

雷传扬, 王波, 刘兆鑫, 等, 2024. 成都平原河流阶地的发育及其对古气候和新构造运动的指示[J]. 沉积与特提斯地质, 44(1): 20-33. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.07003 LEI C Y, WANG B, LIU Z X, et al., 2024. Development of fluvial terraces in Chengdu Plain: Implications for the paleoclimate and Neotectonic Movement[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(1): 20-33. doi: 10. 19826/j.cnki.1009-3850.2022.07003

## 成都平原河流阶地的发育及其对古气候和新构造运动的指示

雷传扬<sup>1</sup>, 王 波<sup>2</sup>, 刘兆鑫<sup>2</sup>, 范 敏<sup>2</sup>, 谢海洋<sup>3</sup>, 郝金波<sup>4</sup>

(1. 四川省地质大数据中心,四川 成都 610072; 2. 四川省综合地质调查研究所稀有稀土战略资源评价与利用四 川省重点实验室,四川 成都 610081; 3. 四川省第一地质大队,四川 成都 610100; 4. 成都市地质环境监测站, 四川 成都 610042)

摘要:为了研究第四纪以来成都平原古气候变化规律和新构造运动特征,对成都平原岷江水系河流阶地序列,年代格架, 不同地质时期的孢粉组合特征和 T4 剖面上网纹红土的地球化学特征等进行了深入研究。通过收集大量存量资料,辅以少量 野外查证工作,结合地质、地貌和年代学资料,厘定了成都平原岷江水系 5 级河流阶地,T5 至 T1 拔河分别为 98~127 m、 59~79 m、36~52 m、4~10 m、2~5 m,形成时代分别为 925±92 ka、722±77 ka、462±46 ka、30.13±2.86 ka、9.0 ka,其中 T5、 T4、T3、T2 为基座阶地,发育受构造运动和气候变化共同驱动,可作为第四纪以来成都平原东缘龙泉山背斜南段隆升的地 貌标志,T1 为堆积阶地,发育主要受气候变化驱动; 泡粉组合特征反映第四纪以来成都平原以森林草原植被为主,气候整 体具由偏暖偏湿向温干变化的趋势;阶地资料揭示第四纪以来龙泉山背斜南段经历了四次间歇性隆升,隆升高度达 127 m, 早更新世中期龙泉山背斜南段隆升速率为 0.089~0.335 mm/a,早更新世晚期隆升速率急剧下降至 0.027~0.165 mm/a,然后 呈现出逐渐升高的趋势,到晚更新世—全新世隆升速率上升到 0.133~0.322 mm/a;龙泉山背斜南北段存在差异隆升,北段 的隆升速率和隆升幅度明显大于南段,在现代地貌上表现为龙泉山北段以低山为主,南段向低山丘陵过渡。 关键词:成都平原;岷江水系;河流阶地;古气候;新构造运动

中图分类号: P546 文献标识码: A

# Development of fluvial terraces in Chengdu Plain: Implications for the paleoclimate and Neotectonic Movement

LEI Chuanyang<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, LIU Zhaoxin<sup>2</sup>, FAN Min<sup>2</sup>, XIE Haiyang<sup>3</sup>, HAO Jinbo<sup>4</sup>

 Sichuan Geological Big Data Center, Chengdu 610072, China; 2. Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey, Chengdu 610081, China; 3. The 1st Geological Brigade of Sichuan, Chengdu 610100, China; 4. Chengdu Institute of Geo-environment Monitoring, Chengdu 610042, China)

Abstract: In order to study the paleoclimate and neotectonic movement characteristics of the Chengdu Plain since the Quaternary, a detailed study of the river terrace sequence of the Minjiang River system examined the chronological framework, pollen assemblage characteristics in different geological periods, and geochemical characteristics of vermicular red clay from T4 in Chengdu Plain.

收稿日期: 2021-10-10; 改回日期: 2021-11-20; 责任编辑: 郭秀梅

**作者简介:** 雷传扬(1985—),男,博士,高级工程师,从事区域地质、矿产地质、生态地质、城市地质的调查与研究工作。E-mail: lcy850610@126.com

资助项目: 四川省地质调查研究院财政资金(SCIGS-CZDZX-2024004, SCIGS-CZDXM-2024014)

21

Based on a large amount of data, along with field verification, and combined with geological, geomorphological, and chronological data, we identified 5 fluvial terraces in the transverse drainage of the Minjiang River system in the Chengdu Plain. The terrace thicknesses from T5 to T1 are  $98\sim127$  m,  $59\sim79$  m,  $36\sim52$  m,  $4\sim10$  m, and  $2\sim5$  m, respectively. The results show that the terraces T5 $\sim$ T2 formed at  $925\pm92$  ka,  $722\pm77$  ka,  $462\pm46$  ka,  $30.13\pm2.86$  ka and 9.0 ka respectively, which are base terrace, whose development is driven by tectonic movement and climate change, and can be used as the geomorphic symbol of the uplift of the south section of Longquan anticline on the eastern edge of Chengdu Plain since Quaternary. T1 is the accumulation terrace, whose development is mainly driven by climate change. Pollen assemblages show that the Chengdu Plain has been dominated by forest and grassland vegetation since the Quaternary, and the climate has a trend of changing from warm and wet to warm and dry. Terrace data reveal that the south section of Longquan anticline has experienced four intermittent uplifts since the Quaternary, with an uplift height of 127 meters. The uplift of the south section of Longquan anticline reached its peak in the middle of the early Pleistocene, with an uplift rate of  $0.089\sim0.335$  mm/a. By the late Early Pleistocene, the uplift rate decreased sharply to  $0.027\sim0.165$  mm/a, and then showed a gradually increasing trend, to  $0.133\sim0.322$  mm/a in the late Pleistocene Holocene. There is differential uplift between the south and north sections of Longquan anticline. The uplift rate and amplitude of the north section are significantly greater than those of the south section. In modern geomorphology, the north section of Longquan Mountain is dominated by low mountains, and the south section transits to low mountains and hills.

Key words: Chengdu Plain; Minjiang River system; fluvial terraces; Paleoclimate; Neotectonic movement

## 0 引言

河流阶地属于河流系统演化的产物,其形成与 基准面下降或地面抬升引起的河流快速下切关系 密切,是河流内部动力变化与外部气候变化、构造 活动等内外因素共同作用的产物(Bridgland et al., 2004;魏全伟等,2006;Bridgland and Westaway, 2008;张蕾等,2013;胡春生,2014;吴环环等,2019)。 其形成过程记录了区域气候变化和构造活动的信 息,通过对河流阶地的序列、年代和驱动力开展研 究,可有效反演第四纪以来气候旋回性变化规律和 新构造运动特征(Westaway,2009;胡小飞等,2013; 周晓梅等,2020)。

成都平原位于四川盆地西部,是我国一级阶梯 向二级阶梯过渡的地带,前人对第四纪以来成都平 原的古气候和新构造运动开展了大量研究,取得了 诸多科研成果。但关于第四纪以来成都平原的气 候特征仍存在较大争议。第四纪中期成都平原的 植被为针叶林,经历了温凉较湿—寒凉较湿—温和 或温凉较湿的气候变化,这种变化是对全球气候变 化的区域响应,而青藏高原快速隆升可能是成都平 原气温较低的直接原因(赵志中等,2007),但应立 朝等(2012a)通过对成都地区中更新世网纹红土的 地球化学特征开展研究,认为其经历了强烈的化学 风化作用,形成于湿热环境,指示中更新世时期成 都平原属于亚热带气候。晚更新世晚期形成的成

都黏土(Qp<sup>3</sup>cd)为末次冰期风成堆积物(应立朝等, 2012b, 2013; 梁斌等, 2013), 通过与北方黄土和成 都平原第四系深层土壤地球化学特征的对比,认为 成都黏土具有中等的化学风化强度,指示成都平原 晚更新世晚期相对于温带干旱和半干旱地区偏温 暖湿润(应立朝等, 2013)。全新世以来, 成都平原 总体呈现温和湿润的气候特征,但也具有一定的波 动性(姚轶锋等,2005;罗丽萍等,2008;王楠等, 2018)。新生代以来, 青藏高原向东的侧向挤压引 起东缘龙门山地区发生强烈隆升和构造变形,并相 伴产生川西前陆盆地和龙泉山断层传播褶皱(刘树 根等, 2003; 邓宾等, 2008; Tian et al., 2018; 刘洪等, 2020; 张威等, 2020; 柳存喜等, 2021), 研究显示, 龙 门山造山带、川西前陆盆地和龙泉山褶断带的构 造活动在空间上具有分区性和连续性,在时间上具 有幕式性(邓宾等, 2008)。新近纪以来, 川西前陆 盆地及周缘经历了多次隆升与夷平,活动时代大致 对应中新世、上新世、更新世中晚期和全新世早期 (刘兴诗, 1983), 而早—中更新世时期龙泉山地区 的构造隆升是对青藏高原东缘构造隆升的响应(王 全伟等, 2013)。龙泉山背斜北段晚更新世以来地 壳缩短速率为 1.36±0.41 mm/a, 隆升速率为 0.64± 0.19 mm/a(李康等, 2013), 但对于第四纪以来龙泉 山背斜南段的构造运动,尚未开展研究。

本文在已有研究基础上,依托"成都市城市地 下空间资源地质调查应用系统开发及数据整合建 库项目",收集了大量有关成都平原岷江水系河流 阶地发育特征和第四纪以来不同时期孢粉组合特 征的资料,并开展了少量野外查证工作,补充完善 了成都平原不同级序河流阶地的年代格架,进一步 论述了第四纪以来不同地质时期孢粉组合特征和 河流阶地网纹红土地球化学特征与古气候的变化, 以及河流阶地对龙泉山背斜南段构造运动的指示。 充分展现了存量地质资料二次开发利用的科学价 值(雷传扬等,2020,2021)。

## 1 区域地质与地貌概况

成都平原西部与青藏高原东缘龙门山和邛崃 山相接,东部以龙泉山为界,与川中丘陵相隔,南北 长约110 km,东西宽约80 km,面积约8400 km<sup>2</sup>(王 羽珂等,2019)。成都平原第四系广泛发育,仅名邛 台地、牧马山台地和东郊台地见侏罗系和白垩系 地层出露(雷传扬等,2022);受青藏高原向东逸出 影响(张家声等,2003),成都平原发育一系列北东 向和北北西向隐伏断裂,以及呈雁列式展布的褶皱 (图1)。晚新生代以来,伴随着青藏高原东缘龙门 山的大幅隆升,盆地边缘急剧下降,形成了一套厚 度较大,成因类型多样的第四系堆积物,由于存在 多期次构造隆升,在其东缘沿龙泉山西坡发育多级 河流阶地。成都平原属亚热带湿润季风气候,海拔 为484~556 m,主要地貌单元为河间地块,沿沱江、 岷江水系沿岸分布的一级阶地与河漫滩,平原东部 发育浅丘台地。地形上形成南北对峙,东西夹持, 从平原中心向周边阶梯状抬升的、封闭的菱形盆 地景观。

下文中关于河流阶地发育特征的描述,不同地 质时期孢粉数据以及地球化学元素数据依据于中 华人民共和国区域地质调查报告1:250000成都幅



图 1 成都平原数字高程模型图(SRTM, 30 m 分辨率) Fig. 1 Digital elevation model of the Chengdu Plain (SRTM, at 30 m resolution)

(四川省地质调查院,2012),作者等人在区调报告的基础上对河流阶地剖面开展了少量野外调查工作,绘制了河流阶地剖面图。河流阶地年代学数据源于梁斌等(2014)编写的《成都平原第四纪地质与环境》一书。在此基础上深入论述了不同地质时期成都平原特征种属孢粉记录的古气候变化,以及成都平原岷江水系河流阶地形成的驱动力和河流阶地对龙泉山背斜隆升的指示意义。

#### 2 河流阶地特征及年代格架

成都平原西北侧为地表水系进口,发育沱江、 岷江两大水系。沱江水系分布在成都平原中北部, 主要由绵远河、石亭江、湔江组成,流入平原后呈 扇状分流,并接纳山前发育的马尾河、射水河等经 平原东北部金堂流出区外。岷江于都江堰山口进 入平原,被都江堰水利工程分为内江和外江,内江 包括蒲阳河、走马河、柏条河、江安河,外江包括 金马河、羊马河、沙黑总河,岷江水系呈扇状流经 成都平原后于平原南部新津流出区外。本次研究 的河流阶地主要受控于岷江水系,分布在龙泉山以 西台地边缘,地貌上构成二、三、四、五级阶地,在 成都平原内部,沿岷江水系两岸发育一级河流阶地。

## 2.1 五级河流阶地

五级河流阶地(T5)零星分布在白垩系红层组 成的低缓山丘之上,如平原东部凤凰山、磨盘山、 牧马山以及新都华阳山、黄牛山一带均有零星分 布,为基座阶地,基座拔河约 98~127 m,基岩为白 垩系红层,阶地整体厚度为 1.3~10.3 m。基座之上 为杂色砾石层,厚 1.5~2.0 m,砾石含量 50%~60%, 粒径 10~20 cm,极少数可达 50 cm,砾石分选差,磨 圆度一般,多呈次圆—次棱角状,砾石成分以砂岩、 石英砂岩、脉石英风化产物为主,见少量岩浆岩风 化形成的砾石,砾石外围普遍被浅白色黏土层包裹, 充填物为棕黄色黏土。砾石层之上残留有少量网 纹红土,为古土壤层,厚 0.2~0.5 m,沿裂隙发育浅 灰白色网纹,网纹宽 1~3 cm,长 20~40 cm。古土壤 层之上为上更新统成都黏土(图 2)。

#### 2.2 四级河流阶地

四级河流阶地(T4)分布在成都平原东郊台地, 双流天福寺一带最为典型,为基座阶地,基座拔河 约59~79 m,基岩为上白垩统灌口组红层,阶地整 体厚度为4.7~11.8 m。基座之上为棕黄色砾石层, 厚约 2.0~2.8 m,砾石含量 60%~70%,粒径多为 3~7 cm,极个别可达 15 cm,砾石分选较好,磨圆度一般, 多呈次棱角—次圆状,砾石成分以石英砂岩、石英 岩及脉石英风化的产物为主,见少量岩浆岩风化形 成的砾石,充填物为中—粗砂及泥质。砾石层之上 为河漫滩相含砾中—细砂层,砂层顶部为一层厚 约 8~10 cm 的砾石层,砾石含量约 20%,砾石大小 为 3~5 cm,砾石成分单一,主要为石英砂岩砾石。 河漫滩相之上发育一层厚约 0.3~0.6 m 的黏土层, 其中发育紫红色条带,为古土壤层。古土壤层之上 为上更新统成都黏土(图 2)。

#### 2.3 三级河流阶地

三级河流阶地(T3)分布在成都平原东郊台地, 双流兴隆镇最为典型,为基座阶地,基座拔河约 36~52 m, 基岩为上白垩统灌口组红层, 阶地整体厚 度为 2.2~5.3 m。基座之上为灰黄色砾石层,厚约 1.2~1.8 m,砾石含量 70%~90%,下部砾石粗大,粒 径 10~20 cm, 磨圆度较好, 多呈次圆状, 分选较差, 充填物为中—粗砂,砾石大部分呈叠瓦状排列,上 部砾石明显变小,分选性相对较好,粒径 3~10 cm, 但磨圆度较差,多呈次圆--次棱角状,充填物为细 砂,砾石成分以石英岩、石英砂岩风化产物为主, 见少量岩浆岩和脉石英风化形成的砾石。砾石层 之上发育厚约 0.3~0.5 m 的河漫滩相中—粗砂层, 普遍见碳屑和碳化的植物根系,与下伏砾石层共同 构成阶地的二元结构。河漫滩相之上为厚约 0.2~0.5 m 的青灰色黏土层, 其中上部发育灰黑色 铁锰质条带,下部含有少量含细砂砾石层,发育水 平层理及小型沙纹层理,该层为河漫滩相和黏土层 之间的过渡层。该层之上发育厚约 0.1~0.3 m 的灰 黄色黏土,结构疏松多孔,普遍见有铁锰质薄膜,为 古土壤层。古土壤层之上为上更新统成都黏土 (图 2)。

#### 2.4 二级河流阶地

二级河流阶地(T2)零星分布在成都平原东侧 龙泉驿柏合镇,南侧双流华阳、籍田一带,为基座 阶地,基座拔河约为 4~10 m,地表仅见上部黏土层, 据钻孔资料,基岩为上白垩统灌口组红层,阶地整 体厚度为 8.7~10.5 m。基座之上为灰黄、褐黄色砾 石层,厚 2.0~5.0 m,砾石含量 50%~60%,粒径 5~10 cm,磨圆度差,多呈棱角状—次棱角状,未见明显 分选,砾石成分以侵入岩风化产物为主,见少量灰 岩风化形成的砾石,充填物为砂泥质,局部泥质呈 团块。砾石层之上发育厚 0.5~0.8 m 厚的河漫滩相



图 2 岷江水系第四纪河流阶地序列、沉积物及测年结果示意图(测年数据据梁斌等, 2014)

Fig. 2 Staircase, strata and dating results of Quaternary terraces along the Minjiang River system (dating data after Liang et al., 2014)

含泥砂砾石层,砾石成分与下部砾石层一致,差异 主要体现在该层砾石磨圆度较好,多呈次圆状,具 一定的分选性,粒径 5~20 cm,充填物中砂质含量 相对增加,与下伏砾石层共同构成阶地的二元结构。 河漫滩相之上为粉砂质黏土,厚 0.3~0.7 m,由下向 上,颗粒变细,黏粒增多,黏土中局部见铁锰膜及豆 状小结核,偶见钙质结核,为古土壤层,其上为厚 0.5~0.8 m 的现代耕作层(图 2)。

#### 2.5 一级河流阶地

一级河流阶地(T1)在成都平原沿岷江水系两 岸广泛分布,高出现代河床 2~5 m(图 2),为堆积阶 地,阶地整体厚度 3.5~13.7 m,具明显的二元结构, 推测可能是人工筑堤后将原来的高漫滩变为一级 阶地。砾石层呈灰黄色,厚 0.3~0.5 m,砾石含量为 75%~80%, 粒径 1~5 cm, 砾石磨圆度和分选性一般, 多呈次棱角状—次圆状, 砾石成分以脉石英、花岗 岩风化产物为主, 充填物为砂质黏土和粗砂; 砾石 层之上发育厚 0.5~1.0 m 的河漫滩相含砾细砂层, 砾石含量 5%~10%, 粒径 1~4 cm, 磨圆度和分选性 一般, 呈次棱角—次圆状, 砾石成分主要为石英岩、 石英砂岩。河漫滩相之上为黄棕色粉砂质黏土, 含 铁质结核, 结构较为疏松、多孔, 厚约 2.5~3.9 m, 属 于古土壤层, 其上为厚约 0.3~0.5 m 的现代耕作层 (图 2)。

#### 2.6 河流阶地年代格架

关于"河流阶地形成年代",不同学者认识不一致,部分学者认为阶地上沉积物的堆积年代代表 河流阶地的形成年代,但更多的学者认为河流下切 的年代才能代表河流阶地形成的年代(潘保田等, 2007; Pan et al., 2013; 胡小飞等, 2013; 董铭等, 2018)。"河流阶地"是指河流下切, 河漫滩不再 接受沉积, 呈阶梯状分布在河谷谷坡上, 所以本文 认为河流下切年代更能准确反映河流阶地的形成 年代, 而河漫滩相沉积结束指示河流下切作用的 开始。

双流牧马山一带 T5 砾石层之上河漫滩相顶部 砂质透镜体的 ESR 测年结果为 925±92 ka, 大致可 以代表河流下切的年代,表明 T5 形成于早更新世 晚期。双流天福寺一带 T4 河漫滩相上部砂质透镜 体的 ESR 测年结果为 722±77 ka, 大致可以代表河 流下切的年代,表明T4形成于中更新世早期。双 流兴隆镇一带 T3 下部砾石层之上河漫滩相顶部, 靠近黏土底部细砂层的 ESR 测年结果为 462±46 ka, 大致可以代表河流下切的年代, 表明 T3 形成于 中更新世中晚期。龙泉驿柏合一带 T2 下部砾石层 之上河漫滩相顶部粉砂质泥岩 OSL 测年结果为 30.13±2.86 ka, 大致可以代表河流下切的年代, 表 明 T2 形成于晚更新世晚期。金堂三星镇一带 T1 下部河漫滩相顶部细砂层的 ESR 测年结果为 9.0 ka,大致可以代表河流下切的年代,表明 T1 形成于 全新世早期。

## 3 孢粉组合与古气候变化

#### 3.1 早—中更新世孢粉组合特征

本次搜集了双流应天寺、仁寿视高和蒲江五 里碑三个地区 T4 剖面的孢粉数据(表 1)。孢粉组 合中木本植物花粉含量为 56.1%~59.8%, 其中阔叶 类花粉含量为 38.2%~41.2%, 以栎属(Ouercus)、栗 属(Castanea)和桦属(Betula)为主,含少量鹅耳枥 属(Carpinus)、桤木属(Alnus)、榆属(Ulmus)、胡桃 属(Juglans);针叶类花粉含量为 17.9%~21.1%,以 松属(Pinus)为主,含少量云杉属(Picea)和铁杉属 (Tsuga)。灌木和草本植物花粉含量为 29.1%~ 32.0%, 以蒿属(Artemisia)、莎草科(Cyperaceae)、 榛属(Corvlus)和藜科(Chenopodiaceae)为主,含少 量茄科(Solanaceae)、狐尾藻属(Myriophyllum)等。 蕨类孢子和藻类含量为 7.7%~9.1%, 以水龙骨属 (Polypodium)、单裂缝孢子(Monolete-spores)和三 裂缝孢子(Trilete-spores)为主,含少量凤尾蕨属 (Pteris)、环纹藻(Concentricystes)、盘星藻属 (Pediastrum)和泥炭藓(Sphagnum)等。

#### 3.2 中更新世孢粉组合特征

本次搜集了眉山城关、双流黄龙溪和眉山东 馆三个地区 T3 剖面的孢粉数据(表 1)。孢粉组合 中木本植物花粉含量为 57.1%~60.6%,其中阔叶类 花粉含量为 34.2%~38.7%,以栎属、桦属和栗属为 主,含少量桤木属、榆属和胡桃属等,针叶类含量 为 21.9%~24.7%,以松属为主,含少量云杉属、冷杉 属(*Abies*)和铁杉属。灌木草本植物花粉含量为 27.4%~28.6%,以榛属、蒿属、莎草科和藜科为主, 含少量禾本科和狐尾藻属。蕨类孢子和藻类含量 为 7.3%~10.1%,以水龙骨属为主,含少量三裂缝孢 子、里白属(*Hicriopteris*)、环纹藻(均值 0.4%)、盘 星藻属、双星藻属(*Zygnema*)和泥炭藓。

#### 3.3 晚更新世孢粉组合特征

本次搜集了双流机场、双流应天寺和青白江 姚渡三个地区成都黏土剖面的孢粉数据(表1)。 孢粉组合中木本植物花粉含量为55.1%~57.1%,其 中阔叶类花粉含量为34.5%~36.4%,以栎属、桦属 和栗属为主,含少量桤木属、胡桃属等;针叶类花 粉含量为20.6%~20.8%,以松属为主,含少量云杉 属、冷杉属和铁杉属。灌木和草本植物花粉含量 为28.8%~30.2%,以榛属、蒿属、莎草科和藜科为 主,含少量杜鹃花科、禾本科等。蕨类孢子和藻类 含量为9.8%~10.2%,以水龙骨属为主,含少量三裂 缝孢子、环纹藻和泥炭藓等。

#### 3.4 晚更新世—全新世孢粉组合特征

本次搜集了龙泉驿柏合、金堂三星两个地区 T2 剖面的孢粉数据(表 1)。孢粉组合中木本植物 花粉含量为 51.6%~55.2%,其中阔叶类花粉含量为 31.9%~32.3%,以栎属、桦属和栗属为主,含少量桤 木属、榆属和胡桃属等,针叶类花粉含量为 19.7%~ 22.9%,以松属为主,含少量云杉属、冷杉属和铁杉 属。灌木和草本植物花粉含量为 20.9%~28.4%,以 蒿属、莎草科和榛属为主,含少量藜科、杜鹃花科 (*Ericaceae*)和禾本科。蕨类孢子和藻类含量为 11.4%~22.9%,以水龙骨属、单裂缝孢子和三裂缝 孢子为主,含少量里白属、环纹藻和泥炭藓等。

#### 3.5 特征种属孢粉记录的古气候变化

孢粉化石广泛存在于不同类型的沉积物中,其 种属组成客观记录了地质历史时期植物群落的组 合特征,可用于重建古植被演化历史和古气候演变 (秦锋和赵艳,2013;赵辰辰等,2020)。本次研究搜 集了成都平原岷江水系 T4、T3、T2 剖面和成都黏

时代										 	全新世
		<u>- ~</u> 仁寿	<u>蒲江</u>	眉山	<u>- 2 新 [</u> 双流	<u>.</u> 眉山	双流	青白江		<u></u> 龙泉驿	金堂
米样位置	应天寺	视高	五里碑	城关	黄龙溪	东馆	机场	姚渡	双流应天寺	柏合	三星
木本植物	56.1	59.2	59.8	57.1	59.3	60.6	57.1	55.9	55.1	55.2	51.6
Pinus	15.2	18.0	14.8	19.4	20.4	18.4	17.1	17.2	17.4	18.9	16.6
Picea	1.8	2.3	2.1	1.8	2.9	1.7	2.2	2.4	2.1	2.3	2.1
Abies	/	/	0.6	0.7	0.6	0.4	0.5	0.2	/	0.6	/
Tsuga	0.9	0.8	1.1	1.0	0.8	1.4	0.9	1.0	1.1	1.1	1.0
Quercus	20.2	19.6	17.9	20.7	19.5	18.5	20.5	17.2	17.2	16.7	15.6
Betula	7.4	8.4	8.9	5.4	6.4	8.2	7.4	8.4	7.4	6.0	4.8
Carpinus	0.5	/	0.6	0.5	0.4	0.8	0.6	0.7	0.4	0.4	1.0
Alnus	0.4	0.8	1.0	0.6	1.1	1.1	1.0	0.6	0.9	1.1	1.0
Castanea	8.5	7.7	10.7	3.8	4.2	7.5	4.1	5.8	5.6	5.7	8.0
Ulmus	0.5	0.8	0.4	0.8	1.3	1.6	1.2	1.1	1.7	0.9	1.1
Juglans	0.7	0.4	1.0	1.4	1.1	1.0	1.1	0.8	0.9	1.0	0.4
Liquidambar	/	0.4	0.7	1.0	0.6	/	0.5	0.5	0.4	0.5	/
灌木和草本植物	32.0	28.0	29.1	27.4	28.6	27.6	28.8	30.2	29.8	28.4	20.9
Corylus	3.7	3.5	2.0	4.4	3.9	2.8	4.4	3.1	3.1	3.3	2.3
Ericaceae	0.7	1.2	0.7	/	0.5	1.1	1.0	0.7	1.0	1.2	0.5
Ephedra	0.3	/	0.4	0.4	0.4	/	0.4	0.4	0.7	0.5	0.3
Artemisia	11.2	6.9	10.1	8.0	8.1	7.6	9.9	9.5	9.5	9.2	5.9
Chenopodiaceae	3.2	3.1	1.9	1.6	3.1	3.1	2.3	3.5	4.7	2.8	2.2
Cyperaceae	8.2	8.8	8.6	8.8	7.9	8.0	7.4	7.6	7.0	7.2	7.6
Polygonum	0.8	0.9	1.2	1.0	0.7	0.5	1.0	1.1	0.5	0.8	0.5
Gramineae	0.8	1.0	1.2	1.5	1.3	2.2	0.9	1.4	1.2	1.2	0.5
Compositae	0.3	/	0.5	0.3	0.7	0.3	/	0.4	/	/	0.6
Solanaceae	1.0	0.7	0.7	0.6	0.4	0.7	0.6	0.9	0.6	0.7	/
Thalictrum	0.5	0.7	0.5	/	0.4	/	/	0.2	/	/	/
Typha	0.4	0.4	0.5	/	0.5	0.3	0.4	0.5	/	0.6	/
Myriophyllum	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	1.0	0.5	0.9	1.5	0.9	0.5
蕨类孢子和藻类	7.7	8.8	9.1	10.1	7.3	8.3	10.2	10.1	9.8	11.4	22.9
Polypodium	2.8	3.3	4.3	3.2	4.2	4.1	5.2	4.3	5.2	5.0	4.1
Trilete-spores	1.2	1.6	0.6	1.8	0.9	1.6	0.9	1.0	1.6	1.3	4.2
Monolete-spores	2.4	3.1	1.4	2.5	/	1.2	/	1.7	0.9	2.9	6.9
Hicriopteris	/	/	0.5	/	0.7	/	1.1	0.9	0.9	0.6	3.9
Pteris	0.4	/	0.3	0.5	/	0.4	0.7	0.3	0.4	/	/
Concentricystes	0.3	0.4	0.6	0.6	0.4	/	1.3	0.5	0.4	0.8	1.8
Pediastrum	0.3	/	0.3	0.4	0.4	/	0.5	0.3	/	/	/
Zygnema	/	/	/	/	0.3	/	/	0.4	/	/	/
Sphagnum	0.3	0.4	1.1	1.1	0.4	1.0	0.5	0.7	0.4	0.8	2.0

表 1 第四纪以来不同时期成都平原孢粉组合百分含量统计 Table 1 Percentage statistics of pollen assemblages in Chengdu Plain in different periods since Ouaternary

注:不同时期孢粉数据来源于中华人民共和国区域地质调查报告1:250 000成都幅; "/"代表未鉴定出该类植物的孢粉。

土的孢粉数据,分别对应早—中更新世、中更新世、 晚更新世和晚更新世—全新世四个地质时期,从不 同地质时期孢粉组合特征来看,第四纪以来成都平 原发育以栎、桦、栗、蒿、莎草科等为主的森林草 原植被, 阔叶类树种较丰富, 分布有少量胡桃属、 榆属、桤木属等, 林下生长蒿, 莎草科, 水龙骨, 里 白等, 气候整体偏暖偏湿。但不同地质时期, 孢粉 组合及百分含量存在一定差异(表1), 指示成都平 原古气候条件存在波动变化的特征。

第四纪以来,成都平原整体上属于偏暖偏湿的 亚热带气候条件,在这种环境中,针叶孢粉种属具 有很好的气候指示作用,尤其是云/冷杉属绝大多 数分布在寒冷地区,为寒冷气候的指示物(石宁, 1996)。早—中更新世时期云杉属花粉含量较低, 未见或偶见冷杉属花粉,指示区域气候相对偏热; 中更新世时期云杉属花粉含量明显增加, 且出现了 冷杉属花粉,表明区域气温明显下降;晚更新世和 全新世时期,云/冷杉属花粉含量整体略有下降,表 明区域气温有所回升。阔叶类植物中桦属喜温湿, 耐水湿,绝大多数种类分布在北半球温带,但不少 种类散布至亚热带、热带地区(陈之端, 1994),研 究表明,其花粉含量与降水量呈正相关(Sun et al., 1996),对区域降水量和湿度变化具有很好的指示 作用(赵辰辰等,2020)。早—中更新世时期桦属花 粉含量较高,指示区域降水量相对偏高,湿度偏大; 中更新世—晚更新世时期桦属花粉含量明显降低, 表明区域降水量减小,气候偏干燥,到晚更新世末 期—全新世时期桦属花粉含量有所上升,表明区域 降水量有所增加,气候趋湿润。蕨类植物中水龙骨 属多生长在阴湿环境,指示冷偏干的气候条件。 早—中更新世时期水龙骨属孢子含量较低,指示区 域气候气候暖偏湿;中更新世和晚更新世时期水龙 骨属孢子含量持续增加,表明区域气候偏冷偏干燥; 晚更新世---全新世时期水龙骨属孢子含量略有下 降,表明区域气候有变湿润的趋势。微体藻类中环 纹藻、双星藻和盘星藻多出现在湖沼沉积物中,指 示温暖湿润的气候条件(唐领余等,2013)。第四纪 不同时期均发现少量环纹藻、双星藻和盘星藻,表 明成都平原可能存在湖泊或沼泽。

以上论述表明,第四纪以来,成都平原以森林 草原植被为主,气候整体具由偏暖偏湿向温干变化 的趋势。早—中更新世时期气候偏热,降水量偏大, 相对湿润;中更新世时期温度下降明显,降水量减 小,气候偏冷偏干燥;晚更新世开始,气温有所回升, 但该时期降水量仍然偏低,气候偏干燥;到晚更新 世晚期至全新世时期,降水量有所增加,气候略为 湿润。

## 4 化学元素对古气候的指示

本次仅搜集到 T4 剖面上网纹红土的地球化学 分析数据(表 2),对应早—中更新世时期。前已述 及, T4 为河流基座阶地,其沉积物来源均为河流搬 运,满足沉积物粒度相近和物源相同这一前提条件, 其地球化学元素含量及比值可指示古气候(朱宏博 等,2019)。

不同气候条件下地表岩石遭受风化作用的类 型不同。温暖湿润气候条件下,化学风化作用和生 物风化作用强烈,而干燥寒冷气候条件下,化学风 化作用和生物风化作用明显受到抑制,以物理风化 作用为主。不同风化作用下化学元素的迁移能力 不同,导致元素发生分异。如 Na、K、Ca、Mg 等元 素易发生迁移, 而 Al 和 Fe 元素的迁移能力相对较 弱,因此表生沉积物中Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、CaO、MgO含 量较低,而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量较高时指示湿润的气 候条件,反之指示气候干燥(朱宏博等,2019)。T4 剖面网纹红土 Na<sub>2</sub>O 含量为 0.09%~0.23%(均值 0.19%), K<sub>2</sub>O含量为 1.08%~1.64%(均值 1.29%), CaO 含量为 0.09%~0.38%(均值 0.27%), MgO 含量 为 0.45%~0.71%(均值 0.57%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 12.21%~ 17.42%(均值 14.13%), Fe2O3 含量为 4.60%~10.24% (均值 7.35%), 与上部陆壳平均值(CUU)相比, Na、 K、Ca、Mg 具明显的亏损特征, Al 显示弱富集的特 征,而Fe具明显的富集特征,表明T4 剖面网纹红 土经历了较强的化学风化作用,指示温暖湿润的气 候条件。

Mn 在干旱环境下含量较高, 在相对湿润环境 下含量较低, Fe 在湿润环境中易以 Fe(OH), 胶体的 形式快速沉淀,因此沉积物中Fe/Mn的高值反映润 湿环境,低值是对干燥气候的响应(胡俊杰等, 2017)。T4 剖面网纹红土中 Fe/Mn 值为 162.34~ 924.81(均值 439.07),指示湿润的气候条件。另外 化学蚀变指数 CIA: CIA=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO\* + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)×100 和气候指数 C: C=∑(Fe + Mn +  $Cr + Ni + V + Co) / \sum (Ca + Mg + Sr + Ba + K + Na)$ 均可用于表征古气候(冯兴雷等, 2014; 徐崇凯等, 2018)。研究表明 CIA 值介于 50~65 之间,反映干 燥寒冷的气候条件下较低的化学风化程度; CIA 值 介于 65~85 之间,反映温暖湿润条件下中等的化学 风化程度; CIA 介于 85~100 之间, 反映炎热潮湿条 件下的强烈的化学风化程度。T4 剖面网纹红土中 CIA 值为 84.52~88.43(均值 86.50), 指示炎热潮湿 的气候条件。根据分类标准 C=0~0.2 为干燥气候, 0.2~0.4 为半干燥气候, 0.4~0.6 为半干燥—半湿润 气候,0.6~0.8为半湿润气候,大于0.8为湿润气候。 T4 剖面网纹红土中 C 值为 1.91~4.84(均值 2.96),

		- J	()				,					
位置	仁寿视高			蒲江城关			双流应天寺					
样号	CP11-5hf1	5hf2	5bf3	PM02-3hf1	3hf2	3hf3	PM31-3hf2	4hf	5hf1	5hf3	5hf4	- 000
SiO <sub>2</sub>	72.15	69.12	68.21	63.32	68.05	75.6	71.23	71.76	72.15	68.91	68.44	66
$Fe_2O_3$	6.84	9.45	10.24	8.99	7.19	4.60	6.32	6.30	6.21	7.07	7.64	5
FeO	0.10	0.17	0.03	0.13	0.03	0.13	0.05	0.07	0.08	0.12	0.10	/
$Al_2O_3$	13.19	13.07	13.28	17.42	15.42	12.21	14.02	13.67	13.37	14.94	14.86	15.2
$K_2O$	1.09	1.14	1.17	1.50	1.50	1.35	1.08	1.10	1.18	1.64	1.45	3.4
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.22	0.09	0.20	0.14	0.18	0.21	0.21	0.21	0.23	0.23	3.9
CaO	0.22	0.27	0.21	0.25	0.09	0.13	0.38	0.38	0.35	0.32	0.36	4.2
MgO	0.49	0.52	0.45	0.71	0.65	0.53	0.58	0.57	0.53	0.62	0.62	2.2
$\mathrm{TiO}_{2}$	1.01	1.03	1.05	1.12	1.14	1.15	1.11	1.12	1.08	1.07	1.07	0.65
MnO	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.08
$P_2O_5$	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.15
LOI	4.55	4.81	5.06	6.16	5.54	3.94	4.82	4.62	4.63	4.87	5.01	
Zr	452.1	388.2	433.6	338.6	417.2	239.3	394.7	410.7	375.3	333.3	351.8	190
Hf	12.4	11.1	12.4	10.0	12.3	6.7	11.8	11.7	11.1	9.4	10.6	5.8
Ba	217.6	264.8	261.5	299.1	293.0	353.2	192.9	217.8	225.3	273.2	193.2	550
Cu	21.0	23.3	23.5	38.0	35.9	28.2	26.4	25.2	34.0	26.5	29.5	25
V	111.2	116.3	130.2	143.6	100.3	132.8	112.5	107.2	105.5	120.9	126.3	60
Zn	41.1	50.1	50.4	107.4	66.6	82.5	88.9	78.6	53.1	54.4	57.8	71
Sc	11.8	11.0	7.2	14.0	12.1	8.3	11.2	13.9	13.8	13.5	9.5	11
Cr	101.3	101.0	103.8	116.4	78.9	75.3	99.2	97.9	94.6	101.5	112.3	35
Co	5.9	7.5	7.4	18.4	11.0	22.4	25.0	22.6	11.9	7.8	11.4	10
Ni	19.7	21.1	20.5	41.2	29.7	35.9	40.5	38.2	31.3	28.3	31.4	20
Rb	58.8	53.8	64.5	59.9	80.4	86.4	49.3	55.8	74.0	65.5	37.7	112
Pb	27.6	30.8	35.0	28.5	20.9	34.5	23.2	20.9	22.0	26.4	26.1	20
Th	15.9	14.7	19.8	15.6	15.1	19.7	12.0	14.8	16.7	16.0	10.1	10.7
U	4.0	4.4	5.4	4.1	3.6	5.1	3.9	4.7	5.4	5.0	5.0	28

表 2 T4 剖面网纹红土主量(%)和微量元素测试结果(×10<sup>-6</sup>) Table 2 Major (%) and trace element concentrations (×10<sup>-6</sup>) of the vermicular red clay from T4

注:测试数据来源于中华人民共和国区域地质调查报告1:250 000成都幅,上陆壳(UCC)数据引自文献(Taylor and McLennan, 1985)。

指示湿润的气候条件。

综合上述分析,认为 T4 剖面上网纹红土形成 于炎热湿润的气候条件,反映早—中更新世时期成 都平原气候偏热,降水量偏大,相对湿润的气候条 件,与通过同时期孢粉组合特征研究得出的结论 一致。

## 5 河流阶地对新构造运动的指示

#### 5.1 河流阶地形成的驱动力

台阶状河流阶地形成于地面相对抬升或基准 面相对下降的背景,记录了河谷两侧斜坡演化的重 要信息,其形成可能受河流内部动力系统变化和外 部气候旋回性变化、构造活动(地面抬升或基准面 下降)等内外动力共同作用(Bridgland et al., 2004; 魏全伟等,2006; Bridgland and Westaway,2008; Westaway,2009; 胡春生,2014; 吴环环等,2019)。 内因变化一般倾向于短时间(10~1000 a)、小范围 (10~1000 m)内河流不同河段的变化(Maddy et al., 2000; 常宏等,2005), 而外因在较长时间和较大空 间尺度河流阶地形成演化过程起着重要的控制作 用。气候旋回性变化通过改变河流泥沙含量和水 动力条件控制河流加积和下切活动的交替,从而形 成阶地序列(杨景春和李有利,2001; Westaway et al.,2009), 而构造活动为河流持续下切提供动力, 控制河流下切深度,所有较长时间和较大空间尺度 河流阶地发育的主控因素应该是气候变化和构造 活动的耦合作用(Maddy et al.,2008; Wang et al., 2009; 胡小飞等,2013; 张天琪等,2014; Jia et al.,2015)。

成都平原岷江水系河流阶地是较长时间(早更 新世到全新世)和较大空间尺度河流地地貌演化的 产物,因此讨论其驱动力时可忽略河流内部动力变 化的影响,而重点考虑构造运动和气候变化在河流 阶地发育过程中的作用。从成都平原岷江水系河 流阶地的发育特征来看, T1 至 T5 河漫滩相之上均 不同程度发育古土壤层,古土壤在温暖湿润气候条 件下易于沉淀,在温凉干燥的环境中则不然,指示 温暖湿润的气候条件(胡春生,2014)。在温暖湿润 的气候条件下,成都平原岷江流域河流径流量增加, 植被覆盖度增加,河流侵蚀作用变缓,被侵蚀的物 质减少,且平均粒径变小,同时化学风化作用加强 (应立朝等, 2012a),风化产物粒径更细,而干冷气 候条件下的情况则相反,故河流的下切作用与稳定 的湿热气候同期,而河流加积作用发生在干湿气候 交替变化的过渡时期(魏全伟等,2006),表明气候 旋回性变化在成都平原岷江水系河流阶地形成过 程中具有重要作用。成都平原岷江水系 T1 为堆积 阶地,连续分布在岷江水系两岸,拔河较小,具对称 分布特征,其形成年代为9.0 ka,可与全新世早期 成都平原气候变暖事件对比(钟宁, 2017), 结合前 人已有研究(Bull, 1990;张蕾等, 2013),认为T1形 成过程主要受气候变化驱动。成都平原岷江水系 T5、T4、T3、T2为基座阶地,均明显高出成都平原 东部边缘,阶面较陡,构造成因特征明显,认为成都 平原岷江水系 T5、T4、T3、T2 是构造运动和气候 旋回性变化共同作用的结果,其中构造运动提供了 河流下切的驱动力,而气候变化控制了河流下切的

时限,成都平原岷江水系 T5、T4、T3、T2 的发育受构造运动和气候变化共同驱动。因此,成都平原岷 江水系 T5、T4、T3、T2 可作为第四纪以来成都平 原东缘龙泉山背斜南段隆升的地貌标志。

#### 5.2 河流阶地对龙泉山背斜南段隆升的指示

青藏高原东缘龙门山造山带和川西前陆盆地 自中生代以来出现区域性差异构造隆升和沉降,该 过程不可能仅由印度板块和亚洲板块之间碰撞造 山引发的侧向挤出所致,而与松潘--甘孜地块向扬 子地块逆冲推覆有较大的成因联系(刘树根等, 2003;邓宾等,2008)。受喜马拉雅造山运动强烈影 响,新近纪以来龙门山造山带的隆升速率大于600 m/Ma, 隆升高度大于 6 000 m, 隆升速率表现出数 十倍的增长趋势, 而川西前陆盆地隆升速率为 8.2 m/Ma, 隆升高度大约 300 m, 隆升速率递增趋势相 对较小(邓宾等, 2008), 表明喜马拉雅造山运动的 大部分能量在龙门山地区以构造隆升的方式得以 释放,少部分能量通过成都平原侏罗系底部和三叠 系顶部之间的滑脱层传递到龙泉山地区(Xu et al., 2009;李康等, 2013),形成了龙泉山褶断带(图 3)。 前已述及,成都平原岷江水系 T5、T4、T3、T2 的形 成受区域构造运动和气候变化共同驱动,每一级河 流阶地都代表一期较强烈的构造运动(常宏等, 2005)。构造运动控制了河流下切的深度,一定程 度上反映了构造隆升的幅度,河流下切的年代大致 可代表构造隆升的年代(Maddy et al., 2008; Hu et al., 2012; He et al., 2015; Jia et al., 2015), 河流下切 的速率可大致反映地面抬升的速率(Burbank et al.,



图 3 成都龙泉山褶断带结构模式图(据 Xu et al., 2009 修改) Fig. 3 Tectonic model sketch of Chengdu Longquan fold-fault zone(after Xu et al., 2009)

1996; Maddy et al., 2000; 袁庆东, 2006; 张蕾等, 2013)。因此, 成都平原岷江水系 T5、T4、T3、T2 序列可较好指示龙泉山背斜南段隆升的历史, 河流 下切的速率可近似表示龙泉山背斜南段隆升的速 率和变化趋势。

利用成都平原岷江水系河流阶地数据计算不同地质时期龙泉山背斜南段隆升幅度和隆升速率(表3),表明第四纪以来,龙泉山背斜南段隆升高度可达127m。约925ka开始第一次隆升,隆升幅度为19~68m,隆升速率为0.089~0.335mm/a;约722ka开始第二次隆升,隆升幅度为7~43m,隆升速率为0.027~0.165mm/a;约462ka开始第三次隆升,

隆升幅度为 26~48 m, 隆升速率为 0.060~0.111 mm/a; 约 30.13 ka 开始第四次隆升, 隆升幅度为 4~10 m, 隆升速率为 0.133~0.322 mm/a。从估算的结果来 看, 早更新世中期龙泉山背斜南段隆升的速率到达 峰值, 到早更新世晚期隆升速率急剧下降, 然后呈 现出逐渐升高的趋势。李康等(2013)通过对龙泉 山北段凯江河流阶地进行研究, 认为晚更新世以来, 龙泉山背斜北段的隆升速率为 0.57 mm/a, 明显大 于本次获得的龙泉山背斜南段的隆升速率, 表明第 四纪以来, 龙泉山背斜南北段存在差异隆升, 在现 代地貌上表现为龙泉山北段以低山为主, 南段向低 山丘陵过渡(郭子奇等, 2019)。

表 3 成都平原河流阶地各时段隆升幅度和速率 Table 3 The uplift amplitude and rate of fluvial terraces in each period in the Chengdu Plain

阶地编号	河流下切年代(ka)	相对隆升时间(ka)	阶地拔河 (m)	相对隆升高度(m)	隆升速率(mm/a)
T5	925	203	98~127	19~68	0.089~0.335
T4	722	260	59~79	7~43	0.027~0.165
T3	462	431.87	36~52	26~48	0.060~0.111
T2	30.13	30.13	4~10	4~10	0.133~0.322

注:相对隆升时间——各级阶地废弃的时间差;阶地拔河——现今阶地面到河床面的高差;相对隆升高度—— 各级阶地间的高差;隆升速率——各级阶地间的高差/相对隆升时间。

#### 6 结论

(1)第四纪以来,成都平原以森林草原植被为 主,气候整体具偏暖偏湿向温干变化的趋势,受气 候旋回性变化和构造活动影响,岷江水系发育5级 河流阶地。

(2)第四纪以来,龙泉山背斜经历了四次间歇 性隆升。早更新世中期,龙泉山背斜南段隆升速率 为0.089~0.335 mm/a;早更新世晚期,其隆升速率 急剧下降至0.027~0.165 mm/a;然后,其呈现出逐 渐升高的趋势;到晚更新世—全新世,其隆升速率 上升到0.133~0.322 mm/a。

(3)晚更新世以来,龙泉山背斜南北段存在差 异隆升,北段的隆升速率和隆升幅度明显大于南段, 在现代地貌上表现为龙泉山北段以低山为主,南段 向低山丘陵过渡。

**致谢**:论文撰写过程中,与原四川省地质调 查院尹显科教授级高工和四川省地质大数据中心 文辉副主任进行了有益交流,郭秀梅编辑和两位 匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议,在 此一并表示诚挚的谢意!

#### References

- Bridgland D and Westaway R, 2008. Climatically controlled river terrace staircases: A worldwide Quaternary phenomenon[J]. Geomorphology, 98 (3-4) : 285 - 315.
- Bridgland D, Maddy D, Bates M, 2004. River terrace sequences : Templates for Quaternary geochronology and marine-terrestrial correlation [J]. Journal of Quaternary Science, 19 (2) : 203 – 218.
- Bull W B, 1990. Stream-terrace genesis : Implications for soil development[J]. Geomorphology, 3 (3-4) : 351 – 367.
- Burbank D W, Leland J, Fielding E, et al., 1996. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas[J]. Nature, 379 (6565) : 505 - 510.
- Chang H, An Z S, Qiang X K, et al., 2005. Formation of fluvial terrace and its tectonic and climate significance [J]. Marine Geology Letters, 21 (2) : 8 – 11+37-38 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z D, 1994. Phylogeny and phytogeography of the Betulaceae (Cont.) [J]. Journal of Systematics and Evolution, 32 (2) : 101 153 (in Chinese with English abstract).
- Deng B, Liu S G, Li Z W, et al., 2008. A comparative study of the late Mesozoic uplifting in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau and Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 35 (4): 477 – 486 (in Chinese with English abstract).

- Dong M, Su H, Shi Z T, et al., 2018. The age of river terraces in the Jinjiangjie reach of the Jinsha river and its implications for valley and drainage evolution[J]. Acta Geographica Sinica, 73 (9) : 1728 – 1736 (in Chinese with English abstract).
- Feng X L, Fu X G, Tan F W, et al., 2014. Sedimentary environment characteristics of Upper Carboniferous Cameng Formation in Kongkong Chaka area of northern Qiangtang basin, Tibet[J]. Geoscience, 28 (5): 953 – 961 (in Chinese with English abstract).
- Guo Z Q, Li S W, Wang D H, et al., 2019. Environmental geology of the Longquanshan urban forest park, Chengdu, Sichuan[J].
  Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 39 (4) : 90 - 99 (in Chinese with English abstract).
- He Z X, Zhang X J, Qiao Y, et al., 2015. Formation of the Yalong Downstream Terraces in the SE Tibetan Plateau and its implication for the uplift of the plateau[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 89 (2): 542 – 560.
- Hu Z B, Pan B T, Wang J P, et al., 2012. Fluvial terrace formation in the eastern Fenwei Basin, China, during the past 1.2 Ma as a combined archive of tectonics and climate change [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 60: 235 – 245.
- Hu C S. 2014, Progress in research on river terraces[J]. Journal of Earth Environment, 5(5):353-362.
- Hu J J, Ma Y S, Wang Z X, et al., 2017. Palaeoenvironment and palaeoclimate of the Middle to Late Jurassic revealed by geochemical records in northern margin of Qaidam basin[J]. Journal of Palaeogeography, 19 (3) : 480 – 490 (in Chinese with English abstract).
- Hu X F, Pan B T, Gao H S, et al., 2013. Development of Holocene fluvial terraces in the eastern Qilianshan mountain and its relationship with climatic changes[J]. Quaternary Sciences, 33 (4) : 723 – 736 (in Chinese with English abstract).
- Jia L Y, Zhang X J, He Z X, et al., 2015. Late quaternary climatic and tectonic mechanisms driving river terrace development in an area of mountain uplift: A case study in the Langshan area, Inner Mongolia, Northern China[J]. Geomorphology, 234 (1) : 109 – 121.
- Lei C Y, Liu Z X, Wang B, et al., 2021. Research on geological big data sharing service under the background of "internet plus" [J]. Natural Resource Economics of China, 34 (11) : 22 27+89 (in Chinese with English abstract).
- Lei C Y, Liu Z X, Wen H, et al., 2022. Research on 3D geological modeling of complex geological body based on multi-source data and prior geological knowledge [J]. Geological Review, 68 (4) : 1393 – 1411 (in Chinese with English abstract).
- Lei C Y, Wang J, Xie H Y, et al., 2020. Research on the method of the collection and sorting out the stocking data of the construction of geological big database [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 37 (4) : 70 - 80 (in Chinese with English abstract).
- Li K, Xu X W, Tan X B, 2013. Using deformation terraces to confine the shortening and uplift of the Longquan anticline [J]. Seismology and Geology, 35 (1) : 22 – 36 (in Chinese with English abstract).
- Liang B, Wang Q W, Zhu B, et al., 2013. Optically stimulated luminescence dating of the Chengdu clay in the west Sichuan basin[J].

Quaternary Sciences, 33 (4) : 823 – 828 (in Chinese with English abstract).

- Liang B, Zhu B, Wang Q W, et al., 2014. Quaternary geology and environment of Chengdu plain[M]. Beijing: Science Press.
- Liu H, Huang H X, Ouyang Y, et al., 2020. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 40 (1) : 91 – 105 (in Chinese with English abstract).
- Liu S G, Luo Z L, Zhao X K, et al., 2003. Coupling relationships of sedimentary basin-orogenic belt systems and their dynamic models in west China-A case study of the Longmenshan orogenic belt-west Sichuan foreland basin system[J]. Acta Geologica Sinica, 77 (2) : 177 – 186 (in Chinese with English abstract).
- Liu X S, 1983. Quaternary system in Sichuan basin [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1-20.
- Liu C X, Li S, Liu G N, 2021. Comprehensive analysis of seismogenesis of the 2020 m<sub>s</sub>5.1 earthquake on the Longquanshan fault zone, SW China[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43 (2) : 306 315+330 (in Chinese with English abstract).
- Luo L P, Zhu L D, Xiang F, et al., 2008. Spore-pollen assemblage and environmental changes of the Chengdu plain during the late Holocene[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 47 (2) : 195 – 202 (in Chinese with English abstract).
- Maddy D, Bridgland D, Green C P, 2000. Crustal uplift in southern England: Evidence from the river terrace records[J]. Geomorphology, 33 (3-4) : 167 – 181.
- Maddy D, Demir T, Bridgland D R, et al., 2008. The Early Pleistocene development of the Gediz River, Western Turkey: An uplift-driven, climate-controlled system?[J]. Quaternary International, (189):115– 128.
- Pan B T, Liu X F, Gao H S, et al., 2007. Formation age and origin of river terraces in Longxi section of the upper reaches of Weihe river[J].
  Progress In Natural Science, 17 (8) : 1063 1068 (in Chinese with English abstract).
- Pan B T, Hu X F, Gao H S, et al., 2013. Late Quaternary River incision rates and rock uplift pattern of the eastern Qilian Shan Mountain, China[J]. Geomorphology, 184 (1): 84-97.
- Qin F, Zhao Y, 2013. Methods of quantitative climate reconstruction based on palynological data and their applications in China[J]. Quaternary Sciences, 33 (6) : 1054 – 1068 (in Chinese with English abstract).
- Shi N, 1996. Development of spruce and fir in North China during the Pliocene and early Pleistocene: Paleoclimatic implications[J]. Quaternary Sciences, 16 (4) : 319 - 328 (in Chinese with English abstract).
- Sichuan Province Geological Survey, 2012. Regional geological survey report of the people's Republic of China (1: 250000) [R].
- Sun X J, Wang B Y, Song C Q, 1996. Pollen-climate response surface analysis of some genus in northern China[J]. Science in China, 26 (5):431-436.
- Tang L Y, Mao L M, Lü X M, et al., 2013. Palaeoecological and palaeoenvironmental significance of some important spores and microalgae in Quaternary deposits[J]. Chinese Science Bulletin, 58 (20) :

1969 - 1983 (in Chinese with English abstract).

- Taylor S R and McLennan S M, The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985,277.
- Tian Y T, Kohn B P, Qiu N S, et al., 2018. Eocene to Miocene out-ofsequence deformation in the eastern Tibetan Plateau: Insights from shortening structures in the Sichuan Basin[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 123 (2) : 1840 – 1855.
- Wang A, Smith J A, Wang G C, et al., 2009. Late quaternary river terrace sequences in the eastern Kunlun range, northern Tibet: a combined record of climatic change and surface uplift[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 34 (4) : 532 – 543.
- Wang N, Zhong J, Li Y, et al., 2018. Research progress on polleninferred Holocene climate histories in southwestern China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 24 (5) : 1015 – 1022 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q W, Liang B, Zhu B, et al., 2013. The discovery and significance of the Pleistocene debris flow deposits on the western slope of the Longquan mountains in western Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 33 (1) : 1 - 4 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y K, Chen H, Feng X L, et al., 2019. Sedimentary characteristics and engineering geological significance of the middle Pleistocene Hejiang Formation in the eastern suburb platform on the Chengdu Plain, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 39 (3) : 33 – 39 (in Chinese with English abstract).
- Wei Q W, Tan L H, Wang S J, 2006. Formation and evolution of river terrace and environment responses[J]. Progress in Geography, 25 (3):55-61 (in Chinese with English abstract).
- Westaway R, 2009. Active crustal deformation beyond the SE margin of the Tibetan Plateau: Constraints from the evolution of fluvial systems[J]. Global and Planetary Change, 68 (4) : 395 – 417.
- Westaway R, Bridgland D R, Sinha R, et al., 2009. Fluvial sequences as evidence for landscape and climatic evolution in the Late Cenozoic: A synthesis of data from IGCP 518[J]. Global and Planetary Change, 68 (4):237-253.
- Wu H H, Wu X W, Li Y, et al., 2019. River terraces in the Gonghe-Guide section of the Yellow River: Implications for the late uplift of the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 93 (12) : 3239 – 3248 (in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al., 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China[J]. Geology, 37 (6) : 515 – 518.
- Xu C K, Liu C Y, Guo P, et al., 2018. Geochemical characteristics and their geological significance of intrasalt mudstones from the Paleogene Qianjiang formation in the Qianjiang gra-ben, Jianghan basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36 (3) : 617 – 629 (in Chinese with English abstract).
- Yang J C, Li Y L, 2001. Principles of geomorphology [M]. Beijing: Peking University Press, 47-58.
- Yao Y F, Li K, Liu J, et al., 2005. Discussion on palaeoclimate of Jinsha site in Chengdu in 3000 a BP[J]. Journal of Palaeogeography,

7 (4) : 549 – 560 (in Chinese with English abstract).

- Ying L C, Liang B, Wang Q W, et al., 2012a. Major elements characters of the middle Pleistocene vermicular red clay from the western Sichuan plain[J]. Geological Journal of China Universities, 18 (4): 759 – 764 (in Chinese with English abstract).
- Ying L C, Liang B, Wang Q W, et al., 2012b. Grain size analysis and origin of the Chengdu clay from the Chengdu plain, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 32 (1) : 72 - 77 (in Chinese with English abstract).
- Ying L C, Liang B, Wang Q W, et al., 2013. Geochemical characteristics of Chengdu clay and their implications for provenance and weathering intensity[J]. Geology in China, 40 (5) : 1666 – 1674 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Q D, Guo Z J, Zhang Z C, et al., 2006. The late Cenozoic deformation of terraces on the north flank of Tianshan Mt. and the tectonic evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 80 (2) : 210 – 216 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J S, Li Y, Han Z J, 2003. Deformation responses to eastward escaping of the Qinghai-Tibet plateau and tectonics of the South- North seismic zones in China[J]. Earth Science Frontiers, (S1) : 168 – 175 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Zhang X J, Wu F D, et al., 2013. River terraces' development and significance of neotectonic movement on the southern margin of Taihang mountains since late Pleistocene[J]. Geoscience, 27 (4) : 791 – 798 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T Q, Lü H H, Zhao J X, et al., 2014. Fluvial terrace formation and tectonic uplift rate——A case study of late Quaternary fluvial process in the north piedmont of the Tianshan, northwestern China[J]. Quaternary Sciences, 34 (2) : 281 – 291 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Zhou R J, He Y L, et al., 2020. Characteristic of shallow structure and fault activity in western piedmont of Longquanshan[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 40 (9) : 942 – 946 (in Chinese with English abstract).
- Zhao C C, Wang Y B, Xu Q M, 2020. Climate changes on Chinese continent since 2.5 Ma: Evidence from fossil pollen records[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 40 (4) : 175 - 191 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z Z, Qiao Y S, Wang Y, et al., 2007. The magnetic stratigraphy and paleo-environment of red soil accumulation in Chengdu plain[J]. Science in China (Series D), 37 (3): 370 – 377 (in Chinese with English abstract).
- Zhong N, 2017. Earthquake and provenance analysis of the lacustrine sediments in the upper reaches of the Min River during the late Pleistocene[D]. Institute of Geology, China Earthquake Administration.
- Zhou X M, Liu B J, Jie D M, 2020. Climate change in northeast China of Holocene based on climate interval of palynological flora[J]. Jilin Normal University Journal (Natural Science Edition), 41 (2):104– 110 (in Chinese with English abstract).
- Zhu H B, Xiang F, Wang J Y, et al., 2019. The geochemical characteristics of sediments in the Three Gorges of Yangtze River and its adjacent areas: Implication for Quaternary paleoclimate[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and

Technology Edition), 46 (6): 746 – 753 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 常宏,安芷生,强小科,等,2005.河流阶地的形成及其对构造与 气候的意义[J].海洋地质动态,21(2):8-11+37-38.
- 陈之端, 1994. 桦木科植物的系统发育和地理分布(续)[J]. 植物 分类学报, 32(2): 101-153.
- 邓宾,刘树根,李智武,等,2008. 青藏高原东缘及四川盆地晚中 生代以来隆升作用对比研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),35(4):477-486.
- 董铭,苏怀,史正涛,等,2018.金沙江金江街段河流阶地年代及 对河谷水系演化历史的启示[J].地理学报,73(9):1728-1736.
- 冯兴雷,付修根,谭富文,等,2014.羌塘盆地孔孔茶卡地区石炭 系擦蒙组烃源岩沉积环境分析[J].现代地质,28(5):953-961.
- 郭子奇,李胜伟,王东辉,等,2019.浅析四川成都龙泉山城市森 林公园主要环境地质问题[J].沉积与特提斯地质,39(4):90-99.
- 胡春生.2014,河流阶地研究进展综述[J].地球环境学报,5(5):353-362
- 胡俊杰,马寅生,王宗秀,等,2017.地球化学记录揭示的柴达木 盆地北缘地区中—晚侏罗世古环境与古气候[J].古地理学报, 19(3):480-490.
- 胡小飞,潘保田,高红山,等,2013.祁连山东段全新世河流阶地 发育及其与气候变化的关系研究[J].第四纪研究,33(4):723-736.
- 雷传扬,刘兆鑫,王波,等,2021."互联网+"背景下地质大数据 共享服务研究[J].中国国土资源经济,34(11):22-27+89.
- 雷传扬,刘兆鑫,文辉,等,2022.基于多源数据和先验知识约束 的复杂地质体三维建模研究[J].地质论评,68(4):1393-1411.
- 雷传扬,王静,谢海洋,等,2020.地质大数据建库存量资料收集 与整理方法研究[J].国土资源科技管理,37(4):70-80.
- 李康,徐锡伟,谭锡斌, 2013. 龙泉山背斜的地壳缩短与隆升—— 来自河流阶地变形的证据[J]. 地震地质, 35(1):22-36.
- 梁斌,王全伟,朱兵,等,2013. 川西地区成都粘土的光释光年代 学[J]. 第四纪研究,33(4):823-828.
- 梁斌,朱兵,王全伟,等,2014.成都平原第四纪地质与环境[M]. 北京:科学出版社.
- 刘洪,黄瀚霄,欧阳渊,等,2020.基于地质建造的土壤地质调查 及应用前景分析——以大凉山区西昌市为例[J]. 沉积与特提斯 地质,40(1):91-105.
- 刘树根,罗志立,赵锡奎,等,2003.中国西部盆山系统的耦合关 系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为 例[J].地质学报,77(2):177-186.
- 刘兴诗, 1983.四川盆地的第四系[M].成都:四川科技出版社, 1-20.
- 柳存喜,黎莎,刘冠男, 2021.2020 年龙泉山断裂带 m,5.1 地震成因综合分析 [J]. 地震工程学报,43 (2):306-315+330.
- 罗丽萍,朱利东,向芳,等,2008.成都平原4000aBP 以来的孢粉 记录与环境变化[J].古生物学报,47(2):195-202.
- 潘保田, 刘小丰, 高红山, 等, 2007. 渭河上游陇西段河流阶地的 形成时代及其成因[J]. 自然科学进展, 17(8): 1063-1068.
- 秦锋,赵艳, 2013. 基于孢粉组合定量重建古气候的方法在中国的运用及思考[J]. 第四纪研究, 33(6):1054-1068.
- 石宁, 1996. 上新世—早更新世云杉属和冷杉属在华北地区的发展

及其气候指示意义[J]. 第四纪研究, 16(4): 319-328.

- 四川省地质调查院,2012.中华人民共和国区域地质调查报告1: 250000成都幅[R].
- 唐领余,毛礼米,吕新苗,等,2013.第四纪沉积物中重要蕨类孢子和微体藻类的古生态环境指示意义[J].科学通报,58(20):1969-1983.
- 王楠,钟静,李勇,等,2018.基于孢粉记录的中国西南地区全新 世气候变化研究进展[J].应用与环境生物学报,24(5):1015-1022.
- 王全伟,梁斌,朱兵,等,2013.川西龙泉山西坡更新世泥石流的 发现及其意义[J]. 沉积与特提斯地质,33(1):1-4.
- 王羽珂,陈浩,冯兴雷,等,2019.成都平原东郊台地中更新统合 江组沉积特征及工程地质意义[J].沉积与特提斯地质,39(3): 33-39.
- 魏全伟,谭利华,王随继, 2006. 河流阶地的形成、演变及环境效 应[J]. 地理科学进展, 25 (3):55-61.
- 吴环环,吴学文,李玥,等,2019.黄河共和—贵德段河流阶地对 青藏高原东北缘晚期隆升的指示[J].地质学报,93(12):3239-3248.
- 徐崇凯,刘池洋,郭佩,等,2018.潜江凹陷古近系潜江组盐间泥 岩地球化学特征及地质意义[J].沉积学报,36(3):617-629.
- 杨景春,李有利,2001.地貌学原理[M].北京:北京大学出版社,47-58.
- 姚铁锋, 李奎, 刘建, 等, 2005. 成都金沙遗址距今 3000 年的古气 候探讨[J]. 古地理学报, 7(4): 549-560.
- 应立朝,梁斌,王全伟,等,2012a.川西平原中更新世网纹红土主 量元素地球化学特征[J].高校地质学报,18(4):759-764.
- 应立朝,梁斌,王全伟,等,2012b.成都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,32(1):72-77.
- 应立朝,梁斌,王全伟,等,2013.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,40(5):1666-1674.
- 袁庆东,郭召杰,张志诚,等,2006.天山北缘河流阶地形成及构造变形定量分析[J].地质学报,80(2):210-216.
- 张家声,李燕,韩竹均, 2003. 青藏高原向东挤出的变形响应及南 北地震带构造组成[J]. 地学前缘, (S1): 168-175.
- 张蕾,张绪教,武法东,等,2013.太行山南缘晚更新世以来河流 阶地的发育及其新构造运动意义[J].现代地质,27(4):791-798.
- 张天琪, 吕红华, 赵俊香, 等, 2014. 河流阶地演化与构造抬升速 率——以天山北麓晚第四纪河流作用为例[J]. 第四纪研究, 34 (2):281-291.
- 张威,周荣军,何玉林,等,2020.龙泉山西麓山前断裂浅部构造 特征及活动性[J].大地测量与地球动力学,40(9):942-946.
- 赵辰辰,王永波,胥勤勉, 2020.2.5 Ma以来中国陆地孢粉记录反 映的古气候变化[J].海洋地质与第四纪地质,40(4):175-191.
- 赵志中,乔彦松,王燕,等,2007.成都平原红土堆积的磁性地层 学及古环境记录[J].中国科学(D辑:地球科学),37(3):370-377.
- 钟宁,2017.岷江上游晚更新世湖相沉积的古地震及物源分析[D]. 中国地震局地质研究所.
- 周晓梅,刘宝健,介冬梅,2020.基于孢粉植物类群气候区间的全 新世东北地区气候变化[J].吉林师范大学学报(自然科学版), 41 (2):104-110.
- 朱宏博,向芳,王金元,等,2019.三峡及邻区第四纪沉积物地球 化学特征及其对古气候的指示[J].成都理工大学学报(自然科 学版),46(6):746-753.