

DOI: 10.11766/trxb201812210567

胡瑾, 慈恩, 王术芳, 连茂山, 翁昊璐, 陈林. 重庆市更新统沉积物发育土壤的特性及分类[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 273–283.
HU Jin, CI En, WANG Shufang, LIAN Maoshan, WENG Haolu, CHEN Lin. Genetic Characteristics and Classification of Soil Derived from Pleistocene Sediments under Cultivation in Chongqing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 273–283.

重庆市更新统沉积物发育土壤的特性及分类*

胡瑾, 慈恩[†], 王术芳, 连茂山, 翁昊璐, 陈林

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 选取重庆市境内分别由夹卵石黄色黏土(PC)、黄色黏土(YC)、红色黏土(RC)等更新统沉积物发育的 6 个典型旱地和水田土壤剖面为研究对象, 探讨其土壤特性及系统分类归属。结果表明, PC 发育的旱地土壤富含砾石且无铁锰斑纹, YC 发育的旱地土壤不含砾石但有铁锰斑纹, RC 发育的旱地土壤耕作层以下黏粒淀积明显。在 PC 和 YC 发育的水田土体内, 上部土层的有机质累积明显且彩度较下部低, 游离铁在下部土层有明显聚积, 而母质为 RC 的水田土体内游离铁则迁移不明显。3 个旱地土壤分别被划归为普通筒育湿润锥形土、普通铁质湿润锥形土和红色铁质湿润淋溶土 3 个亚类, 3 个水田土壤则分别被划归为普通铁聚水耕人为土和普通筒育水耕人为土 2 个亚类, 共可建立 6 个土族和 6 个土系。YC 发育的普通铁质湿润锥形土有铁锰斑纹存在, 这是古水文条件的反映, 现已完全脱离地下水的影 响, 故不再具有潮湿土壤水分状况; 沉积物特征、区域气候等会影响旱地土体内黏粒的淋溶淀积, 进而影响其土纲划分; 水耕活动使更新统沉积物发育的锥形土和淋溶土演变为水耕人为土; 地块筛选、坡改梯、拣拾等人为活动会显著减少 PC 发育的水田土体内砾石含量, 影响其土族控制层段的颗粒大小级别判定。

关键词: 更新统沉积物; 耕作条件; 土壤特性; 土壤系统分类; 重庆

中图分类号: S155.3 **文献标志码:** A

Genetic Characteristics and Classification of Soil Derived from Pleistocene Sediments under Cultivation in Chongqing

HU Jin, CI En[†], WANG Shufang, LIAN Maoshan, WENG Haolu, CHEN Lin

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

Abstract: 【Objective】 It is of great significance to explore genetic characteristics and evolution laws of the soils derived from Pleistocene sediments to the study of geological evolution and ancient climate change and the management of the soil resources. Chongqing is a region dominated by mountains and hills, and hence known as “Mountain City”, where the soil layer is thin, except for the soils derived from Pleistocene sediments, which are often quite thick in soil layer and hence high in land utilization

* 国家科技基础性工作专项 (2014FY110200)、中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2017B027) 和西南大学科技创新“光炯”培育项目 (2016001) 资助 Supported by the Special Project of National Science and Technology Basic Research (No. 2014FY110200), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. XDJK2017B027) and The Science and Technology Innovation “GUANG Jiong” Project of Southwest University (No. 2016001)

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

作者简介: 胡瑾 (1999—), 女, 云南昭通人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤发生与分类。E-mail: hujin0421@163.com

收稿日期: 2018–12–21; 收到修改稿日期: 2019–02–28; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019–03–26

rate, so it is the important agricultural resource of Chongqing. However, so far little has been reported on genetic characteristics and classification of the soils and effects of cultivation on evolution of their properties. Therefore, this paper addressed the issue in an attempt to promote development of quantitative classification of the soils, to provide certain theoretic bases and important ideas for rational utilization of the soils, relative to soil type. 【Method】 Field soil surveys were conducted to specify six soil profiles, 3 upland soils and 3 paddy soils, derived from Pleistocene sediments of pebble-mixed yellow clay (PC), yellow clay (YC) and red clay (RC), of which soil morphological characteristics were obtained through investigations of their soil-forming environments. PC and YC (commonly known as old alluvial sediments) are mainly distributed on the high terraces on both sides of the Jialing River and its main tributaries, and RC mainly on the karst plains and some valleys in Xiushan County. Soil samples were collected from the profiles by horizon for analysis of physico-chemical properties. Based on the comparative analysis, genetic characteristics and classification of the soils relative to cultivation mode were discussed, and diagnostic horizons and diagnostic characteristics of the soils were determined, and the soils were attributed and named in CST level by level in the light of the “Chinese Soil Taxonomy (3rd ed.)”. 【Result】 The upland soil derived from PC was found to have a lot of gravels but no iron-manganese speckles or stripes, while that derived from YC was found to be in a reverse condition and that derived from RC to have apparent clay deposition right beneath the plow layer. In the profiles of paddy soils derived from PC and YC, organic matter accumulation was obvious in the upper part, while iron oxide accumulation was in the lower part, so the upper part was lowery the lower part in chroma. However in the paddy soil derived from RC, migration of iron oxide was not as obvious. The 3 upland soils were sorted into 3 subgroups, i.e. Typic Hapli-Udic Cambosols, Typic Ferri- Udic Cambosols and Red Ferri -Udic Argosols, and further into 3 soil families, i.e. Coarse bone loamy silica non-acid thermic -Typic Hapli-Udic Cambosols, Clay loamy silica mixture non-acid thermic - Typic Ferri-Udic Cambosols and Heavy clayey illitic mixture acid thermic - Red Ferri - Udic Argosols, separately. The 3 paddy soils were sorted into 2 subgroups, i.e. Typic Fe-accumuli- Stagnic Anthrosols and Typic Hapli- Stagnic Anthrosols, and further into 3 soil families, i.e. Clay loamy silica mixture non-acid thermic - Typic Fe-accumuli - Stagnic Anthrosols, Clayey illitic mixture non-acid thermic - Typic Fe - accumuli - Stagnic Anthrosols and Clayey kaolinitic non-acid thermic - Typic Hapli - Stagnic Anthrosols, separately. The six soils formed 6 soil series in total. 【Conclusion】The soils derived from YC have iron-manganese speckles or stripes, which are reflections of paleo-hydrological conditions, but now they are completely free from the influence of groundwater and no longer were the aquic soil moisture regime. The characteristics of sediments and regional climate do have some impact on clay deposition in the upland soils, thus affecting their classification on the soil order level. Long-term paddy cultivation would transform Cambosols and Argosols derived from Pleistocene sediments into Stagnic Anthrosols. Artificial activities, such as field screening, changing slopes into terraces, gathering pebbles et al, would reduce gravel content in the paddy soil derived from PC, which would in turn influence particle-size fractionation of the soil layers controlled by soil family.

Key words: Pleistocene Sediments; Cultivation conditions; Genetic Characteristics; Chinese soil taxonomy; Chongqing

更新统的陆相沉积物按沉积相的不同主要分为风积黏土、冲积黏土等, 研究其土壤发生与演变规律对地质变迁、古气候变化和土壤资源的管理有重要意义^[1-5]。我国已有学者在辽宁省^[6]、湖北省^[7]和湖南省^[8]等区域开展了更新统沉积物发育土壤的类型归属等相关研究。由于耕作环境、耕作方式和模式等存在明显差异, 旱地和水田在人为耕作下的成土环境、成土过程和发生特征均有所不同, 从而导致土壤特性和类型不同。韩光中等^[9-10]研究了母质对南方丘陵区水耕人为土属性演变的影响, 认为水

耕对成土过程有重要作用。重庆市地貌以山地和丘陵为主, 大部分土壤较浅薄, 但境内水系发达, 河谷两侧的丘陵和山间平坝常遗留有大量古河道, 在其形成的高阶地上常有更新统地层零星出露^[11-13], 而更新统沉积物发育的土壤则较为深厚, 土地利用率高, 是重庆市重要的农业土壤资源。土壤分类是土壤学最基础的研究领域, 以诊断层和诊断特性为基础、以定量化为特点的土壤系统分类目前已成为国际土壤分类的主流^[14-15]。近年来我国在土壤系统分类领域发展迅速, 取得了诸多成果^[16-23]。重庆市对

紫色土、冲积物发育土壤和中山区土壤已开展了相关工作^[16-18]，但未见更新统沉积物发育土壤的分类及耕作条件对其特性影响的相关研究。为此，本文探讨了耕作条件下重庆市几类更新统沉积物发育土壤的特性及分类，旨在推动重庆市土壤定量化分类的进程，为更深入地认识土壤演变机制及合理利用每一类土壤提供重要思路和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

重庆市地处四川盆地东部，属我国陆地地势第二级阶梯；全市大致可分为渝东北中山区、渝东南中山区、渝西方山丘陵区和中部分行岭谷区（低山、丘陵区）等 4 个地貌分区；全市属亚热带湿润季风气候，具有夏热冬暖、光热同季、湿润多阴、无霜期长、立体气候显著等特点；其年均气温为 17.5℃，年均降水量为 1 125 mm，年均相对湿度为 80%，年均日照时数为 1 000 h~1 400 h，日照百分率仅为 25%~35%，为全国年日照最少的地区之一^[16]。在重庆市境内，有多种更新统沉积物分布，其中，夹卵石黄色黏土和黄色黏土（两者俗称“老冲积物”）主要分布在嘉陵江及其主要支流两岸的高阶地上，红色黏土主要分布在秀山县境内的喀斯特平原及部分槽谷平坝上，另有极少量的黄土或黄土状土（巫山黄土）则仅零星分布于巫山县城一带^[11]，目前已基本被人造建筑物覆盖。夹卵石黄色黏土、黄色黏土和红色黏土是重庆市更新统沉积物中最为主要的 3 种分布类型，为此本文仅选取以上 3 种更新统沉

积物发育的典型土壤为研究对象。在中国土壤发生分类中，夹卵石黄色黏土、黄色黏土和红色黏土等 3 种母质发育的典型旱地土壤分别为黄壤土类的卵石黄泥土、面黄泥土和红壤土类的黄红泥土 3 个土种，其发育的水田土壤分别为水稻土土类的卵石锈黄泥田、老冲积黄泥田和黄红泥田 3 个土种。

1.2 样品采集与分析

选择重庆市境内更新统沉积物出露且同时有旱地和水田的区域为采样区域，参照实际情况，控制水田与旱地的母质相同，之后选取旱地和水田的采样点。供试土壤的成土环境如表 1 所示，所处海拔范围为 189~395 m，其成土母质分别为夹卵石黄色黏土（PC）、黄色黏土（YC）和红色黏土（RC），剖面数字编号 01 为旱地，02 为水田。其中，剖面 PC01 和 PC02 采于合川区境内的嘉陵江干流的高阶地上，剖面 YC01 和 YC02 采于铜梁区境内的嘉陵江主要支流涪江的高阶地上，剖面 RC01 和 RC02 采于秀山县喀斯特平原。上述 6 个供试土壤的土种归属分别为：卵石黄泥土（PC01）、卵石锈黄泥田（PC02）、面黄泥土（YC01）、老冲积黄泥田（YC02）、黄红泥土（RC01）和黄红泥田（RC02）。参照《野外土壤描述与采样手册》（简称《手册》）^[24]，挖掘标准土壤剖面，开展成土环境调查（表 1）、剖面形态观察、土壤比色^[25]以及相关记录工作，分层采集土壤分析样，确定其测定指标^[26]及方法：pH—水浸提法；土壤有机碳（SOC）—重铬酸钾-硫酸消化法；颗粒组成—吸管法；黏粒阳离子交换量（黏粒 CEC）—NH₄OAc（pH7.0）交换法；交换性盐基—NH₄OAc（pH7.0）浸提，原子吸收光谱法和火焰光度法；全

表 1 供试土壤剖面的成土环境

Table 1 Soil-forming conditions of the tested soil profiles

剖面编号 Profile No.	剖面地点 Location	海拔 Elevation/m	地形 Terrain	母质 Parent material	土地利用类型 Land use
PC01	合川区 ^①	244	高阶地 High terrace	夹卵石黄色黏土 ^④	旱地 Upland soil
PC02	合川区 ^①	247	高阶地 High terrace	夹卵石黄色黏土 ^④	水田 Paddy soil
YC01	铜梁区 ^②	215	高阶地 High terrace	黄色黏土 ^⑤	旱地 Upland soil
YC02	铜梁区 ^②	189	高阶地 High terrace	黄色黏土 ^⑤	水田 Paddy soil
RC01	秀山县 ^③	376	平原 Plain	红色黏土 ^⑥	旱地 Upland soil
RC02	秀山县 ^③	395	平原 Plain	红色黏土 ^⑥	水田 Paddy soil

① Hechuan District; ② Tongliang District; ③ Xiushan County; ④ Pebble-mixed yellow clays; ⑤ Yellow clays; ⑥ Red clays

铁(Fe_t)—HF、HClO₄酸溶比色法;游离氧化铁(Fe_d)—DCB浸提比色法;土壤矿物组成及黏土矿物含量—X射线衍射法。

2 结果

2.1 土壤形态特征

由表 2 可见,由供试 PC 发育土壤的剖面色调均为 7.5YR,其中剖面 PC01 通体均一,明度为 4~6,彩度为 3~4,而剖面 PC02 的明度为 5~7,水耕表层彩度为 2~3,下层彩度为 6,剖面 YC01 的色调为 10YR,明度为 5~7,耕作层彩度为 4,下层彩度为 6,而剖面 YC02 其水耕表层和 Br1 层的色调演化为 2.5Y,下层色调为 10YR,明度为 5~7,水耕表层和 Br1 层

彩度为 4,下层彩度为 6~8,剖面 RC01 的色调为 5YR,通体均一,明度为 4~7,彩度为 6,而剖面 RC02 色调向 10YR 演化,明度为 5~7,彩度为 3~4;供试剖面 PC01 的砾石含量在耕作层为 10%,下层为 25%~60%,剖面 PC02 的砾石含量通体低于剖面 PC01,耕作层为 2%,下层为 5%~10%;此外,6 个供试土壤剖面均无亚铁反应;剖面 PC01 中无铁锰斑纹,剖面 YC01 除耕作层外均有铁锰斑纹,且剖面下部有少量铁管,剖面 RC01 除耕作层外有大量黏粒胶膜,而剖面 PC02、YC02 和 RC02 均有铁锰斑纹,且在水耕表层之下至少有一个土层存在灰色腐殖质-粉砂-黏粒胶膜;供试的旱地和水田土壤均为块状结构,且水田土壤逐渐演变为大块状结构,向棱柱状结构演化。

表 2 供试土壤的剖面形态特征和理化性质

Table 2 Morphological characteristics and physico-chemical properties of the tested soil profiles

剖面 编号 Profile No.	发生 层次 Soil horizon	深度 Depth /cm	土壤颜色 Soil color		新生体 New growth of soil	砾石含量 Content of gravel /%	容重 Bulk density / (g·cm ⁻³)	pH	结构 Soil structure	有机碳 SOC / (g·kg ⁻¹)	质地 Soil texture (USDA)
			干态 Dry	润态 Wet							
			PC01	Ap							
	Bw	20~50	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	无 No	25	1.19	6.7	块状 [®]	4.83	粉壤土 [®]
	C	50~135	7.5YR 6/4	7.5YR 5/3	无 No	60	1.01	6.3	块状 [®]	4.28	粉壤土 [®]
PC02	Ap1	0~20	7.5YR 7/2	7.5YR 5/3	铁锰斑纹 [®]	2	1.44	5.0	块状 [®]	9.27	粉质黏壤土 [®]
	Ap2	20~28	7.5YR 7/3	7.5YR 5/3	铁锰斑纹 [®]	5	1.68	4.9	块状 [®]	7.49	粉质黏壤土 [®]
	Br1	28~45	7.5YR 6/6	7.5YR 5/6	铁锰斑纹 [®] 、 灰色胶膜 [®]	10	1.67	5.0	块状 [®]	2.83	粉质黏壤土 [®]
	Br2	45~62	7.5YR 7/6	7.5YR 6/6	铁锰斑纹 [®]	5	1.59	5.5	块状 [®]	2.68	粉质黏壤土 [®]
	Br3	62~95	7.5YR 6/6	7.5YR 5/6	铁锰斑纹 [®]	5	1.59	5.7	块状 [®]	2.74	砂质黏壤土 [®]
	Br4	95~135	7.5YR 6/6	7.5YR 5/6	铁锰斑纹 [®]	5	1.59	5.7	块状 [®]	2.26	黏壤土 [®]
YC01	Ap	0~15	10YR 7/4	10YR 6/4	无 No	-	1.39	5.3	块状 [®]	6.35	粉质黏壤土 [®]
	Br1	15~40	10YR 7/6	10YR 6/6	铁锰斑纹 [®]	-	1.43	5.9	块状 [®]	2.18	粉质黏壤土 [®]
	Br2	40~70	10YR 7/6	10YR 6/6	铁锰斑纹 [®]	-	1.45	5.0	块状 [®]	1.15	粉壤土 [®]
	Br3	70~82	10YR 6/6	10YR 5/6	铁锰斑纹 [®]	-	1.48	5.0	块状 [®]	1.27	壤土 [®]
	Br4	82~123	10YR 6/6	10YR 5/6	铁锰斑纹 [®] 铁管 [®]	-	1.43	5.6	块状 [®]	1.06	粉壤土 [®]
	Br5	123~140	10YR 7/6	10YR 6/6	铁锰斑纹 [®] 铁管 [®]	-	1.48	5.7	块状 [®]	0.37	粉壤土 [®]

续表

剖面 编号 Profile No.	发生 层次 Soil horizon	深度 Depth /cm	土壤颜色		新生体 New growth of soil	砾石含量 Content of gravel /%	容重 Bulk density / (g·cm ⁻³)	pH	结构 Soil structure / (g·kg ⁻¹)	有机碳 SOC	质地 Soil texture (USDA)
			Soil color								
			干态	润态							
			Dry	Wet							
YC02	Ap1	0~16	2.5Y 7/4	2.5Y 5/4	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.28	5.2	块状 ^⑦	11.19	粉质黏壤土 ^⑤
	Ap2	16~24	2.5Y 7/4	2.5Y 5/4	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.44	5.8	块状 ^⑦	8.11	粉质黏壤土 ^⑤
	Br1	24~47	2.5Y 7/4	2.5Y 5/4	铁锰斑纹 ^⑧ 、 灰色胶膜 ^⑩	-	1.65	5.5	块状 ^⑦	5.08	粉质黏壤土 ^⑤
	Br2	47~75	10YR 7/6	10YR 5/8	铁锰斑纹 ^⑧ 、 灰色胶膜 ^⑩	-	1.48	6.0	块状 ^⑦	3.27	粉质黏壤土 ^⑤
	Br3	75~105	10YR 7/6	10YR 5/8	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.46	5.7	块状 ^⑦	2.78	粉质黏土 ^⑥
	Br4	105~130	10YR 7/6	10YR 5/8	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.44	5.8	块状 ^⑦	3.14	粉质黏壤土 ^⑤
	RC01	Ap	0~16	5YR 7/6	5YR 5/6	无	-	1.28	4.7	块状 ^⑦	13.98
Bt1		16~45	5YR 6/6	5YR 4/6	黏粒胶膜 ^⑪	-	1.36	4.8	块状 ^⑦	7.26	黏土 ^②
Bt2		45~80	5YR 6/6	5YR 4/6	黏粒胶膜 ^⑪	-	1.30	5.1	块状 ^⑦	4.44	黏土 ^②
Bt3		80~140	5YR 6/6	5YR 4/6	黏粒胶膜 ^⑪	-	1.31	5.3	块状 ^⑦	3.48	黏土 ^②
RC02	Ap1	0~18	10YR 6/4	10YR 5/4	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.13	5.2	块状 ^⑦	12.21	黏土 ^②
	Ap2	18~25	10YR 6/4	10YR 5/4	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.57	6.2	块状 ^⑦	7.08	黏土 ^②
	Br1	25~35	10YR 6/4	10YR 5/4	铁锰斑纹 ^⑧ 、 灰色胶膜 ^⑩	-	1.58	6.6	块状 ^⑦	6.74	粉质黏土 ^⑥
	Br2	35~53	10YR 6/4	10YR 5/4	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.46	6.8	块状 ^⑦	8.10	粉质黏土 ^⑥
	Br3	53~64	10YR 6/3	10YR 5/3	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.52	6.7	块状 ^⑦	7.73	粉质黏土 ^⑥
	Br4	64~75	10YR 6/3	10YR 5/3	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.44	6.7	块状 ^⑦	8.11	粉质黏土 ^⑥
	Br5	75~110	10YR 7/3	10YR 6/3	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.41	5.7	块状 ^⑦	9.52	粉质黏土 ^⑥
Br6	110~145	10YR 6/3	10YR 5/3	铁锰斑纹 ^⑧	-	1.49	5.1	块状 ^⑦	10.68	粉质黏土 ^⑥	

① Loam; ② Silt loam; ③ Silty clay loam; ④ Sandy clay loam; ⑤ Clay loam; ⑥ Silty clay; ⑦ Clay; ⑧ Iron-manganese speckles or stripes; ⑨ Grey colloids; ⑩ Iron tube; ⑪ Clay colloids; ⑫ Blocky structure.

2.2 土壤理化性质

由表 2 可见, 供试的水田土壤 Ap2 层容重为 Ap1 层容重的 1.13 倍~1.39 倍, 而旱地土壤耕作层之下的土层其容重未明显增加。在 6 个供试土壤剖面中, 剖面 PC01 的质地为壤土类, 而剖面 PC02 为黏壤土类; 剖面 YC01 为壤土类和黏壤土类, 而剖面 YC02 为黏壤土类和黏土类; 剖面 RC01 和 RC02 均为黏土类。此外, 如图 1a 所示, 剖面 PC01 和 YC01 无黏粒淀积现象, 剖面 RC01 的黏粒含量随土层深度增加而增加, 且剖面中含有大量黏粒胶膜。

如图 1b 所示, 剖面 PC01 和 YC01 的盐基饱和度均随深度先增大后减小, 剖面 PC02 和 YC02 均在

Br2 及其下层的盐基饱和度明显高于上层, 剖面 RC01 的盐基饱和度随深度先减小后增大再减小, 有复盐基化的趋势, 剖面 RC02 在 25~75 cm 处的盐基饱和度明显高于上层和下层, 故更新统沉积物的旱地土壤表层盐基淋失淀积于剖面中部, 而 PC 和 YC 的水田土壤其盐基淋失淀积于剖面下部, RC 的水田土壤其盐基淋失淀积于剖面中部。如图 1c 所示, 剖面 PC01 和 RC01 的黏粒 CEC 含量变化较均一, 剖面 YC01 内部变异较大, 而水田剖面黏粒 CEC 含量内部变异大, 在耕作层下部会出现一个极低值。供试的更新统沉积物发育的土壤的全铁含量在 34.98~103.20 g·kg⁻¹ 之间, 游离氧化铁含量在

15.35~69.34 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 3 种更新统沉积物发育土壤的全铁含量 $\text{RC}>\text{YC}>\text{PC}$ 。如图 1e 所示, 剖面 PC01 的游离氧化铁含量内部变异小, 剖面 PC02 在 Br1 (28~45 cm) 及下层的游离氧化铁含量明显高于上层; 剖面 YC01 的游离氧化铁含量在 Br3 (70~82 cm) 及下层明显低于上层, 剖面 YC02 在 Br2 (47~75 cm) 及下层的游离氧化铁含量明显高于上层, 剖面 RC01 和 RC02 的游离氧化铁含量内部变异小。如图 1d 和图 1e 所示, 供试土壤的全铁含量变

化趋势与游离氧化铁含量十分相似, 这表明重庆市更新统沉积物发育土壤的游离氧化铁对全铁的贡献大于硅酸盐铁。如图 1f 所示, 剖面 PC01 的铁游离度内部变异均一, 而剖面 PC02 的 Br1 (28~45 cm) 及下层的铁游离度明显高于上层; 剖面 YC01 的铁游离度在 Br3 (70~82 cm) 及下层明显低于上层, 而剖面 YC02 的 Br4 (47~75 cm) 及下层的铁游离度明显高于上层; 剖面 RC01 和 RC02 的铁游离度随深度的变异不大, 剖面 RC01 的铁游离度高于剖面 RC02。

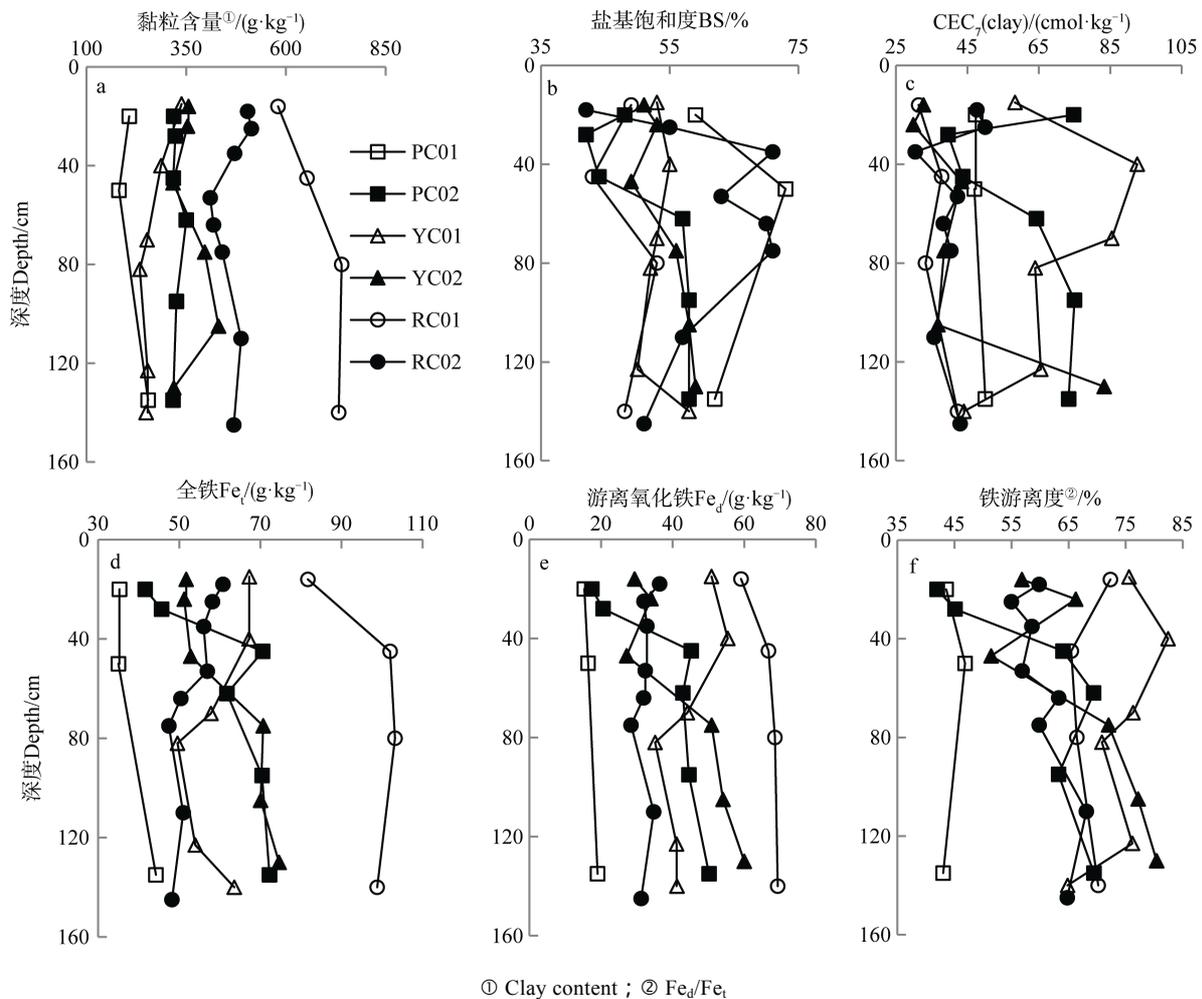


图 1 供试土壤剖面化学性质随土层深度的变化

Fig. 1 Changes in soil chemical properties with depth in the tested soil profiles

2.3 土壤系统分类

2.3.1 诊断层和诊断特性 由表 4 可知, 根据《中国土壤系统分类检索 (第三版)》^[15] (简称《检索》) 对 6 个供试土壤剖面的成土条件和各项指标进行检索, 共鉴定出 1 个诊断表层、3 个诊断表下层和 4

个诊断特性。结果如下: 诊断层有: (1) 水耕表层: 剖面 PC02、YC02 和 RC02 在淹水耕作条件下符合水耕表层的检索条件。(2) 锥形层: 剖面 PC01 和 YC01 在风化成土过程中形成的无或基本上无物质的淀积, 有结构发育的 B 层, 符合锥形层的鉴定条

件。(3)水耕氧化还原层:剖面 PC02、YC02 和 RC02 符合水耕氧化还原层的检索条件。(4)黏化层:依照黏化层的鉴定条件^[15],剖面 RC01 由黏粒的淋溶淀积所形成的黏化层。诊断特性有:(1)土壤水分状况:剖面 PC01、YC01 和 RC01 年干燥度 <1 ,为湿润土壤水分状况;剖面 PC02、YC02 和 RC02 在耕作条件下,耕作层被灌溉水饱和,符合人为滞水

土壤水分状况。(2)氧化还原特征:剖面 PC02、YC01、YC02、RC01 和 RC02 均有铁锰锈斑纹,符合氧化还原特征。(3)土壤温度状况:本文中各剖面土壤年平均土温位于 $15\sim 22^{\circ}\text{C}$ 之间,符合热性土壤温度状况。(4)铁质特性:剖面 PC02、YC01、YC02、RC01 和 RC02 的整个 B 层部分 DCB 浸提游离氧化铁 $\geq 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,符合铁质特性。

表 3 供试土壤的诊断层和诊断特性

Table 3 Diagnostic horizons and diagnostic characteristics of the tested soils

剖面编号 Profile No.	水耕表层	雏形层	水耕氧化还		土壤水分状况 Soil moisture regime	氧化还原特征 Redoxic features	土壤温度状况 Soil temperature regime	铁质特性 Ferric property
	Anthrostragnic epipedon	Cambic horizon	原层 Hydragric horizon	黏化层 Argic horizon				
PC01		√			湿润 ^①		热性 ^③	
PC02	√		√		人为滞水 ^②	√	热性 ^③	√
YC01		√			湿润 ^①	√	热性 ^③	√
YC02	√		√		人为滞水 ^②	√	热性 ^③	√
RC01				√	湿润 ^①	√	热性 ^③	√
RC02	√		√		人为滞水 ^②	√	热性 ^③	√

① Udic; ② Anthrostragnic; ③ Thermic.

2.3.2 系统分类单元归属 根据供试土壤的诊断层和诊断特性(表 3),依照《检索》^[15]划分其系统分类高级单元(表 4),再依据“中国土壤系统分类土族和土系划分标准”^[27]确定供试土壤的控制层段,选择供试土壤土族控制层段的鉴别特征—颗粒大小级别、矿物学类型、石灰性和酸碱反应类别和土壤温度等级(表 5),通过比土、评土,最后确立典型土壤个体的基层分类单元(土族-土系)。矿物组成分析表明,RC01 土族控制层段黏粒部分的高岭石及其他非膨胀的 2:1 型层状矿物含量 $>50\%$,但其非膨胀的 2:1 型层状矿物(伊利石)含量要明显高于高岭石含量,故其矿物学类型被定为伊利石混合型,而不是高岭石型;RC02 土族控制层段黏粒部分的高岭石及其他非膨胀的 2:1 型层状矿物(伊利石)含量 $>50\%$,且其非膨胀的 2:1 型层状矿物(伊利石)低于高岭石含量,故其矿物学类型被定为高岭石型。依据供试土壤的土族鉴别特征(表 4),可建立 6 个土族,其中 PC01 为粗骨壤质硅质型非酸性热性-普通筒育湿润雏形土,PC02 为黏壤质硅质混合型非酸性热性-普通铁聚水耕人为土, YC01 为黏壤质硅质

混合型非酸性热性-普通铁质湿润雏形土, YC02 为黏质伊利石混合型非酸性热性-普通铁聚水耕人为土, RC01 为极黏质伊利石混合型酸性热性-红色铁质湿润淋溶土, RC02 为黏质高岭石型非酸性热性-普通筒育水耕人为土;每个土族仅对应 1 个典型土壤个体,故可建立 6 个土系(表 4)。

3 讨论

3.1 沉积物特征对更新统沉积物发育土壤特性及类型的影响

虽然 3 种供试母质均为更新统沉积物,但不同类型沉积物的物质来源、分布位置、颗粒组成、颜色以及其他理化性质等存在明显差异。第二次土壤普查资料认为 PC 和 YC 母质系更新统冰水沉积物^[28, 29],较之 PC 母质,供试的 YC 母质样点海拔较低,位于涪江下游沿岸阶地的较平缓地段,可能是因沿河搬运距离的延长导致流水挟砾能力的下降,使得其以黏土等细颗粒物沉积为主而无卵石分布;此外,两者间的砾石含量差异也可能与沉积相不同有关,

表 4 供试土壤的系统分类归属

Table 4 Attribution of the tested soils in the Chinese Soil Taxonomy

剖面编号 Profile No.	亚类 Subgroup	土族 Soil family
PC01	普通筒育湿润锥形土	粗骨壤质硅质型非酸性热性-普通筒育湿润锥形土
	Typic Hapli - Udic Cambosols	Coarse bone loamy silica non-acid thermic - Typic Hapli - Udic Cambosols
PC02	普通铁聚水耕人为土	黏壤质硅质混合型非酸性热性-普通铁聚水耕人为土
	Typic Fe-accumuli - Stagnic Anthrosols	Clay loamy silica mixture non-acid thermic - Typic Fe-accumuli - Stagnic Anthrosols
YC01	普通铁质湿润锥形土	黏壤质硅质混合型非酸性热性-普通铁质湿润锥形土
	Typic Ferri - Udic Cambosols	Clay loamy silica mixture non-acid thermic - Typic Ferri - Udic Cambosols
YC02	普通铁聚水耕人为土	黏质伊利石混合型非酸性热性-普通铁聚水耕人为土
	Typic Fe-accumuli - Stagnic Anthrosols	Clayey illitic mixture non-acid thermic - Typic Fe - accumuli - Stagnic Anthrosols
RC01	红色铁质湿润淋溶土	极黏质伊利石混合型酸性热性-红色铁质湿润淋溶土
	Red Ferri - Udic Argosols	Heavy clayey illitic mixture acid thermic - Red Ferri - Udic Argosols
RC02	普通筒育水耕人为土	黏质高岭石型非酸性热性-普通筒育水耕人为土
	Typic Hapli - Stagnic Anthrosols	Clayey kaolinitic non-acid thermic - Typic Hapli - Stagnic Anthrosols

表 5 供试土壤的土族鉴别特征

Table 5 Soil family characteristics of the tested soils

剖面编号 Profile No.	颗粒大小级别 Particle-size level	矿物学类型 Mineralogical type	石灰性和酸碱反应类别 Type of calcareous and acid reaction	土壤温度等级 Soil temperature grade
PC01	粗骨壤质 ^①	硅质型 ^⑤	非酸性 Non-acid	热性 Thermic
PC02	黏壤质 ^②	硅质混合型 ^⑥	非酸性 Non-acid	热性 Thermic
YC01	黏壤质 ^②	硅质混合型 ^⑥	非酸性 Non-acid	热性 Thermic
YC02	黏质 ^③	伊利石混合型 ^⑦	非酸性 Non-acid	热性 Thermic
RC01	极黏质 ^④	伊利石混合型 ^⑦	酸性 Acid	热性 Thermic
RC02	黏质 ^③	高岭石型 ^⑧	非酸性 Non-acid	热性 Thermic

注：矿物学类型测定中，剖面 PC01、PC02 和 YC01 测定土壤砂粒部分，YC02、RC01 和 RC02 测定土壤黏粒部分。Note: In determination of mineralogical types, Profiles PC01, PC02 and YC01 were analyzed for sand content; and Profiles YC02, RC01 and RC02 were for clay content^①Coarse bone loamy; ^②Clay loamy; ^③Clayey; ^④ Heavy clayey; ^⑤Silica type; ^⑥Silica mixture type; ^⑦Illitic mixture type; ^⑧Kaolinitic type

PC 母质可能是古河床相沉积，富含卵石和其他粗颗粒物^[1, 11]，而 YC 母质可能是古河漫滩相沉积，受古河流分选作用的影响，该沉积物以粒径较小的黏土类物质为主，故无卵石存在。PC 发育的土壤砾石含量很高、透水性较好，不易形成水分饱和且呈还原状态的土壤层次或区域，土体内的铁锰氧化物难以发生还原迁移和再氧化，使得土壤结构体面上无明显铁锰斑纹存在；与 PC 母质发育的土壤相比，

YC 母质发育的土壤更黏、透水性较差，受古水文条件（如地下水位等）的影响，土体内易出现水分饱和和并呈还原状态的土壤水分状况—潮湿土壤水分状况，故使其发育的旱地土壤剖面上有明显的铁锰斑纹和少量铁管存在。然而，受新构造运动的影响，河流不断下切，使老冲积物（PC 和 YC 母质）的分布位置由河床和河漫滩逐渐演变为高阶地，其发育的土壤已完全脱离了现代地下水的影响，YC 母质发

育的土壤已不再具有潮湿土壤水分状况，其土体内存在的铁锰斑纹和铁管仅仅是其古水文条件或古土壤水分状况的反映，因此本文将剖面 YC01 归为普通铁质湿润锥形土亚类。在重庆市境内，更新统沉积物 RC 母质则主要是由石灰岩风化发育而成，在湿热的气候条件下，经溶蚀、冲积、洪积等作用后，最终堆积于秀山县境内的喀斯特平原或槽谷区域^[1, 11, 28]，在地势较低或汇水区域（如水田），其发育的土壤复盐基作用较为明显，这使得水田土壤的 pH 明显高于旱地土壤（图 1b）；RC 母质富含黏粒，其发育的土壤质地黏重，加上所处地域的降雨量较为丰富^[13]，导致该类母质发育的旱地土体中水分向下运动频繁，使得其耕作层以下土体内出现了明显的黏粒淀积；受 RC 母质的游离氧化铁含量及其色调的影响，其发育的旱地土壤游离铁含量较高，且色调较老冲积物（PC 和 YC 母质）发育的旱地土壤更红，一般为 5YR 且在 140 cm 深度范围内明度和色度的变异较小，故被划归为红色铁质湿润淋溶土亚类。

3.2 人类活动对更新统沉积物发育土壤特性及类型的影响

人类活动使 3 种更新统沉积物发育土壤的特性及分类存在明显差异，PC 和 YC 发育的水田土壤其上部彩度降低，结合表 2 可知，彩度降低的土层较旱地土壤更厚，这类土层有机碳含量较下部土层更高，游离氧化铁和全铁含量较下部土层更低，这可能是水耕作用使得其长期处于淹水厌氧状态，有机碳易在土壤表层积累后向下迁移，且土壤上部游离氧化铁被还原为低价铁，随水向下淋溶淀积于土壤下层。因此，表层有机碳积累并向下迁移以及铁元素淋溶共同导致 PC 和 YC 发育的水田土壤上部彩度降低，由此可通过抛荒土壤上部土层彩度降低的厚薄来判断 PC 和 YC 发育土壤从前的耕作条件，这与已有的研究结果一致^[30-33]。此外，人类活动会导致 PC 发育的水田土壤其砾石含量低于旱地土壤，原因如下：（1）造田时人为筛选卵石含量相对较低的地块进行开垦；（2）该类型土壤分布于高阶地上，在坡改梯、挖高填低形成梯田和后期水耕的过程中，人为拣拾较深土层的卵石（笔者调查与推测至少为 1 m），才能使水田形成滞水层。故 PC01 的颗粒大小级别为粗骨壤质，PC02 的颗粒大小级别为黏壤

质。剖面 PC02 的 Br1 层砾石含量较高，是因为最初耕作时耕作层的卵石被压在犁底层，犁底层容重增加（表 2），后期在水耕过程中，受周围土壤的淤积作用，耕作层变深，犁底层上升，之前的犁底层变为 Br1 层。

在老冲积物（PC 和 YC）发育的水田土壤其下层的游离氧化铁含量和铁游离度明显高于上层，而在红色黏土 RC 发育的水田土壤其游离氧化铁含量和铁游离度的内部变异较小，故水耕作用使得 PC 和 YC 发育的水田土壤其游离氧化铁在剖面上部被还原为低价铁，向下淋溶淀积于土壤下层，在耕作层以下发生游离氧化铁聚积，故被划归为普通铁聚水耕人为土；而 RC 的水田土壤由于所处地形部位和耕作时间影响，在人为水耕作用下其游离氧化铁聚积均不明显，故被划归为普通筒育水耕人为土。剖面 RC01 的矿物学类型为伊利石混合型，剖面 RC02 的矿物学类型为高岭石型，原因如下：（1）该类沉积物的矿物分布不均匀；（2）水耕作用会导致 RC 发育的水田土壤其次生矿物伊利石等缓慢脱盐基而逐步减少^[34]。由表 2 和图 1b 可见，剖面 RC01 的 pH 较低，盐基饱和度较低，RC02 的 pH 较高，盐基饱和度较高，是由于 RC 发育的旱地土壤在复盐基作用后风化溶蚀过程中淋失较多盐基离子，而其水田土壤在水耕作用下，复盐基化持续发生，故剖面 RC01 的石灰性和酸碱反应类别为酸性，RC02 的石灰性和酸碱反应类别为非酸性。

4 结 论

在重庆市境内，夹卵石黄色黏土（PC）、黄色黏土（YC）和红色黏土（RC）等 3 种更新统沉积物发育的典型旱地土壤分别归为普通筒育湿润锥形土、普通铁质湿润锥形土和红色铁质湿润淋溶土 3 个亚类，老冲积物（PC 和 YC）和红色黏土（RC）发育的典型水田土壤则分别归为普通铁聚水耕人为土和普通筒育水耕人为土 2 个亚类。YC 发育的普通铁质湿润锥形土有铁锰斑纹存在，这是其古水文条件的反映，现已完全脱离地下水的影响，故不具有潮湿土壤水分状况；沉积物特征、区域气候等会影响旱地土体内黏粒的淋溶淀积，进而影响其土纲划分，使得 PC 和 YC 发育的旱地土壤划分为锥形土，

RC发育的旱地土壤为划分为淋溶土;水耕活动使更新统沉积物发育的雏形土和淋溶土演变为水耕人为土;地块筛选、坡改梯、拣拾等人为活动会使得PC发育的水田土体内砾石含量较低,影响其土族控制层段的颗粒大小级别判定。

参考文献 (References)

- [1] Yang H R. Quaternary geology. Beijing: Higher Education Press, 1987. [杨怀仁. 第四纪地质. 北京: 高等教育出版社, 1987.]
- [2] Johnson D L, Keller E A, Rockwell T K. Dynamic pedogenesis: New views on some key soil concepts, and a model for interpreting quaternary soils. *Quaternary Research*, 1990, 33 (3): 306—319.
- [3] Vlaminc S, Kehl M, Rolf C, et al. Late Pleistocene dust dynamics and pedogenesis in Southern Eurasia – Detailed insights from the loess profile Toshan (NE Iran) . *Quaternary Science Reviews*, 2018, 180: 75—95.
- [4] Jagercikova M, Cornu S, Bourlés D, et al. Understanding long-term soil processes using meteoric ¹⁰Be: A first attempt on loessic deposits. *Quaternary Geochronology*, 2015, 27: 11—21.
- [5] Badía D, Martí C, Casanova J, et al. A Quaternary soil chronosequence study on the terraces of the Alcanadre River (semiarid Ebro Basin, NE Spain) . *Geoderma*, 2015, 241/242: 158—167.
- [6] Han C L, Wang Q B, Sun F J, et al. Properties and taxonomy of Quaternary paleo-latosol-like soils in Chaoyang area of Liaoning Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (5): 836—846. [韩春兰, 王秋兵, 孙福军, 等. 辽宁朝阳地区第四纪古红土特性及系统分类研究. 土壤学报, 2010, 47 (5): 836—846.]
- [7] Chen F, Zhang H T, Wang T W, et al. Taxonomy and spatial distribution of soils typical of Jiangnan Plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4): 761—771. [陈芳, 张海涛, 王天巍, 等. 江汉平原典型土壤的系统分类及空间分布研究. 土壤学报, 2014, 51 (4): 761—771.]
- [8] Ouyang N X, Zhang Y Z, Sheng H, et al. Attribution of typical soils derived from Quaternary Red Clay of eastern Hunan in Chinese Soil Taxonomy. *Soils*, 2018, 50 (4): 841-852. [欧阳宁相, 张杨珠, 盛浩, 等. 湘东红色黏土发育的典型土壤在中国土壤系统分类中的归属. 土壤, 2018, 50 (4): 841—852.]
- [9] Han G Z, Zhang G L. Influence of parent material on evolution of physico-chemical properties of hydric anthrosols in hilly regions of south China. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4): 772—780. [韩光中, 张甘霖. 母质对南方丘陵区水耕人为土理化性质演变的影响. 土壤学报, 2014, 51 (4): 772—780.]
- [10] Han G Z, Zhang G L, Li D C, et al. Pedogenetic evolution of clay minerals and agricultural implications in three paddy soil chronosequences of south China derived from different parent materials. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15 (2): 423—435.
- [11] Liu X S. Quaternary system in Sichuan Basin. Chengdou: Sichuan Science and Technology Press, 1983. [刘兴诗. 四川盆地的第四系. 成都: 四川科学技术出版社, 1983.]
- [12] Gong L M, Wang C S, Feng D G, et al. Preliminary study of Quaternary climate in Chongqing. *Journal of Stratigraphy*, 2012, 36 (3): 620—626. [龚黎明, 王长生, 冯代刚, 等. 重庆地区第四纪气候的初步研究. 地层学杂志, 2012, 36 (3): 620—626.]
- [13] Chen S Q, Cai S L, Xiao T, et al. Chongqing geography. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2003. [陈升琪, 蔡书良, 肖挺, 等. 重庆地理. 重庆: 西南师范大学出版社, 2003.]
- [14] Gong Z T, et al. Chinese soil taxonomy: Theory, methodology, practices. Beijing: Science Press, 1999. [龚子同, 等. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [15] 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. 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3版. 合肥: 中国科技大学出版社, 2001.]
- [16] Ci E, Tang J, Lian M S, et al. Higher category partition for purple soils in Chongqing in Chinese soil taxonomy. *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. 土壤学报, 2018, 55 (3): 569—584.]
- [17] Hu J, Ci E, Lian M S, et al. Taxonomy of soils derived from Holocene alluvial sediments in Chongqing. *Soils*, 2018, 50 (1): 202—210. [胡瑾, 慈恩, 连茂山, 等. 重庆市全新统冲积物发育土壤的系统分类研究. 土壤, 2018, 50 (1): 202—210.]
- [18] Lian M S, Ci E, Tang J, et al. Soil taxonomy of typical soils in middle-mountain area of northeastern Chongqing. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30 (10): 1729—1738. [连茂山, 慈恩, 唐江, 等. 渝东北中山区典型土壤的系统分类. 浙江农业学报, 2018, 30 (10): 1729—1738.]
- [19] Li D C, Zhang G L. On difficulties and countermeasures in describing soil series in Chinese Soil Taxonomy. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (6): 1563—1567. [李德成, 张甘霖. 中国土壤系统分类土系描述的难点与对策. 土壤学报, 2016, 53 (6): 1563—1567.]
- [20] Qu X L, Long H Y, Xie P, et al. Genetic characteristics and classification of typical sierozem in central Ningxia. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (1): 75—87. [曲潇

- 琳, 龙怀玉, 谢平, 等. 宁夏中部地区典型灰钙土的发育特性及系统分类研究. 土壤学报, 2018, 55 (1): 75—87.]
- [21] Wu K N, Gao X C, Zha L S, et al. Soil taxonomy of artificial soils containing artifacts typical of Henan Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1091—1101. [吴克宁, 高晓晨, 查理思, 等. 河南省典型含有人工制品土壤的系统分类研究. 土壤学报, 2017, 54 (5): 1091—1101.]
- [22] Wang X L, Zhang F R, Wang S, et al. Discussion on characteristics, pedogenetic process and taxonomy of red clay in Beijing. *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. 土壤学报, 2014, 51 (2): 238—246.]
- [23] Zhang C, Yuan D G, Song Y G, et al. Taxonomy of soils featuring organic soil materials in West Sichuan. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (5): 1085—1097. [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. 土壤学报, 2018, 55 (5): 1085—1097.]
- [24] Zhang G L, Li D C. Manual of soil description and sampling. Beijing: Science Press, 2016. [张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [25] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Standard soil colour charts. 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. 南京: 南京出版社, 1989.]
- [26] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [27] Zhang G L, Wang Q B, Zhang F R, et al. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese Soil Taxonomy. *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. 土壤学报, 2013, 50 (4): 826—834.]
- [28] Agriculture and Animal Husbandry Department of Sichuan Province, Soil Survey Office of Sichuan Province. Soils of Sichuan Province. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1997. [四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土壤. 成都: 四川科学技术出版社, 1997.]
- [29] Agriculture and Animal Husbandry Department of Sichuan Province, Soil Survey Office of Sichuan Province. Chorography of Sichuan soil species. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994. [四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土种志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.]
- [30] Pan G X, Wu L S, Li L Q, et al. Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20 (4): 456—463.
- [31] Han G Z, Zhang G L, Li D C. Accumulation of soil organic carbon and their influencing factors of hydric anthrosols in hilly regions of South China. *Soils*, 2013, 45 (6): 978—984. [韩光中, 张甘霖, 李德成. 南方丘陵区三种母质水耕人为土有机碳的累积特征与影响因素分析. 土壤, 2013, 45 (6): 978—984.]
- [32] Wang L Y, Qin L, Lü X G, et al. Progress in researches on effect of iron promoting accumulation of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (5): 1041—1050. [王璐莹, 秦雷, 吕宪国, 等. 铁促进土壤有机碳累积作用研究进展. 土壤学报, 2018, 55 (5): 1041—1050.]
- [33] Qu Z, Li L N, Jia R. Contribution of water dissolved organic carbon to iron (III) reduction in paddy soils. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (2): 346—356. [曲植, 李丽娜, 贾蓉. 水稻土中水溶性有机碳对铁还原过程的贡献. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (2): 346—356.]
- [34] Gao X. Clay mineralogy. Beijing: Chemical Industry Press, 2017. [高翔. 黏土矿物学. 北京: 化学工业出版社, 2017.]

(责任编辑: 檀满枝)