

DOI: 10.11766/trxb201904080062

翁昊璐, 慈恩, 李松, 连茂山, 陈林. 重庆市黄壤的成土特点与系统分类研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 579–589.

WENG Haolu, CI En, LI Song, LIAN Maoshan, CHEN Lin. Pedogenetic Process and Taxonomy of Yellow Soil in Chongqing, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 579–589.

重庆市黄壤的成土特点与系统分类研究*

翁昊璐, 慈恩[†], 李松, 连茂山, 陈林

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘 要: 选取重庆市境内 4 种母质(第四系更新统老冲积物、须家河组砂岩风化物、石灰岩风化和紫色岩风化物)发育的 5 个代表性黄壤剖面为研究对象, 探讨其成土特点及系统分类归属, 并与其他分类体系进行参比。结果表明, 各供试土壤中, 须家河组砂岩母质发育的黄壤脱硅富铝化最为明显, 蓬莱镇组紫色砂、泥岩母质发育的黄壤次之, 石灰岩母质和更新统老冲积物发育的黄壤脱硅富铝化程度则相对较低; 相比而言, 须家河组砂岩母质发育的黄壤较为典型, 在海拔 350~1 300 m 范围内均有分布。依据《中国土壤系统分类检索(第三版)》, 5 个供试土壤剖面分别归为淋溶土和雏形土 2 个土纲、3 个亚纲、5 个土类、5 个亚类和 5 个土族; 与发生分类的参比表明, 供试土壤的系统分类与发生分类之间并非简单的一一对应关系, 相较于发生分类, 系统分类具有更高的区分度; 被中国土壤系统分类(CST)归为淋溶土的供试剖面分属活性淋溶土和高活性强酸土 2 个世界土壤资源参比基础(WRB)一级单元, 而被 CST 归为雏形土的供试剖面则同样也被 WRB 归为雏形土(一级单元)。

关键词: 重庆市; 黄壤; 成土过程; 系统分类; 参比

中图分类号: S159 **文献标志码:** A

Pedogenetic Process and Taxonomy of Yellow Soil in Chongqing, China

WENG Haolu, CI En[†], LI Song, LIAN Maoshan, CHEN Lin

(College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: 【Objective】 Yellow soil, an important arable land resource, is extensively distributed in Chongqing. However, so far, little is known about its pedogenetic process and attribution in the Chinese Soil Taxonomy. The aim of the study was to make up the missing knowledge in this aspect. 【Method】 In this study, 5 soil profiles were prepared in 4 plots of yellow soils developed separately from different parent material (Quaternary Pleistocene old alluvial deposits, sandstone weathering of Xujiahe Formation, limestone weathering and purple rock weathering) for analysis of soil forming environment, morphological characteristics and physico-chemical properties, to determine pedogenetic processes of the soils. 【Result】 Results show that in the Chongqing area, yellow soil that developed from sandstone of Xujiahe Formation was quite high in desilication and alumination degree of soils, followed by the soils developed from purple rock, and those developed from Quaternary

* 国家科技基础性工作专项(2014FY110200)、国家自然科学基金项目(41977002)资助 Supported by the Special Project of National Science and Technology Basic Research (No. 2014FY110200) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41977002)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: cien777@163.com

作者简介: 翁昊璐(1993—), 女, 内蒙古乌海人, 硕士, 主要从事土壤发生与分类研究。E-mail: weng151@sina.com

收稿日期: 2019-04-08; 收到修改稿日期: 2019-09-06; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-10-28

Pleistocene old alluvial deposits and limestone were relatively low in desilication and alumination. Comparatively, soils developed from sandstone weathering of Xujiahe Formation were more typical, which distributed in the altitude of 350–1 300 m. Correlation analysis of pH with clay $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ shows the coefficient was 0.71, reaching up to a significant level ($P < 0.05$), which meant that pH would regulate desilication and alumination of the yellow soils. And Fe_d/Fe_T in the soil was 50%–60%, this may because the climate in Guizhou was more humid and cold. 【Conclusion】 By referring to “Keys to the Chinese Soil Taxonomy (third Edition)”, the 5 profiles were found to have the following diagnostic horizons and characteristics: ochric epipedon, cambic horizon, argic horizon, udic soil moisture regime, redox features, mesic soil temperature regime, ferric property and alic evidence. The 5 profiles could tentatively be sorted into the soil orders of argosols and cambosols, and further into 3 suborders, 5 groups and 5 subgroups. Reference studies of the 5 soil profiles between various soil classification systems shows that the Chinese Soil Genetic Classification and the Chinese Soil Taxonomy (CST) do not have any simple one to one corresponding relationships, as for yellow soil in the Chinese Soil Genetic Classification, certain discriminations begin to appear at the genus and species levels, while CST demands soil information more quantified, and hence is more accurate in classification. And the reference between CST and World Reference Base for Soil Resources (WRB) shows that the soils belonged to argosols of CST were Luvisols and Alisols in the first level of WRB separately, and the soils belonged to Cambosols of CST were also Cambisols of WRB.

Key words: Chongqing; Yellow soil; Pedogenetic process; Chinese Soil Taxonomy; Reference

土壤是自然地理景观的镜子, 其性状能够反映出土壤形成过程中的自然条件特点, 是分析成土过程的重要依据^[1]。土壤分类是土壤信息的载体、土壤科学发展水平的反映、农业资源调查的基础和指导农业生产的依据, 同时也是国际土壤交流的媒介^[2-5]。当前土壤分类发展的趋势是量化、标准化, 土壤系统分类正逐渐成为世界土壤分类发展的主流^[6-7]。自 20 世纪 80 年代以来, 我国土壤系统分类研究一直保持着强劲的发展势头, 迄今为止, 江苏^[8]、河南^[9]、湖北^[10]、河北^[11]等诸多省份已相继开展了一系列土壤系统分类工作, 并建立了相应的土系, 中、西部地区的土壤系统分类工作也在开展中^[5, 12-14]。

黄壤是重庆市境内重要的土壤资源^[15], 其面积为 $2.37 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占土壤总面积的 28.78%, 主要分布于海拔 1 500 m 以下的中、低山和丘陵地带以及河流沿岸高阶地上, 其中以海拔 400~1 200 m 的分布面积最大, 占黄壤总面积的 75.22%, 是重庆市山区的重要旱粮和多种经济作物用地, 同时也是重要的林业基地, 因此, 明确重庆市黄壤的成土特点及系统分类归属对重庆市农业生产有着重要的意义。目前, 关注黄壤成土特点及其系统分类的研究相对较少^[16-17], 特别是对重庆市境内黄壤的成土特点和系统分类研究几乎为零, 针对这一现状, 本文选取重庆市境内 5 个黄壤剖面为研究对象, 分析其成土特点, 并对其系统分类进行检索, 以弥补该领域研

究的不足。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市地处我国西南部, 长江上游地区, 地跨 $105^\circ 11' \sim 110^\circ 11' \text{E}$, $28^\circ 10' \sim 32^\circ 13' \text{N}$ 之间的青藏高原与长江中下游平原的过渡地带, 辖区东西长 470 km, 南北宽 450 km, 幅员面积 $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。全市地势沿河流、山脉起伏, 由南北向长江河谷逐级降低, 表现为东南部和东北部高、中部和西部低的特征; 西北部和中部以丘陵、低山为主, 东南部和东北部多为中山地貌。属亚热带湿润季风气候, 年均气温 $16 \sim 18^\circ \text{C}$, 降水丰沛, 大部分地区年降水量 1 000~1 350 mm, 且多集中在 5—9 月份, 年均相对湿度 70%~80%, 年日照时数 1 000~1 400 h, 日照百分率仅为 25%~35%。

1.2 土壤样品采集

以重庆市土壤图为基础, 结合地质图、地形图等, 确定 5 个代表性黄壤样点, 利用 GPS 野外定位, 挖掘土壤剖面 (图 1), 划分剖面发生层次, 描述土壤剖面的形态特征, 并进行石灰反应和 pH 的现场速测, 按发生层次自下而上采集土壤样品, 供实验室分析使用。成土环境见表 1, 各剖面点的海拔在 244~1 291 m 范围内, 所处坡位不一, 土地利用方式为旱地和林地, 剖面 H01 由寒武系燧石灰岩风化

发育而来,剖面 H02 和 H03 发育于三叠系须家河组砂岩风化物,剖面 H04 发育于侏罗系蓬莱镇组紫色砂、泥岩风化物,剖面 H05 发育于第四系更新统老冲积物。

表 1 供试土壤的成土环境

Table 1 Soil forming environment of the tested soils relative to the profiles

剖面号	地点	海拔	地形	坡位	母质	土地利用
Profile No.	Location	Altitude/m	Topography	Slope position	Parent material	Land use
H01	彭水县鹿角镇	454	低山	中坡	寒武系燧石灰岩风化残坡积物	旱地
H02	铜梁区虎峰镇	389	低山	下坡	三叠系须家河组砂岩风化残坡积物	旱地
H03	石柱县沙子镇	1291	中山	上坡	三叠系须家河组砂岩风化残坡积物	林地
H04	巴南区南泉街道	602	低山	中坡	侏罗系蓬莱镇组砂、泥岩风化残坡积物	林地
H05	合川区三庙镇	244	阶地	高阶地	第四系更新统老冲积物	旱地

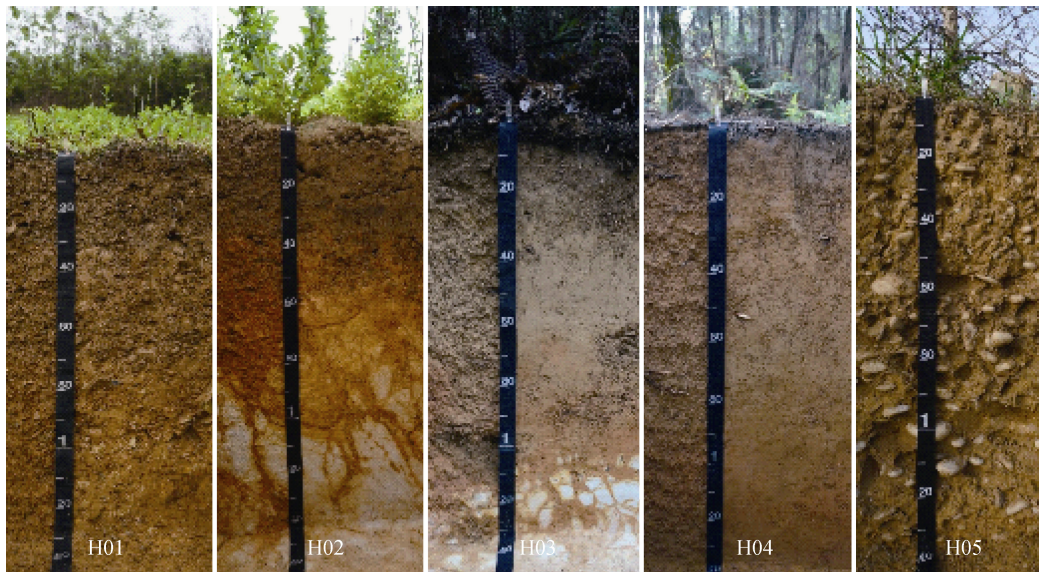


图 1 土壤剖面照片

Fig. 1 Pictures of the tested soil profiles

1.3 样品分析方法

土壤基本理化指标的测定依据《土壤调查实验室分析方法》^[18]和《土壤农化分析》^[19],主要包括:土壤颜色—Munsell 比色卡; pH(水提/盐提)—电位法(水/氯化钾溶液:土=2.5:1);全氮(TN)—凯式蒸馏法;有机碳(SOC)—重铬酸钾-硫酸消化法;交换性酸/交换性氢/交换性铝—氯化钾交换,氢氧化钠中和滴定法;交换性盐基—醋酸铵交换,原子吸收光谱法(Ca、Mg)和火焰光度法(K、Na);阳离子交换量(CEC)—醋酸铵(pH7.0)交换法;游离铁(Fe_d)—DCB 浸提比色法;矿质全量—X 射线荧光法;机械组成—吸管法;烧失水—

灼烧减重法。

2 结果

2.1 剖面形态特征

由表 2 可知,各供试剖面的层次发育明显,均有 A、B 层。土壤颜色以黄色、黄棕色为主,色调为 2.5Y、7.5YR 和 10YR,干态明度 5~8,干态彩度 1~8,润态明度 4~8,润态彩度 2~8;同一剖面的各层次之间颜色变化不明显,不同剖面之间颜色差异较大。仅剖面 H01 的下部土层有铁锰斑纹,剖面 H01、H02 和 H03 有黏粒胶膜存在。各供试土壤的黏粒含量介于 5.84%~

51.24%之间,除剖面 H01 下层土壤的黏粒含量较高外,其他剖面发生层土壤的颗粒组成均以粉粒或砂粒为主;供试剖面发生层的质地类型有壤质砂土、砂质壤土、粉

壤土、壤土、砂质黏壤土、粉质黏壤土、黏壤土、黏土等 8 种;除剖面 H04 通体皆为黏壤土外,其他剖面自上而下均存在质地变异。

表 2 供试土壤的剖面形态特征和颗粒组成

Table 2 Morphological characteristics and particle size composition of the tested soils relative to the profiles

剖面号 Profile No.	深度 Depth /cm	层次 Layer	土壤颜色 Soil color		新生体 New growth	颗粒组成 (美国制) Particle size composition (USDA) /%			质地 Texture
			干态 Dry	润态 Wet		砂粒 Sand (0.05~ 2 mm)	粉粒 Silt (0.002~ 0.05 mm)	黏粒 Clay (<0.002 mm)	
H01	0~15	Ap	10YR 6/4	10YR 5/4		38.99	26.32	34.69	黏壤土
	15~30	AB1	10YR 6/4	10YR 5/4		19.58	46.98	33.43	粉质黏壤土
	30~67	AB2	10YR 6/6	10YR 5/6		18.77	48.83	32.40	粉质黏壤土
	67~110	Btr1	10YR 6/6	10YR 5/6	铁锰斑纹 ^① , 黏粒胶膜 ^②	9.27	39.49	51.24	黏土
	110~130	Btr2	10YR 5/6	10YR 4/6	铁锰斑纹 ^① , 黏粒胶膜 ^②	12.61	39.12	48.27	黏土
H02	0~20	Ap	2.5Y 6/4	2.5Y 5/3		61.33	18.11	20.56	砂质黏壤土
	20~37	Bt1	2.5Y 6/6	2.5Y 5/6	黏粒胶膜 ^②	57.09	17.65	25.27	砂质黏壤土
	37~57	Bt2	2.5Y 7/8	2.5Y 6/6	黏粒胶膜 ^②	51.16	18.69	30.15	砂质黏壤土
	57~108	BC	2.5Y 8/6	2.5Y 8/8		70.48	14.26	15.26	砂质壤土
	108~141	C	2.5Y 8/1	2.5Y 8/2		76.45	17.72	5.84	壤质砂土
H03	0~19	Ah	2.5Y 7/3	2.5Y 6/3		30.30	48.71	20.99	壤土
	19~54	Bt1	2.5Y 7/3	2.5Y 6/3	黏粒胶膜 ^②	23.68	49.80	26.52	壤土
	54~82	Bt2	10YR 7/4	10YR 6/4	黏粒胶膜 ^②	26.35	43.83	29.83	黏壤土
	82~102	Bt3	10YR 6/6	10YR 5/6	黏粒胶膜 ^②	29.20	38.88	31.92	黏壤土
H04	0~14	Ah	10YR 7/6	10YR 6/6		27.17	38.93	33.90	黏壤土
	14~30	Bw1	10YR 7/6	10YR 6/6		25.80	37.41	36.79	黏壤土
	30~55	Bw2	10YR 7/6	10YR 6/6		24.08	39.92	35.99	黏壤土
	55~78	Bw3	10YR 7/4	10YR 6/4		24.38	42.01	33.61	黏壤土
	78~98	Bw4	10YR 7/8	10YR 6/8		33.62	34.63	31.74	黏壤土
H05	0~20	Ap	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3		47.88	31.39	20.73	壤土
	20~50	Bw	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3		27.03	54.83	18.14	粉壤土
	50~135	C	7.5YR 6/4	7.5YR 5/3		10.04	64.49	25.47	粉壤土

① Ferromanganese markings; ② Argillan

2.2 土壤化学性质

由表 3 可知,在各剖面发生层中,除剖面 H05 的 Bw 层 pH 为 6.7 外,其余剖面发生层 pH 均小于 6.5,其中剖面 H02 和 H04 的各发生层 pH 均小于 5.0,呈强酸性;各供试剖面有机碳含量的变化范围为 0.87~16.98 g·kg⁻¹,且各剖面有机碳含量均大体

呈现出随土层深度增加逐级下降的趋势;供试剖面发生层的 CEC 变化范围为 5.89~41.74 cmol·kg⁻¹,最低值出现在剖面 H02 的 C 层,其余剖面发生层 CEC 均大于 8.00 cmol·kg⁻¹;剖面 H02 和 H04 的交换性铝含量较高,剖面 H03 次之,剖面 H01 和 H05 含量较低;剖面 H05 和 H01 各发生层盐基饱和度均

大于 50%，呈饱和状态，剖面 H04 仅最底层 (Bw4) 的盐基饱和度大于 50%，剖面 H02 和 H03 各发生层盐基饱和度均小于 50%，呈不饱和状态。由图 2 可知，剖面 H01 的游离铁/全铁值最高，各发生层均达到 70%以上，其余剖面的游离铁/全铁值主要集中在 50%~60%之间。

土壤黏粒的硅铝率和硅铝铁率是反映土壤风化发育度的常用指标，本文选取各供试剖面受人为扰动较小的表下层段，测定其土壤黏粒的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 相对含量，并计算其硅铝率和硅铝铁

率，具体见表 4。由表 4 可知，剖面 H02、H03 和 H04 的黏粒硅铝率较低，均小于 3.00，剖面 H01 和 H05 的黏粒硅铝率较高，均在 3.00 以上，各供试剖面的黏粒硅铝铁率和硅铝率的变化趋势相同，两者的高低顺序均依次为 $\text{H01} > \text{H05} > \text{H04} > \text{H02} > \text{H03}$ 。此外，对于剖面 H01，其选测层段的黏粒硅、铝、铁含量变异不明显，硅铝率、硅铝铁率在上下层中的数值相同，剖面 H02、H03 和 H04 在选测层段中的黏粒硅铝率和硅铝铁率均表现出上层低而

表 3 供试土壤的化学性质

Table 3 Chemical characteristics of the tested soils

编号 Profile No.	深度 Depth /cm	pH		有机碳 Organic carbon / (g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC / (cmol·kg ⁻¹)	交换性铝 Exchangeable Al / (cmol·kg ⁻¹)	盐基饱和度 Base saturation /%
		H ₂ O	KCl				
H01	0~15	5.6	4.5	12.06	24.83	0.17	55.71
	15~30	5.6	4.4	12.28	27.60	0.11	51.69
	30~67	5.7	4.5	6.98	32.45	0.40	51.45
	67~110	5.8	4.5	3.83	27.24	0.26	58.27
	110~130	5.8	4.2	3.53	31.31	0.13	50.37
H02	0~20	4.6	3.6	16.98	16.00	7.19	44.61
	20~37	4.3	3.4	10.36	18.32	9.43	33.24
	37~57	4.3	3.5	8.27	18.53	10.66	36.20
	57~108	4.3	3.6	3.24	12.14	7.84	48.96
	108~141	4.7	4.1	2.49	5.89	3.02	40.38
H03	0~19	4.8	4.2	11.40	15.15	1.90	43.87
	19~54	4.7	4.2	4.27	12.66	2.91	38.58
	54~82	5.2	4.1	2.46	12.95	3.11	37.81
	82~102	5.2	4.0	2.25	22.00	3.90	33.81
H04	0~14	4.3	3.5	6.03	36.01	7.11	35.79
	14~30	4.3	3.6	3.01	38.77	7.24	36.45
	30~55	4.3	3.7	1.76	41.74	6.48	38.71
	55~78	4.5	3.7	1.69	33.73	5.67	43.67
	78~98	4.8	3.7	0.87	27.35	5.84	51.23
H05	0~20	5.6	4.3	10.37	9.81	0.25	59.18
	20~50	6.7	—	4.82	8.52	—	73.42
	50~135	6.3	4.8	4.28	12.74	0.06	62.13

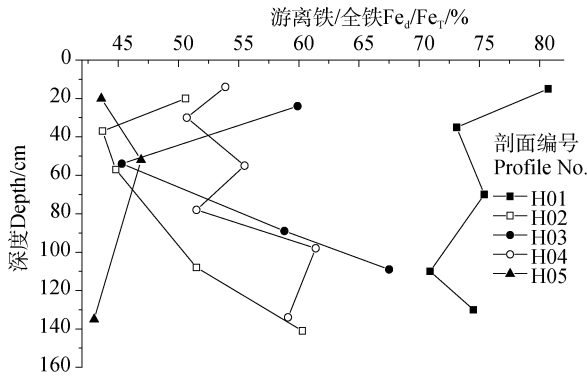


图2 供试土壤游离铁/全铁的剖面变化
Fig. 2 Variation of Fe_d/Fe_T in the tested soil profiles

由图3可知,供试土壤的烧失水含量在 1.17%~11.75%之间,其中,剖面 H02 和 H05 烧失水含量较高,均在 7.5%以上,且各层次之间烧失水的含量差

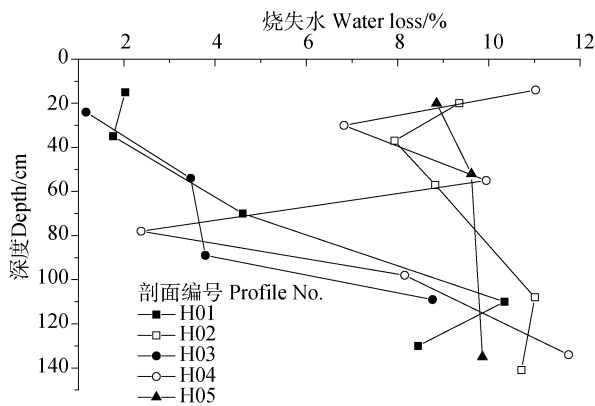


图3 供试土壤烧失水的剖面变化
Fig. 3 Variation of water loss in the tested soil profiles

异不大,其余剖面烧失水波动幅度较大,如剖面 H04 的 Bw3 层烧失水为 2.37%,而 C 层为 11.75%,波动幅度达到 9.37%。

2.3 供试土壤的系统分类归属

依据中国土壤系统分类的相关方法和标准^[20],鉴别供试土壤的诊断层和诊断特性,结果见表 5。从表 5 可知,各供试土壤的诊断层和诊断特性主要涉及淡薄表层、锥形层、黏化层等诊断层以及常湿润和湿润土壤水分状况、氧化还原特征、热性土壤温度状况、铁质特征、铝质现象等诊断特性。根据供试剖面所在区县历年的气象观测数据,依据 Penman 公式^[20]估算土壤水分状况,其中剖面 H03 分布于中山上部,海拔较高,多云雾,年干燥度小于 1,且每月干燥度<1,为常湿润土壤水分状况,其余剖面年干燥度<1,但每月干燥度并不都小于 1,为湿润土壤水分状况。此外,各供试剖面均分布于亚热带季风气候区,年均土温 16.3~19.1℃,具有热性土壤温度状况。

根据供试土壤的诊断层和诊断特性(表 5),依照《中国土壤系统分类检索(第三版)》^[20],对 5 个供试剖面进行分类检索,将其分别划归为 2 个土纲(淋溶土、锥形土)、3 个亚纲(常湿淋溶土、湿润淋溶土和湿润锥形土),5 个土类(筒育常湿淋溶土、铁质湿润淋溶土、铝质湿润淋溶土、铝质湿润锥形土和筒育湿润锥形土)和 5 个亚类,在此基础上,再依据“中国土壤系统分类土族和土系划分标

表 4 供试土壤的黏粒化学组成

Table 4 Clay chemical composition of tested soils

剖面编号 Profile No.	深度 Depth /cm	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	硅铝率 SiO ₂ /Al ₂ O ₃	硅铝铁率 SiO ₂ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)
H01	15~30	47.41	24.00	9.72	3.36	2.75
	30~67	47.42	24.01	9.82	3.36	2.75
H02	20~37	41.85	31.59	9.19	2.25	1.96
	37~57	43.46	27.88	9.83	2.65	2.23
H03	19~54	41.73	32.12	9.14	2.21	1.93
	54~82	41.68	28.03	9.96	2.53	2.13
H04	14~30	41.70	26.78	9.78	2.65	2.21
	30~55	44.65	27.45	10.04	2.77	2.31
H05	20~50	45.81	24.43	11.09	3.19	2.55

表 5 供试土壤的诊断层和诊断特性

Table 5 Diagnostic horizons and characteristics of the tested soils

编号 Profile No.	淡薄表层 Ochric epipedon	雏形层 Cambic horizon	黏化层 Argic horizon	水分状况 Soil moisture regimes	氧化还原特征 Redox eatures	温度状况 Soil temperature regimes	铁质特性 Ferric property	铝质现象 Alic evidence
H01	√		√	湿润 Udic	√	热性 Thermic	√	
H02			√	湿润 Udic		热性 Thermic	√	√
H03			√	常湿润 Perudic		热性 Thermic	√	√
H04	√	√		湿润 Udic		热性 Thermic	√	√
H05		√		湿润 Udic		热性 Thermic	√	

准”^[21]，确定各供试剖面的土族鉴别特征（表 6），划分为 5 个土族，具体见表 7。

2.4 供试土壤的分类参比

目前，我国土壤分类依然处于量化的系统分类与定性的发生分类并存的阶段^[3]，系统分类工作也以发生学原理为指导，且已有的大量土壤资料多是在土壤发生分类的基础上积累起来的^[4]，开展土壤发生分类与系统分类的参比研究对于我国土壤科学发展的相互转化具有很大的促进作用^[5]，故本文也将 5 个供试剖面的发生分类和系统分类归属进行了参比，具体见表 7。

由表 7 可知，在发生分类中，5 个供试剖面归属为 1 个土类、1 个亚类和 4 个土属，若采用系统

分类，则可将其划分为 5 个土类、5 个亚类和 5 个土族，区分度明显高于发生分类；虽然发生分类在土属上也体现了一定的区分度。但与系统分类的土族之间也并不是一一对应的关系。总的来看，系统分类使供试黄壤的分类更加细化，提高了其分类的准确性。表 8 为供试剖面在中国土壤系统分类(CST)和世界土壤资源参比基础(WRB)^[22]中的分类参比。由表 8 可知，若采用 WRB，5 个供试剖面可划归为 3 个一级单元（高活性淋溶土、高活性强酸土和雏形土）和 5 个二级单元，表内列出的 WRB 二级单元仅使用了主要限定词（Principal qualifiers）；供试剖面的淋溶土土纲（CST）与高活性淋溶土和高活性强酸土 2 个 WRB 一级单元相对应，其 CST 的雏

表 6 供试土壤的土族鉴别特征

Table 6 Identifying characteristics of soil family for the tested soils

剖面编号 Profile No.	颗粒大小级别 Soil texture	矿物学类别 Mineralogical class	石灰性和酸碱反应级别 Calcareous and acid-base reaction	温度等级 Temperature class
H01	粗骨黏质	伊利石型	非酸性	热性
	Clayey-skeletal	Illite type	Non-acidic	Thermic
H02	砂质	硅质型	酸性	热性
	Sandy	Siliceous type	Acidic	Thermic
H03	黏壤质	硅质混合型	酸性	热性
	Clay-loamy	Siliceous mixed type	Acidic	Thermic
H04	黏壤质	硅质混合型	酸性	热性
	Clay-loamy	Siliceous mixed type	Acidic	Thermic
H05	粗骨壤质	硅质混合型	非酸性	热性
	Loamy-skeletal	Siliceous mixed type	Non-acidic	Thermic

表 7 供试土壤的系统分类及其与发生分类的参比

Table 7 Classification of the tested soils in CST and reference of the tested soils between Chinese Soil Genetic Classification (CSGC) and Chinese Soil Taxonomy (CST)

剖面 编号 Profile No.	中国土壤系统分类 (CST)			中国土壤发生分类 (CSGC)		
	土类 Group	亚类 Subgroup	土族 Family	土类 Group	亚类 Subgroup	土属 Genus
H01	铁质湿润淋溶土 Ferri-Udic Argosols	斑纹铁质湿润 淋溶土 Mottlic Ferri-Udic Argosols	粗骨黏质伊利石型非酸性热性-斑纹铁质湿润淋溶土 Clayey-skeletal, illite, non-acidic, thermic-Mottlic Ferri-Udic Argosols	黄壤 Yellow soil	黄壤 Yellow soil	矿质黄泥土 Mineral yellow soil
H02	铝质湿润淋溶土 Ali-Udic Argosols	黄色铝质湿润 淋溶土 Xanthic Ali-Udic Argosols	砂质硅质型酸性热性-黄色铝质湿润淋溶土 Sandy, siliceous, acidic, thermic-Xanthic Ali-Udic Argosols	黄壤 Yellow soil	黄壤 Yellow soil	冷砂黄泥土 Cold sandy yellow soil
H03	筒育常湿淋溶土 Hapli-Perudic Argosols	铝质筒育常湿 淋溶土 Alic Hapli-Perudic Argosols	黏壤质硅质混合型酸性热性-铝质筒育常湿淋溶土 Clay-loamy, siliceous mixed, acidic, thermic-Alic Hapli-Perudic Argosols	黄壤 Yellow soil	黄壤 Yellow soil	冷砂黄泥土 Cold sandy yellow soil
H04	铝质湿润锥形土 Ali-Udic Cambosols	黄色铝质湿润 锥形土 Xanthic Ali-Udic Cambosols	黏壤质硅质混合型酸性热性-黄色铝质湿润锥形土 Clay-loamy, siliceous mixed, acidic, thermic-Xanthic Ali-Udic Cambosols	黄壤 Yellow soil	黄壤 Yellow soil	砂黄泥土 Sandy yellow soil
H05	筒育湿润锥形土 Hapli-Udic Cambosols	普通筒育湿润 锥形土 Typic Hapli-Udic Cambosols	粗骨壤质硅质混合型非酸性热性-普通筒育湿润锥 形土 Loamy-skeletal, siliceous mixed, non-acidic, thermic-Typic Hapli-Udic Cambosols	黄壤 Yellow soil	黄壤 Yellow soil	老冲积黄泥土 Old alluvial yellow soil

表 8 供试土壤在中国土壤系统分类与世界土壤资源参比基础中的分类参比

Table 8 Reference of the tested soils between Chinese Soil Taxonomy (CST) and World Reference Base for Soil Resources (WRB)

剖面编号 Profile No.	中国土壤系统分类 (CST)		世界土壤资源参比基础 (WRB)	
	土纲 Order	土类 Group	一级单元 First Level	二级单元 Second level
H01	淋溶土 Argosols	铁质湿润淋溶土 Ferri-Udic Argosols	高活性淋溶土 Luvisols	铁质高活性淋溶土 Ferric Luvisols
	淋溶土 Argosols	铝质湿润淋溶土 Ali-Udic Argosols	高活性强酸土 Alisols	筒育高活性强酸土 Haplic Alisols
H03	淋溶土 Argosols	筒育常湿淋溶土 Hapli-Perudic Argosols	高活性淋溶土 Luvisols	筒育高活性淋溶土 Haplic Luvisols
	锥形土 Cambosols	铝质湿润锥形土 Ali-Udic Cambosols	锥形土 Cambisols	不饱和锥形土 Dystric Cambisols
H05	锥形土 Cambosols	筒育湿润锥形土 Hapli-Udic Cambosols	锥形土 Cambisols	饱和锥形土 Eutric Cambisols

形土纲则与 WRB 一级单元雏形土相对应；此外，供试剖面的 CST 土类与 WRB 二级单元呈一一对应的关系。

3 讨 论

3.1 重庆市黄壤的成土特点

有学者认为黄壤是在“水化-脱硅富铝化”风化物的基础上发育的，也有学者认为黄壤是红壤发育的早期阶段，无论是黄壤或水化红壤，发生原因均归因于氧化铁的水化^[23, 24]。前人的研究表明，黄壤的分布范围较广^[25-27]，西南地区由于山地高原特殊的生物—气候条件与地貌条件，黄壤分布的下限变化较大。本文调查显示，重庆市境内海拔 244 m 处即开始有黄壤分布，供试黄壤样点的最高海拔达到 1 291 m，这表明重庆市黄壤的垂直分布带幅较宽，海拔上限可达 1 300 m 左右，下限在 250 m 左右；第四系更新统老冲积物和须家河组砂岩均可在 < 400 m 海拔处形成黄壤，相比而言，须家河组砂岩发育的黄壤分布海拔变幅最大。

土壤黏粒硅铝率和硅铝铁率可反映土壤的脱硅富铝化程度，各供试剖面的黏粒硅铝率和硅铝铁率高低顺序均依次为 H01>H05>H04>H02>H03，表明石灰岩母质发育的黄壤（H01）脱硅富铝化程度最低，其次是更新统老冲积物发育的黄壤（H05），而须家河组砂岩发育的黄壤（H02、H03）脱硅富铝化程度则相对较高；同典型黄壤的黏粒硅铝率（2.00~2.50）^[28]相比，须家河组砂岩发育的黄壤黏粒硅铝率与之最为相近，而蓬莱镇组砂、泥岩发育的黄壤（H04）黏粒硅铝率则要稍高于典型黄壤，表明须家河组砂岩发育的黄壤是重庆市境内一类较为典型的黄壤。此外，剖面 H01 中上下层的黏粒硅铝率、硅铝铁率均相同，且上下层中 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 的相对含量变化不大（表 4），表明上下层土壤的风化发育度基本一致，而剖面 H02、H03 和 H04 中黏粒硅铝率、硅铝铁率则出现上层低于下层的现象，这可能是上层的风化发育度高于下层所致。

土壤 pH 是反映其母质属性、风化淋溶状况的重要指标，供试土壤 pH 与其黏粒硅铝率的相关性分析显示，两者呈显著相关（ $r=0.71$ ， $P<0.05$ ），表明土壤 pH 高低会影响黄壤的发育过程。剖面 H01

由石灰岩风化发育而成，母质呈石灰性，在脱硅富铝化之前，要经历脱钙过程，故脱硅富铝化程度较低；剖面 H05 的成土母质源于较新地层，发育时间短，脱硅富铝化程度虽高于剖面 H01，但明显低于其他剖面；剖面 H04 发育于蓬莱镇组砂、泥岩风化物，成土母质虽也含一定钙质，但含量不及石灰岩风化物，加之所处海拔较高，淋溶作用强，盐基易淋失，使土壤呈酸性，导致其脱硅富铝化程度要高于剖面 H01 和 H05，这也表明海拔对重庆市境内含钙母质形成黄壤的过程有影响；剖面 H02 和 H03 均由须家河组砂岩风化发育而成，母质呈酸性，无需经历脱钙过程，使得其脱硅富铝化程度较深。

将供试黄壤与贵州典型黄壤^[26, 29]对比可知，供试黄壤的盐基饱和度较高，大部分可达到 40%~60%，而贵州典型黄壤的盐基饱和度则多小于 20%，表明供试黄壤的盐基淋溶强度不及贵州典型黄壤，这可能与贵州黄壤受高原气候影响，多为常湿润土壤水分状况有关；贵州典型黄壤的铁游离度为 60%~80%，离铁作用强，而在供试黄壤中，除剖面 H01 的铁游离度高于 70%外，其余剖面的铁游离度均集中在 50%~60%之间，要稍低于贵州典型黄壤；此外，供试黄壤的烧失水仅为 1.17%~11.75%，含量较低，通常典型黄壤的烧失水能达到 9%~15%，这可能与贵州典型黄壤分布区的气候更加湿冷有关。

3.2 重庆市黄壤的系统分类及其与发生分类和 WRB 的参比

在系统分类归属上，供试黄壤分别归为淋溶土和雏形土 2 个土纲、3 个亚纲、5 个土类和 5 个亚类。各供试剖面中，仅剖面 H01 有铁锰斑纹，这可能与其下部土层黏粒含量较高有关，加之所处位置靠近诸佛江，降水丰沛，使得透水性较差的黏化层易出现间歇性水分饱和，进而有铁锰斑纹形成，故被归为铁质湿润淋溶土的斑纹亚类。剖面 H02、H03 和 H04 均具有铝质现象，这与黄壤的 pH 低、交换性铝含量高等特征^[26]相符；此外，剖面 H02 和 H04 分布于低山坡地，所处区域多云雾，土壤水分状况为偏向常湿润的湿润土壤水分状况，故分别被归为铝质湿润淋溶土和铝质湿润雏形土的黄色亚类。

由供试土壤的系统分类和发生分类参比可知，相较于发生分类，中国土壤系统分类（CST）具有

更高的区分度, 本文仅选取了发生分类的 1 个土类 (黄壤) 作为供试土壤, 但供试的 5 个代表性黄壤剖面在系统分类中则分属于 5 个土类, 并将发育典型的黄壤归为 CST 淋溶土纲的铝质土类或亚类, 这充分表明相较于发生分类, CST 分类体系对供试土壤的类型区分更加细化、准确。由供试土壤的 CST 与 WRB 分类参比可知, 被归为淋溶土土纲 (CST) 的黄壤可分属高活性淋溶土 (Luvisols) 和高活性强酸土 (Alisols) 2 个 WRB 一级单元, 被归为雏形土土纲 (CST) 的黄壤则同样也被归为 WRB 的雏形土一级单元, 这与龚子同等^[30]的参比结果类似; 此外, 供试土壤在 CST 中的土类归属和在 WRB 中仅用主要限定词修饰的二级单元归属呈一一对应关系, 个别 CST 土类的词首和 WRB 二级单元的主要限定词相似, 表明两种分类之间有较好的对应性, 但由于 CST 和 WRB 的分类原则和侧重点有所不同, 故也存在部分用于供试土壤 CST 亚纲或土类区分的诊断特性并未在 WRB 二级单元区分中体现, 有些指标可能会体现在一级单元区分中。

4 结 论

在重庆市境内, 须家河组砂岩母质发育的黄壤脱硅富铝化最为明显, 蓬莱镇组紫色砂、泥岩母质发育的黄壤次之, 石灰岩母质和更新统老冲积物发育的黄壤脱硅富铝化程度则相对较低; 相比而言, 须家河组砂岩母质发育的黄壤较为典型。5 个供试黄壤剖面在中国土壤系统分类 (CST) 中分别被归为 2 个土纲 (淋溶土和雏形土)、3 个亚纲、5 个土类、5 个亚类和 5 个土族, 其 CST 归属与发生分类归属之间不是一一对应关系, 相较于发生分类, CST 对供试黄壤具有更高的区分度, 分类更加细化、准确; 被中国土壤系统分类 (CST) 归为淋溶土的供试黄壤分属活性淋溶土和高活性强酸土 2 个世界土壤资源参比基础 (WRB) 一级单元, 而被 CST 归为雏形土的供试黄壤则同样也被 WRB 归为雏形土 (一级单元)。

参考文献 (References)

- [1] Wang X L, Zhang F R, Wang S, et al. Discussion on characteristics, pedogenetic process and taxonomy of red clay in Beijing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 238—246.[王秀丽, 张凤荣, 王数, 等. 北京地区红色黏土特性及成土过程和系统分类探讨[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 238—246.]
- [2] Hu H X, Yu Z X, Wang J K, et al. Comparison of two kinds of soil classification systems and the prospects of soil classification[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2002, 30(5): 670—672.[胡宏祥, 於忠祥, 汪景宽, 等. 2 种土壤分类体系的比较及其展望[J]. *安徽农业科学*, 2002, 30(5): 670—672.]
- [3] Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C, et al. Soil reference on the bases of Chinese Soil Taxonomy[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1): 1—5.[龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 以中国土壤系统分类为基础的土壤参比[J]. *土壤通报*, 2002, 33(1): 1—5.]
- [4] Chen Z C, Gong Z T, Zhang G L, et al. Correlation of soil taxa between Chinese Soil Genetic Classification and Chinese Soil Taxonomy on various scales[J]. *Soils*, 2004, 36(6): 584—595.[陈志诚, 龚子同, 张甘霖, 等. 不同尺度的中国土壤系统分类参比[J]. *土壤*, 2004, 36(6): 584—595.]
- [5] Qu X L, Long H Y, Xie P, et al. Genetic characteristics and classification of typical sierozem in central Ningxia, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 75—87.[曲潇琳, 龙怀玉, 谢平, 等. 宁夏地区典型灰钙土的发育特性及系统分类研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 75—87.]
- [6] Hartemink A E. The use of soil classification in journal papers between 1975 and 2014[J]. *Geoderma Regional*, 2015, 5: 127—139.
- [7] Stolt M H, Needelman B A. Fundamental changes in soil taxonomy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(4): 1001—1007.
- [8] Wang H, Huang B, Sun W X, et al. Soil series of Rugao County, Jiangsu and their productivity and eco-environmental characteristics[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 862—874.[王虹, 黄标, 孙维侠, 等. 江苏省如皋市土系及其生产性能和生态环境特征[J]. *土壤学报*, 2012, 49(5): 862—874.]
- [9] Ju B, Wu K N, Li L, et al. Characteristic horizons and classification of soil series typical of Henan Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1): 48—57.[鞠兵, 吴克宁, 李玲, 等. 河南省典型土系的特定土层特征与分类研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 48—57.]
- [10] Cai C F, Hu Y H, Wang Q Y. A study on soil series in a typical region of Wuhan[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(2): 49—52.[蔡崇法, 胡泳海, 王庆云. 武汉市典型地区土系的研究[J]. *土壤通报*, 2001, 32(2): 49—52.]
- [11] An H Y, Long H Y, Liu Y, et al. Taxonomic classification of the typical soils on Bashang plateau of Chengde[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 448—458.[安红艳, 龙怀玉, 刘颖, 等. 承德市坝上高原典型土壤的

- 系统分类研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 448—458.]
- [12] Ci E, Tang J, Lian M S, et al. Higher category partition for purple soils in Chongqing in Chinese Soil Taxonomy[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3): 569—584. [慈恩, 唐江, 连茂山, 等. 重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 569—584.]
- [13] Zhang C, Yuan D G, Song Y G, et al. Taxonomy of Soils Featuring Organic Soil Materials in West Sichuan, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 48—60. [张楚, 袁大刚, 宋易高, 等. 川西地区具有有机土壤物质特性土壤的系统分类[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 48—60.]
- [14] OuYang N X, Zhang Y Z, Sheng H, et al. Taxonomy of granite-derived Red soils in eastern Hunan[J]. *Soils*, 2017(4): 828—837. [欧阳宁相, 张杨珠, 盛浩, 等. 湘东地区花岗岩红壤在中国土壤系统分类中的归属[J]. 土壤, 2017(4): 828—837.]
- [15] Dai S, Jiang G Y, Xia Q, et al. Effects of slopes and rainfall intensities on runoff and sediment characteristic of arid hillside land with Yellow soil in Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 1—5, 11. [代数, 蒋光毅, 夏清, 等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产生产沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 1—5, 11.]
- [16] Zeng Y E. Taxonomy, Development and utilization of mountainous yellow soil in Wuyi mountain[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(21): 10095—10096. [曾月娥. 武夷山山地黄壤的系统分类与开发利用[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(21): 10095—10096.]
- [17] Gong Z T, Wang Z Q, Wei Q F, et al. The yellow soil in the mountain of West Hunan[J]. *Soils*, 1989, 21(2): 98—100. [龚子同, 王振权, 韦启璠, 等. 湘西山地的黄壤[J]. 土壤, 1989, 21(2): 98—100.]
- [18] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory analysis method[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.]
- [19] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [20] Soil Taxonomy Group, Nanjing Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. 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]. 第3版. 合肥: 中国科技大学出版社, 2001.]
- [21] 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.]
- [22] IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2014[M]. FAO, Rome, 2015.
- [23] Ye Z J. Opinion on genetic classification of yellow earth[J]. *Zhejiang Forestry University Science and Technology Communication*, 1984, 21(4): 447—454. [叶仲节. 对黄壤发生分类的看法[J]. 浙江林学院科技通讯, 1984, 21(4): 447—454.]
- [24] Guizhou Provincial Department of Agriculture, Nanjing Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. Guizhou soil[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1980. [贵州省农业厅, 中国科学院南京土壤研究所. 贵州土壤[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1980.]
- [25] Zou G C, Zhao Q G. Soil regionalization in southern Yunnan Guizhou Plateau[J]. *Special Soil Issue*, 1964, 36. [邹国础, 赵其国. 云贵高原南部土壤区划[J]. 土壤专刊, 1964, 36.]
- [26] Zou G C. Distribution law of soil geography in Yunnan Guizhou Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1965, 13(3): 253—261. [邹国础. 云贵高原土壤地理分布规律[J]. 土壤学报, 1965, 13(3): 253—261.]
- [27] Ma R Z. General principles of geographical distribution of mountain soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1965, 13(1): 1—7. [马溶之. 中国山地土壤的地理分布规律[J]. 土壤学报, 1965, 13(1): 1—7.]
- [28] Zhang F R. Soil geography[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016. [张凤荣. 土壤地理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.]
- [29] National Soil Census Office. Chinese Soils[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. [全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.]
- [30] Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C, et al. Soil reference on the bases of Chinese Soil Taxonomy[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1): 1—5. [龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 以中国土壤系统分类为基础的土壤参比[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 1—5.]

(责任编辑: 檀满枝)