

“成都粘土”的成因、物源、时代及其古环境问题

冯金良¹, 赵振宏², 赵翔³, 赵其华⁴, 彭社琴⁴

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 2. 河北省地勘局第四水文工程地质大队, 河北 沧州 061000;
3. 中国建筑西南勘察设计研究院, 四川 成都 610081; 4. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘 要:“成都粘土”由 Thorp 和 Dye 于 1936 年命名,用以指示分布在四川盆地西部、西北部丘陵及高阶地上的含钙质结核粘土。Thorp 和 Dye 并提出,“成都粘土”可能是遭受风化的风尘堆积。在四川盆地西北部,发育完整的第四纪粘土剖面,自上而下可分为三层:“成都粘土”、褐色粘土及网纹红土。在 Thorp 和 Dye 之后的 70 多年间,“成都粘土”成为土壤学家、地理学家和地质学家所共同关注的研究对象。但是,“成都粘土”的成因、物源、时代及其古环境意义,以及“成都粘土”与青藏高原黄土、黄土高原黄土的关系是一个长期争论的、有待解决的科学问题。“成都粘土”作为可能的风成堆积,针对其的研究,对认识和了解地质时期,尤其是冰期和冰消期四川盆地西部及其周边地区风向、大气环流格局及强度,以及风尘源区的植被覆盖及干旱化等古环境变化是十分有意义的。此外,“成都粘土”及其下伏的褐色粘土和网纹红土是著名的超固结性、胀缩性和裂隙性粘土,对于这一特殊土体的研究亦具有重要的理论和实践意义。为此,就有关成都粘土的研究历史进行了回顾,并对今后的研究工作提出如下建议:1. 深入调查成都粘土的分布范围及其地貌分布特征;2. 开展成都粘土的精细年代学研究并建立标准剖面;3. 褐色粘土和网纹红土的成因及物源的深入研究;4. 确认“成都粘土”、褐色粘土及网纹红土三者间的关系及可能存在的沉积间断;5. 阐明“成都粘土”与川西高原黄土、黄土高原黄土之间的物源关系;6. 重建“成都粘土”的风尘传输过程及机制;7. 探索各层粘土的成因及后期风化改造对其超固结性、胀缩性和裂隙性发育的影响。

关键词: 四川盆地;“成都粘土”;成因;物源;年代学;风尘堆积;风尘传输;古环境

中图分类号: P642.13, X144

文献标志码: A

“成都粘土”原称“成都土”(Chengtú Clay),由土壤学家 James Thorp (梭颇)和 Daniel S. Dye (戴意)于 1936 年命名^[1],用以指示分布在四川盆地西部、西北部丘陵及高阶地上的棕黄色、灰棕色的富含钙质结核的塑性粘土,并指出其很可能是风尘堆积。

根据 Thorp and Dye^[1]的描述及限定,“成都粘土”具有如下特征:1. 近地表出露,2. 覆盖在二级及二级以上阶地顶部或丘陵基岩之上,3. 无层理,4. 柱状结构不发育,5. 灰白色裂隙粘土及裂隙均不发育,6. 含钙质结核,7. 不含卵砾石,8. 中度或弱酸性至中性反应,9. 黄色塑性粘土,10. 分布在四川盆地西部及西北部,11. 沉积之后遭受了风化,12.

形成于晚更新世晚期,13. 可能为风成成因。

在 Thorp 和 Dye^[1]之后的 70 多年间,“成都粘土”成为土壤学家、地理学家和地质学家所共同关注的研究对象^[2-19]。但是由于研究剖面、研究侧重点的差异以及研究内容的扩展和深入,从而对“成都粘土”的含义、成因、物源、时代及其古环境指示意义形成了不同的认识。

1 “成都粘土”的含义和界限问题

“成都粘土”命名后,这一地层名称在一些研究论文^[2-19]、地质报告^[1,20]、地层划分^[20-24]中被广泛

收稿日期 (Received date): 2014 - 03 - 01; **改回日期** (Accepted): 2014 - 03 - 20。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (项目编号: 41171008, 40771028)。[Supported by National Nature Science Foundation of China. Grant no. 41171008, 40771028. \]

作者简介 (Biography): 冯金良 (1964 -), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 地貌过程与沉积。[Feng Jinliang (1964 -), male, Ph D, professor, research interest: geomorphological processes and sedimentation.] E-mail: fengjl@itpcas.ac.cn

采用。但是,由于“成都粘土”缺乏标准剖面控制,以及成因问题的争议,从而后人对“成都粘土”的层位各有不同的理解^[13,18]。

在四川盆地西部、西北部丘陵及高阶地区域,发育完整的成都粘土剖面自上而下可分为三层^{[7,8,25], 1), 2)} (图 1A, 1B)

I 层:含钙质结核“成都粘土”(Chengdu Clay), 黄色(7.5YR7/4), 层厚 1.6~2.7 m, 含丰富的钙质结核, 部分剖面可见少量细小铁锰结核。

II 层:褐色粘土(Brown Clay), 褐黄色为主色(5YR6/6), 层厚 1.5~6.0 m, 与 I 层相比颜色变红, 二者间似为不整合接触关系(图 1A); 含钙质结核, 中、下部铁锰结核发育; 偶见卵砾石(图 1C); 裂隙发育, 隙壁为灰白色粘土(图 1D)。

III 层:网纹红土(Reticulate-mottled red clay), 红褐色为主色调(2.5YR4/8), 层厚 0.5~5 m; 部分剖面顶部可见钙质结核; 铁锰结核和裂隙发育, 隙壁为灰白色粘土; 与上层接触关系也较为清晰。

下伏地层可为河流相亚砂土及亚粘土层、砾石层或基岩(图 1E)。

依本文作者理解,“成都粘土”的命名者 Thorp 和 Dye^[1]主要把成都市周围区域(如磨盘山)近地表出露的、含钙质结核的粘土层(I 层)作为“成都粘土”的岩石地层。同时, Thorp 和 Dye^[1]把绵阳涪江二级阶地砂砾层之上近 15 m 厚、含钙质结核粘土也统一归为“成都粘土”。Richardson^[8]不仅把绵阳涪江二级阶地砂砾层之上粘土归为“成都粘土”, 而且进一步把绵阳地区三级阶地上的粘土分为三层, 顶部黄色粘土归为“成都粘土”。此外, 有一点可以肯定的是, Thorp 和 Dye^[1]把网纹红土(Reticulately mottled red and yellow clays)与上覆的“成都粘土”明显区别开来。遗憾的是, Thorp 和 Dye^[1]没有详细描述其所定义的网纹红土。仅从其文章记录来看, Thorp 和 Dye^[1]所描述的网纹红土可能是雅安砾石层之上遭受强烈风化的河流相沉积。

在 Thorp 和 Dye^[1]之后, 不同的研究者对“成都粘土”一词赋予了不同的含义。有的学者把含钙质

结核粘土(I 层)视作“成都粘土”^[1,3-9]; 有的学者把 I 层和褐色粘土(II 层)称为“成都粘土”^[15,22,26]; 而有的学者把“雅安砾石层”之上的 I 层、II 层和网纹红土(III 层)统称为“成都粘土”^{[13,18,25], 3)}。

“成都粘土”作为一个岩石地层单位和术语, 应具有惟一性, 但目前出现的‘异物同名’现象, 使这一地层单位名称在使用和理解上存在着不同程度的混乱现象。同时, 也导致成都粘土成因、物源、时代和古环境的研究和对比更加困难。

2 “成都粘土”的成因问题

Thorp 和 Dye^[1,5]根据“成都粘土”的分布、产状、厚度、颜色、结构与构造、钙质结核等特征, 认为“成都粘土”很可能是风成成因。之后的研究者对此予以支持或者提出了不同的观点。此外, Thorp 和 Dye^[1]提出其所定义的网纹红土源于白垩纪的砂岩和泥岩。

2.1 风成黄土说

Salfeld^[2]、原绍贤^[6]、Richardson^[7-8]、马溶之^[9]、施雅风^[10]、邵之刚等^[16]和谢又予等^[27]认为“成都粘土”是风成黄土; 而余皓等^[11]认为 Thorp 和 Dye^[1]的风成说乃‘臆断’, 但并未明确阐明个人观点。胡兆国等^[28]、Feng 等^[29-31]的研究结果指示, “成都粘土”为风成堆积, 沉积之后遭受了风化作用的改造。上述学者主要把 I 层的含钙质结核粘土定义为“成都粘土”。

刘兴诗^{[4), 5), [15]}、成都水文队^{[2), 6)}、陈治荣等^[26]和四川地矿局^[22]把含钙质结核粘土(I 层)和褐色粘土(II 层)归为“成都粘土”, 并认为是冰缘风成堆积或风成黄土堆积。

汪波等^[19]、Han 等^[32]、Yang 等^[33-34]对“成都粘土”的定义, 实际上不仅包括了狭义的“成都粘土”(I 层)和褐色粘土(II 层), 而且含有网纹红土(III 层), 并确认它们为冰缘风成堆积或远源风尘堆积。

1) 四川地质局成都水文地质工程地质队. 1:20 万区域水文地质普查报告简阳幅(H-48-15). 1977:16-18

2) 四川地质局成都水文地质工程地质队. 成都平原水文地质工程地质综合勘察评价报告. 1985:18-37

3) 四川地质局航空区域地质调查队. 1:20 万区域地质调查报告(阆中幅; 德阳幅; 三台幅; 简阳幅). 1980:81-113

4) 刘兴诗. 成都粘土当属风成无疑. 地质报, 1981 年 1 月 2 日, 第 4 版.

5) 刘兴诗. 成都粘土成因问题再讨论. 地质报, 1981 年 3 月 27 日, 第 4 版.

6) 四川地质局成都水文地质工程地质队. 成都市水文地质工程地质环境地质综合勘察报告. 1990:25-29

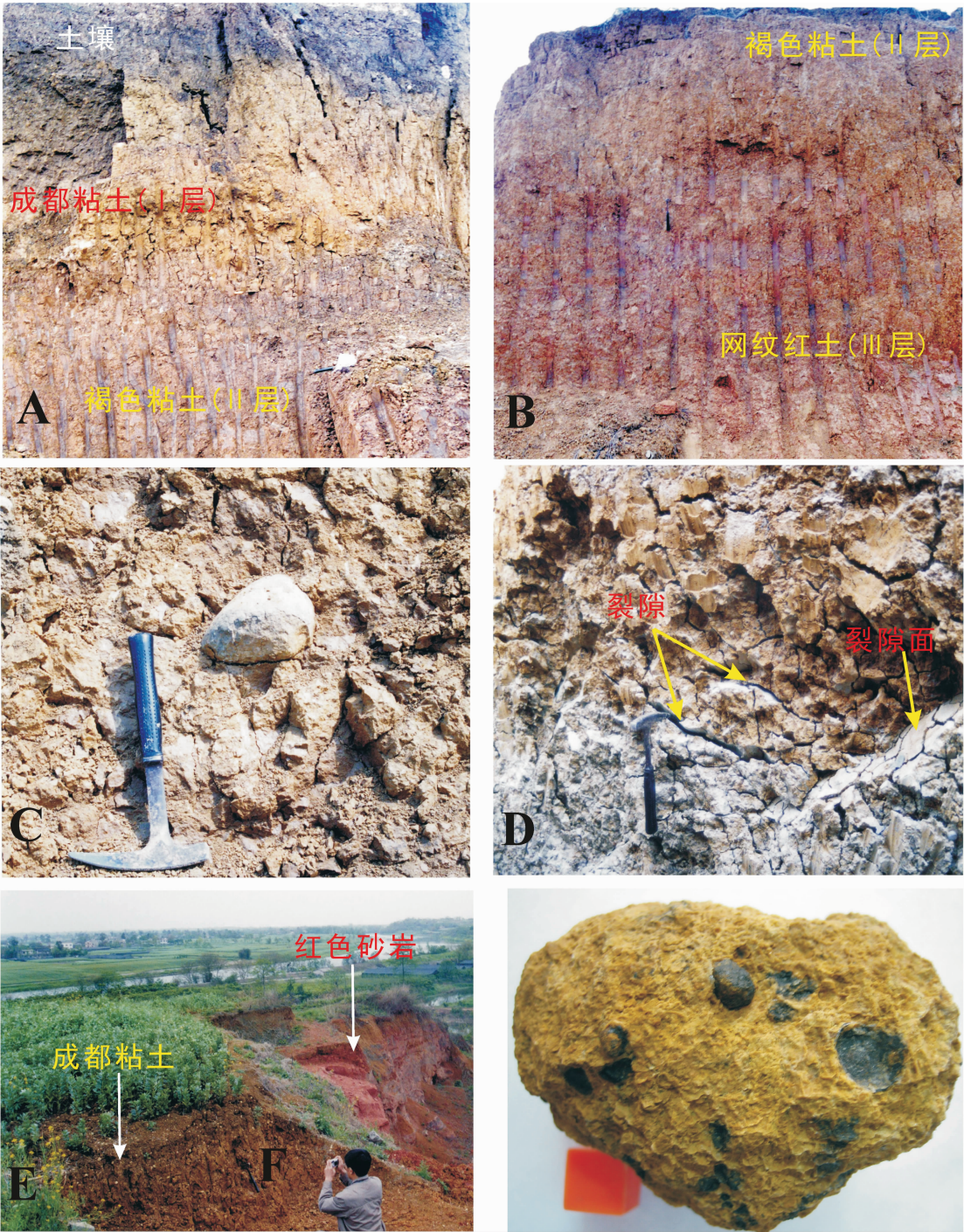


图 1 A. 德阳黄许镇剖面:上部灰色土壤及黄色“成都粘土”(I 层),下部褐色粘土(II 层);
B. 彭山县牧马乡剖面:“成都粘土”(I 层)缺失,上部褐色粘土(II 层),下部网纹红土(III 层);
C. 绵阳永兴镇普明粘土剖面 3.0 m 深处卵石;D. 三台县东塔镇传染病医院基坑剖面:
粘土中裂隙及光滑的裂隙面;E. 金堂县城西毗河北岸“成都粘土”直接覆盖在紫红色砂岩之上;
F. 成都理工大学老地质楼基坑粘土剖面 1.5 m 深处钙质结核包裹铁锰结核现象

Fig. 1 A. Huangxu profile of Deyang: upper gray soil and yellow “Chengdu Clay” (I unit) overlying the lower brown clay (II unit); B. Muma profile of Pengshan: the “Chengdu Clay” (I unit) missing, brown clay (II unit) covering the reticulate-mottled red clay (III unit); C. pebble in the brown clay at 3.0 m depth of Puming profile, Yongxing, Mianyang; D. clay profile of Dongta, Santai: fissures and smooth fissured surface; E. the “Chengdu clay” (I unit) overlying red sandstone at northern bank of Pihe River, Jintang; F. the ferromanganese nodules being included in the calcareous concretion at 1.5 m depth of clay profile in Chengdu University of Technology

赵志中等^[35]、乔彦松等^[36]、谭元隆等^[37]和 Tan 等^[38]基于粒度、稀土元素等指标,指出成都粘土及下伏网纹红土为风成成因。但这些研究者定义的“成都粘土”可能为褐色粘土(Ⅱ层)。

应立朝等^[39-40]、梁斌等^[41]也指出成都粘土与甘孜黄土一样,属于风成成因。但这些研究者,把“成都粘土”和下伏的褐色粘土(Ⅱ层),甚至网纹红土(Ⅲ层)统称为“成都粘土”。

刘东生等^[42-43]和其他一些研究者^[20,44-48]在论及“成都粘土”时,认为其是风成黄土成因,但未明确“成都粘土”的含义。

2.2 河流冲积成因说

Young (杨钟健)^[3]不同意 Thorp 和 Dye^[1]对成都粘土的风成成因解释,以及 Salfeld^[2]对砾石层的冰川成因解释,并提出河流和坡面侵蚀过程是一个简单和合理的成因解释。此外,有的学者^[13-14,18,49]把成都粘土与下伏的“雅安砾石层”视作一套冲积物的二元结构,为龙门山山前河流漫滩相沉积。成都水文队⁷⁾认为“成都粘土”的成因确有争议,但其倾向于流水堆积成因解释。

2.3 冰水成因说

李春昱^[50]、李承三等^[51]、成都水文队⁸⁾、四川区域地层表编写组^[21]、高雄鹰^[52]、孔德坊^[25]、韩梅^[53]和张品萃^[54]认为成都粘土和其下伏的“雅安砾石层”同属冰水成因。谢又予等^[55]和刘兴诗^[56]认为泥砾层系山前洪积物。

2.4 湖相沉积成因说

周绪纶^[17]否定钙质结核次生淋滤成因观点,并提出了“成都粘土”及其钙质结核同时形成于沉积作用过程中,是低能湖盆环境的沉积。

2.5 风化残积说

柯懋⁹⁾认为“成都粘土”是风化和成土产物,其母质主要为河流漫滩亚相沉积,其次是中生代基岩。“成都粘土”的生成时期也即是风化成土时期。

2.6 多成因说

四川航调队³⁾认为,区内含钙质结核粘土是遭受过或未遭受过早期风化的残积、坡积和冲积的粘土物质;但报告又同时指出,分布于梓潼黎雅、绵阳

宣化铺、金堂淮口等地丘间坦谷中的含钙质结核粘土为风成黄土堆积。

成都水文队¹⁰⁾把Ⅰ层含钙质结核粘土和Ⅱ层褐色粘土统称为“成都粘土”,并认为二层间无明显界线,均为渐变过渡关系,无层理,显示风成和水成混合沉积特征,并言局部地区可为残积而成。徐速等^[57]则提出成都粘土可能为冰期的冷水沉积和风成的混合产物。

综合前人的研究可以看出,“成都粘土”成因争议的形成及成因研究中存在的问题主要有以下几个方面:1. 对“成都粘土”的含义存在不同的理解,致使争议者讨论的对象并非是一致的;其中的关键问题是缺乏标准剖面的建立和对比。2. 不同的研究者,选择了不同地区或不同地貌单元之上的“成都粘土”作为研究目标,从而产生一定的片面性和局限性。由点到面以及系统和区域性综合对比研究尚嫌不足。3. 受研究历史所限,不同学说的产生与研究方法或指标的非唯一指示性有关。常量元素地球化学分析结果、粒度数据、钙质结核成因、矿物组成等研究为了解“成都粘土”做出了贡献。但这些方法的不确定性和局限性,使它们对“成都粘土”成因的研究尚缺乏明确的指示性。4. 对“成都粘土”形成环境和背景有不同的认识。持“冰水成因”说的学者认为,研究区西部的龙门山地区存在同时期发育的广泛的冰川。在此环境背景条件下,自然把“成都粘土”的成因与冰水相联系。而冰缘风成论者认为,龙门山地区主要为冰缘环境。河流冲积成因说则建立在“成都粘土”分布在龙门山前地带,涪江、绵远河、石亭江、岷江等河流的冲积扇十分发育。5. 对“成都粘土”不同特征的关注和解释,也会放大某一特征的成因指示意义。如褐色粘土(Ⅱ层)中偶见的卵石,风尘堆积说尚未给出满意的成因解释;而却成为河流、冰水成因说的关键证据。而河流冲积、冰水成因、湖相沉积等学说也无法解释含钙质结核粘土(Ⅰ层)披覆于不同的地貌单元所显示的风力搬运特征。此外,“成都粘土”及其钙质结核若为湖泊沉积,那么其分布的海拔应该相同或大致相同。但据本文作者的调查,“成都粘土”的分布高度存在较大的差距^[31]。“成都粘土”的颜色、结构、有机质

7) 四川地质局成都水文地质工程地质队. 成都市综合水文地质工程地质勘察报告. 1990: 33-45

8) 四川地质局成都水文地质工程地质队. 1:20 万区域水文地质普查报告简阳幅(H-48-15). 1977: 16-18

9) 柯懋. 关于“成都粘土”问题的商榷. 地质报, 1981 年 3 月 20 日, 第四版.

10) 四川地矿局成都水文地质工程地质队. 成都东部台地区供水水文地质勘察报告 1984.

及微体生物化石缺乏也很难支持湖泊成因论点。残积论者也无法解释覆盖于基岩风化壳上的“成都粘土”与下伏风化壳间的巨大差异。

通过初步的野外调查和研究表明,部分含钙质结核粘土(I层;分布在丘陵顶部、三级阶地顶部、丘间封闭和半封闭洼地、基岩风化壳上)应为风尘堆积。但冲积扇边缘、二级阶地上的含钙质结核粘土的成因尚待讨论,是冲积、坡积作用下形成的次生黄土,抑或是河流堆积遭受风化所成,尚待研究。而褐色粘土(II层)及网纹红土(III层)的成因更需要深入研究。

3 “成都粘土”的物源问题

对于“成都粘土”的河流冲积及冰水堆积成因论者,“成都粘土”的物质来源自然比较明确,即来自川西北的河流侵蚀、冰川磨蚀和冰缘寒冻风化所形成的碎屑物质。风化残积说认为“成都粘土”的物质来源是原地的河流漫滩亚相沉积或基岩,“成都粘土”的生成时期也即是风化成土时期。目前,最大争议存在于“成都粘土”的风成论者中,这也是今后应进一步要深入开展的研究。

3.1 源自西北干旱和沙漠区

Thorp 和 Dye^[1]在“成都粘土”命名一文中,首次讨论了“成都粘土”物源问题,并认为“成都粘土”物源大部分来自西北部的青海、甘肃,风运接力传输至“成都粘土”分布区;同时他们也指出盆地西缘冲积扇和西藏东部也有贡献。马溶之^[9]认为蒙新干燥的沙漠区为“成都粘土”的发源地。

熊毅^[58]1944年最早对“成都粘土”与马兰黄土同期和同源学说提出疑问,但并未明确提出个人的观点。卢演侑等^[59]在讨论中国黄土的物质来源时,绘图表示高空大气环流可以从西北沙漠和冰川地区携尘到达成都附近生成黄土。王文鹤^[47]认为来自我国西北地区的高空尘土是“成都粘土”的物源。

3.2 局地或近源风尘堆积

Richardson^[7]最早指出,“成都粘土”可能是来自当地河流物源的风尘堆积,而与中国北方黄土不需要有直接联系。邵之刚等^[16]认为‘龙门山地区广泛存在着D期冰流遗迹,而“成都粘土”可能属于D期冰缘风成堆积’。这意味着“成都粘土”的组成物质来自盆地西部的龙门山地区。

汪波等^[19]认为“成都粘土”是‘晚更新世龙门

山的冰缘区冰川堆积物等经风蚀并搬运在成都平原堆积所致’。胡兆国等^[28]、Feng等^[29-31]的研究结果指示,“成都粘土”的物源主要来自四川盆地西北部的河流冲积物,风尘搬运的动力是冰期及冰消期的下坡风(Katabatic wind);而来自西北干旱区和青藏高原的风尘对“成都粘土”的形成贡献很小。

乔彦松等^[36]认为,成都平原地区的风尘物质也主要来源于当地。谭元隆等^[37]和Tan等^[38]的分析结果指示,成都平原区域的风尘物质来源主要为四川盆地及周边山地的松散沉积物,并与黄土高原黄土物源存在差异。应立朝等^[39-40]给出了相互矛盾的结论。应立朝等^[39]2012年的文献指出成都平原区的成都粘土主体是远源的,还有部分来源于当地。但之后又修正了原有的认识,并提出成都粘土主要来源于成都平原当地^[40]。

3.3 青藏高原物源区

刘东生等^[43]认为“青藏高原的昆仑山以南地区,高空西风气流向东到110°E以东地区下沉,因此青藏高原的沙尘将降落到长江中下游地区。可是青藏高原南部是否是黄土来源区还有待进一步工作”。方小敏等^[44,60-65]提出青藏高原中、西部是一个重要的粉尘源区。青藏高原冬季风和高空西风急流可将粉尘搬运至高原东侧及其邻区^[44];并认为南秦岭(摩天岭)以南为冷黄土区,物质主要来源于青藏高原^[44,61]。这样青藏高原就成为“成都粘土”可能和潜在的物源。但张小曳等^[66-67]认为青藏高原不具备粉尘源区的条件。Yang等^[33-34]近期的研究也指出,四川盆地风尘堆积的物源是青藏高原;高空西风急流和青藏高原冬季风是风尘传输的动力。

总体而言,虽然前人已关注“成都粘土”的物源问题,但仅限于初步的研究,目前尚缺乏针对“成都粘土”物源的深入研究。此外,“成都粘土”与青藏高原及川西高原黄土、黄土高原及秦岭山地黄土的关系,以及可能的风尘物质的传输机制仍需要进一步的探索。

4 “成都粘土”的年代问题

基于野外地貌分布特征和相对地层关系的对比研究,早期的调查者^[1,8-9,12]提出成都粘土形成于晚更新世。Thorp 和 Dye^[1]和 Richardson^[7-8]认为成都粘土可与中国北方的马兰黄土对比。Young(杨钟健)^[3]认为分布在龙泉驿等地的粘土及红色土

(Red loams)为更新世。成都地质学院水文工程地质教研室^[13,68]及张惠英^[18]根据川西平原三级阶地的年代,将成都粘土确定为中更新世沉积。但其所定义的成都粘土实际上包含了狭义的“成都粘土”及下伏的褐色粘土(Ⅱ层)和网纹红土(Ⅲ层)。张惠英^[18]进一步指出,“成都粘土”及下伏的褐色粘土(Ⅱ层)和网纹红土(Ⅲ层)的内部并不存在明显的沉积间断面,应当认为这是“连续的”一层粘土。

之后,采用化石地层及传统¹⁴C定年方法,刘兴诗^[15]测得成都粘土中钙质结核¹⁴C年龄为 $16\,960 \pm 210 \sim 23\,500 \pm 410$ a;并指出成都粘土形成于晚更新世后期。刘良梧和茅昂江^[69]引用黎兴国等未刊发的数据,指出成都粘土中钙质结核¹⁴C年龄为 $11\,390 \sim 30\,390$ a B. P。但是,上述学者未给出详细的钙质结核采样信息。陈治荣和何银武^[26]报道了成都粘土中钙质结核¹⁴C年龄为 $10\,870 \pm 190 \sim 25\,290 \pm 1\,448$ a,确定成都粘土形成于晚更新世。从该文章作者采样描述来看,成都五桂桥剖面2.0 m深处采得的钙质结核应属于典型“成都粘土”中的结核,其年代为 $10\,870 \pm 190$ a。

近期,赵志中等^[35]采用古地磁地层方法,指出双流县应天寺、黄甲剖面网纹红土的顶、底界年龄约为 $0.56 \sim 0.64$ Ma B. P 和 $1.09 \sim 1.13$ Ma B. P。并进一步指出,成都粘土层与下伏网纹红土层之间至少存在0.4 Ma的地层缺失。其判断和推理的基础是上覆粘土为“成都粘土”,并根据前人工作限定这层“成都粘土”的形成时代不超过0.1 Ma B. P。但是,据本文作者的初步野外调查,在双流县应天寺剖面,典型的含钙质结核“成都粘土”似乎缺失(图1B)。赵志中等^[35]定义的“成都粘土”可能为褐色粘土(Ⅱ层),而非真正意义上的“成都粘土”(Ⅰ层)。因此,地层缺失的判断就存在不确定性。然而,本文作者并不否认二者之间可能存在沉积间断,但需要其他证据的支持。相反,本文作者的野外调查结果,同样指示“成都粘土”(Ⅰ层)与下伏褐色粘土(Ⅱ层)之间也可能存在沉积间断(图1F)。

Yang等^[33]基于古地磁地层,指出绵阳安县花菱镇粘土自825 ka B. P开始堆积。Han等^[32]利用光释光(OSL)及¹⁴C定年方法,对德阳黄许剖面上部粘土进行了年代约束;并外推出粘土底界年龄约为145 ka B. P。这一底界年龄与赵志中等^[35]及Yang等^[33]基于古地磁地层确定的底界年代有很大的差距,导致这一差距的具体原因是地层的不连续,抑或

其他原因,需要进一步工作的证实。

梁斌等^[41]利用光释光(OSL)定年方法,对成都市周围5个粘土剖面的年代进行了约束。样品的OSL测年结果为 $74.67 \pm 9.59 \sim 18.60 \pm 0.33$ ka。梁斌等^[41]进一步指出,网纹红土与上覆粘土之间并非连续堆积,中间至少存在约0.5 Ma的地层缺失。值得指出的是,龙泉山东侧金堂福兴剖面典型含钙质结核“成都粘土”(Ⅰ层)的底界年龄为 18.60 ± 0.33 ka。

综合前人的研究工作可以看出,网纹红土的底界年龄已得到较好的约束;典型“成都粘土”(Ⅰ层)可能是末次盛冰期(LGM)及末次盛冰期之后冰消期的沉积。但是,“成都粘土”及下伏的褐色粘土(Ⅱ层)和网纹红土(Ⅲ层)是否是连续堆积,以及可能的地层缺失的时间,仍待进一步工作的确认。

5 “成都粘土”及下伏粘土层的形成环境问题

Thorp和Dye^[1]提出风成成因的“成都粘土”作为“化石”证据,指示区域内曾经历了一个干燥多风的时期,并与现代湿润气候存在明显差异。Richardson^[7-8]认为“成都粘土”可能形成于半干旱的间冰期气候条件下,之前的黄土沉积被目前湿热的气候所风化改造。Harland^[12]指出“成都粘土”可能形成于冷期,其沉积之后气候变湿。刘兴诗^[15]认为成都粘土形成于晚更新世后期最后一个冰期,也就是一个冷的环境背景条件下。与此对应的是,马溶之^[9]提出成都粘土形成于间冰期。

基于成都双流应天寺胜利剖面网纹粘土层的孢粉分析结果,赵志中等^[35]指出第四纪中期网纹粘土母质的形成时期,成都平原地区植被总体呈现针叶林景观,气候经历了温凉较湿-寒凉较湿-温和或温凉较湿的变化。然而,网纹粘土母质的形成之后遭受了极端暖湿的气候条件下的风化改造。Han等^[32]基于德阳黄许粘土剖面的分析,探讨了MIS3阶段东亚季风与印度季风的变化及其机制。Yang等^[34]基于绵阳市安县花菱粘土剖面的粒度分析,指出500 ka以来粗粒组分显著增加,意味着源区的一个干旱化事件。谭元隆等^[37]基于对成都双流应天寺胜利粘土剖面化学风化特征的研究,指出四川盆地及周围地区自距今1.13 Ma(中更新世)以来有逐渐干旱化的趋势。

从目前情况来看,对于“成都粘土”及下伏粘土层的古环境指示意义的探讨,均是基于一个科学假设条件,即“成都粘土”及下伏粘土层为风成成因。同时,一些学者^[32-34]的研究也是基于“成都粘土”及下伏粘土层之间为连续堆积。如上所述,“成都粘土”及下伏粘土层的成因、以及各层粘土之间的地层关系,仍是一个争论的问题。在此研究基础背景下,对于“成都粘土”及下伏粘土层古环境指示意义的探讨就存在一定程度的不确定性。

此外,Han等^[32]在德阳黄许粘土剖面中识别出多层黄土-古土壤系列。Yang等^[33-34]在对绵阳市安县花菱粘土剖面的研究中,也指出虽然风化改造模糊了黄土-古土壤之间的界限,但是仍可识别出的黄土-古土壤系列。对于“成都粘土”及下伏粘土层中是否存在土-古土壤系列,或是否能够识别出黄土-古土壤系列,仍待进一步的工作证实。

6 进一步研究的建议

6.1 “成都粘土”的成因

与我国其他地区风尘堆积相比,成都粘土具有一定的特殊性。这些特征主要包括:无层理、柱状节理不发育、粘重(粘粒含量高)、弱透水性、不均匀性、裂隙性和胀缩性;二是 CaCO_3 含量低,“除结核层外,均不呈石灰性反应”^[9],土体呈弱酸性;三是土体中钙质结核与铁锰结核共存,并且钙质结核与铁锰结核之间存在不同的共生组合关系(图1F)。

“成都粘土”及下伏粘土层遭受了不同程度的后期风化改造,湿热风化强烈地改变了母质的原有特征。这在一定程度上干扰了对其成因和物源的研究。

目前,大多数研究者认为含钙质结核“成都粘土”(Ⅰ层)是风成堆积。进一步的工作应确证含钙质结核“成都粘土”(Ⅰ层)的风成起因,并重点研究褐色粘土(Ⅱ层)和网纹红土(Ⅲ层)的成因;探索三层粘土之间的成因联系。尤其是要加强标准剖面的建立,以及剖面间的对比研究。

今后主要研究内容应包括:1.“成都粘土”及其他下伏粘土层的分布范围及地貌分布特征:以了解沉积物的搬运和沉积的地质营力及沉积介质(风或流水);2.“成都粘土”及其他下伏粘土层的沉积结构:主要开展可能存在的沉积韵律或旋回对沉积环境的指示;尤其是要确认是否存在可识别的黄土-

古土壤系列;3.“成都粘土”及其他下伏粘土层的原生沉积构造特征:层理、层面构造及砾石、结核等的成因及沉积介质指示意义;4.钙质结核和铁锰结核在剖面及区域上的分布和赋存特征及其反映的沉积次序、沉积间断和风化过程;5.粘土层的产状及接触关系:粘土中卵砾石的分布层位及其与周围介质粘土的过渡关系及其成因意义;6.“成都粘土”及其他下伏粘土层在区域和剖面上的岩性和岩相变化:以野外调查为基础,辅助以粒度分析、磁化率、化学组成、粘土及碎屑矿物组成、以及Sr-Nd-Pb等同位素指标,查明“成都粘土”与其他下伏粘土层、砂(砾)层、泥砾层或基岩的关系。

6.2 “成都粘土”的物源

成因与物源研究不是相互割裂的。“成都粘土”物源的研究同时又可作为其成因研究的证据;而成因的确定又可对其物源给以限定。此外,对风成成因的“成都粘土”及可能是风成成因的其他粘土层,应重点关注可能存在的不同粒径间的物源差异,以及不同的指示意义。建议开展“成都粘土”的成因和物源的综合研究。

在今后的研究中,建议选择典型物源指示性指标,尤其是Sr-Nd-Pb等同位素指标,采取类比和归纳方法。确认“成都粘土”与下伏地层、青藏高原及川西黄土、黄土高原黄土和龙门山山前冲积扇的物源联系。一是可以通过秦岭黄土、川西黄土的物源来约束“成都粘土”的物源;二是通过在空间上的对比,来探讨它们之间的空间变化规律和联系,进而了解它们在粉尘来源和输移路径上的可能关系,最终来确定“成都粘土”的物源。

6.2.1 “成都粘土”的局地或近源研究

选择典型剖面,开展“成都粘土”及其他下伏粘土层、冲积层、基岩(风化壳)、及下伏泥砾层之间的综合对比研究,以探索“成都粘土”与它们在物源上的可能关系。此外,建立“成都粘土”与山前各河流冲积扇物源对比断面,以探索“成都粘土”与河流沉积物之间物源上的可能关系。

6.2.2 “成都粘土”与青藏高原及川西黄土之间的物源关系

青藏高原的粉尘活动及风尘堆积已被关注和研究,但是青藏高原是否是一个重要的粉尘源区及其可能的传输机制,仍存在很大的争议^[31]。

前人的研究工作主要集中在青藏高原的东北部边缘、相邻的川西高原黄土和四川盆地的“成都粘

土”等。这其中缺少了一个重要的空间区域风尘堆积的调查,即由羌塘高原-青藏高原东部-川西高原-四川盆地。由于缺乏对该区域风尘堆积基本特征及其空间变化的了解,致使我们很难探讨和分析在青藏高原内部、以及由高原向其东部外围区域,是否存在一个有效的风尘传输系统,以及可能的风尘传输机制^[29-31,70]。

希望通过今后的研究,在羌塘高原-青藏高原东部-川西高原-四川盆地建立一个东西向的风尘堆积综合对比断面;基于对风尘物质的年代、物源、风力分选特征、及其传输机制的认识,探讨青藏高原是否是一个重要的粉尘源区、青藏高原粉尘对“成都粘土”的贡献,以及可能的风尘传输机制^[29-31]。

6.2.3 “成都粘土”与秦岭黄土及黄土高原黄土之间的物源关系

携带粉尘的东亚冬季风是否能够越过秦岭并进入四川盆地堆积,以及可能的粉尘堆积界限及贡献量,亦是一个重要的科学问题^[29-31,71]。

分布于黄土高原与四川盆地之间的秦岭是我国重要的地理分界线。此外,作为大地貌,高大的秦岭山脉也可能阻挡了形成黄土高原的风尘进一步向四川盆地输送。但是,在秦岭山地、汉中盆地直至广元嘉陵江边的贯家河仍有大量风尘堆积分布^[71-73]。这些风尘堆积是黄土高原黄土向南输送过程中的延伸沉积(或言是黄土高原黄土与四川盆地“成都粘土”的联系纽带^[1]),抑或是局地近源风尘堆积仍待调查研究。

在有关成都粘土的早期文献中,Thorp and Dye^[1]和 Harland^[12]均描述了成都市及四川盆地的降尘或浮尘天气事件。Thorp and Dye^[1]一文中,引述 Dye 的观察,在 25 a 里成都出现了 4 次浮尘天气事件。Thorp and Dye 进一步阐述,不常见的降尘对土壤性质影响不大。但是,这些事件可能指示了在地质历史时期存在大的和有重要影响的尘暴事件。此外,2009-04-24 四川北部及成都市出现严重的浮尘天气事件。此次浮尘与我国西北甘肃河西出现强沙尘暴天气有关。上述近现代的记录表明,我国西北或北方风尘可以被输送到四川盆地。通常认为,只有 <20 μm 粒级的粉尘能够较长时间地滞留于空中而被风力远距离传输^[74]。但是,“成都粘土”的全样及石英粒度分析表明,其含有大量的 >20 μm 粒级的颗粒(图 2)^[73]。因此,远源风尘在“成都粘土”的形成过程中可能扮演了一个次要的

角色^[29-31]。希望通过今后的研究,能在黄土高原-秦岭山地-汉中盆地-四川盆地建立一个南北向的风尘堆积综合对比断面,以探讨“成都粘土”与黄土高原黄土的物源关系。

6.3 “成都粘土”的年代学

在“成都粘土”剖面中,缺乏能用于地层划分的化石,AMS¹⁴C 定年所需的有机物质也很少。钙质结核¹⁴C 定年也可能受碳库效应及¹⁴C 测年方法时限的制约。在今后的工作中,应该选择典型剖面,利用古地磁和光释光(OSL)年代学方法,开展精细的年代学研究。确定“成都粘土”及下伏层次年代地层序列,以及可能存在的界限和沉积间断。为“成都粘土”形成环境及其古环境指示意义的研究奠定基础。

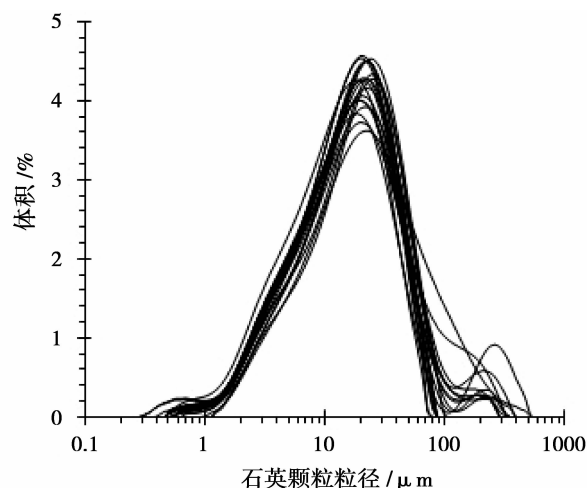


图 2 “成都粘土”(I 层)中石英粒度分布

Fig. 2 Quartz grain size distribution of the “Chengdu Clay” (I unit)

6.4 “成都粘土”岩石地层单位和沉积地貌单元

今后应在标准剖面建立及对比研究基础上,重视“成都粘土”沉积的地层结构在不同地区差异及其原因的调查。在成因和物源研究基础上,厘定“成都粘土”(I 层)及下伏的褐色粘土(II 层)和网纹红土(III 层)之间在成因和物源上的联系。结合“成都粘土”年代学研究,明确“成都粘土”这一岩石地层单位和沉积地貌单元的确切含义。

在“成都粘土”研究中,另外一个不可回避的问题是“广汉粘土”。同有关“成都粘土”的研究一样,“广汉粘土”的岩石地层单位和沉积地貌单元亦缺乏明确的定义。此外,“成都粘土”与“广汉粘土”之间的地层层位关系也很混乱。

刘兴诗^[15]提出了“广汉粘土”这一名称,并指示存在于“成都粘土”之下的河流相亚粘土层。陈治荣和何银武^[26]对“广汉粘土”一词的定义与刘兴诗^[15]相似。其他许多研究者^[16,75-77],把二级阶地顶部的粘土层理解为“广汉粘土”,并用河流沉积来解释。而 Thorp 和 Dye^[1]、Richardson^[8]把绵阳地区二级阶地粘土也归为“成都粘土”。梁云甫^[76]则提出“广汉粘土”为晚更新世流水堆积,而“成都粘土”是晚更新世风成堆积,二者乃是同期异相。苏森^[78]则把成都周围二、三级阶地粘土统称为成都粘土。

目前似乎存在一个趋势,即把德阳、广汉及成都等地二级阶地之上的粘土,甚至包括含钙质结核的粘土归为“广汉粘土”;而把三级阶地及更高阶地和基岩之上覆盖的含钙质结核粘土归为“成都粘土”。因此,今后的研究应该对“成都粘土”与“广汉粘土”有明确的定义和区分。

关于“成都粘土”的含义,原则上应该尊重命名者的意见,但限于命名者 Thorp 和 Dye^[1]所描述的不确定性,本文作者认为,目前可把近地表出露的、分布在高阶地(主要是三级阶地)或丘陵地带基岩上、形成于末次盛冰期(LGM)及之后的冰消期、具有风成成因特征、含钙质结核的黄色粘土(I层)作为“成都粘土”的岩石地层。

6.5 “成都粘土”古环境指示意义

“成都粘土”分布于一个特殊的区域,其向西通过川西高原与青藏高原相连,向北通过秦岭山地与黄土高原接壤^[29-31]。在现在大地貌和大气环流背景下,受青藏高原和秦岭山地的影响,四川盆地一带气流扰动较少,风力较弱,被称为“死水区”^[79-80]。从而不利于现代粉尘的搬运和堆积。同时也表明,可能的风成“成都粘土”形成期的大气环流状况与现今相比可能存在较大的差异。我国气象学家,通过对青藏高原积雪与我国南方洪水的关系研究,已阐明青藏高原下垫面异常对高原和邻近地区上空大气环流的影响。因而,青藏高原周边地区大气环流和环境同时受控于高原的隆生过程、高度和下垫面状况。在冰期时高原的影响可能更加明显。青藏高原冬季风、高空西风 and 东亚冬季风,甚至冰期龙门山冰缘地带的反气旋风均有可能将粉尘搬运至盆地西部沉积。因此,对“成都粘土”成因、物源和年代的研究,对认识和了解地质时期,尤其是冰期及冰消期青藏高原及其周边地区大气环流格局及强度,以及

风尘源区的环境变化是十分有意义的。

“成都粘土”及其下伏粘土层遭受了不同程度的后期风化改造。但是,次生的粘土矿物、钙质结核与铁锰结核在剖面上的演化及组合关系,也可为研究提供信息。钙质结核是干旱半干旱环境下的产物,而铁锰结核形成于湿热风化过程中。钙质结核的存在同时也指示“成都粘土”母质含有较多的碳酸盐矿物。钙质结核包裹铁锰结核现象,不仅指示了可能存在沉积间断,同时也指示了风化环境由弱酸性、湿热风化向弱碱性、干旱半干旱的转变。此外,风成黄土类母质土体具有棱柱状结构及湿陷性。在风尘沉积之后的湿热风化过程中,次生粘土矿物的“胶结”有利于其超固结特性的形成。而风尘沉积原有的棱柱状结构及湿陷性,以及风化过程形成的不均匀胀缩性(主要是收缩性大于膨胀性^[78]),有益于土体网纹结构及裂隙的发育。因此,本文作者认为,“成都粘土”及其下伏粘土层可能的风成因解释,有助于对其超固结特性和裂隙性形成的理解。

7 结语

风尘堆积是一种特殊沉积地貌体和工程地质土体,同时也是一种十分理想的环境信息载体。风尘堆积的物质来源和其粒度分布规律是研究大气环流格局(风的方向和强度)的很好的替代指标。通过对风尘堆积物来源和源区特征分析,进而探讨大地貌演化、大气环流格局及变化,乃至环境演变已成为不同学科所共同关注的科学问题。

我国是黄土堆积最为广泛的国家。目前,科研工作者已对黄土高原、华北、东北、青藏高原,以及下蜀土、江南网纹红土等地区的风尘堆积开展了深入的研究,并取得了一些重要的科研成果。相比较而言,对“成都粘土”及其下伏粘土层这一特殊土体的成因、物源、年代、风化过程和环境指示的系统性和深入性研究有待加强。

此外,“成都粘土”及其下伏的褐色粘土(Ⅱ层)和网纹红土(Ⅲ层)是著名的裂隙性和胀缩性粘土,是一类对于工程建筑物具有较强危害作用的特殊土体^[13,25,76,78]。关于其成因、物质来源、形成环境、风化过程、地层划分的研究,对于认识这一特殊土体工程地质分类、土体裂隙的成因、滑坡的形成、地基的变形等工程地质问题亦具有重要的理论和实践意

义 [49, 52-53, 81-83]。

参考文献 (References)

- [1] Thorp J, Dye D S. The Chengtu Clays-deposits of possible loessial origin in western and northwestern Szechuan Basin [J]. Bull. Geol. Soc. China, 1936, 15: 225-246
- [2] Salfeld H. Über die diluviale Vereisung von West-Szechuan (China) und insbesondere der Chengtu-Ebene [J]. Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1936, (9): 353-357
- [3] Young C C. New triassic and cretaceous reptiles in China [J]. Bull. Geol. Soc. China, 1937, 17: 109-120
- [4] Zhu Lianqing. A reconnaissance soil survey of Chengtu area, Szechuan [J]. Soil Bull. 1937, 18, 1-53 [朱莲青. 四川成都地区土壤约测 [J]. 土壤专报, 1937, 18: 1-53]
- [5] Thorp J. Geography of the soils of China [M]. Peking: The National Geological Survey of China, 1939.
- [6] Yuan Shaoxian. The calcareous concretions in the Chengdu Clay [J]. The Nung Ling Sin Pao, 1942, (1-3): 7-11 [原绍贤. 成都粘土之石灰结核 [J]. 农林新报, 1942, (1-3): 7-11]
- [7] Richardson H L. Soils and agriculture of Szechwan [R]. National Agriculture Research Bureau. Special Publication No. 27. Chungking: Ministry Agriculture and Forestry, 1942: 24-31
- [8] Richardson H L. The ice age in west China [J]. West China Border Res. Soc. (Chengtu) Ser. B, 1943, 14: 1-27
- [9] Ma Rongzhi. Formation of Chinese loess [J]. Geol. Rev., 1944, 9: 205-224 [马溶之. 中国黄土之生成 [J]. 地质论评, 1944, 9: 205-224]
- [10] Shi Yafeng. The geographic expedition in the western Szechuan [J]. Geography, 1945, 5: 21-33 [施雅风. 川西地理考察记 [J]. 地理, 1945, 5: 21-33]
- [11] Yü Hao, Lee Qinkui. Soils in Szechuan [J]. Soil Bull., 1945, 24: 1-91 [余皓, 李庆逵. 四川之土壤 [J]. 土壤专报, 1945, 24: 1-91]
- [12] Harland W B. On the physiographical history of Western Szechuan with special reference to the ice age in the red basin [J]. West China Border Res. Soc. (Chengtu) Ser. B, 1945, 15: 1-19
- [13] Chengdu College of Geology. Engineering geological characteristics of Chengdu Clay [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1960, (1): 75-91 [成都地质学院水文工程地质教研室. 成都粘土的工程地质特征 [J]. 成都地质学院学报, 1960, (1): 75-91]
- [14] Xu Zhonglu, Liu Yaping. Quaternary calcareous concretions in the Western Sichuan Plain [G]//3th Conference of CAQR. Beijing: Science Press, 1982: 272-273 [许仲路, 刘亚平. 川西平原第四系中钙质结核的发育规律 [G]//中国第四纪研究委员会, 第三届全国第四纪学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1982: 272-273]
- [15] Liu Xinshi. Quaternary in the Sichuan Basin [M]. Chengdu: Sci. Technol. Pre. Sichuan, 1983: 88-123 [刘兴诗. 四川盆地第四系 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1983: 88-123]
- [16] Shao Zhigang, Li Daijun, Li Yongzhao. Geological characteristics of Pleistocene clay in the Chengdu Plain [G]//Proceedings of Quaternary glacial and Quaternary Geology (No. 1), Geological Society of China. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 142-153 [邵之刚, 李代钧, 李永昭. 成都平原更新世粘土的地质特征 [G]//中国地质学会第四纪冰川与第四纪地质专业委员会, 第四纪冰川与第四纪地质论文集(第一集). 北京: 地质出版社, 1984: 142-153]
- [17] Zhou Xulun. Calcareous concretions in the Chengdu Clay [J]. Hydrogeol. Eng. Geol., (4): 29-31 [周绪纶. 成都粘土中的钙质结核 [J]. 水文地质工程地质, 1986, (4): 29-31]
- [18] Zhang Huiying. Genesis of the Chengdu Clay based on micro-fracture research [J]. Hydrogeol. Eng. Geol. (1): 17-19 [张惠英. 从微结构特征对成都粘土成因的初步探讨 [J]. 水文地质工程地质, 1986, (1): 17-19]
- [19] Wang Bo, Nie Qianrong, Wang Yunsheng, et al. Discussion on the genetic mechanism of the Chengdu Clay [J]. Geol. Hazards Environ. Preserv, 2002, 13: 54-56 [汪波, 聂前勇, 王运生, 等. 也论成都粘土的成因 [J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13: 54-56]
- [20] Editorial Committee of Chinese Geology. Regional stratigraphic in China [M]. Beijing: Science Press, 1956. [中国地质学编辑委员会. 中国区域地层表 [M]. 北京: 科学出版社, 1956.]
- [21] Editorial Committee of Sichuan stratigraphy. Sichuan branch - Regional Stratigraphy in Southwest China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978: 96-97 [四川区域地层表编写组. 西南地区区域地层表-四川分册 [M]. 北京: 地质出版社, 1978: 96-97]
- [22] Mineral Bureau of Sichuan. Geology in Sichuan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 293-305 [四川地矿局. 四川区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 293-305]
- [23] Zhou Mulin, Min Longrui, Wang Shufang. Stratigraphy in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 29 [周慕林, 闵隆瑞, 王淑芳. 中国地层典 [M]. 北京: 地质出版社, 2000: 29]
- [24] Zhang Shouxing. Stratigraphic terms in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 63 [张守信. 中国地层名称 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 63]
- [25] Kong Defang. Fractured clay [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-11 [孔德坊. 裂隙性粘土 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-11]
- [26] Chen Zhirong, He Yingwu. A preliminary discussion on date determination of Guanghan clay and Chengdu Clay with ^{14}C dates [J]. Mountain Research, 1990, 8: 167-173 [陈治荣, 何银武. 据 ^{14}C 年龄数据浅议广汉粘土与成都粘土的时代问题归属 [J]. 山地研究(现山地学报), 1990, 8: 167-173]
- [27] Xie Youyu. Atlas of quartz surface structure in China [M]. Beijing: Ocean Press, 1984: 1-11 [谢又予. 中国石英砂表面结构特征图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 1-11]
- [28] Hu Zhaoguo, Feng Jinliang, Ju Jianting. Grain size distribution and micro-structure of quartz in the Chengdu Clay [J]. Mountain Research, 2010, 28, 392-406 [胡兆国, 冯金良, 鞠建廷. 成都粘土中石英的粒度分布及其表面微结构特征 [J]. 山地学报,

- 2010, **28**:392–406]
- [29] Feng J–L, Hu Z–G, Cui J–Y, et al. Distributions of lead isotopes with grain size in aeolian deposits [J]. *Terra Nova*, 2010, **22**: 257–263
- [30] Feng J–L, Hu Z–G, Ju J–T, et al. Variations in trace element (including rare earth element) concentrations with grain sizes in loess and their implications for tracing the provenance of eolian deposits [J]. *Quatern. Int.*, 2011, **236**: 116–126.
- [31] Feng J–L, Hu Z–G, Ju J–T, et al. The dust provenance and transport mechanism for the Chengdu Clay in the Sichuan Basin, China [J]. *Catena*, 2014, **121**:68–80
- [32] Han W–X, Fang X–M, Yang S–L, et al. Differences between East Asian and Indian monsoon climate records during MIS3 attributed to differences in their driving mechanisms: Evidence from the loess record in the Sichuan basin, southwestern China and other continental and marine climate records [J]. *Quatern. Int.*, 2010, **218**: 94–103
- [33] Yang S–L, Fang X–M, Shi Z–T, et al. Timing and provenance of loess in the Sichuan Basin, southwestern China [J]. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecon.*, 2010, **292**: 144–154
- [34] Yang S–L, Fang X–M, Yan M–D, et al. Grain size profiles in the Chengdu Clay, eastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for significant drying of Asia since 500 ka B. P. [J]. *Asian Earth Sci.*, 2010, **38**: 57–64
- [35] Zhao Z–Z, Qiao Y–S, Wang Y, et al. Magnetostratigraphic and paleoclimatic studies on the red earth formation from the Chengdu Plain in Sichuan Province, China [J]. *Sci. China (Ser. D)*, 2007, **50**:927–935
- [36] Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Li Zengyue, et al. Aeolian origin of the red earth formation in the Chengdu Plain [J]. *Quaternary Sci.*, 27:286–294 [乔彦松, 赵志忠, 李增悦, 等. 成都平原红土堆积的风成成因证据 [J]. *第四纪研究*, 2007, **27**:286–291]
- [37] Tan Yuanlong, Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, et al. Chemical weathering characteristics and paleoclimatic significance of the eolian deposits in Chengdu Plain [J]. *Geomechanics*, 2013, **19**:26–34 [谭元隆, 乔彦松, 赵志忠, 等. 成都平原风尘堆积的化学风化特征及其古气候意义 [J]. *地质力学学报*, 2013, **19**:26–34]
- [38] Tan Y–L, Qiao Y–S, Zhao Z–Z, et al. Geochemical characteristics of eolian deposits in the Chengdu Plain of Sichuan Province and the implications for provenance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, **87**:1712–1723
- [39] Ying Lichao, Liang Bin, Wang Quanwei, et al. Grain size analysis and origin of the Chengdu clay from the Chengdu Plain, Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, **32**:72–77 [应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 川西平原区成都粘土的粒度特征及其成因意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, **32**:72–77]
- [40] Ying Lichao, Liang Bin, Wang Quanwei, et al. Geochemical characteristics of Chengdu clay and their implications for provenance and weathering intensity [J]. *Geology in China*, 2013, **40**:1666–1674 [应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 成都粘土地球化学特征及其对物源和风化强度的指示 [J]. *中国地质*, 2013, **40**:1666–1674]
- [41] Liang Bin, Wang Quanwei, Zhu Bin, et al. Optically stimulated luminescence dating of the Chengdu Clay in the west Sichuan [J]. *Quaternary Sci.*, 2013, **33**:823–828 [梁斌, 王全伟, 朱兵, 等. 川西地区成都粘土的光释光年代学 [J]. *第四纪研究*, 2013, **33**:823–828]
- [42] Liu Dongsheng, Zhang Zonghu. The loess in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1962, **42**:1–14 [刘东生, 张宗祜. 中国的黄土 [J]. *地质学报*, 1962, **42**:1–14]
- [43] Liu Dongsheng. Loess and the Environment [M]. Beijing: China Ocean Press, 1985:17, 321–322 [刘东生, 等. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985:17, 321–322]
- [44] Fang X. The origin and provenance of the Malan loess along the eastern margin of the Qinghai–Xizang (Tibetan) Plateau and its adjacent area [J]. *Sci. China (Ser. B)*, 1995, **38**: 876–887
- [45] Sun Jianzhong On the genesis of the loesses in China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1980, (2):194–200 [孙建中. 黄土成因问题的探讨 [J]. *地质科学*, 1980, (2):194–200]
- [46] Sun Dianqing, Wu Xihao. Studies on the Quaternary glacial geology of China [J]. *Bull. Chin. Acad. Geol. Sci.*, 1986, (15): 121–135 [孙殿卿, 吴锡浩. 关于中国第四纪冰川地质研究 [J]. *中国地质科学院院报*, 1986, (15):121–135]
- [47] Wang Wengu, The summary history of landform evolution in Mianyang [J]. *Southwest Institute of Technology*, 1998, **13**:74–78 [王文鹤. 绵阳市地貌发育简史 [J]. *西南工学院学报*, 1998, **13**:74–78]
- [48] Li Qinqiang. Soils in Sichuan [M]. Chengdu: Sci. Technol. Pre. Sichuan, 1995. [李钦榜. 四川土壤. 成都: 四川科学技术出版社, 1995.]
- [49] Fei Meigao, Xu Guolon, Zhang Pincui. Phenomena of tectonic fractures and faults in Chengdu Clay [J]. *Geol. Hazards Environ. Preserv.*, 1995, **6**:24–32 [费美高, 许国琳, 张品萃. 成都粘土中的构造断裂现象及其研究意义 [J]. *地质灾害与环境保护*, 1995, **6**:24–32]
- [50] Li Chunyu. Generation of gravel layers in Ya'an and Jiangbei periods [J]. *Geol. Rev.*, 1947, **12**:117–126 [李春昱. 雅安期与江北期砾石层之生成 [J]. *地质论评*, 1947, **12**:117–126]
- [51] Li Chensan, Wu Yansheng, Li Yongzhao, et al. Quaternary glacial relics in eastern foot of southern Longmenshan Mountains [G]// *Corpus of Quaternary glacial relics in China*, Quaternary Commission of China. Beijing: Science Press, 1964:14–84 [李承三, 吴燕生, 李永昭, 等. 四川龙门山南段东坡及其山前带第四纪冰川遗迹 [G]//中国第四纪委员会等, 中国第四纪冰川遗迹研究文集. 北京: 科学出版社. 1964:14–84]
- [52] Gao Xiongying. Analysis of geological conditions on landslide [J]. *Sichuan Architectural*, 2004, **24**:46–47 [高雄鹰. 浅析滑坡生成的地质条件 [J]. *四川建筑*, 2004, **24**:46–47]
- [53] Han Mei. Conditions of the soil body for building foundation in Chengdu [J]. *Electric Power Survey*, 1996, (1):25–33 [韩梅. 成都市区地基土的建筑条件综述 [J]. *电力勘测*, 1996, (1):25–33]

- [54] Zhang Pincui. Effect of free Fe_2O_3 on the engineering properties of Chengdu Clay [J]. Mineral. Petrol., 1999, 19: 81–84 [张品萃. 游离 Fe_2O_3 对成都粘土部分工程地质特征的影响[J]. 矿物岩石, 1999, 19: 81–84]
- [55] Xie Youyü, Cui Zhijiu. The observation and comparison of some of quartz sands using SEM [J]. Hydrogeol. Eng. Geol., 1980, (6): 19–21 [谢又予, 崔之久. 某些石英砂的扫描电镜观察和比较[J]. 水文地质工程地质, 1980, (6): 19–21]
- [56] Liu Xingshi. Discussion about ‘boulder clay’ in western Sichuan Plain [J]. Glaciology and Geocryology, 1980, 2: 51–52 [刘兴诗. 川西平原一个“泥砾”剖面的讨论[J]. 冰川冻土, 1980, 2: 51–52]
- [57] Xu Su, Xu Guanli, Sun Chuanmin. Mineralogical character of main clay soils in Chengdu [J]. Bull. Sci. Tech., 2012, 28: 7–10 [徐速, 徐冠立, 孙传敏, 等. 成都地区主要粘性土壤的矿物学特征[J]. 科技通报, 2012, 28: 7–10]
- [58] Hseung Yi. Properties and origin of Pleistocene clay in Jiangxi [J]. Geol. Rev., 1944, 9: 109–120 [熊毅. 江西更新统粘土之性质及其生成[J]. 地质论评, 1944, 9: 109–120]
- [59] Lu Yanchou, Wen Qizhong, Huang Bojun, et al. A preliminary discussion on the source of loessic materials in China—a study of the surface textures of silt quartz grains by transmission electron microscope [J]. Geochimica, (1): 47–53 [卢演畴, 文启忠, 黄伯钧, 等. 中国黄土物质来源的初步探讨[J]. 地球化学, 1976, (1): 47–53]
- [60] Fang Xiaomin, Chen Fubin, Shi Yafeng, et al. Garze loess and evolution of cryosphere on the Tibetan Plateau [J]. Chinese Sci. Bull., 1996, 41: 1865–1867 [方小敏, 陈富斌, 施雅风, 等. 甘孜黄土与青藏高原冰冻圈演化[J]. 科学通报, 1996, 41: 1865–1867]
- [61] Chen Guoying, Sun Shurong, Fang Xiaomin, et al. Heavy minerals and provenance of the Malan loess on the Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau and its adjacent area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15: 134–142 [陈国英, 孙树荣, 方小敏, 等. 青藏高原及邻区马兰黄土重矿物与黄土物质来源[J]. 沉积学报, 1997, 15: 134–142]
- [62] Fang X–M, Li J–J, Van der Voo, R. Age and provenance of loess in West Qinling [J]. Chinese Sci. Bull., 1999, 44: 2288–2291
- [63] Fang X–M, Han Y–X, Ma J–H, et al. Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: a case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa [J]. Chinese Sci. Bull., 2004, 49: 953–960
- [64] Han Yongxiang, Xi Xiaoxia, Song Lianchun, et al. Spatio-temporal sand-dust distribution in Qinghai–Tibet Plateau and Its Climatic Significance [J]. Desert Research, 2004, 24: 588–592 [韩永翔, 奚晓霞, 宋连春, 等. 青藏高原沙尘及其可能的气候意义[J]. 中国沙漠, 2004, 24: 588–592]
- [65] Lü L–Q, Fang X–M, Lu H–Y, et al. Millennial-scale climate change since the last glaciation recorded by grain sizes of loess deposits on the northeastern Tibetan Plateau [J]. Chinese Sci. Bull., 2004, 49: 1157–1164
- [66] Zhang X–Y, Shen Z–B, Zhang G–Y, et al. Remote mineral aerosol in westerlies and their contributions to the Chinese Loess [J]. Sci. China (Ser. D), 1996, 39: 134–143
- [67] Zhang Xiaoye. Source distribution, emission, transport, deposition of Asia dust and loess accumulation [J]. Quaternary Sci., 2001, 21: 29–40 [张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积[J]. 第四纪研究, 2001, 21: 29–40]
- [68] Chengdu College of Geology. Hydrogeological and engineering geological conditions in the western Sichuan Plain [J]. Chengdu College of Geology, 1960, (2): 1–42 [成都地质学院水文工程地质教研室. 川西平原水文工程地质条件的研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 1960, (2): 1–42]
- [69] Liu Liangwu, Mao Angjiang. Radiocarbon dating of calcareous concretions [J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23: 106–112 [刘良梧, 茅昂江. 钙质结核放射性碳断代的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23: 106–112]
- [70] Lin Yongchong. The origin and provenance of parent materials for alpine meadow soils in Amdo, Northern Tibetan Plateau [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, CAS. Graduate University of CAS. 2012. [林永崇. 藏北高原安多地区高山草甸土的母质成因及其物源探讨[D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院研究生院, 2012.]
- [71] Lei Xiangyi. Grain size analysis and genesis of loess in the Qinling Mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72: 178–188 [雷祥义. 秦岭黄土的粒度分析及其成因初步探讨[J]. 地质学报, 1998, 72: 178–188]
- [72] Pan Deyang. The Loess [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1958: 17 [潘德杨. 黄土[M]. 北京: 地质出版社, 1958: 17]
- [73] Hu Zhaoguo. The preliminary study on origin and provenance of Chengdu Clay [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, CAS. Graduate University of CAS. 2010. [胡兆国. 成都粘土成因及其物源的初步研究[D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院研究生院, 2010.]
- [74] Pye K. Aeolian dust and dust deposits [M]. London: Academic Press, 1987.
- [75] He Yurong, Huang Chengmin, Chen Xuehua, et al. Taxonomic classification of soils derived from loesses in hilly region of western Sichuan [J]. Mountain Research, 2001, 19: 334–338 [何毓蓉, 黄成敏, 陈学华, 等. 川西丘陵地区黄色母质发育土壤的系统分类[J]. 山地学报, 2001, 19: 334–338]
- [76] Liang Yunfu. Engineering geological characteristics of Pleistocene clay in Chengdu Plain [J]. Site Investigation Science and Technology, 1987, (6): 43–46 [梁云甫. 成都平原更新世粘土类土的工程地质特征[J]. 勘察科学技术, 1987, (6): 43–46]
- [77] Xu Zhonglu. Studies on the vertical fissures and calcareous concretions in terrestrial non-aeolian deposits [J]. Sichuan Normal University, 1985, (4): 74–82 [许仲路. 非风成陆相土状堆积层中垂直节理和钙质结核的粗浅分析[J]. 四川师范大学学报, 1985, (4): 74–82]
- [78] Su Sen. Engineering geological properties and judgment for the Chengdu Clay [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1992, (2): 5–11 [苏森. 成都粘土的工程特性与评价[J]. 工

- 程勘察,1992,(2):5-11]
- [79] Zhang Jiacheng. *Climate in China* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1991. [张家诚. 中国气候总论[M]. 北京:气象出版社, 1991.]
- [80] Ye Duzheng, Gao Youxi. *Meteorology in the Tibetan Plateau* [M]. Beijing: Science Press, 1979:35-36 [叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社, 1979:35-36]
- [81] Hu Xiewen, Li Qunfeng, Zhao Zesun. et al. Mechanical properties of fissured clay [J]. *Geotechnical Engineering*, 1994, 16:81-88 [胡卸文, 李群丰, 赵泽三, 等. 裂隙性粘土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1994, 16:81-88]
- [82] Zhao Xiang. On genesis of fissures in Chengdu Clay [J]. *Geol. Hazards Environ. Preserv.*, 1997, 8:40-46 [赵翔. 成都粘土裂隙成因研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8:40-46]
- [83] Peng Sheqin, Zhao Qihua, Huang Runqiu. The dynamic triaxial test study of Chengdu Clay [J]. *Geol. Hazards Environ. Preserv.*, 2002, 13:57-60 [彭社琴, 赵其华, 黄润秋. 成都粘土动三轴试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13:57-60]

The Origin, Provenance, Age and Climatic Links of the Chengdu Clay: A Review

FENG Jinliang¹, ZHAO Zhenhong², ZHAO Xiang³, ZHAO Qihua⁴, PENG Sheqin⁴

(1. *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;*

2. *The 4th Hydrogeology Group of Hebei Bureau of Geological Development, Cangzhou 061000, China;*

3. *China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute, Chengdu 610081, China;*

4. *Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)*

Abstract: The Chengdu Clay (Chengtuo Clay) was named by Thorp and Dye in 1936. The Chengdu Clay is defined as a type of brownish yellow sticky and plastic clay which contains lime concretions overlying the hills and higher terraces in the northwest Sichuan Basin (Szechwan Basin). Thorp and Dye also proposed that the Chengdu Clay is likely a weathered aeolian deposit. The developed Quaternary clayey strata in the northwestern Sichuan Basin can be divided into three units from top to bottom: Chengdu Clay (upper horizon), brown clay (middle horizon) and reticulate-mottled red clay (lower horizon). Within the 70 years after Thorp and Dye, a number of pedologists, geographers and geologists focused on the study of the Chengdu Clay. But, the origin, provenance, age and climatic links of the Chengdu Clay, and the relationship among the Chengdu Clay, loess on the Tibetan Plateau, and loess on the Chinese Loess Plateau are still debatable. The Chengdu Clay as a possible aeolian deposit can provide valuable information about past climate and vegetation, especially information about past wind direction, intensity of atmospheric circulation, source-area aridity and plant cover. In addition, the Chengdu Clay and underlying brown clay and red clay are characterized by overconsolidated, expansive and fissured features. Therefore, the study of these particular clays has theoretical and practical significance. The history of the study for the Chengdu Clay was reviewed in this paper. In addition, a number of research questions for future work have been raised. They involve the following issues: 1. further investigation of geomorphological distribution of Chengdu Clay; 2. high-resolution geochronological study of Chengdu Clay and establishment of key profile; 3. origin of brown clay and reticulate-mottled red clay; 4. relationship and possible sedimentary hiatus among the Chengdu Clay, brown clay and reticulate-mottled red clay; 5. original relationship among the Chengdu Clay, loess on the eastern Tibetan Plateau, and loess on the Chinese Loess Plateau; 6. the dust provenance and transport mechanism for the Chengdu Clay; 7. connection between the genesis and weathering reworking with the development of overconsolidated, expansive and fissured features for all the clays.

Key words: Sichuan Basin; Chengdu Clay; origin; dust provenance; age; aeolian deposits; dust transport; paleo-environment