"N 110°00'00"E	溶蚀盆地	砂页岩风化洪积、冲积物	水稻、莲藕
GX18	45-143	贺州市富川县麦岭镇大坝村	2017	370.6	25°03'42"N 111°23'01"E	谷地	砂页岩风化坡积、洪积物	双季稻
GX19	45-144	贺州市富川县朝东镇茶山村	2017	350.5	25°05'54"N 111°14'58"E	宽谷垌田	紫色砂页岩	水稻或烟稻轮作
GX20	45-147	贺州市八步区莲塘镇骡桥村	2017	89.7	24°23'04"N 111°38'05"E	宽谷垌田	洪积、冲积物	水稻

依照《野外土壤描述与采样手册》<sup>[13]</sup>,按土壤发生层(合计 95 个发生层)采集土样,分别制备粒径为 2、0.25、0.149 mm 的土壤样品以供测试。

## 1.2 土壤分析和数据处理

土壤颜色采用芒赛尔标准比色卡比色;容重采用环刀法测定;颗粒组成采用吸管法测定;pH 采用电位法(水土比 2.5:1,  $V:m$ )测定;有机质采用重铬酸钾外加热容量法测定;游离铁采用 DCB 提取,比色法测定;CaCO<sub>3</sub>相当物采用气量法测定;各指标的具体分析方法详见《土壤调查实验室分析方法》<sup>[14]</sup>。

数据分析和作图处理使用 Excel 2016 和 Origin 2018。

## 2 研究结果

### 2.1 岩溶地区水稻土的主要发生特性

**2.1.1 剖面形态特征** 对供试水稻土土壤剖面形态特征的分析见表 2。从润态颜色来看,土壤剖面色调多介于 5YR~2.5Y,分别有 53% 和 40% 的发生层土壤润态颜色为 10YR 和 2.5Y。明度多为 4、5,彩度多为 3~8。土壤颜色总体表现为随土壤深度增加而逐渐变浅、变亮。GX07、GX11、GX12、GX20

由于长期被水饱和,土壤基质润态颜色为 2.5Y 或更灰,具有明显的潜育特征。剖面构型多为 Ap1-Ap2-Br-Cr,其他构型如 GX11 为 Ap1-Ap2-Bg-C, GX07 为 Ap1-Ap2-Bg, GX12、GX20 为 Ap1-Ap2-Bg-Br。水稻土剖面分化较为明显,剖面发育较好,除 GX09 土体厚度较浅(60 cm)外,其余剖面土体厚度均大于 90 cm。Ap 层厚度介于 18~33 cm。测定结果表明,犁底层的容重明显高于耕作层,两者容重比均在 1.10 以上。由于长期周期性灌溉和排水,人为表层结构面或土体中均可见明显的锈纹、锈斑。之下土层中 80% 的剖面出现锈纹锈斑,65% 的剖面出现铁锰结核,其数量因剖面不同有所差异,20 个水稻土研究剖面均符合水耕表层和水耕氧化还原层的诊断要求<sup>[12]</sup>。

**2.1.2 细土有机质和颗粒组成** 水稻土的有机质积累受生物积累和人为施用有机肥等有机物质输入的双重作用影响。表层土壤有机质含量均较高,介于 14.66~130.02 g/kg,平均值为 48.35 g/kg,并呈现出由上至下逐渐下降的特点,剖面底层土壤有机质平均仅为 7.22 g/kg。说明有机质主要积累在土壤表层。GX15 有机质含量整体较低,可能是由于管理较为粗放,有机物质投入低。本研究水稻土均采自岩溶地区, GX10、GX11、GX12 和 GX14 表层土壤 pH 低于 6.5,

其余剖面表层 pH 介于 6.5~8.3, 主要与复盐基作用和使用岩溶水灌溉或施用石灰有关。pH 随土壤深度增加多呈现递增或先增后减的趋势。

20 个水稻土剖面黏粒含量介于 93.0~699.4 g/kg, 质地以壤土为主(包括壤土、粉壤土、粉质黏壤土),

少数剖面质地较黏(包括黏壤土、粉质黏土、黏土)(表 2)。发育于砂页岩风化洪冲积物母质的多为粉质黏壤土, 发育于石灰岩风化洪冲积物的质地多为粉质黏壤土和粉壤土, 发育于第四纪红土母质的以壤土为主(包括粉壤土、黏壤土和壤土)。

表 2 供试土壤的主要理化性质  
Table 2 Soil physiochemical properties of studied profiles

编号	发生层	深度 (cm)	颜色(润)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	黏粒 (g/kg)	质地 <sup>[16]</sup>	pH (H <sub>2</sub> O)	有机质 (g/kg)	CaCO <sub>3</sub> 相当 物(g/kg)	游离铁 (g/kg)
GX01	Ap1	0~13	橄榄棕色 2.5Y4/4	1.34	327.8	黏壤土	7.30	31.52	7.3	38.33
	Ap2	13~23	棕色 10YR4/4	1.51	263.4	壤土	8.19	7.93	81.3	46.83
	Br1	23~52	亮棕色 7.5YR5/8	1.40	570.4	黏土	8.02	8.08	13.9	58.01
	Br2	52~85	亮棕色 7.5YR5/8	1.31	699.4	黏土	7.83	8.25	1.3	70.71
GX02	Ap1	0~11	棕色 10YR4/4	1.27	292.8	粉质黏壤土	7.99	47.7	80.5	42.16
	Ap2	11~19	棕色 10YR4/4	1.45	333.6	粉质黏壤土	8.13	29.85	99.1	44.35
	Br1	19~41	棕色 10YR4/6	1.50	422.2	粉质黏土	8.08	14.53	24.4	58.25
	Br2	41~75	黄棕色 10YR5/8	1.35	423.4	粉质黏土	7.76	8.98	1.5	66.88
	Cr	75~100	亮棕色 7.5YR5/8	1.46	490.0	粉质黏土	8.01	3.46	1.5	71.10
GX03	Ap1	0~20	棕色 10YR4/4	1.23	284.2	粉质黏壤土	8.03	36.54	121.7	38.38
	Ap2	20~29	黄棕色 10YR5/6	1.49	327.8	粉质黏壤土	8.22	13.45	155.7	39.78
	Br1	29~45	黄棕色 10YR5/6	1.49	356.4	粉质黏壤土	8.26	10.70	119.5	51.46
	Br2	45~66	黄棕色 10YR5/6	1.30	446.0	粉质黏土	8.14	10.71	10.8	53.39
	Br3	66~107	黄棕色 10YR5/6	1.30	480.4	粉质黏土	7.89	9.56	2.8	63.04
GX04	Ap1	0~11	浊黄橙色 10YR4/3	1.09	205.0	粉壤土	7.71	63.69	9.5	99.87
	Ap2	11~20	浊黄橙色 10YR4/3	1.23	218.4	粉壤土	7.57	47.20	15.5	96.40
	Br1	20~33	浊黄橙色 10YR4/3	1.53	240.0	壤土	7.67	9.44	3.5	117.27
	Br2	33~68	黄棕色 10YR5/8	1.55	376.8	黏壤土	7.67	4.40	1.1	115.82
	Br3	68~100	黄棕色 10YR5/8	1.41	589.8	黏土	7.55	4.89	1.3	104.41
GX05	Ap1	0~14	浊黄棕色 10YR4/3	1.31	252.9	粉壤土	6.51	33.74	-	85.90
	Ap2	14~24	浊黄棕色 10YR4/3	1.57	293.5	黏壤土	6.58	11.13	-	129.13
	Br1	24~45	亮黄棕色 10YR6/8	1.53	275.7	黏壤土	6.76	4.96	-	130.74
	Br2	45~72	亮黄棕色 10YR6/8	1.54	177.7	壤土	6.84	3.91	-	139.91
	Br3	72~102	亮黄棕色 10YR6/8	1.55	255.7	壤土	6.92	3.39	-	154.51
GX06	Ap1	0~16	橄榄棕色 2.5Y4/4	1.25	271.0	粉质黏壤土	8.02	47.10	333.3	25.03
	Ap2	16~22	橄榄棕色 2.5Y4/6	1.47	303.2	黏壤土	8.14	13.94	65.8	50.55
	Br1	22~56	黄棕色 10YR5/8	1.43	425.8	粉质黏土	8.01	7.04	4.3	46.52
	Br2	56~90	黄棕色 10YR5/8	1.22	521.4	黏土	7.94	5.52	0.9	62.64
GX07	Ap1	0~12	黑棕色 2.5Y3/2	0.96	131.8	壤土	7.35	130.02	86.2	36.51
	Ap2	12~20	黑棕色 2.5Y3/2	1.14	125.6	粉壤土	7.47	121.15	85.5	36.82

续表 2

编号	发生层	深度 (cm)	颜色(润)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	黏粒 (g/kg)	质地 <sup>[16]</sup>	pH (H <sub>2</sub> O)	有机质 (g/kg)	CaCO <sub>3</sub> 相当 物(g/kg)	游离铁 (g/kg)
GX07	Bg1	20~53	黑棕色 2.5Y4/2	1.08	123.0	壤土	7.98	155.35	63.7	34.86
	Bg2	53~80	黑棕色 2.5Y4/2	1.07	196.4	壤土	7.91	44.28	18.3	36.83
	Bg3	80~100	橄榄棕色 2.5Y4/6	1.47	296.0	黏壤土	7.79	7.52	0.6	36.20
GX08	Ap1	0~11	暗橄榄棕色 2.5Y3/3	1.17	179.9	粉壤土	6.45	48.52	-	60.16
	Ap2	11~18	橄榄棕色 2.5Y4/3	1.52	255.3	粉壤土	6.57	31.15	-	75.65
	Br1	18~33	橄榄棕色 2.5Y4/6	1.48	328.7	黏壤土	6.82	10.80	-	83.59
	Br2	33~73	黄棕色 10YR5/8	1.35	452.1	黏土	6.8	6.14	-	90.37
	C	73~105	黄棕色 10YR5/8	1.27	407.7	粉质黏土	6.84	6.24	-	97.67
GX09	Ap1	0~15	暗橄榄棕色 2.5Y3/3	0.97	189.4	粉壤土	7.38	77.90	105.3	49.99
	Ap2	15~30	暗橄榄棕色 2.5Y3/3	1.09	231.4	粉壤土	7.60	65.33	112.2	53.53
	Br1	30~44	黑棕色 10YR4/3	0.93	254.2	壤土	7.64	95.08	51.5	56.51
	Br2	44~60	棕色 10YR4/4	0.94	424.4	粉质黏土	7.58	35.46	27.3	66.73
GX10	Ap1	0~19	黄棕色 2.5Y5/3	1.30	276.6	粉质黏壤土	5.58	43.50	-	18.48
	Ap2	19~33	橄榄棕色 2.5Y4/4	1.65	248.4	粉壤土	6.38	11.61	-	43.76
	Br1	33~72	黑棕色 2.5Y3/2	1.51	306.0	粉质黏壤土	6.58	20.63	-	31.99
	Cr	72~100	橄榄棕色 2.5Y4/6	1.52	252.0	壤土	6.71	9.30	-	42.83
GX11	Ap1	0~12	橄榄棕色 2.5Y4/4	1.20	270.2	粉质黏壤土	6.14	50.32	-	12.31
	Ap2	12~20	橄榄棕色 2.5Y4/4	1.36	253.6	粉壤土	6.14	34.46	-	12.53
	Bg	20~60	黄灰色 2.5Y6/1	1.62	147.7	粉壤土	6.63	16.99	-	8.05
	C	60~100	33%浅淡黄色 2.5Y8/3, 67%黄棕色 10YR5/6	1.73	110.5	粉壤土	6.96	4.48	-	77.03
GX12	Ap1	0~13	暗橄榄棕色 2.5Y3/3	0.99	100.7	粉壤土	7.98	47.12	80.1	25.83
	Ap2	13~22	暗橄榄棕色 2.5Y3/3	1.12	149.2	粉壤土	8.10	44.06	84.0	28.13
	Bg	22~37	橄榄棕色 2.5Y4/6	1.42	192.2	粉壤土	8.25	19.50	161.3	28.08
	Br1	37~72	浊黄色 2.5Y6/3	1.42	144.3	粉壤土	8.36	7.30	347.0	14.09
	Br2	72~110	浊黄色 2.5Y6/3	1.53	167.7	粉壤土	8.43	5.49	149.5	23.98
GX13	Ap1	0~14	橄榄黑 5Y3/1	1.17	263.2	粉壤土	7.80	30.58	88.5	22.90
	Ap2	14~23	黄灰 2.5Y4/1	1.30	268.2	粉壤土	7.98	35.66	93.4	22.00
	Br1	23~40	橄榄棕 2.5Y4/6	1.62	269.0	粉壤土	8.34	13.74	122.1	27.45
	Br2	40~80	橄榄棕 2.5Y4/6	1.57	271.4	粉质黏壤土	8.35	7.64	103.3	24.69
	Br3	80~115	橄榄棕 2.5Y4/6	1.53	266.0	壤土	8.28	7.68	65.2	24.65
GX14	Ap1	0~15	暗灰黄 2.5Y4/2	1.23	288.7	粉质黏壤土	6.20	75.44	0.1	15.53
	Ap2	15~27	暗灰黄 2.5Y4/2	1.41	285.1	粉质黏壤土	7.46	44.21	10.6	18.30
	Br1	27~52	黄棕 2.5Y5/3	1.59	219.4	粉壤土	7.70	7.62	3.3	37.50
	Br2	52~75	亮黄棕 10YR6/6	1.60	313.6	黏壤土	7.65	7.85	0.8	30.23
	Cr	75~100	亮黄棕 10YR7/6	1.56	373.4	粉质黏壤土	7.64	7.89	0.4	33.33

续表 2

编号	发生层	深度 (cm)	颜色(润)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	黏粒 (g/kg)	质地 <sup>[16]</sup>	pH (H <sub>2</sub> O)	有机质 (g/kg)	CaCO <sub>3</sub> 相当 物(g/kg)	游离铁 (g/kg)
GX15	Ap1	0~15	浊黄棕色 10YR5/4	1.31	185.0	粉壤土	5.08	14.66	—	21.23
	Ap2	15~27	浊黄棕色 10YR5/4	1.63	178.2	粉壤土	5.44	25.03	—	16.00
	Br1	27~44	浊黄棕色 10YR6/4	1.67	207.4	粉壤土	6.35	9.90	—	38.07
	Br2	44~76	浊黄棕色 10YR5/4	1.71	259.4	粉壤土	6.45	11.37	—	33.06
	Br3	76~110	80%浊黄棕色 10YR7/3, 20%亮红棕 5YR5/8	1.65	294.6	粉质黏壤土	6.42	8.52	—	31.23
GX16	Ap1	0~15	浊黄棕色 10YR4/3	1.21	283.4	粉质黏壤土	7.93	53.93	56.1	27.25
	Ap2	15~23	浊黄棕色 10YR4/3	1.50	293.6	粉质黏壤土	8.14	28.63	86.2	30.00
	Br1	23~50	浊黄棕色 10YR4/3	1.41	318.2	粉质黏壤土	8.25	16.76	79.0	32.06
	Br2	50~73	浊黄棕色 10YR4/3	1.46	350.2	粉质黏壤土	7.98	16.63	5.5	38.26
	Br3	73~100	黄棕 10YR5/6	1.40	380.2	粉质黏壤土	7.69	13.67	0.4	44.22
GX17	Ap1	0~16	暗橄榄棕色 2.5Y3/3	1.25	217.8	壤土	7.50	36.68	21.6	22.42
	Ap2	16~26	暗橄榄棕色 2.5Y3/3	1.55	202.2	壤土	7.63	32.07	22.3	24.01
	Br1	26~40	黄棕色 2.5Y5/4	1.48	239.2	壤土	8.04	8.50	4.6	29.21
	Br2	40~52	黄棕色 2.5Y5/3	1.50	281.0	黏壤土	7.67	7.12	0.5	14.47
	Br3	52~80	淡黄色 2.5Y7/4	1.47	279.0	黏壤土	7.59	2.75	0.5	27.06
	Cr	80~110	浊黄橙色 10YR7/2	1.55	93.0	壤质砂土	7.65	1.20	0.3	2.07
GX18	Ap1	0~15	棕色 10YR4/4	1.20	303.6	粉质黏壤土	8.02	40.10	331.2	21.76
	Ap2	15~27	棕色 10YR4/4	1.46	274.6	粉质黏壤土	8.31	19.77	408.0	22.53
	Br1	27~53	暗棕色 10YR3/4	1.42	366.4	粉质黏壤土	8.33	18.37	119.8	35.97
	Br2	53~70	棕色 10YR4/6	1.57	373.2	粉质黏壤土	8.35	6.52	22.6	40.66
	Cr	70~95	橙色 7.5YR6/6	1.57	362.6	粉质黏壤土	8.28	3.06	6.8	35.66
GX19	Ap1	0~19	黄棕色 10YR5/6	1.25	238.8	粉壤土	7.85	25.89	157.8	23.17
	Ap2	19~30	黄棕色 10YR5/6	1.55	227.6	粉壤土	8.32	9.50	186.8	27.51
	Br1	30~53	棕色 7.5YR4/4	1.56	256.6	壤土	8.12	8.29	10.5	30.12
	Br2	53~100	黄棕色 10YR5/6	1.51	238.6	壤土	8.16	4.64	4.6	28.32
GX20	Ap1	0~12	橄榄棕 2.5Y4/4	1.17	289.9	黏壤土	7.12	32.10	3.8	28.13
	Ap2	12~23	暗灰绿 7.5Y3/1	1.36	291.7	黏壤土	7.72	32.10	13.2	27.33
	Bg	23~35	90%灰 5Y6/1, 10%黄棕 10YR5/6	1.49	275.1	黏壤土	7.92	12.14	9.2	31.83
	Br1	35~60	15%亮黄棕 10YR6/8, 85%灰 N4/0	1.57	309.5	粉质黏壤土	7.95	2.19	4.1	33.80
	Br2	60~100	15%亮黄棕 10YR6/8, 70%灰 N4/0, 15%红棕 5YR4/8	1.57	290.3	粉质黏壤土	7.72	2.62	0.4	44.14

注: 全部剖面各发生层均在野外进行土壤剖面采样时使用 10% 稀盐酸试剂检测石灰反应, “—” 表示野外检测观察无石灰反应, 故实验室不进行 CaCO<sub>3</sub> 相当物检测。

**2.1.3 氧化铁的分布特征** 土壤氧化铁在干湿交替条件下还原淋溶和氧化淀积的迁移, 改变了水稻土铁的分布特征, 反映水稻土的成土过程。本研究剖面的耕层土壤游离铁含量在 12.31 ~ 99.87 g/kg。从沿剖面垂直分布来看, 80% 的剖面土壤游离铁含量随土壤深度增加, 有从表层向底土层增加或先增后减的趋势, 这是水稻土淹水时氧化铁的还原淋溶和排水落干后氧化淀积共同作用的结果<sup>[15]</sup>。80% 的剖面土壤游离铁含量以耕层 (Ap1) 和犁底层 (Ap2) 较低, 向下呈现增加的趋势。GX01、GX02、GX03、GX05、GX06、GX08、GX10、GX14、GX15、GX16、GX18、GX20 水耕氧化还原层的游离铁含量介于 30.23 ~ 154.51 g/kg, 是耕作层 Ap1 的 1.50 倍 ~ 2.50 倍, 均大于 1.5 倍, 故具有明显的铁聚特征<sup>[12]</sup>。

## 2.2 诊断层和诊断特性以及高级单元划分

综合以上对水稻土理化性质结果和发生特性的分析, 依据《中国土壤系统分类检索(第三版)》<sup>[12]</sup>, 对 20 个水稻土剖面的诊断层和诊断特性进行鉴定和检索, 为岩溶地区水稻土在中国土壤系统分类中高级分类单元的划分奠定基础。供试剖面的诊断层均包括水耕表层和氧化还原层, 诊断特性均包括人为滞水土壤水分状况、氧化还原特征和盐基饱和, 此外, 各剖面具有的其他诊断特性见表 3。由表 3 可知, GX01、GX02、GX03、GX04、GX05、GX11、GX12、GX14、GX15、GX16、GX17 为高热性土壤温度状况, 其余为热性土壤温度状况<sup>[15]</sup>; GX07、GX11、GX12、GX20 具有潜育特征, 潜育特征出现的深度分别为 20 ~ 100、20 ~ 60、22 ~ 37、23 ~ 35 cm; GX03、GX07、GX09、GX12、GX13、GX016、GX18 和 GX19 具有石灰性。

表 3 供试土壤的诊断层和诊断特性  
Table 3 Diagnostic horizons and characteristics of studied soils

编号	人为滞水土壤水分状况	水耕表层	水耕氧化还原层	氧化还原特征	潜育特征	石灰性	土壤温度状况	盐基饱和度
GX01	√	√	√	√			高热性	饱和
GX02	√	√	√	√			高热性	饱和
GX03	√	√	√	√		√	高热性	饱和
GX04	√	√	√	√			高热性	饱和
GX05	√	√	√	√			高热性	饱和
GX06	√	√	√	√			热性	饱和
GX07	√	√	√	√	√	√	热性	饱和
GX08	√	√	√	√			热性	饱和
GX09	√	√	√	√		√	热性	饱和
GX10	√	√	√	√			热性	饱和
GX11	√	√	√	√	√		高热性	饱和
GX12	√	√	√	√	√	√	高热性	饱和
GX13	√	√	√	√		√	热性	饱和
GX14	√	√	√	√			高热性	饱和
GX15	√	√	√	√			高热性	饱和
GX16	√	√	√	√		√	高热性	饱和
GX17	√	√	√	√			高热性	饱和
GX18	√	√	√	√		√	热性	饱和
GX19	√	√	√	√		√	热性	饱和
GX20	√	√	√	√	√		热性	饱和

由表 2、表 3 可知, GX07、GX11、GX12、GX20 在水耕表层以下至 60 cm 范围内有厚度  $\geq 10$  cm 的土层具有潜育特征, GX01、GX02、GX03、GX06、GX07、GX09、GX16、GX18、GX19 在土表至 60 cm 范围内碳酸钙相当物含量以表层(耕作层或犁底层)为最高, 均大于 45 g/kg, 有人为复石灰作用, 并沿剖面呈向下递减的趋势, 出现了复钙现象。

根据供试土壤诊断特征, 20 个水稻土的系统分类高级分类单元均可归属为水耕人为土亚纲, 各供试剖面在中国土壤系统分类高级分类单元的归属依次为: GX07 属于复钙潜育水耕人为土, GX20 属于铁聚潜育水耕人为土, GX11、GX12 属于普通潜育水耕人为土; GX01、GX02、GX03、GX06、GX16、GX18 为复钙铁聚水耕人为土, GX05、GX08、GX10、

GX14、GX15 属于普通铁聚水耕人为土; GX09 和 GX19 属于复钙筒育水耕人为土, GX04、GX13、GX17 为普通筒育水耕人为土。

### 2.3 供试土壤的基层分类单元划分

土族划分的重要依据: ①颗粒大小级别; ②矿物学类型; ③石灰性和酸碱反应类别; ④土壤温度等级<sup>[17]</sup>。结合供试土壤的颗粒大小, 对各供试土壤的颗粒大小级别进行鉴定分别得到黏质、黏壤质、壤质等 3 种类型。土壤颗粒大小级别和土壤矿物组成共同决定土族矿物学类型。本次分类的矿物学类型参考《广西土种志》<sup>[4]</sup>和《广西土壤》<sup>[6]</sup>, 对供试水耕人为土土壤矿物学类型进行检索得到高岭石混合型、硅质混合型、混合型等 3 种类型。供试土壤的土族特征与基层分类单元归属如表 4 所示。土系划分的依据<sup>[17-18]</sup>主要考虑土族内影响土壤利用的性质差异, 以影响利用的表土特征和地方性分异为主。本研究岩溶地区的水耕人为土土系划分选用的土壤性质与划分标准如下: ①有效土层厚度; ②特定土层深

度和厚度; ③表层土壤质地、厚度; ④土壤中岩石碎屑、结核、侵入体等; ⑤土壤中碳酸钙相当物含量; ⑥土体颜色。按照《中国土壤系统分类土族与土系划分标准》<sup>[17]</sup>, GX01 和 GX03, GX14 和 GX15, GX09 和 GX19 属于同一土族, 需进行比较看是否划分不同的土系; 其余的剖面为不同的土族, 故分别可直接划分一个土系。GX01 水耕表层 Ap1 和 Ap2 的碳酸钙相当物含量分别为 7.3 和 81.3 g/kg, GX03 则分别为 121.7 和 155.7 g/kg, 差异明显, 故可分为两个不同土系; GX14 土体层次构型为粉质黏壤土-粉壤土交替, 水耕表层 pH 介于 6.2 ~ 7.5, GX15 则通体为粉壤土, 水耕表层 pH 介于 5.1 ~ 5.4, 差异也较明显, 故可分为两个不同土系; GX09 水耕表层碳酸钙相当物含量介于 105 ~ 112 g/kg, 通体游离铁含量介于 50 ~ 67 g/kg, GX19 则分别介于 157 ~ 187 g/kg 和 23 ~ 31 g/kg, 差异也较明显, 故可分为两个不同土系。因此, 最后将 20 个样点的供试土壤续分为 17 个土族 20 个土系。

表 4 供试土壤的土族特征与基层分类检索结果  
Table 4 Soil family characteristics and basic unit classification of studied soils

编号	土族鉴别特征				亚类	土系
	颗粒大小级别	矿物学类型	石灰性和酸碱反应类别	土壤温度等级		
GX20	黏壤质	混合型	非酸性	热性	铁聚潜育水耕人为土	螺桥系
GX07	壤质	混合型	石灰性	热性	复钙潜育水耕人为土	新坡系
GX12	壤质	混合型	石灰性	高热性	普通潜育水耕人为土	大兴系
GX11	壤质	混合型	非酸性	高热性	普通潜育水耕人为土	鸣凤系
GX01、GX03	黏质	高岭石混合型	石灰性	高热性	复钙铁聚水耕人为土	东球系、大利系
GX02	黏质	高岭石混合型	非酸性	高热性	复钙铁聚水耕人为土	巡马系
GX06	黏质	混合型	非酸性	热性	复钙铁聚水耕人为土	拉麻系
GX16	黏壤质	混合型	石灰性	高热性	复钙铁聚水耕人为土	隆光系
GX18	黏壤质	混合型	石灰性	热性	复钙铁聚水耕人为土	麦岭系
GX08	黏质	高岭石混合型	非酸性	热性	普通铁聚水耕人为土	洛东系
GX05	黏壤质	硅质混合型	非酸性	高热性	普通铁聚水耕人为土	道峨系
GX10	黏壤质	混合型	非酸性	热性	普通铁聚水耕人为土	长排系
GX14、GX15	黏壤质	混合型	非酸性	高热性	普通铁聚水耕人为土	花马系、古灯系
GX09、GX19	黏壤质	混合型	石灰性	热性	复钙筒育水耕人为土	塘利系、茶山系
GX04	黏质	高岭石混合型	非酸性	高热性	普通筒育水耕人为土	槐前系
GX13	黏壤质	混合型	石灰性	热性	普通筒育水耕人为土	里贡系
GX17	黏壤质	混合型	非酸性	高热性	普通筒育水耕人为土	守育系

## 3 讨论

### 3.1 岩溶地区水稻土(水耕人为土)的形成条件与过程

3.1.1 形成条件 地形、成土母质、水热条件、种稻时间等要素在不同景观中的不同组合, 共同主导了

水耕人为土的形成和演化方向。由于水稻的生物学特性, 对气候和土壤具有很强的适应性, 因此水耕人为土可以起源于不同类型母质。种稻后土壤在人为作用下, 随着形成环境的改变, 土壤的形成和性状在母质土壤的基础上发生重大变化。水耕人为土主要是通过在水耕熟化中灌水淹育和排水落干的水分管理使土



体发生还原与氧化交替,不同元素的迁移和物质变化最终导致土壤层次分化明显<sup>[19]</sup>。

从不同类型的水稻土空间分布特征来看,铁聚与复钙潜育水耕人为土主要分布于宽谷垌田和岩溶低洼垌田,普通潜育水耕人为土主要分布于岩溶和山丘谷地。复钙铁聚水耕人为土主要分布在峰丛谷地,少量是谷地。普通铁聚水耕人为土主要分布在溶蚀盆地和平原、丘陵和山丘谷地,少量是宽谷垌田。复钙筒育水耕人为土主要分布在丘陵谷地和宽谷垌田,普通筒育水耕人为土主要分布在宽谷垌田、岩溶和溶蚀盆地。水耕人为土的成土母质类型主要有洪积-冲积物、古相沉积物和第四纪红土。铁渗水耕人为土一般分布在地形部位略高的地区,但本研究调查区域地形以谷地和盆地为主,未发现此类土壤。

**3.1.2 形成过程** 水耕人为土的形成过程包括水耕熟化与还原淋溶、氧化淀积(铁锰的淀积增加了土壤的保水性)两个过程。水耕熟化使有机质增加,种稻过程施用有机肥,及作物根茎的归还,在淹水条件下有利于表层有机质的积累<sup>[19]</sup>。与起源土壤相比,水耕人为土有机质增加,并随熟化程度提高而提高。由于受不同时期沉积母质或不同时期堆积物质的影响,同一土壤剖面的不同土层之间的颗粒组成也常有较大的差异。

水耕人为土氧化还原交替对其元素迁移产生深刻影响。灌水后,耕层和犁底层的上部处于水分饱和状态。有机质在嫌气微生物作用下分解导致土壤发生还原。在还原条件下,铁的活性提高,通常在滞水状况下被还原成低价态离子(呈蓝绿或蓝灰)转入溶液。同时,铁与土壤中有有机物质络合,从而浓度增加。随着水耕人为土的发育,铁在剖面中移动加强,铁被还原淋溶,尤其在老水耕人为土中有明显的分化。除最表面极薄的泥面层受灌溉水中溶解氧的影响呈氧化态外,整个耕层和犁底层处于还原状态,犁底层具有滞水作用。因此,下土层氧化或还原状态由地下水位高低决定,若地下水位低,则水分仍不饱和,有一定孔隙,土壤处于氧化状态,反之,则为还原状态<sup>[19]</sup>。水耕人为土的这种氧化还原特征决定了其形成及有关的一系列特性。随熟化程度提高,耕作层与有机物质结合的铁增加,有机络合铁在土壤排水落干后,在耕层孔隙氧化淀积形成红棕色胶膜或锈斑、锈线,这是高度熟化的标志。这种层次分化过程与成土时间(植稻历史长短)关系密切。在相同或相似的母质、气候、地形等条件下,元素的移动和聚集特征则主要取决于成土时间<sup>[20-21]</sup>。由此可见,水耕人为土的发育既

与起源土壤的形成环境和性状有关,更受人为作用的深刻影响。

由于过多施用石灰或以富钙溶洞水进行灌溉<sup>[19]</sup>,本研究岩溶地区的水耕人为土(GX01、GX02、GX03、GX06、GX07、GX09、GX16、GX18、GX19)的碳酸钙不仅在耕层,而且在犁底层积聚,耕作层碳酸钙相当物含量介于 7.3 ~ 333.3 g/kg,平均值 142.2 g/kg,犁底层碳酸钙相当物含量介于 65.8 ~ 408.0 g/kg,平均值 149.4 g/kg。总体表现为耕作层或犁底层碳酸钙相当物含量大于 45 g/kg 并随剖面深度向下,碳酸钙相当物含量呈递减趋势。这些在岩溶地区出现的石灰积聚的水耕人为土是华南地区的一种低产水耕人为土。水耕人为土多在剖面 10 ~ 20 cm 处有一黏粒积聚层,由于通透性差,加剧了石灰和黏粒的积聚,石灰和黏粒的积聚又进一步恶化土壤通透性,从而对水耕熟化程度和物质的还原淋溶、氧化淀积向下迁移造成负面影响。因此,在该区水耕人为土的复钙作用是限制水稻产量和进行土壤系统分类划分的重要因素。

11 个铁聚水耕人为土剖面中游离铁含量表现为由上至下增加或先增后减趋势,但最终与水耕表层相比均为增加(图 1)。GX10、GX14、GX15、GX18 游离铁表现出由上至下陡增的特点,其铁聚特征尤其明显,原因与土壤熟化程度高、土壤结构发育良好、通透性优良、排水落干后铁的顺利氧化淀积有关。5 个筒育水耕人为土游离铁含量除 GX04 有稍微明显的铁氧化淀积现象外,其余剖面变化不明显(图 2)。潜育水耕人为土的 GX12 游离铁在潜育层减少的幅度较明显(图 3),这是地下水位高使水分饱和和土壤呈还原状态和钙积层的存在使土壤通透性恶化共同作用的结果;而其余 3 个潜育水耕人为土游离铁含量表现为先在潜育层小幅度减少再在下土层或母质层增至最高。

GX01、GX02、GX03、GX06、GX07、GX09、GX16、GX18、GX19 由于人为复石灰(复钙作用)产生或深或浅的钙积现象,对铁的向下淋溶淀积有一定程度的阻碍,因此,游离铁含量由上至下体现为增加不明显或无变化。

### 3.2 关于修订系统分类中水耕人为土亚类的建议

土壤系统分类是一个不断探索完善的过程<sup>[22-24]</sup>,虽然我国土壤系统分类工作有了阶段性的进展,但尚不能完全满足目前土壤资源信息系统建设和其他学科应用的需求,仍需要不断地修订和完善<sup>[25]</sup>。《中国土壤系统分类检索(第三版)》中潜育和筒育水耕人为土土类下均建立了复钙亚类,检索条件是:在矿质土

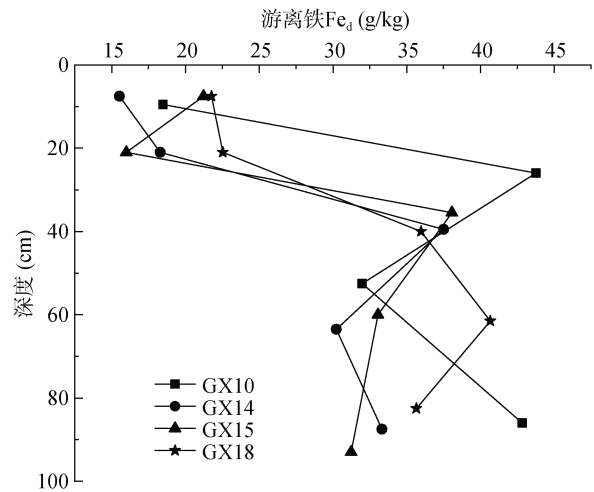
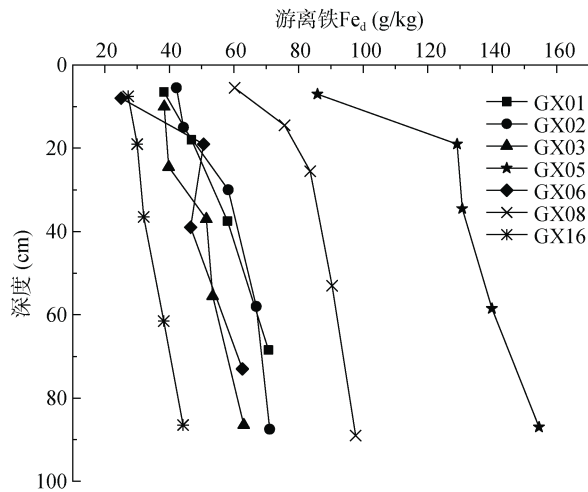


图 1 铁聚水耕人为土游离铁的垂直分布

Fig.1 Vertical distribution of free Fe ( $Fe_d$ ) contents in Fe-accumuli-Stagnic Anthrosols

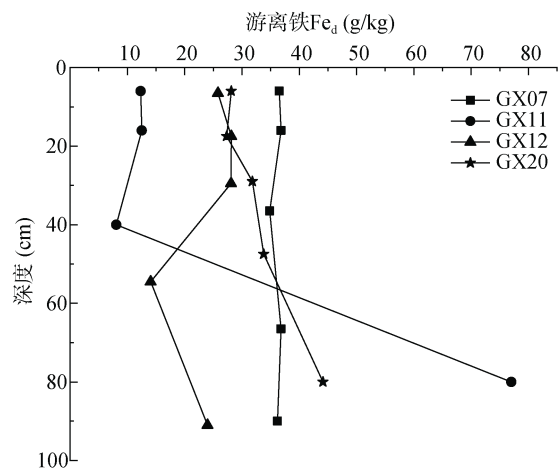
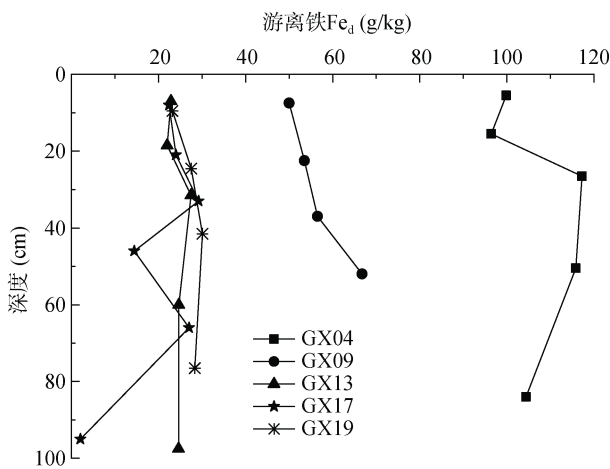


图 2 简育水耕人为土游离铁的垂直分布

Fig. 2 Vertical distributions of free Fe ( $Fe_d$ ) contents in Hapli-Stagnic Anthrosols

图 3 潜育水耕人为土游离铁的垂直分布

Fig. 3 Vertical distributions of free Fe ( $Fe_d$ ) contents in Gleyi-Stagnic Anthrosols

表至 60 cm 范围内有人为复石灰作用,其碳酸钙含量以表层为最高, >45 g/kg 向下渐减。

需要指出的是,这里的“表层”没有明确指出到底是耕作层(水耕表层的 Ap1),还是也包括了犁底层(水耕亚表层的 Ap2),因此在复钙型水耕人为土鉴别时可能会造成不确定性。在实际条件下,由于过去长期施用石灰和化肥,受季节性淹水种稻翻耕和重力作用影响,耕作层的碳酸钙相当物含量往往低于犁底层,甚至出现耕作层达不到 >45 g/kg、犁底层 >45 g/kg 并向下递减趋势的情况(如表 2 GX01),无法确定其是否能满足复石灰作用的条件,因此建议将检索中的“表层土壤”修改为“水耕表层(耕作层或犁底层)土壤”。

另外,可能受当时研究范围的局限和地区种稻空间格局的影响,目前仅在潜育和简育水耕人为土土类

下设置复钙亚类,很可能未能涵盖所有出现了明显石灰反应和碳酸钙积累的岩溶地区水耕人为土。如本研究中发现,归属为铁聚水耕人为土土类的 GX01、GX02、GX03、GX06、GX16、GX18 也具有人为复石灰作用,表明其也属于复钙亚类,但铁聚水耕人为土下尚没有复钙亚类,依据现行分类只能将以上剖面亚类归属为普通铁聚水耕人为土,这就未能体现出其具有的复钙特性,造成分类上的不尽合理,也可能会造成利用改良上的误导。然而类似剖面特征的具有人为复石灰作用的铁聚水耕人为土在广西、广东等华南岩溶地区的土系调查工作中屡有发现。据此建议在其中增加具有复石灰作用的亚类,即增设复钙铁聚水耕人为土亚类,具体的检索条件为:其他铁聚水耕人为土中在矿质土表至 60 cm 范围内有人为复石灰作用,其碳酸钙含量以水耕表层(耕作层或犁底层)为最高,

>45 g/kg, 向下渐减。检索顺序放在漂白水耕人为土之前。

#### 4 结论

1) 很多广西岩溶地区水稻土存在明显的复钙现象。

2) 供试剖面的系统分类高级单元归属为人为土土纲;水耕人为土亚纲;潜育、铁聚和筒育 3 个水耕人为土土类;复钙、铁聚和普通潜育水耕人为土,复钙和普通铁聚水耕人为土,复钙和普通筒育水耕人为土 7 个亚类;可续分为 17 个土族,进分为 20 个土系。

3) 建议将水耕人为土复钙亚类检索中“表土层”修改为“水耕表层(耕作层或犁底层)土壤”,并增设复钙铁聚水耕人为土亚类。

#### 参考文献:

- [1] 龚子同, 陈志诚, 史学正, 等. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] Liu Y L, Zhang B, Li C L, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in a rice paddy soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1580–1590.
- [3] Chen L M, Zhang G L, Effland W R. Soil characteristic response times and pedogenic thresholds during the 1000-year evolution of a paddy soil chronosequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(5): 1807–1820.
- [4] 广西土壤肥料工作站. 广西土种志[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1993.
- [5] 广西壮族自治区地方志编纂委员会. 广西通志: 岩溶志[M]. 南宁: 广西人民出版社, 2000.
- [6] 广西土壤肥料工作站编著. 广西土壤[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1994: 215–267.
- [7] 龚子同, 张甘霖. 中国土壤系统分类: 我国土壤分类从定性向定量的跨越[J]. *中国科学基金*, 2006, 20(5): 293–296.
- [8] 赵刚刚, 张东坡, 袁大刚, 等. 岷江上游杂谷脑河谷土壤发生特征与系统分类研究[J]. *土壤*, 2022, 54(4): 865–872.
- [9] 付旋旋. 广西猫儿山土壤发生特性及系统分类[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [10] 白云星, 周运超, 周鑫伟, 等. 喀斯特土壤与喀斯特区域土壤关系的探讨——以贵州省普定县后寨河小流域为例[J]. *土壤*, 2020, 52(2): 414–420.
- [11] 李松, 慈恩, 连茂山, 等. 水耕条件下两类富钙母岩发育土壤的系统分类归属及成因探讨[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 678–687.
- [12] 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[M]. 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [13] 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, 2022.
- [14] 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.
- [15] 韩春兰, 余无忌, 刘金宝, 等. 中国年均地温的估算方法研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 354–366.
- [16] 郭彦彪, 戴军, 冯宏, 等. 土壤质地三角图的规范制作及自动查询[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1221–1225.
- [17] 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.
- [18] 卢瑛, 韦翔华, 张甘霖. 中国土系志·广西卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [19] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 145–153.
- [20] 黄来明, 邵明安, 陈留美, 等. 水耕人为土时间序列铁氧化物与磁化率演变特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 1–13.
- [21] 韩光中. 3 种水稻土时间序列黏粒矿物的组合特征与物源指示意义[J]. *地理科学*, 2016, 36(8): 1277–1284.
- [22] 曲潇琳, 龙怀玉, 曹祥会, 等. 宁夏山地土壤的发育规律及系统分类研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 65–77.
- [23] Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy[M]. 12th ed. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014.
- [24] 袁大刚, 张甘霖. 美国土壤系统分类最新修订[J]. *土壤*, 2005, 37(2): 136–139.
- [25] 姜志文, 韩春兰, 吕秀艳. 火山灰土在土壤系统分类中的提出与修订[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3): 578–587.