

DOI: 10.11766/trxb202004300208

李军, 黄成敏, 文星跃, 岳智慧. 四川盆地中生代古土壤发生学特征及古环境意义[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 79–91.

LI Jun, HUANG Chengmin, WEN Xingyue, YUE Zhihui. Pedogenetic Characteristics and Paleoenvironment Significance of Mesozoic Paleosols in Sichuan Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 79–91.

四川盆地中生代古土壤发生学特征及古环境意义^{*}

李军^{1, 2}, 黄成敏^{2†}, 文星跃³, 岳智慧²

(1. 兰州城市学院城市环境学院, 兰州 730070; 2. 四川大学环境科学与工程系, 成都 610065; 3. 西华师范大学国土资源学院, 四川南充 637002)

摘要: 古土壤形成于地质历史时期的地球表面, 直接记录了其形成时地球陆地表层的环境信息。以四川盆地中生代古土壤为研究对象, 通过古土壤的形态与微形态、矿物组成、颗粒组成以及地球化学等成土特征的观察与分析, 开展土壤发生学特征概述与分类研究并探讨古土壤指示的环境意义。结果表明: (1) 四川盆地中生代古土壤具有生物遗迹、成壤碳酸盐结核、土层颜色变化、土壤发生层次等成土特征。(2) 古土壤的矿物组成以石英和方解石为主, 含少量长石、蒙脱石和云母类矿物, 且不同古土壤类型中矿物含量有差异。(3) 古土壤总有机碳含量明显低于现代土壤, 但变化趋势与其一致。(4) 不同时期不同类型古土壤的化学风化强弱程度不同。古土壤类似于现代的新成土、雏形土、干旱土和淋溶土, 其中淋溶土的比例较少。不同类型古土壤的发育表明四川盆地中生代环境整体上在干旱-湿润之间波动变化, 但以半干旱、干旱环境为主。

关键词: 四川盆地; 中生代; 古土壤; 古环境

中图分类号: P532; S151 文献标志码: A

Pedogenetic Characteristics and Paleoenvironment Significance of Mesozoic Paleosols in Sichuan Basin

LI Jun^{1, 2}, HUANG Chengmin^{2†}, WEN Xingyue³, YUE Zhihui²

(1. College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. School of Land and Resource, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637002, China)

Abstract: [Objective] Detailed inversion of paleoclimates facilitates a better understanding of variation of the climate in the history and provides a basis for predicting future changes triggered by human activities in climate. Paleosol, formed on the Earth's surface during its geological period, is a direct record of the information about the terrestrial environmental conditions when it was formed. Quite a volume of paleosols are found developed within the Mesozoic strata across the Sichuan Basin and they may serve as an important terrestrial archive available for the research on global or regional deep-time paleoclimate. [Method] In this paper, a total of four hundred and thirteen deep-time paleosol profiles were identified in the Mesozoic strata of the Sichuan Basin, southwest China based on the pedogenic characteristics of paleosols. Of the paleosol profiles, observations and analyses were

* 国家自然科学基金项目 (41901066, 41371225) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41901066, 41371225)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: huangcm@scu.edu.cn

作者简介: 李军 (1984—), 男, 甘肃瓜州人, 博士, 副教授, 主要从事环境土壤学与环境变化研究。E-mail: lijunrock@163.com

收稿日期: 2020-04-30; 收到修改稿日期: 2020-10-29; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-02-08

performed for their morphology, micromorphology, mineral composition, particle size composition and geochemical properties, for summarization of their pedogenic characteristics, for researches on their classification, and for discussion of their environmental significance as indicators. 【Result】These profiles with distinct pedogenic features, such as presence of root traces and/or animal burrows, accumulation of pedogenic carbonate nodules, vertical variation of color, and development of soil horizons and soil structures, could be sorted into four different types of paleosols (i.e., Paleosol A, Paleosol B, Paleosol C, and Paleosol D). All the paleosol horizons are predominantly composed of quartz and calcite in mineralogy with minor proportions of feldspar, muscovite, illite and/or smectite. And content of the minerals varies with type of the paleosol. The paleosols are obviously lower than their corresponding modern ones in TOC and vary in a similar trend. And moreover, the two are basically consistent in element composition, and do not differ much in geochemical weathering index, leaching index, clayeyness, salinization index, and barium/strontium ratio, which indicate that the paleosols vary in chemical weathering degree with geological period and type of the soil. 【Conclusion】According to the standards of the Chinese Soil Taxonomy, the paleosols, observed within the Mesozoic strata of the Sichuan Basin, are analogous to the four orders of modern soil, that is, Primosols, Cambosols, Aridosols, and Argosols, and the proportion of the last is relatively low. The development of the different types of paleosols indicates that the environment of the Sichuan Basin experienced repeated alternations between aridity and humidity during the Mesozoic Era, however, it was mainly under semi-arid and arid weathers.

Key words: Sichuan Basin; Mesozoic; Paleosols; Paleoenvironment

古土壤是地质历史时期地球表层系统气候、母质、植被(生物)、地形和时间综合作用的风化成土产物,直接记录了地球岩石圈、水圈、生物圈、大气圈相互作用下的地表综合环境效应^[1-3]。自1927年前苏联学者Polyrov提出古土壤学(Palaeopedology)以来,科学家们不仅通过解译古土壤性质与成土特征从多时空尺度视角下重建过去陆相地表系统环境信息,如大气组分变化、景观变迁、地貌演化、水文条件以及气候演变等^[4-6],还揭示了地球表层系统重要地质、气候、环境事件^[3, 7]及古人类活动特征^[8],并与海洋沉积地层、古生物等材料信息进行对比和相互印证,全面综合反映过去环境变化^[1, 9]。精准的古气候环境信息既有助于增进地球气候环境变率和机制的理解,同时也对检验气候模式和预测未来气候环境变化具有重要价值^[10]。

四川盆地是我国陆相中生代代表性沉积盆地之一。盆地中生代陆相上三叠统、侏罗系及白垩系地层系统发育完备,最大厚度可达13 500 m^[11]。其中蕴藏着十分丰富的深时(早于第四纪)古土壤,为开展区域长时间尺度(约1亿5千万年)、记录连续的深时古环境和古气候研究提供了最佳场所和理想材料。

本研究以四川盆地中生代地层的古土壤为研究对象,通过详细的古土壤野外成土特征观察,辨识了413个深时古土壤剖面。选择其中312个代表性

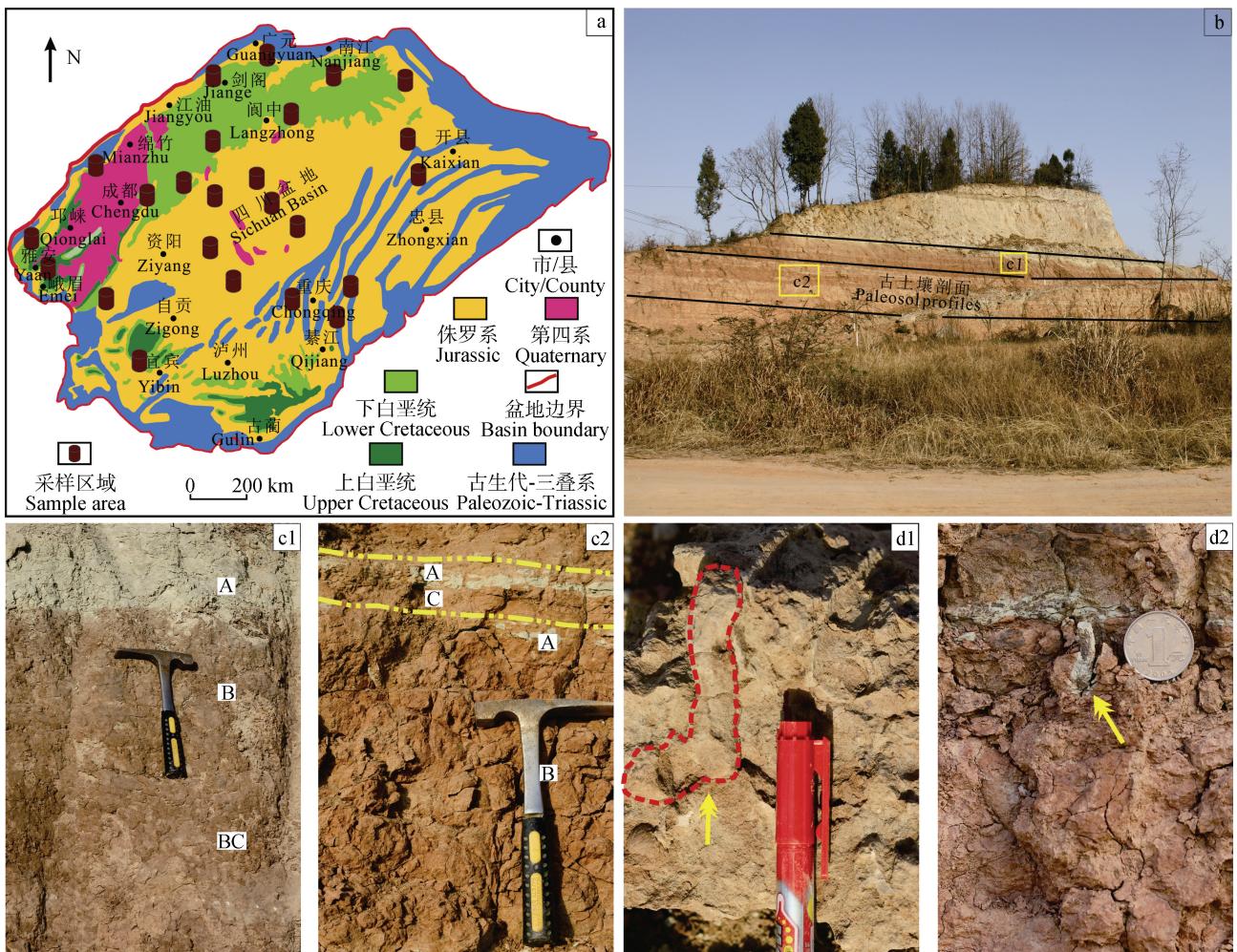
剖面,论述形态、微形态、矿物、颗粒组成、地球化学等特征,并开展古土壤分类。同时探讨古土壤成土过程中反映的环境变化信息,为进一步深化中生代区域环境变化提供来自土壤学的证据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

四川盆地位于103°~108°E、28°~32°N之间,地处中国大陆西南部,包括四川省东部地区和重庆市,面积为1.8×10⁵ km²(图1a)^[11]。因盆地中广泛分布中生代紫红色砂岩、泥岩、页岩系列地层,又称“红色或紫色盆地”(图1a、图1b)^[12]。其中三叠系陆相岩石地层总厚度约100~4 270 m;侏罗系岩石地层发育齐全,包括白田坝组、新田沟组、沙溪庙组、遂宁组、蓬莱镇组,分布在盆地的东部、中部和南部地区,厚度为1 500~3 500 m;白垩系岩石地层有苍溪组、白龙组、七曲寺组、古店组、天马山组及灌口组,主要分布于盆地西北部区域,厚度为1 300~4 000 m^[11]。

基于文献资料描述^[11]和古土壤的野外鉴别特征^[1, 13],笔者所在团队于2012—2018年期间,先后在四川盆地成都、广元、雅安、峨眉山、遂宁、绵阳以及重庆合川等地的新鲜野外露头、新修道路、新开挖建筑地基与砖厂断面、河流冲刷的河道中辨



注: 图 1b—古土壤野外露头(四川绵阳); c1—古土壤剖面; c2—古土壤序列; d1—古土壤剖面 c1 中的虫孔遗迹(黄色箭头); d2—古土壤剖面 c2 中的根系遗迹(黄色箭头)。Note: Fig.1b—Outcrop of paleosol (Mianyang, Sichuan); c1—Paleosol profile; c2—Paleosol sequence; d1—Animal burrows in paleosol profile c1 (yellow arrow); d2—Root trace in paleosol profile c2 (yellow arrow).

图 1 四川盆地地理位置、地层分布及野外实景图

(注: 图 1a 据文献^[11])

Fig. 1 Geographical location, stratigraphic distribution, and field photographs of the Sichuan Basin (Note: Fig. 1a modified after Ref. ^[11])

识了 413 个古土壤剖面(图 1), 其中白垩系古土壤剖面最多, 241 个; 侏罗系次之, 168 个; 而上三叠统古土壤剖面仅识别出了 4 个。具体而言, 分别在下白垩统苍溪组、白龙组、七曲寺组、古店组和天马山组岩石地层中辨识了 69 个、102 个、42 个、4 个和 9 个古土壤剖面。由于白垩纪中晚期全球陆地气候炎热干旱, 四川盆地沙漠广布^[14], 仅在上白垩统灌口组中识别了 17 个古土壤剖面。侏罗系珍珠冲组、自流井组、白田坝组、新田沟组、沙溪庙组、遂宁组和蓬莱镇组岩石地层中各发现了 2 个、3 个、6 个、12 个、108 个、12 个和 25 个古土壤剖面。上三叠统须家河组时期为四川盆地主要成煤期, 也含

有多套厚层砂岩和砾岩, 仅辨识出 4 个古土壤剖面。在古土壤识别与采集的同时进行土壤剖面的描述工作, 包括土壤剖面厚度、发生层次、土壤结构、成土特征等。同一地点采集不同地层和不同成壤类型的代表性古土壤剖面样品, 所有采集的样品封装于土壤样品袋, 用于室内测试分析。

1.2 分析测试

野外采集的样品经风干后, 选取部分经研磨、过筛用于室内项目分析, 同时挑选部分块状样品进行薄片制样, 用于土壤微形态观察, 剩余样品留存备用。室内分析项目包括颜色识别、颗粒组成和总有机碳 (TOC, Total organic carbon) 的测定、古土

壤矿物组成和元素含量的测定。古土壤颜色利用土壤标准比色卡 (Munsell) 确定。古土壤颗粒组成和 TOC 含量分别采用吸管法和重铬酸钾-硫酸消化法进行测定。在透射偏光显微镜下观察、鉴定古土壤微形态。

古土壤各发生层次的矿物组成利用高分辨 X 射线衍射仪 (XRD) (荷兰帕纳科、Empyrean 型) 在四川大学分析测试中心进行测定。古土壤常量元素和微量元素使用高分辨 X-射线荧光光谱仪 (XRF) (荷兰帕纳科、MagiX (PW2403) 型) 在兰州大学西部环境教育部重点实验室测定, 待测元素的浓度范围和精度分别处于 0.1%~100% 与 0.1%~0.3% 之间。

2 结 果

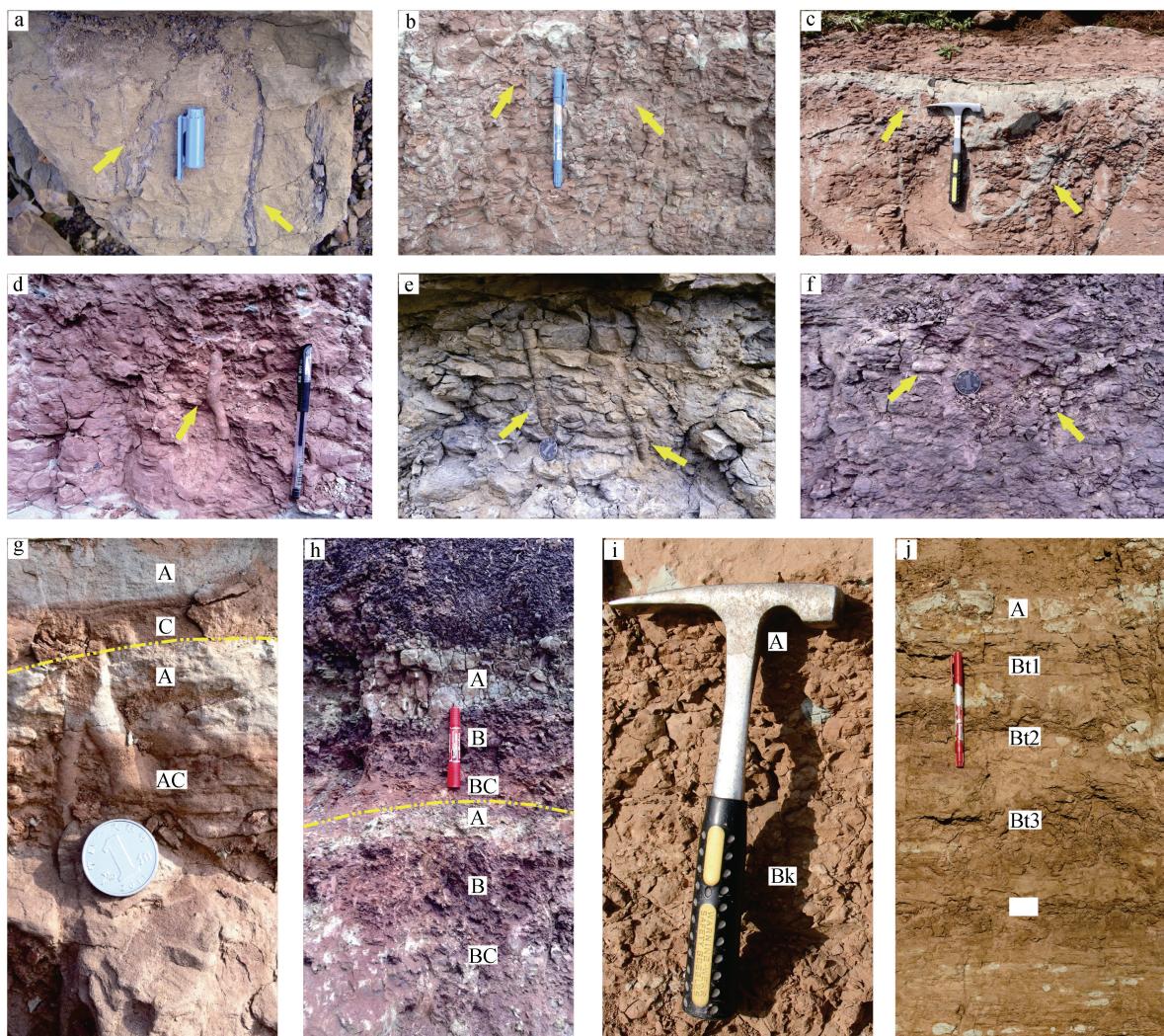
2.1 古土壤剖面构型/形态

四川盆地中生代古土壤广泛分布于上三叠统、侏罗系和白垩系地层之中。沉积岩一般具有层理构造, 或表现出波痕、干裂、锯齿状缝合线等原生构造特征; 而包夹在典型沉积岩中的古土壤, 则可观察到土壤发生层次、根系以及生物活动遗迹、土壤结构、成壤碳酸盐结核等土壤发生特征 (图 1c1、1c2、图 1d1、1d2 和图 2)。同时, 也不具有层理等构造特征而区别于沉积岩。

四川盆地中生代古土壤可以划分为 A、B、C 和 D 等四种成土类型。古土壤 A 普遍发育较弱, 没有明显的土壤发生层次但有微弱的生物扰动作用, 部分土体残留有一定的沉积层理 (图 2g)。土体发育深度介于 6~40 cm 之间, 具有典型的 A-AC 或 A-C 土体构型 (图 2g)。与古土壤 A 相比, 古土壤 B 发育程度相对较高, 土体发育不厚, 大部分介于 30~50 cm 之间。淡色薄层覆盖于锥形层之上为其主要成土特征, 多呈 A-B-BC/CB (图 2h)、A-B 或 A-Bw-C 土体构型。古土壤 C 是以成壤碳酸盐结核淀积为其鲜明的成土特征, 土体厚度发育程度不一, 整体上在 7~95 cm 之间, 均未超过 1 m, 具有典型的 A-Bk (图 2i) 或 A-Bk-C 剖面构型。与发育数量较多的上述古土壤相比, 古土壤 D 发育较少, 但成土程度相对较高。土层发育较厚, 总体上在 70~220 cm 之间且发育有土壤黏化层 (Bt), 从而使土壤剖面呈现 A-Bt-BC 或 A-Bt-BC-C 土体构型 (图 2j)。

大部分古土壤表土层 (A 层) 发育厚度不超过

30 cm, 土层颜色在灰绿色 (7/5GY)、浅绿色 (5G 8/2) 夹有红棕色 (2.5YR 5/3) 或间有浅红色 (5YR 6/4)、红色 (10R 5/6)、黄色 (2.5Y 7/6) 之间变化, 土壤结构体多为快状或整块状, 少量为片状。该土层为泥岩或粉砂岩且含有少量的植物根系 (以细根和中根为主, 少量粗根) 和生物活动遗迹 (虫孔) (图 2), 从而使其有机碳含量高于其他土层 (图 4)。古土壤 A 与古土壤 B 的亚表层伏于表层下部, 层次过渡清晰, 过渡层为波状或不规则状界面。土壤结构以块状结构体居多, 还有少量棱柱结构体, 土层厚度在 4~24 cm 之间, 质地可为黏质土、壤土或砂质土。相比于 A 层, 亚表层颜色变深, 以浅红棕色 (5YR 6/4) 与红棕色 (2.5YR 5/4) 为主, 还有部分为暗红色 (5YR 4/2) 与弱红色 (10R 5/4)。该层生物扰动作用明显减少, 大部分土层无任何生物活动遗迹, 少量土层含有极少的植物细根系或生物活动遗迹 (图 2g)。部分古土壤 B 发育有 BC 层, 与上覆土层呈平滑界面, 土层厚度在 15~20 cm 之间且保留有一定的沉积构造特征, 为砂质土。古土壤 C 的钙积层 (Bk) 是以成壤碳酸盐结核的出现为标志, 它们大小形状各异, 为圆状、椭圆状、豆荚状或不规则形态, 直径在 0.1~3 cm 之间, 与上覆 A 层过渡清晰且不连续, 呈破碎状或不规则状界面 (图 2i)。该发生层质地可为黏质土、壤土或砂质土, 土层厚度在 8~80 cm 之间, 相应地土层颜色在深红棕色 (2.5YR 3/3)、弱红色 (2.5YR 4/2)、深红色 (2.5YR 3/2)、深灰色 (5YR 4/1) 与灰色 (5Y 6/1) 之间变化, 土壤结构以多角块状或棱角块状结构为主, 部分古土壤剖面的 Bk 层含有少量植物细根系。古土壤 D 的 B 层颜色为红棕色 (5YR 5/3)、深灰色 (10YR 4/2) 或浅红色 (2.5YR 4/2), 土层厚度为 20~80 cm, 为黏质土或壤土地质, 棱角块状、团粒结构体或多角块状体。该层与表层过渡清晰, 呈波状或平滑状界面。颗粒组成分析显示该层黏粒含量明显增多, 黏土淀积现象显著 (图 5d), 发育有黏化层 (Bt)。Bt 层可依据其厚度、黏粒的变化分为多个亚层, 如 Bt1、Bt2 与 Bt3 层 (图 2j 和图 5d)。大部分古土壤 D 含有 BC 层, 与上覆土层呈平滑状界面, 厚度在 10~80 cm 之间。土层多为块状结构并无任何生物活动遗迹出现 (图 2j), 为黏质土或壤土。此外, 部分古土壤剖面还发育有 C 层, 多为砂质土或壤土, 该层中无任何生物活动遗迹。



注: a-古土壤根迹(重庆合川, 黄色箭头); b-古土壤根系结构(重庆合川, 黄色箭头); c-古土壤根系结构(四川雅安, 黄色箭头); d-古土壤虫孔遗迹(四川阆中, 黄色箭头); e-古土壤虫孔遗迹(四川广元, 黄色箭头); f-古土壤成壤碳酸盐结核(四川达州, 黄色箭头); g-古土壤 A (MYKB15, 白垩系白龙组, 四川绵阳); h-古土壤 B (GYBTB02-03, 侏罗系白田坝组, 四川广元); i-古土壤 C (MYKQ02, 白垩系七曲寺组, 四川绵阳); j-古土壤 D (MYKQ10, 白垩系七曲寺组, 四川绵阳)。图中硬币直径为 1.9 cm、笔长为 14 cm、地质锤长为 28 cm。Note: a–Root traces in paleosol (Hechuan, Chongqing, yellow arrows); b–Traces of root structure in paleosol(Hechuan, Chongqing, yellow arrows); c–Traces of root structure in paleosol(Ya'an, Sichuan, yellow arrows); d–Traces of animal burrows in paleosol (Langzhong, Sichuan, yellow arrow); e–Traces of animal burrows in paleosol (Guangyuan, Sichuan, yellow arrows); f–Carbonate nodules formed in paleosol (Dazhou, Sichuan, yellow arrows); g–Paleosol A (MYKB15, Bailong Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan); h–Paleosol B (GYBTB02-03, Baitianba Formation, Jurassic, Guangyuan, Sichuan); i–Paleosol C (MYKQ02, Qiusi Formation Cretaceous, Mianyang, Sichuan); j–Paleosol D (MYKQ10, Qiusi Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan) . The coin, pen and hammer in the graph used as reference is 1.9 cm in diameter, and the pen and hammer used for scale are 14 cm and 28 cm in length, respectively.

图 2 四川盆地中生代古土壤成土特征及不同类型代表性古土壤形态特征

Fig. 2 Pedogenic characteristics and morphological characteristics of the representative paleosols in the Mesozoic Sichuan Basin relative to soil type

2.2 古土壤微形态特征

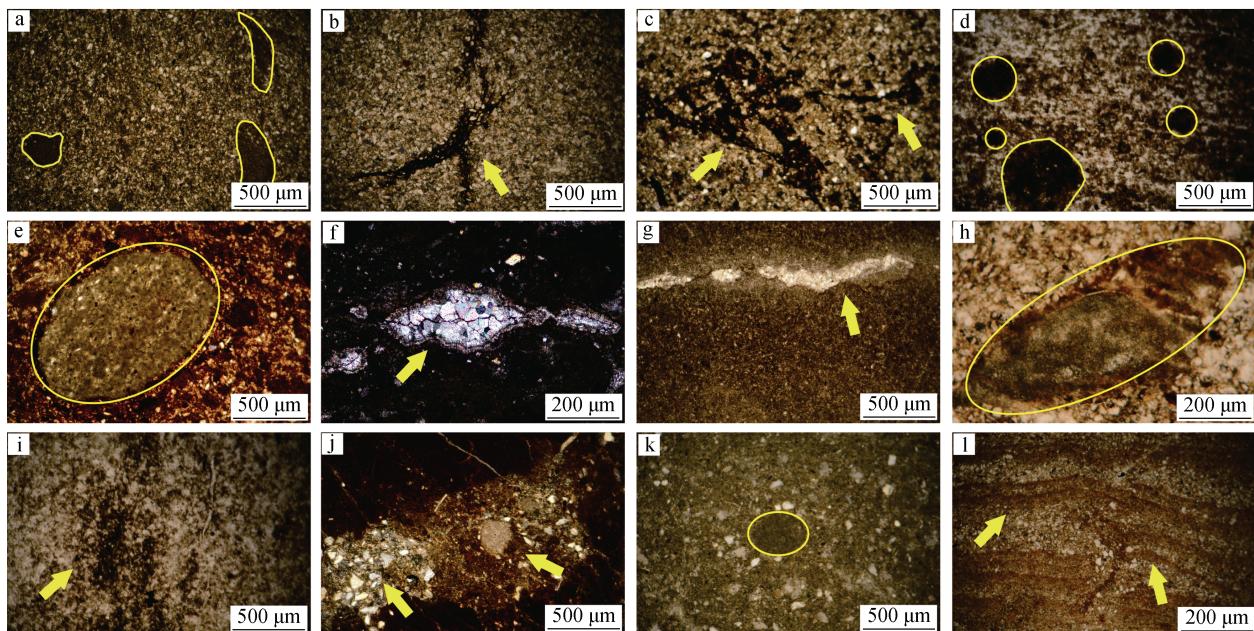
古土壤 A 层的物质以骨骼颗粒或泥质(黏粒)基质为主,且含少量的骨骼颗粒,如石英等(图 3a、图 3b、图 3c)。同时,古土壤 A 层均可见大量的有机残体、圆形或环状的根系痕迹与虫孔(图 3a、图

3b、图 3c、图 3d、图 3e),说明生物扰动作用强烈。古土壤 A 和古土壤 B 亚表层中土壤物质的细粒物质(黏粒)增多,骨骼颗粒(粉砂)含量减少,出现了一定的有机残体且数量明显减少。部分古土壤 B 的亚表层中可见铁氧化物,同时保留有一定的沉积微

层理构造(图3d),表明古土壤成土作用较弱。

在古土壤C的钙积层(Bk)中,土壤物质以黏粒基质为主,含少量的骨骼颗粒。在显微镜下土壤基质可见少量的铁氧化物,碳酸盐结核以微晶、针状或大晶粒方解石等形式存在,在土壤孔隙中也可观察到结晶的方解石(图3f、图3g)。古土壤D亚表层(Bt)的土壤物质仍以黏粒基质为主,但骨骼

颗粒(以石英为主,含方解石)的含量较表层增多但孔隙较A层少,部分孔隙为条状,同时出现有铁氧化物聚集的现象(图3j)。该层含有根孔且其直径小于表层根孔,同时可见一定量的有机残体,如植物残体(图3h、图3i、图3k),说明植物发育在土壤之中,根系向下植入土体深部。此外,古土壤的BC土层中保留有一定的沉积层理构造(图3l)。



注: a-A层中的黏粒基质、骨骼颗粒与有机残体(GYKB18,白垩系白龙组,四川广元,黄色标识,单偏光);b-A层中的植物根迹(MYK003,白垩系白龙组,四川绵阳,黄色箭头,单偏光);c-A层中的黏粒基质、石英及植物残体(HCXJH01,上三叠统须家河组,重庆合川,黄色箭头,单偏光);d-B层中的根孔与微层理结构(YAKG05,白垩系灌口组,四川雅安,圆形标识,正交偏光);e-A层黏粒基质中的根孔痕迹(MYKB03,白垩系白龙组,四川绵阳,椭圆标识,单偏光);f-Bk层中的碳酸盐结核(YBJZ01,侏罗系自流井组,四川宜宾,黄色箭头,正交偏光);g-Bk层碳酸盐结核中重结晶的方解石(EMS02,侏罗系沙溪庙组,四川峨眉,黄色箭头,单偏光);h-Bt2层中的植物残体痕迹或动物排泄物(MYK001,白垩系白龙组,四川绵阳,椭圆标识,单偏光);i-Bt1层中的有机残体(MYK001,白垩系白龙组,四川绵阳,黄色箭头,单偏光);j-Bt2层中铁染的黏粒基质、被石英填充的孔隙及少量碳酸盐结核(MYKC30,白垩系苍溪组,四川绵阳,黄色箭头,正交偏光);k-Bt1层中的虫迹或根孔痕迹(MYKC30,白垩系苍溪组,四川绵阳,椭圆标识,正交偏光);l-BC层中的骨骼颗粒(岩屑和石英)与沉积层理(MYKC30,白垩系苍溪组,四川绵阳,黄色箭头,单偏光)。Note: a-Clay matrix, skeletal grains and Organic residues in A horizon (GYKB18, Bailong Formation, Cretaceous, Guangyuan, Sichuan, yellow arrow, PPL); b-Root traces in A horizon (MYK003, Bailong Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan, yellow arrow, PPL); c-Clay matrix, quartz and plant residue in A horizon (HCXJH01, Xujiahe Formation, Late Triassic, Hechuan, Chongqing, yellow arrow, PPL); d-Traces of root pores and micro-layered structure in B horizon (YAKG05, Guankou Formation, Cretaceous, Ya'an, Sichuan, round dot, CPL); e-Traces of root pores in A horizon (MYKB03, Bailong Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan, ellipse dot, PPL); f-Carbonate nodules in Bk horizon (YBJZ01, Ziliujing Formation, Jurassic, Yibin, Sichuan, yellow arrow, CPL); g-Re-crystallized calcite in carbonate nodules in Bk horizon (EMS02, Shaximiao Formation, Jurassic, Emei, Sichuan, yellow arrow, PPL); h-Traces of plant residue or animal excreta in Bt2 horizon (MYK001, Bailong Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan, ellipse mark, PPL); i-Traces of organic residues in Bt1 horizon (MYK001, Bailong Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan, PPL); j-Iron-stained clay matrix, quartz filled pores and limited carbonate nodules in Bt2 horizon (MYKC30, Cangxi Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan, yellow arrow, PPL); k-Traces of insect activity or root pores in Bt1 horizon (MYKC30, Cangxi Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan, ellipse dot, PPL); l-Sedimentary layers and skeletal grains (rock fragments and quartz) in BC horizon (MYKC30, Cangxi Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan, yellow arrow, PPL)

图3 四川盆地中生代不同类型代表性古土壤微形态特征

Fig. 3 Micromorphological features of the representative paleosol in the Mesozoic Sichuan Basin relative to type of the soil

2.3 古土壤矿物特征

四川盆地中生代不同时期古土壤各发生层次矿物类型相似,但含量有差异。石英、长石、云母类矿物是古土壤 A 中常见的原生矿物和主要矿物,蒙脱石/伊利石为常见的黏土矿物,矿物含量除石英较高之外,其余矿物均不多。在大部分古土壤 B 中,矿物组成主要仍以原生矿物石英为主,同时含有一定量长石、方解石与云母类原生矿物及黏土矿物蒙脱石。黏土矿物绿泥石也出现在部分古土壤 B 中,但含量较低。极少量的伊利石、绿泥石和蒙脱石等黏土矿物出现在古土壤 A 和 B 中表明两类土壤经历了较弱的风化作用。

古土壤 C 中,原生矿物石英与黏土矿物方解石为常见矿物,长石、文石、蒙脱石与云母类矿物也有分布。古土壤 C 土层中矿物的相对含量除石英较高之外,均以方解石为主,其余矿物含量不高。古土壤 C 中方解石含量明显高于其他类型古土壤,这与碳酸盐的淀积有关。古土壤 D 矿物组成主要为原生矿物石英和长石与次生矿物方解石,同时有较低含量的黏土矿物蒙脱石与伊利石,但含量高于其他古土壤类型,这也反映了古土壤 D 经历了较古土壤 A 和 B 更强的风化成土作用。

2.4 古土壤地球化学特征

四川盆地中生代古土壤的地球化学特征主要是指对中生代不同时期所有成土类型的代表性古土壤样品的总有机碳 (TOC) 和全岩元素含量进行分析。四川盆地中生代古土壤 TOC 含量总体较低,介于 0.09%~1.03% 之间,平均为 0.29% 左右 (图 4),与其他时期古土壤基本相似,均表现出较低的含量^[1],明显低于现代土壤总有机碳含量值。一般而言,除了泥炭质类型的古土壤之外,其他古土壤的总有机碳含量普遍小于 1.00%^[15],一方面是因为古土壤在长期埋藏过程中发生了降解作用从而使其含量减少,另一方面是因为生物分解作用导致古土壤的总有机碳含量减少^[1]。同时,四川盆地中生代古土壤总有机碳含量随深度变化特征 (图 4) 与现代土壤总有机碳含量随土壤剖面深度增加而减少的变化特征相一致。

四川盆地中生代古土壤各发生层次元素组成与现代土壤元素组成一致。基于古土壤元素比率的地球化学指标可用来判别岩石风化成土过程中化学风化程度的强弱^[2]。古土壤的淋溶指数 ((Ca+Mg+K+Na)

/Al)、化学风化指数 (CIA-K=100×Al/(Ca+Al+Na))、黏化指数 (Si/Al)、盐化指数 ((Na+K)/Al) 以及 Ba/Sr 比被用来衡量中生代四川盆地古土壤成土过程中的化学风化作用。

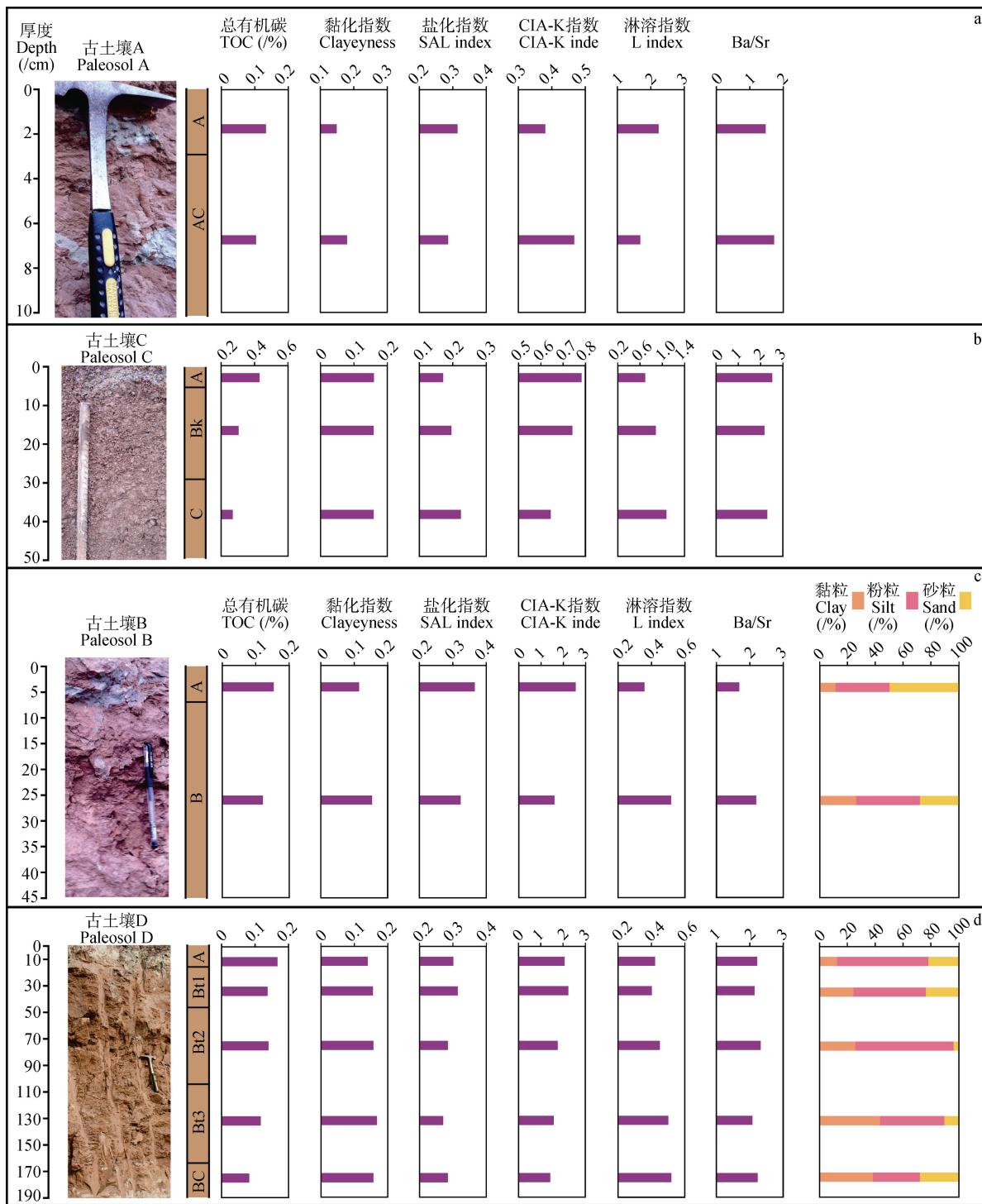
四川盆地中生代不同类型古土壤的淋溶指数介于 0.32~10.21 之间,变化较大 (图 4),说明古土壤成土过程中淋溶作用差异较大。不同类型古土壤的 CIA-K 值为 0.09~0.97,总体上变化较大 (图 4),表明古土壤在成土过程中化学风化强度差异较大。而古土壤的盐化指数总体上较小且变化不大,为 0.10~0.63 (图 4);同时,不同时期古土壤的 Ba/Sr 比为 0.26~11.06,总体上变化幅度较大 (图 4)。此外,不同类型古土壤的黏化指数 (硅铝比) 为 0.12~0.28,总体上变化不大,表明成土过程中脱硅作用不强 (图 4)。

3 讨 论

3.1 四川盆地中生代古土壤类型

“以今论古”是古土壤分类的基本原则。古土壤历经长时间的埋藏、压实、成岩作用,虽然其原有的某些性质发生改变,例如土壤被埋藏后在降解与微生物分解作用下引起的有机碳含量减少、古土壤铁氧化物或铁的氢氧化物发生氧化、水化、脱水作用导致土体颜色出现“红化”、地层压实作用使得土壤孔隙度降低,从而引起土壤紧实度增加,导致土层厚度和土壤水分减小、埋藏作用下使得古土壤泥炭层发生成煤作用等^[1, 16],但土壤剖面形态、土壤发生层分异、土壤结构以及土层的主要矿物学、颗粒组成、元素地球化学特征含量及其比值以及剖面内部土层之间的有机碳含量、生物活动强度、质地、矿物组成等差异依旧会保留与现代土壤特征相同或相近的特征^[1]。因此,依旧可以通过上述特征判别和演绎古土壤的成土因素、主要成土过程特征以及大部分土壤诊断层、诊断特征,进而以现代土壤发生与分类理论为基础,即利用现代土壤系统分类理论与方法进行古土壤系统分类^[17]。

四川盆地中生代古土壤形貌特征显示大部分古土壤表层均发现根迹 (图 2 和图 3),但经历一定程度风化作用的古土壤 A 和古土壤 B 仍保留有一定的沉积层理 (图 2g 和图 3d),指示这两类土壤成土作



注: a—古土壤 A (GYKB18, 白垩系白龙组, 四川广元); b—古土壤 C (HCZZC02, 侏罗系珍珠冲组, 重庆合川); c—古土壤 B (CXKC10, 白垩系苍溪组, 四川广元); d—古土壤 D (MYKC30, 白垩系苍溪组, 四川绵阳)。Salinity—SAL; L—Leaching; 图中笔长为 14 cm、地质锤长为 28 cm。Note: a—Paleosol A (GYKB18, Bailong Formation, Cretaceous, Guangyuan, Sichuan); b—Paleosol C (HCZZC02, Zhengzhuchong Formation, Jurassic, Hechuan, Chongqing); c—Paleosol B (CXKC10, Cangxi Formation, Cretaceous, Guangyuan, Sichuan); d—Paleosol D (MYKC30, Cangxi Formation, Cretaceous, Mianyang, Sichuan); Salinity—SAL; L—Leaching; The pen and hammer in the graph used as reference for size is 14 cm and 28 cm in length, respectively.

图 4 四川盆地中生代代表性古土壤剖面发生学特征 (土壤厚度、发生层次、总有机碳 (TOC)、地球化学指数及颗粒组成)

Fig. 4 Pedogenic characteristics of the paleosol profile representative of the Mesozoic Sichuan Basin (Soil thickness, horizons, total organic carbon, geochemical index and particle size composition)

用微弱, 矿物组成和地球化学特征也佐证了这一点。此外, 形态特征显示古土壤 A 具有淡薄表层, 无 B 层发育, 呈 A-C 或 A-AC 型剖面结构(图 2g 和图 4a), 与新成土发生特征相比具有一致性^[18](表 1)。因此, 古土壤 A 属于新成土纲, 即为古新成土。与古土壤 A 相比, 古土壤 B 剖面中虽也残留沉积层理(图 3d), 但风化成土作用较古土壤 A 增强, 除具有淡薄表层外, 表下层经土层厚度解压公式^[19]消除地层压实作用后的厚度, 一般超过 10 cm, 具有块状结构, 且质地以壤土、黏质土为主, 可判定为锥形层或风化 B 层, 剖面呈现出 A-B-C 或 A-B-BC 土体构型(图 2h 和图 4c), 因而, 古土壤 B 类似于中国土壤系统分类中的锥形土^[18](表 1)。

古土壤 C 碳酸盐结核淀积形成过程由野外形态特征、微形态特征及矿物组成揭示(图 2i、图 3f、图 3g、图 4b)。同时古土壤 C 具有淡薄表层和发育厚度在 8~50 cm 之间的钙积层, 从而呈现 A-Bk-C/A-Bk 的剖面构型。此外, 钙积层消除地层压实作用后的厚度为 9~51 cm, 即土表至 100 cm

范围内发育有钙积层。上述土壤发育特征符合干旱土的诊断层、诊断特性^[18](表 1)。因此, 古土壤 C 可划分为古干旱土。相比于上述三种成土类型, 古土壤 D 土体发育深厚, 根系结构深植于土壤 B 层, 少数几个土壤剖面中即使有成壤碳酸盐结核出现, 其深度也超过 1 m(图 2j、图 3g、图 3k)。矿物组成显示古土壤 D 中黏土矿物含量高于其他土壤类型, 颗粒组成结果发现土壤亚表层黏粒的含量要高于上覆土层的 1.2 倍(图 4d), 说明土壤亚表层发生了明显的黏土聚集过程, 形成黏化层。以上土壤发育特征显示古土壤 D 发育黏化层, 为淋溶土具有的典型特征^[18](表 1)。因此, 古土壤 D 可划分为淋溶土。

中生代四川盆地广泛分布着类似于新成土、锥形土、干旱土和淋溶土等古土壤。其中古新成土剖面发育有淡薄表层、土体厚度较薄且保留有一定的沉积层理; 古锥形土具有锥形层; 古干旱土剖面含淡薄表层、钙积层或钙磐; 古淋溶土剖面表土层含有大量植物根系、土体深厚且含有黏土层, 而含成壤碳酸盐结核的土层距表层>1 m(表 1)。

表 1 四川盆地中生代古土壤类型和土壤系统分类^[18]参比

Table 1 Reference between the modern soil taxonomy and Mesozoic paleosol types in the Sichuan Basin

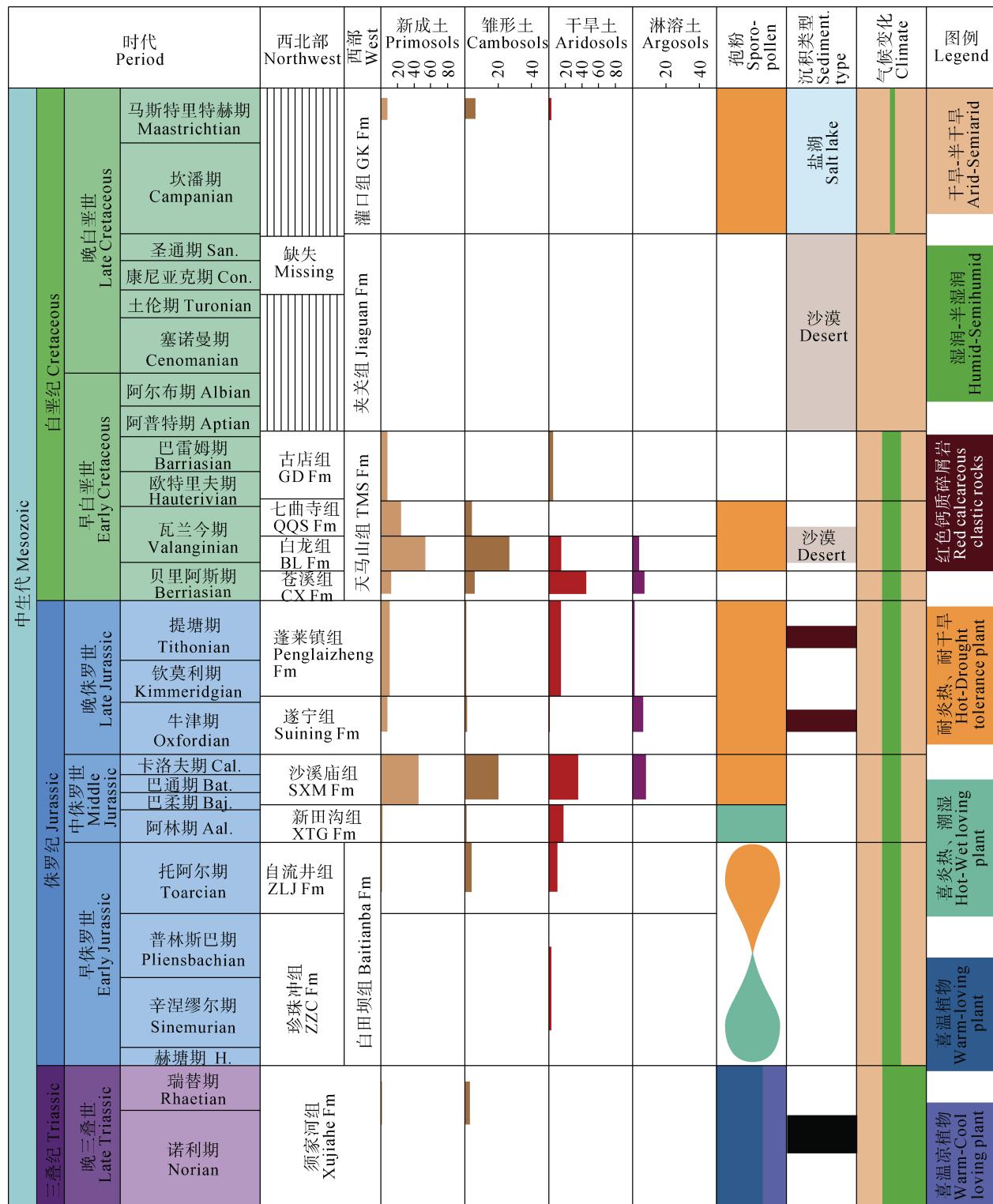
古土壤类型 Paleosol type	诊断层/和诊断特性 Diagnostic horizon/characteristics
干旱土 Aridosols	土壤中含淡薄表层; 和上界在矿质土表至经消除地层压实作用后的 100 cm 范围内含钙积层或钙磐; 土体发育较好。
淋溶土 Argosols	土壤中有黏化层且土壤亚表层黏粒含量高于上覆土层 1.2 倍; 土体发育深厚; 含碳酸盐结核的土层深度超过 1 m。
锥形土 Cambosols	土壤中有锥形层且矿质土表至经消除地层压实作用后的 100 cm 范围内没有如下任一土层: 石膏层、超石膏层、钙积层、超钙积层、钙磐或黏化层。
新成土 Primosols	土壤中仅含淡薄表层, 土体发育较浅且保留有一定的沉积层理。

3.2 四川盆地中生代古土壤指示的古环境与古气候

土壤发生学研究认为成土时间较短、发育较弱的新成土可在极度干旱的气候条件下或部分湿润地区形成, 而锥形土可在任何气候条件下形成, 但在湿润-半湿润气候条件下成土时间快于干旱气候条件下^[1, 20]。干旱土发育于半干旱、干旱气候条件下, 淋溶土形成于半干旱、半湿润、湿润地区^[1, 20]。发育自四川盆地中生代地层中的古新成土、古锥形土、古干旱土和古淋溶土的快速变化表明了气候环境在半干旱、干旱、半湿润、湿润之间波动变化(图 5)。此外, 古土壤中高含量的石英和方解石的存在及变

化不大的地球化学指数也反映了土壤形成时以干旱-半干旱为主的环境特征^[21-22]。

上三叠统须家河组是四川盆地最主要的成煤地层, 分布广泛。须家河组时期(诺利期-瑞替期)发育有古新成土和古锥形土, 同时可见大量的煤层、煤线(部分土壤可划分为有机土)。这说明当环境湿度增加, 温度下降时, 成煤作用发生, 反之随着湿度下降、环境温度升高, 环境转变为干旱、半干旱时, 成煤作用中断, 非水成古土壤开始发育(图 5)。这与古植物学研究结果相一致。晚三叠世须家河组植物群研究认为该时期以热带、亚热带滨海潮湿型气候为主, 并出现了潮湿与干旱或半干旱交替出现的环境^[23-24]。



San.-Santonian; Con.-Coniacian; Cal.-Callovian; Bat.-Bathonian; Baj.-Bajocian; Aal.-Aalenian; H.-Hettangian; Fm-Formation; GK-Guankou; GD-Gudian; TMS-Tianmashan; QQS-Qiusi; BL-Bailong; CX-Cangxi; SXM-Shaximiao; XTG-Xintiangou; ZLJ-Ziliujing; ZZC-Zhengzhuchong; 注: 年代模式据^[9, 11-12]、孢粉记录据^[25]、沉积类型据^[14, 25]。Note: Age taken from Ref. ^[9, 11-12], Sporopollen record cited from Ref. ^[25], and sedimentary facies cited from Ref. ^[14, 25]

图 5 四川盆地中生代古土壤环境演化及其与其他记录对比

Fig. 5 Evolution of the Mesozoic paleosol environment of the Sichuan Basin and comparison with other records

侏罗纪（辛涅缪尔期-提塘期）四川盆地以高频成壤和土壤类型多变为主要特点（图5），说明了气候环境的快速波动变化。岩石地球化学特征^[26]、湖相碳酸盐岩致密储层^[27]与沉积相及生物特征研究均认为四川盆地早、中侏罗世沉积期间是一个温暖潮湿或湿润的气候环境^[28]。而孢粉组合研究发现中侏罗世为亚热带半干旱、半潮湿与亚热带半干旱、干旱交替的气候环境，晚侏罗世气候总体上为半干旱-干旱环境，部分时期为半干旱-半潮湿^[25]。由沉积岩中黏土矿物研究表明四川盆地北部广元地区中侏罗世早、中期为以干冷为主的半干旱气候，到晚期出现了短期的干冷气候，晚侏罗世为暖湿的气候环境^[29]。上侏罗统遂宁组和蓬莱镇组频繁出现红色富含钙质碎屑岩沉积^[25]及遂宁地区蓬莱镇组岩相特征^[30]均指示晚侏罗世四川盆地为半干旱气候环境。总体而言，侏罗纪四川盆地气候环境在半干旱、干旱、半湿润和湿润之间波动变化（图5）。

早白垩世（贝里阿斯期-巴雷姆期）四川盆地以古新成土、古雏形土和古干旱土分布为主，还有少部分发育较好的古淋溶土，这说明此时的四川盆地处于半干旱、干旱、半湿润、湿润之间快速波动变化的环境之中（图5）。然而到晚白垩世的马斯特里赫特中晚期，古土壤发育减少，仅有数量不多的古新成土、古雏形土和古干旱土发育，这表明晚白垩世的四川盆地逐渐步入半干旱、干旱、半湿润的环境（图5）。白垩纪植物群面貌的演变及早白垩世四川盆地南部地区沙漠的出现也印证了这一变化^[25]（图5）。同时，四川盆地剑门关地区侏罗纪-白垩纪地层中的分子化石研究发现从中侏罗世到早白垩世总体上为温暖湿润的气候环境，部分时期也出现了寒冷干燥的气候环境^[31]。此外，在晚白垩世地层中，石膏、钙芒硝层等蒸发盐类和盐湖沉积的出现，沙化和盐碱化的扩张均表明晚白垩世四川盆地气候极为干旱炎热^[14]。在这样的气候条件下，植被较少、沙漠广布等现象导致古土壤整体发育弱或少，所以相比于白垩纪早期，四川盆地白垩纪晚期识别的古土壤大为减少。

由以上分析可知，四川盆地中生代整体上表现为干旱-湿润波动变化的气候环境且以半干旱、干旱环境为主（图5）。

4 结 论

四川盆地保存着丰富的中生代古土壤，使其成为研究深时古土壤及其与古环境关系演变的天然实验室。综合古土壤形态特征、微形态特征、矿物特征、颗粒组成和地球化学特征发现，这些古土壤以土壤发生层次、土壤结构、植物根系与生物活动遗迹、黏土聚集、成壤钙质结核等成土特征的出现为标志。古土壤中矿物以石英和方解石为主，含少量长石、蒙脱石和云母类矿物。古土壤总有机碳含量明显低于现代土壤，不同时期不同类型古土壤的化学风化强弱程度不同。基于中国土壤系统分类标准，四川盆地中生代古土壤类似于新成土、雏形土、干旱土和淋溶土。其中古新成土、古雏形土和古干旱土为主要土壤类型，古淋溶土的比例较少。不同类型古土壤的发育指示四川盆地中生代为半干旱、干旱为主并伴有暖湿交替的气候环境。随着该地区深时古土壤研究的深入持续开展，有望进一步加深对四川盆地中生代不同时段古土壤发生和环境变化及其相互联系的认识。

致 谢 感谢中国科学院南京地质古生物研究所王永栋研究员、曲阜师范大学地理与旅游学院谢小平教授等在野外工作中给予的大力帮助与支持；对参与室内样品处理与分析工作的博士生张茂超、龚政和硕士生殷庆元、王章文、张方方，在此一并表示衷心感谢。

参考文献 (References)

- [1] Retallack G J. Soils of the past: An introduction to paleopedology[M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell, 2001: 3—203.
- [2] Sheldon N D, Tabor N J. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 95 (1/2): 1—52.
- [3] Wen X Y, Huang C M, Wang C S. Critical events in paleoenvironmental and paleoclimatic change revealed by deep-time paleosols[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46 (5): 1272—1280. [文星跃, 黄成敏, 王成善. 重要环境与气候变化事件: 深时古土壤的记录与响应[J]. 土壤通报, 2015, 46 (5): 1272—1280.]
- [4] Huang C M, Retallack G, Wang C S. Cretaceous calcareous paleosols: Pedogenetic characteristics and paleoenvironmental implications[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (6): 1029—1038. [黄成敏, Gregory

- John Retallack, 王成善. 白垩纪钙质古土壤的发生学特征及古环境意义[J]. 土壤学报, 2010, 47 (6): 1029—1038.]
- [5] Tabor N J, Myers T S. Paleosols as indicators of paleoenvironment and paleoclimate[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2015, 43 (1): 333—361.
- [6] Wiest L A, Lukens W E, Driese S G, et al. Landscape evolution across the Cretaceous/Paleogene boundary in southwestern North Dakota, USA[J]. Cretaceous Research, 2020, 112: 104470.
- [7] Li J, Han Z, Wen X Y, et al. Sea-level fluctuations in the late Middle Permian estimated from palaeosols of the Sichuan Basin, SW China[J]. Geological Magazine, 2020, 157 (8): 1333—1348.
- [8] Wu K N, Wang W J, Zha L S, et al. Review of paleosol and palaeoenvironment in ancient culture sites[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (6): 1169—1182. [吴克宁, 王文静, 查理思, 等. 文化遗址区古土壤特性及古环境研究进展[J]. 土壤学报, 2014, 51 (6): 1169—1182.]
- [9] Li J, Wen X Y, Huang C M. Lower Cretaceous paleosols and paleoclimate in Sichuan Basin, China[J]. Cretaceous Research, 2016, 62: 154—171.
- [10] Yan H, Liu C C, An Z S, et al. Extreme weather events recorded by daily to hourly resolution biogeochemical proxies of marine giant clam shells[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117 (13): 7038—7043.
- [11] Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Regional Geology of Sichuan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. [四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.]
- [12] Wang Y D, Fu B H, Xie X P, et al. The terrestrial Triassic and Jurassic systems in the Sichuan Basin, China[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010. [王永栋, 付碧宏, 谢小平, 等. 四川盆地陆相三叠系与侏罗系[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2010.]
- [13] Huang C M, Wang C S. Identification, classification and application in paleoenvironment research of pre-Neogene paleosols[J]. Advances in Earth Sciences, 2006, 21 (9): 911—917. [黄成敏, 王成善. 晚第三纪以前形成古土壤的鉴别、分类及其在古环境研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2006, 21 (9): 911—917.]
- [14] Jiang X S, Pan Z X, Fu Q P. The variations of palaeowind direction of the Cretaceous desert in the Sichuan Basin and their significance[J]. Geology and Tethyan Geology, 1999, 19 (1): 1—11. [江新胜, 潘忠习, 傅清平. 四川盆地白垩纪沙漠风向变化规律及其意义[J]. 沉积与特提斯地质, 1999, 19 (1): 1—11.]
- [15] Krull E S, Retallack G J. $\delta^{13}\text{C}$ depth profiles from paleosols across the Permian-Triassic boundary: Evidence for methane release[J]. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112 (9): 1459—1472.
- [16] Dal'Bó P F F, Basilici G, Angélica R S. Factors of paleosol formation in a Late Cretaceous eolian sand sheet paleoenvironment, Marília Formation, Southeastern Brazil[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 292 (1/2): 349—365.
- [17] Retallack G J. Adapting soil taxonomy for use with paleosols[J]. Quaternary International, 1998, 51/52: 55—57.
- [18] Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001. [中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 第3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.]
- [19] Sheldon N D, Retallack G J. Equation for compaction of paleosols due to burial[J]. Geology, 2001, 29 (3): 247—250.
- [20] Brady N C, Weil R. The nature and properties of soils[M]. 14th ed. Edinburgh: Pearson, 2014.
- [21] Xiang F, Song J C, Luo L, et al. Distribution characteristics and climate significance of continental special deposits in the Early Cretaceous[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (5): 48—62. [向芳, 宋见春, 罗来, 等. 白垩纪早期陆相特殊沉积的分布特征及气候意义[J]. 地学前缘, 2009, 16 (5): 48—62.]
- [22] Goldberg K, Humayun M. The applicability of the Chemical Index of Alteration as a paleoclimatic indicator: An example from the Permian of the Paraná Basin, Brazil[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 293 (1/2): 175—183.
- [23] Xu Z H, Wang Z C, Hu S Y, et al. Paleoclimate during depositional period of the upper Triassic Xujiahe formation in Sichuan basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12 (4): 415—424. [徐兆辉, 汪泽成, 胡素云, 等. 四川盆地上三叠统须家河组沉积时期古气候[J]. 古地理学报, 2010, 12 (4): 415—424.]
- [24] Liu Z S, Li L Q, Wang Y D. Late Triassic spore-pollen assemblage from Xuanhan of Sichuan, China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2015, 32 (1): 43—62. [刘兆生, 李丽琴, 王永栋. 四川宣汉晚三叠世孢粉组合及其古植被与古气候意义[J]. 微体古生物学报, 2015, 32 (1): 43—62.]
- [25] Wang Q W, Kan Z Z, Liu X H, et al. The Mesozoic sporopollen assemblage in the Sichuan Basin and its significance to paleovegetation and paleoclimate[J]. Acta Geologica Sichuan, 2008, 28 (2): 89—95. [王全伟, 阚泽忠, 刘啸虎, 等. 四川中生代陆相盆地孢粉组合所反映的古植被与古气候特征[J]. 四川地质学报, 2008,

- 28 (2): 89—95.]
- [26] Liang B, Wang Q W, Kan Z Z. Geochemistry of Early Jurassic mudrocks from Ziliujing Formation and implications for source-area and weathering in dinosaur fossils site in Gongxian, Sichuan Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26 (3): 94—99. [梁斌, 王全伟, 阙泽忠. 珙县恐龙化石埋藏地自流井组泥质岩地球化学特征及其对物源区和古风化作用的指示[J]. 矿物岩石, 2006, 26 (3): 94—99.]
- [27] Xu Q L, Ma Y S, Liu B, et al. Characteristics and control mechanism of nanoscale pores in lacustrine tight carbonates : Examples from the Jurassic Da'anzhai Member in the central Sichuan Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 178: 156—172.
- [28] Wang Y B, Xu H J. Relations between evolution of sedimentary cycles and tectonic uplift around Sichuan Basin from Jurassic to Early Cretaceous[J]. Earth Science, 2001, 26 (3): 241—246. [王永标, 徐海军. 四川盆地侏罗纪至早白垩世沉积旋回与构造隆升的关系[J]. 地球科学, 2001, 26 (3): 241—246.]
- [29] Cao K, Li X H, Wang C S, et al. Clay minerals of the Middle Jurassic—Lower Cretaceous in the Guangyuan area, northern Sichuan: Implications to paleoclimate[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30 (1): 41—46. [曹珂, 李祥辉, 王成善, 等. 四川广元地区中侏罗世—早白垩世粘土矿物与古气候[J]. 矿物岩石, 2010, 30 (1): 41—46.]
- [30] Zhou Y, Li X H, Sun Y. Sedimentary facies and its paleoclimate significance for the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in Mingzhu town, Shehong, Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31 (2): 142—144. [周勇, 李祥辉, 孙勇. 四川射洪县明星镇上侏罗统蓬莱镇组岩相及古气候意义[J]. 四川地质学报, 2011, 31 (2): 142—144.]
- [31] Wang H M, Liu Y Y, Wang Z Y. Molecular fossils as indicators for paleoenvironment and paleo-climate from red clastic rocks of Middle Jurassic-Early Cretaceous in Jianmenguan, Sichuan Basin of China[J]. Earth Science, 2001, 26 (3): 229—234. [王红梅, 刘育燕, 王志远. 四川剑门关侏罗—白垩系红层分子化石的古环境和古气候意义[J]. 地球科学, 2001, 26 (3): 229—234.]

(责任编辑: 檀满枝)