

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.06.06

引用格式: 刘洪,黄瀚霄,欧阳渊,等.新构造活动的生态地质环境效应讨论——以扬子西缘西昌市为例[J].中国地质调查,2021,8(6): 63–77. (Liu H,Huang H X,Ouyang Y,et al. Discussion on the eco-geo-environment effects of Neotectonic activities: A case study of Xichang City in western Yangtze block[J]. Geological Survey of China,2021,8(6): 63–77.)

新构造活动的生态地质环境效应讨论 ——以扬子西缘西昌市为例

刘洪^{1,2}, 黄瀚霄¹, 欧阳渊¹, 李文昌¹, 张景华¹, 张腾蛟¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 扬子西缘西昌市的环境变迁和地质灾害与新生代构造活动密切相关。该地区的新构造运动主要经历了5个阶段: ①青藏运动阶段(N_{1-2} , 11.6~3.6 Ma), 强烈向东挤压, 形成一系列的复式褶皱系, 断裂带以挤压走滑活动为主; ②伸展断陷阶段(N_2-Q_1 , 3.6~1.0 Ma), 断裂带以斜张走滑活动为主, 活动强度较弱, 形成安宁河谷等断陷盆地; ③元谋运动阶段(Q_{1-2} , 1.0~0.6 Ma), 进一步向东挤压, 地壳逆冲增厚, 早期褶皱山系加速隆升; ④构造松弛阶段(Q_2 , 0.6~0.126 Ma), 在安宁河谷等地区再次发生断陷作用; ⑤共和运动阶段(Q_{3-4} , 0.126 Ma 至今), 左旋走滑活动为主, 褶皱山系整体缓慢剥蚀和抬升。西昌市的新构造运动具有强烈性、差异性、振荡性、继承性和新生性等特征。新构造运动导致了该区现今地貌格局, 控制了山河湖泊的分布, 形成了独特的局部气候, 对土壤、植被等生态环境的影响十分显著。新构造运动也直接或间接地控制着本区地质环境的演化以及地质灾害和地震的发育。

关键词: 扬子西缘; 大凉山; 新构造; 生态地质调查; 环境地质

中图分类号: P66; P546; X14

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2021)06-0063-15

0 引言

认识自然环境的变化规律, 尤其是全球变化的过程及其机理, 从而维护好地球的生态环境, 是人类生存发展面临的重大课题^[1-7]。新构造指现今构造应力场及构造地貌格局形成以来(新近纪以来)所发生的构造运动^[1,8], 深入理解新构造与地貌演化、地表过程、水系演变、气候变化以及环境变迁等方面的内在动力联系, 有助于更深入认识地球表层系统的变化过程和预测其未来发展趋势。由于新构造运动和现今正在进行的板块运动、断裂活动、褶皱变形、地震与火山等地质过程, 以及伴生的地面沉降、崩塌滑坡灾害、海平面变化、河口变迁、

地热、地下水活动、热液成矿、油气运移与赋存等资源环境效应密切相关, 新构造的调查和研究成为生态地质调查工作的重要内容, 它对国民经济社会发展中的国土空间规划、环境保护、能源资源开发利用、重大基础设施规划建设、灾害防御和地震预测等众多领域具有重要意义。受印度—欧亚大陆碰撞和青藏高原隆升的影响, 地处青藏高原东缘和扬子西缘的西昌市, 新构造运动非常活跃, 形成了一系列近南北向的多期变形和多期活动的裂谷、断裂和褶皱, 自然灾害类型多, 强震频发, 是我国自然灾害威胁较为严重的地区之一。本文以大凉山区生态地质调查成果为依托, 在西昌市建造构造背景分析的基础上划分构造活动的阶段, 探讨西昌市新构造运动

收稿日期: 2021-08-30; 修订日期: 2021-11-02。

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目“特提斯构造域地质构造编图及区域对比研究(编号: 92055314)”, 云南省科学技术奖—杰出贡献奖项目(编号: 2017001), 四川省“天府万人计划”杰出科学家项目(编号: 川万人第023号), 中国地质调查局“生态地质调查工程(编号: 0703)”“大凉山区生态地质调查(编号: DD20190542)”“长江上游水土流失区生态地质调查与综合评价(编号: DD20221776)”“西南地区自然资源综合调查(编号: DD20211386)”和西南地质科技创新中心青藏高原国际大学学科计划联合资助。

第一作者简介: 刘洪(1987—), 男, 高级工程师, 从事矿床学、岩石学、生态地质研究。Email: liuh@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 欧阳渊(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事遥感地质、生态地质研究。Email: freebad@126.com。

的生态环境本底效应,为西昌市地质灾害治理、生态保护修复和国土空间用途管制提供科学依据。

1 区域新构造运动发展史概述

印度与亚洲大陆的初始受撞时间大致在晚白垩世末期到古近纪(E)初期^[9-13],新近纪(N)以来,青藏高原不断隆升,在青藏高原以东的扬子西缘,先后经历了青藏运动阶段(N_{1-2} , 11.6~3.6 Ma)、伸展断陷阶段(N_2-Q_1 , 3.6~1.0 Ma)、元谋运动阶段(Q_{1-2} , 1.0~0.6 Ma)、构造松弛阶段(Q_2 , 0.6~0.126 Ma)和共和运动阶段(Q_{3-4} , 0.126 Ma 至今)等 5 个新构造运动阶段^[14-19]。西昌市位于上扬子古陆西缘的康滇断隆带中北部(图 1)。①青藏运动阶段(N_{1-2} , 11.6~3.6 Ma)发生在中新世(N_1)中—晚期,并持续到上新世末期(N_2)^[18-22],表现为青藏高原整体快速隆起与高强度垂直运动,以及在高原周边褶皱变形和大规模的断裂活动,甚至伴有强烈的岩浆活动^[21];青藏板块持续向东挤压导致扬子地块沉积盖层向近 EW 方向进一步滑脱、褶皱^[18],在古近纪青藏高原隆升初期已经形成了成都平原东侧的龙泉山复式褶皱系、四川盆地南部的大小凉山复式褶皱系以及四川盆地东侧的川东—

重庆“朱罗山式”褶皱系等褶皱构造带,在这一阶段扬子西缘整体发生褶皱和隆升。②上新世(N_2)晚期至更新世早期(Q_1),青藏高原东部整体进入伸展断陷阶段(N_2-Q_1 , 3.6~1.0 Ma),并整体进入冰冻时期,沿其东缘发育一系列受正断层控制的 SN 向伸展断陷盆地,如安宁河谷盆地、元谋盆地、盐源盆地等^[18,23],并形成了以昔格达组(N_2Q_{1x})为代表的稳定河湖相沉积,扬子西缘的盆岭结构初步形成。③元谋运动(Q_{1-2} , 1.0~0.6 Ma)发生在早更新世(Q_1)和中更新世(Q_2)之交,该期运动使青藏高原东部地块进一步向东挤压,地壳逆冲增厚,早期褶皱山系褶皱作用加强并加速隆升,邛海、巧家等断陷盆地形成,扬子西缘的盆岭结构基本形成^[15,18]。④中更新世中晚期,区域上进入构造松弛阶段(Q_2 , 0.6~0.126 Ma),在安宁河谷盆地、元谋盆地、盐源盆地等地区再次发生断陷作用^[18]。⑤更新世晚期—全新世(Q_3-Q_4)的构造活动称为共和运动(Q_{3-4} , 0.126 Ma 至今)。川滇菱形地块发生绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动,形成川滇双弧形旋扭构造体系。在这个最新构造变动阶段,青藏高原东部下地壳通道流可能是重要的深部构造驱动因素^[18](图 1)。

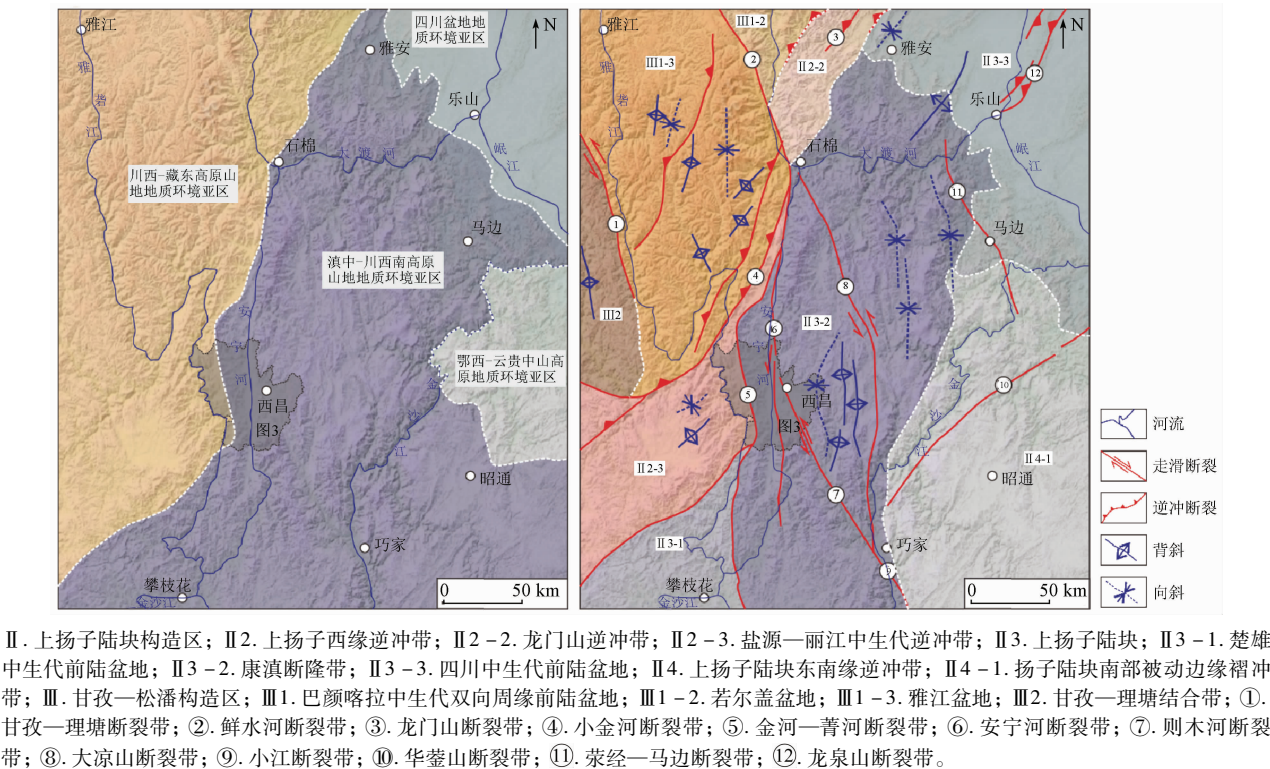


图 1 邛海地区地质环境分区位置(左)^[24]和大地构造位置(右)^[10,13]
Fig. 1 Geological environment zoning location (left)^[24] and geotectonic location (right)^[10,13] of Qionghai area

2 西昌市新构造活动概述

西昌市在地貌上兼具干热峡谷(如雅砻江河谷等)、高寒山区(如牦牛山—磨盘山区、螺髻山区等)、中高侵蚀山区(北山、东河、普诗等地)和中山宽谷盆地(如安宁河谷、邛海盆地等)等类型^[2,25-28]。该地区构造演化复杂,自古太古代以来,经历多期次的构造活动,逐步形成了底部的前震旦纪基底、西部的造山带(牦牛山—磨盘山区)、

中部的第四纪河谷盆地(安宁河谷、邛海盆地)以及东部的震旦纪—白垩纪沉积盖层(泸山—北山—普诗一带)(图 2)。在中生代末该地区经历了海陆变迁,在中生代末—新生代、新近纪以来,由于印度—欧亚大陆碰撞和青藏高原隆升,该地区经历了 5 个阶段的新构造运动,发生强烈的褶皱变形,形成现今复杂的一系列近 SN 走向断裂—复式褶皱构造系统^[2,29-32],主要包括则木河断裂带、安宁河断裂带和轿顶山—中梁子复式向斜和泸山向斜等(图 2,表 1)。

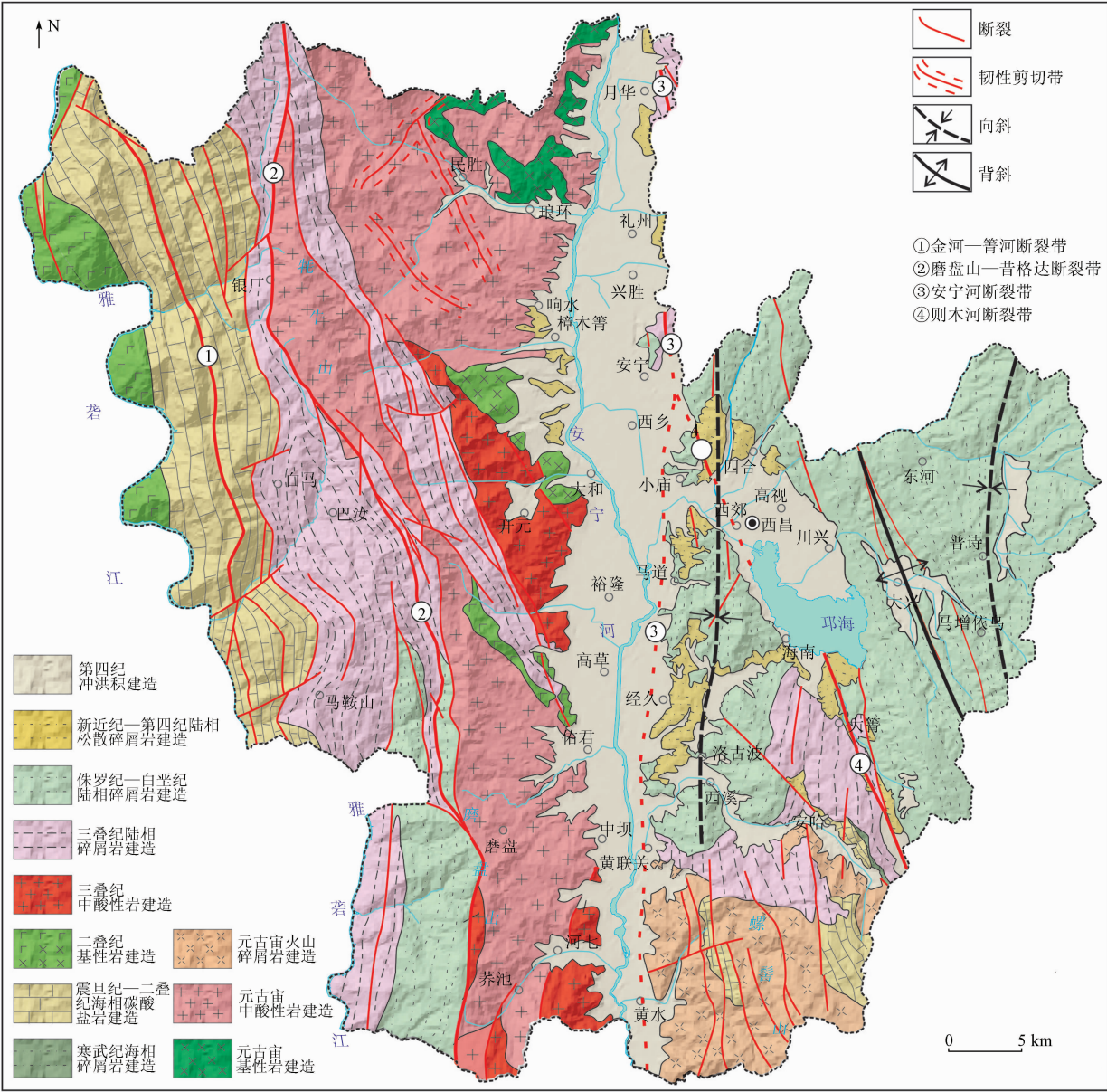


图 2 西昌市建造构造简图^[2]

Fig. 2 Geological formation - structure sketch of Xichang City^[2]

表 1 西昌市新构造运动简表^[14-18]

Tab. 1 Brief table of Neotectonics movement in Xichang City^[14-18]

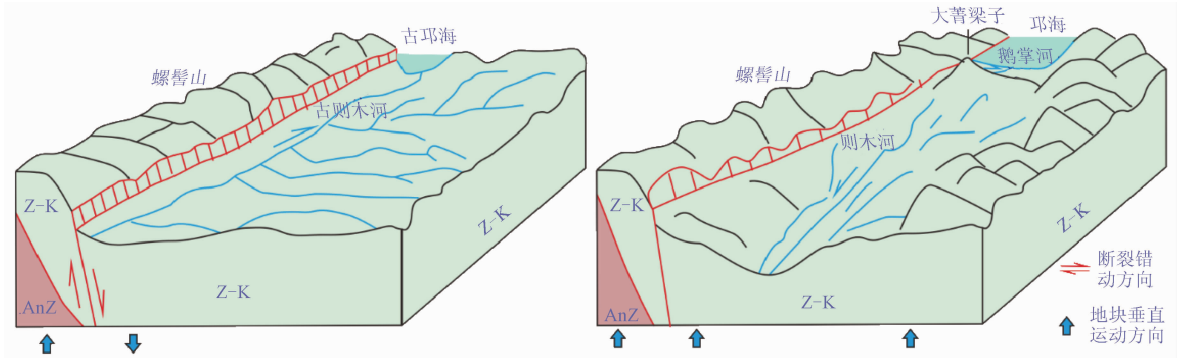
地质年代	新构造运动阶段	构造演化事件
全新世(Q ₄) 晚更新世(Q ₃)	共和运动阶段(0.126~0 Ma)	以左旋走滑活动为主,持续隆升,侵蚀加剧,大箐梁子强烈隆升,形成地震断裂地貌
中更新世(Q ₂)	构造松弛阶段(0.6~0.126 Ma)	构造松弛阶段。断裂的力学性质由压扭性质转变为现张扭性质。断裂走滑运动形成断陷或断错地貌,形成安宁河谷两堑夹一垒的构造格局
早更新世(Q ₁)	元谋运动阶段(1.0~0.6 Ma)	青藏高原东部地块进一步向东挤压,地壳逆冲增厚,早期褶皱山系褶皱作用加强并加速隆升,昔格达组湖相岩层褶皱变形。安宁河断裂带左旋挤压剪切运动,并有沉降。则木河逆冲断裂逐渐变为左旋走滑的断裂带
上新世(N ₂)	伸展断陷阶段(3.6~1.0 Ma)	安宁河谷地断陷盆地在伸展作用中形成。同时该地区气候上进入安宁冰期,以昔格达组为代表的稳定湖相沉积形成。安宁河断裂和则木河断裂以斜张走滑活动为主,活动强度较弱
中新世(N ₁)	青藏运动阶段(11.6~3.6 Ma)	青藏高原整体快速隆起并发生高强度垂直运动,青藏板块向东挤压导致西昌市的震旦纪—白垩纪沉积盖层滑脱形成南北向复式褶皱系。安宁河断裂和则木河断裂以挤压走滑活动为主

2.1 则木河断裂带

则木河断裂带为康滇断隆带中一条重要左旋水平走滑的活动断裂。断裂西北由西昌开始,向东南至云南巧家盆地与大凉山断裂相汇,由多条次级剪切断层呈左阶斜列组合而成,长约 150 km,宽约 7 km,走向 NNW,断面 SWW 倾斜,倾角 50°~70°(图 1,图 2)。断裂具有左行走滑、压扭特征,最初形成于二叠纪,并于晚白垩世定型,具有多期活动特点。该断裂作为“川滇菱形断块”东南边界的一部分,新构造活动极其强烈,历史上发生过多次强震。

早更新世(Q₁)中晚期—中更新世早期(Q₂)的元谋运动阶段,由于青藏高原由西向东侧向挤压增大和川滇块体向南东方向的滑移,使区域应力场由 NE 向转变为近 EW 向。则木河断裂由原来的逆冲断裂系逐渐转变为 1 条宽度为 1~4 km,由 5 条次

级剪切断层组成的左旋走滑断裂带^[33-34],错断了昔格达组(N₂Q_{1x})及早期河流阶地和山脊。到中更新世(Q₂)的构造松弛阶段,则木河活动断裂带内的各次级剪切断层的活动得到了进一步的加强和发展,形成 1 条羽列式排列的不连续左旋走滑活动断裂带^[33-34]。更新世晚期—全新世(Q₃—Q₄)的共和运动阶段,则木河活动断裂带的力学性质由原来的压扭性质转变为现今的张扭性质。其中在更新世晚期(Q₃),则木河断裂走滑运动形成断陷湖,并沉积一套以河湖相为特征的堆积物,导致邛海断块的垂直断陷以及大箐梁子向 SSE 方向的掀斜抬升,使得沿断裂带出现了一连串的断层陡坎或断层陡崖地貌(图 3)。而全新世(Q₄)以来,则木河活动断裂带仍以左旋走滑活动为主,发育水平断错地貌^[35-36]。



(a) Q₁₋₂ AnZ. 前震旦纪基底; Z—K. 侏罗纪—白垩纪沉积盖层; Q₁₋₂. 早—中更新世; Q₃₋₄. 晚更新世—全新世。

图 3 则木河断裂第四纪活动模式^[33]

Fig. 3 Quaternary activity model of Zemuhe fault^[33]

2.2 安宁河断裂带

安宁河断裂带沿安宁河谷发育,北起石棉,向

南过菩萨岗,顺西昌至德昌(图 1(b),图 2),其主要部分继续伸展到会理以南,全长超过 300 km,宽

10~20 km,呈近SN走向展布;断面以西倾为主,倾角约70°,长约170 km,具有明显的挤压和走滑特征。安宁河断裂带由3~6条断面陡倾的主干断裂并列组成(图4),其中以安宁河西侧断裂、大平山—白果湾断裂和哑口村断裂规模最大^[23-37]。安宁河断裂可能发育在中元古代以前,在古生代晚期

(二叠纪)控制了大规模峨眉玄武岩和花岗岩侵位,具有张性特征;在随后的中生代早期(三叠纪)受EW向的挤压,断裂两侧断块西升东降,在断块内部形成NW和NE向断裂;新生代,断裂两侧断块的差异升降形成安宁河断陷盆地和断块山脉,总体表现出挤压、走滑特征。

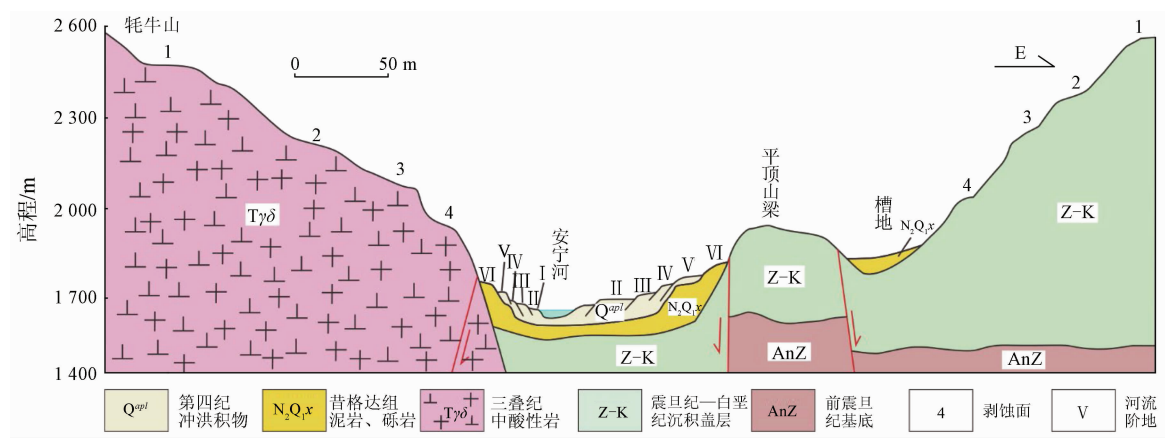


图4 西昌市巨龙一带构造地段综合剖面示意^[23]
Fig. 4 Comprehensive structural section in Julong area of Xichang City^[23]

中新世晚期—上新世早期,在上新世早期(N_2)的青藏运动阶段,安宁河断裂带以挤压走滑变形为特征,这一时期沿断裂带形成了一套白色断层泥,它被后期的昔格达组(N_2Q_1x)河湖相沉积覆盖。从区域推测,这期断裂剪切变形与鲜水河断裂带中新世中晚期的变形是同时的。在晚上新世—早更新世(N_2-Q_1)的伸展断陷阶段,安宁河断裂带以左旋走滑活动为主,活动强度较弱。沿断裂带局部地区发育同沉积生长断层。早更新世(Q_1)中晚期—中更新世早期(Q_2)的元谋运动阶段,安宁河断裂带以挤压走滑为主活动,具有北强南弱的特征。该期运动使昔格达组湖相岩层褶皱变形,且与中更新世红色砂砾层之间呈角度整合接触。安宁河断裂带平均主压应力方向为NEE—SWW向。根据磁性地层学研究结果,推断其发生的时间在1.1~0.8 Ma^[23-37]。中更新世(Q_2)的构造松弛阶段,安宁河断裂带发生断陷作用,这期断陷作用导致了安宁河河谷中、南段地堑—地垒构造和断陷盆地的形成,断陷盆地充填晚更新世河湖相砂泥岩。钻孔资料揭示,西昌一带的昔格达组之上发育一套厚140~200 m的河湖相沉积^[23-37](图4)。在晚更新世—全新世(Q_{3-4})的共和运动阶段,安宁河断裂以左旋走滑活动为主,区域构造挤压应力方向为NW—SEE向。构造变形主要集中在安宁河—则木河主

边界活动断裂带上,走滑破裂在地表形成显著的断坎地貌,使水系沿断裂带发生转折。现有资料显示,断裂带现今平均走滑速率为4.5 mm/a^[38]。此时,西昌市的安宁河断裂带由2条近平行的断裂组成,2条断裂中间为条状上升的山体,东侧断裂控制了断层槽谷并发育串珠状的山间小盆地,西侧断裂以西为安宁河谷地。

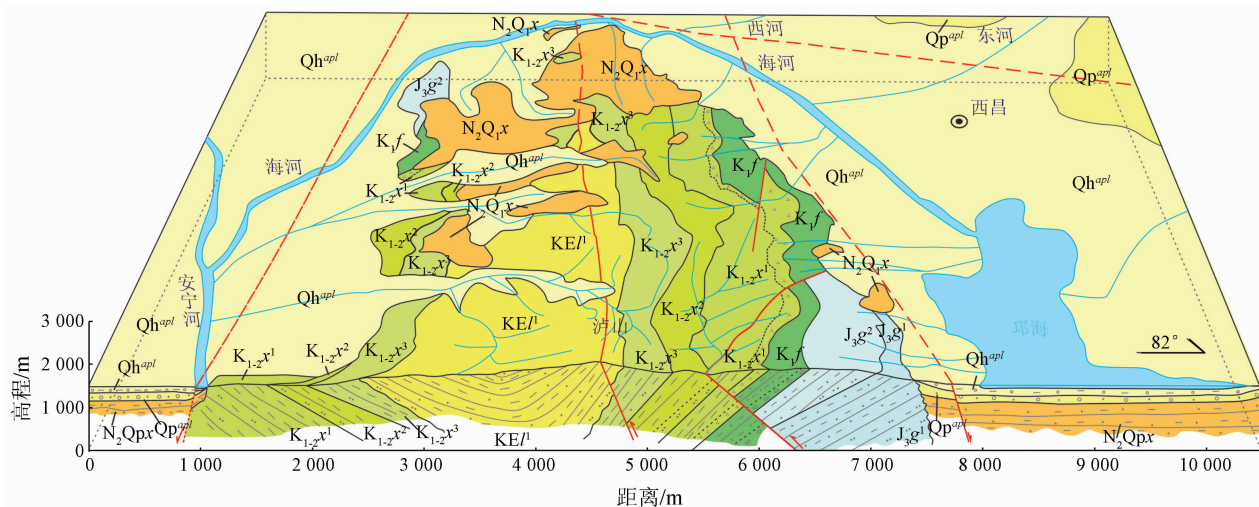
该断裂带自晚新生代以来经历了3次以挤压走滑为特征的变形期和2次以斜张走滑为特征的活动期。作为大凉山次级地块西侧活动边界,安宁河断裂具有强烈的地震活动性。

2.3 轿顶山—中梁子复式向斜

轿顶山—中梁子复式向斜(图2)北起汉源轿顶山,经过喜得、西昌,南至普格县中梁子,北宽南窄,全长70 km以上,由白垩系、侏罗系组成。南段褶皱形态对称,两翼岩层倾角15°~20°;中段有几个次一级的背斜和向斜,岩层倾角多在20°以下;北段西翼岩层倾角15°~20°,东翼20°~35°。在西昌市,该向斜核部由北向南依次出露雷打树组(KEl^1)、小坝组($K_{1-2}x$)、飞天山组(K_1f)、官沟组(J_3g)、牛滚凼组(J_2n)、新村组(J_2x)、益门组($J_{1-2}y$),两翼主要为白果湾组(T_3bg)。该褶皱轴线呈波状,轴面东倾,产状为72°~120°∠84°~89°,属直立对称开阔向斜。泸山向斜(图5)为轿顶山—中梁子

复式向斜西翼的组成部分,北起西昌四合北部,经过泸山,南至西昌西溪南部,由白垩系、侏罗系组成。该向斜核部由北向南依次出露雷打树组(KE^I),两翼为小坝组($K_{1-2}x$)、飞天山组(K_{1f})和官沟组(J_3g)。该褶皱轴线呈波状,枢纽总体呈波

状。该系列向斜形成于青藏运动阶段(N_{1-2} , 11.6 ~ 3.6 Ma)扬子地块沉积盖层滑脱、挤压和褶皱过程中,并在元谋运动阶段(Q_{1-2} , 1.0 ~ 0.6 Ma)和共和运动阶段(Q_{3-4} , 0.126 ~ 0 Ma)褶皱作用不断加强,同时不断剥蚀,形成现今的地貌。



Qh^{apl} . 全新统冲洪积物; Qp^{apl} . 更新统冲洪积物; N_2Q_1x . 上新统一更新统昔格达组浅灰色、深灰色黏土岩、粉砂岩; KE^I . 砖红色石英砂岩、粉砂岩夹泥岩; $K_{1-2}x^3$. 小坝组三段: 砖红色泥岩夹砂岩; $K_{1-2}x^2$. 小坝组二段: 砖红色、暗红色泥岩夹粉砂岩; $K_{1-2}x^1$. 小坝组一段: 砖红色泥岩夹粉砂岩,底部为砂岩; K_{1f} . 飞天山组: 紫红色泥岩夹粉砂岩,底部为砾岩; J_3g^2 . 官沟组二段: 紫红色、灰绿色泥岩夹砂岩; J_3g^1 . 官沟组一段: 砖红色泥岩夹砂岩; J_2n^2 . 紫红色粉砂岩、泥岩互层。

图5 泸山向斜地质简图

Fig. 5 Geological sketch map of Lushan syncline

3 新构造运动特点及变形行迹

3.1 新构造特点

西昌市新构造运动具构造性质转换、水平和垂直运动显著等基本特征^[33-39]。中新世(N_1)以前,安宁河、则木河等活动构造总体以逆冲推覆为主。在此动力学环境下,昔格达等盆地和螺髻山等山脉形成。早更新世,构造体制由逆冲逐渐转变为左旋走滑,山地走滑挤压隆升,盆地走滑断陷。全新世以来,构造体制由走滑伸展反转为走滑挤压收缩,断块山得以显著崛起,盆地抬升受切割而逐渐肢解。

新构造具有明显的水平和垂直差异运动。垂直差异运动不仅表现为攀西地区整体隆升,也表现在盆地与断块山地的垂直差异运动和盆地内部不同断块与山地不同断块之间的相对垂直差异运动。安宁河西侧和东侧的断裂控制了冕宁到德昌的安宁河谷,安宁河东侧断裂和娅口村断裂控制了西昌北边由大海子山、大平山、谢家山和癞子山组成

的窄条状“平顶山梁”(图4);主断裂带又被多条次一级横向断裂穿切,形成“纵向成条、条中有块”的构造格局^[33-39]。

构造水平运动也引人注目。运动方式受活动断裂带的左旋走滑运动控制,剪切变形带内的平行逆断裂在新的应力条件下形成平行而斜列的次级剪切断层。次级剪切断层的枢纽运动使断层两盘块体的运动以剖面旋转为主,两盘块体在滑动前方挤压隆起、滑动后方拉张下降,形成拉分盆地^[33]。

3.2 构造变形行迹

在青藏运动阶段(N_{1-2}),西昌市处在青藏高原向东的挤压作用背景下^[33-39],震旦纪到白垩纪的沉积盖层发生进一步的强烈褶皱、断裂和隆升(表1)。同时,运动中构造向东的挤出作用导致了青藏高原东缘牦牛山冲断构造带的发育,使西昌市西部牦牛山一带的中生代地层发生构造拆离,形成褶皱构造,高原东缘年轻山系快速隆升,主要河流快速下切,地貌边界带形成。根据河流下切深度,估计此阶段高原隆升幅度可能在2 000 ~ 2 500 m,深切谷

地与山顶面之间地形高差超过 3 000 m,螺髻山等山地可能达到了现今的海拔高度。西昌市的构造地貌格局基本形成^[23,37]。

在上新世(N_2)晚期到早更新世(Q_1)的伸展断陷阶段(N_2-Q_1),安宁河和则木河等断裂进入到构造相对稳定阶段,气候进入冰冻时期,在攀西深切河谷中冰川逐渐演化成昔格达湖盆,在湖盆中堆积了 300 m 厚的砂泥岩沉积(表 1)。

在元谋运动阶段(Q_{1-2}),走滑挤压-盆岭构造组合形成于挤压收缩转向走滑挤压的时期。该期构造变形在宏观上造就了西昌市盆岭构造地貌的基本轮廓。这次构造变动不仅导致了昔格达湖盆的消失和昔格达组(N_2Q_{1x})的变形,也使中侏罗世的泥质粉砂岩、砂岩逆冲于早更新世昔格达组(N_2Q_{1x})的粉砂层之上,而且使高原进一步抬升,从而缺失中更新世地层。西昌市进一步抬升,安宁河河谷发育了 6 级阶地(图 4)^[23,37]。则木河活动断裂带因走滑拉分形成邛海盆地等,形成盆山结构。盆地边缘较为低洼的地方有一些中更新世的物质堆积^[33]。

共和运动阶段(Q_{3-4}),走滑挤压变形构造组合的动力学环境主要为挤压走滑(表 1)。则木河、安宁河等活动断裂带的走滑运动更加突出。在邛海、大箐梁子和拖木沟等地沉积形成全新统邛海群(Q_{4qh})^[23,37],断裂则以强烈的抬升运动为主,致使邛海盆地相对于其西侧的泸山断块大约下陷 130 m。频繁的地震活动和连续的断错地貌反映了该期构造组合的特征,如大箐梁子强烈隆升,坡中谷、断层崖、地表破裂等地震断裂地貌形成(图 3,图 4)^[33]。大箐梁子的强烈隆起使得从南东向北西流的古则木河改道反向南流,其断头河即为鹅掌河^[33]。

4 新构造活动的生态环境效应讨论

新构造运动时刻影响着生态地质环境^[21-23]。新构造运动不断地改变西昌市地貌,引起了气候和水环境的变化,影响着生态环境的演化。隆起和断陷断块的差异性活动加剧了地貌演化与地表过程。断裂的掀斜运动改变了地表水系格局与地热运移等现象^[40]。

4.1 新构造活动与气候

青藏高原的隆升与亚洲季风、北非干旱化以及

新生代全球 3 次变冷等现象密切相关,而秦岭也是我国亚热带季风气候和温带季风气候的分界线。因此,造山运动能改变大气环流的面貌,引起不同时空尺度的气候改变。

4.1.1 新构造活动与古气候

西昌市位于扬子陆块西缘,经历多期次的构造活动,形成了前震旦纪基底(AnZ)及震旦纪-白垩纪($Z-K$)的沉积盖层。新生代以来,受印度-欧亚大陆碰撞及青藏高原隆升的影响,沉积盖层褶皱成山,本区形成了现在的地貌皱型。青藏运动(N_{1-2})和元谋运动(Q_{1-2})造成地壳间歇性和差异性升降,并发生局部翘起和陷落,奠定了现今盆岭地貌格局。共和运动(Q_{3-4})阶段,地壳升降运动仍在强烈进行,主要河流不断下切。

蒋实等^[41]通过安宁河谷青龙山昔格达组垂向剖面研究发现,昔格达组在该剖面的底部为青灰色和灰黄色岩层交错沉积,向上岩层逐渐过渡到以紫色泥岩和灰黄色粉砂质泥岩为主的沉积物,沉积物矿物类型及 Th/U 值逐渐减小等变化说明气候由上新世的干燥、寒冷逐渐向更新世温和、潮湿转变。安宁河 I ~ III 级阶地孢粉记录表明,0.010 3 ~ 0.004 1 Ma 形成的 I 级阶地沉积以针叶裸子植物为主的常绿针叶林,说明此时气候温和、较湿或轻湿; II 级阶地形成时期为 0.026 ~ 0.016 Ma,阶地顶部及上部沉积森林草原相关的植被,说明气候温和、或温凉轻爽或轻润;中部至下部沉积以松为主的常绿针叶林,说明气候温和、较湿或轻湿; III 级阶地形成时期为 0.046 ~ 0.030 Ma,孢粉记录揭示该阶段沉积以针叶裸子植物松为主组成的常绿针叶林,气候温和、较湿。总体来看,0.046 Ma 以来,安宁河谷气候总体为温和、较湿或轻湿,期间出现过 2 次以上比较明显的变化及波动^[42]。可见,西昌市古气候的变化与安宁河河谷新构造运动演化密切相关。

4.1.2 新构造活动与现代气候

西昌市属于亚热带干热峡谷气候,在全国气候区划中是南亚热带西段的一个孤岛^[43],气候总体具有热量丰富、光照充足,气温年较差小、日较差大,干、雨季分明,四季之分不明显,垂直气候差异明显等特点,小气候复杂多样,在河谷和半山暖润地区表现尤为突出。西昌的海拔与纬度相对攀枝花高一些,因而具有紫外线强、多风、温度相对较低、雨季降水量相对较少等特点。

该地区北接川西高山,南邻云南高原,东抵四

川盆地,西靠横断山系,南北纵向排列的岭谷起伏高差悬殊。冬半年时,本区受南支西风急流影响,云雨较少,形成干季;夏半年时,印度洋暖湿气流沿平直河谷急速北流,水汽被输送到北部地势增高之处形成地形降雨。而南北纵向排列的岭谷地形波导致水热条件在EW向的波动,形成明显的降水波状起伏分布曲线。由于地形和光热条件的差异,西昌市形成了完整的层次分明垂直气候带

谱^[43-45],多年平均降雨量、多年平均气温和土壤植被的分布均呈明显的垂向分带特征(图6,图7):在西昌中部的安宁河谷和邛海盆地形成高温多雨、光照丰富的干爽气候,在雅砻江峡谷形成干旱少雨、高温酷暑的干热峡谷的气候,而在螺髻山、牦牛山等高山区则形成高寒气候。西昌市独特的垂直气候分带与新构造活动形成的独特地貌密切相关。

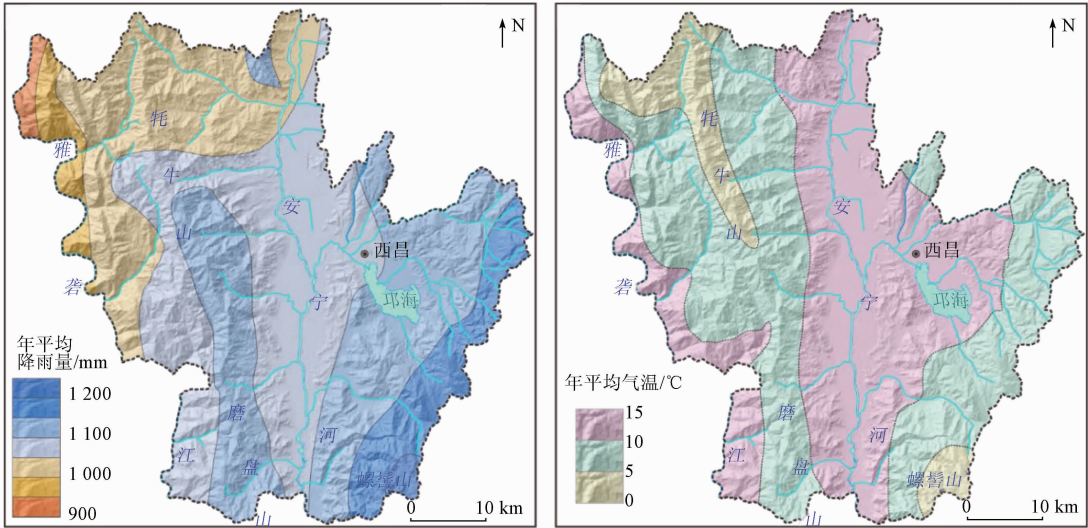


图6 西昌市多年平均降雨量(左)和多年平均气温(右)分布(数据据四川省气象局)
Fig. 6 Distribution maps of annual average rainfall (left) and annual average temperature (right) in Xichang city (datas from Sichuan Provincial Meteorological Service)

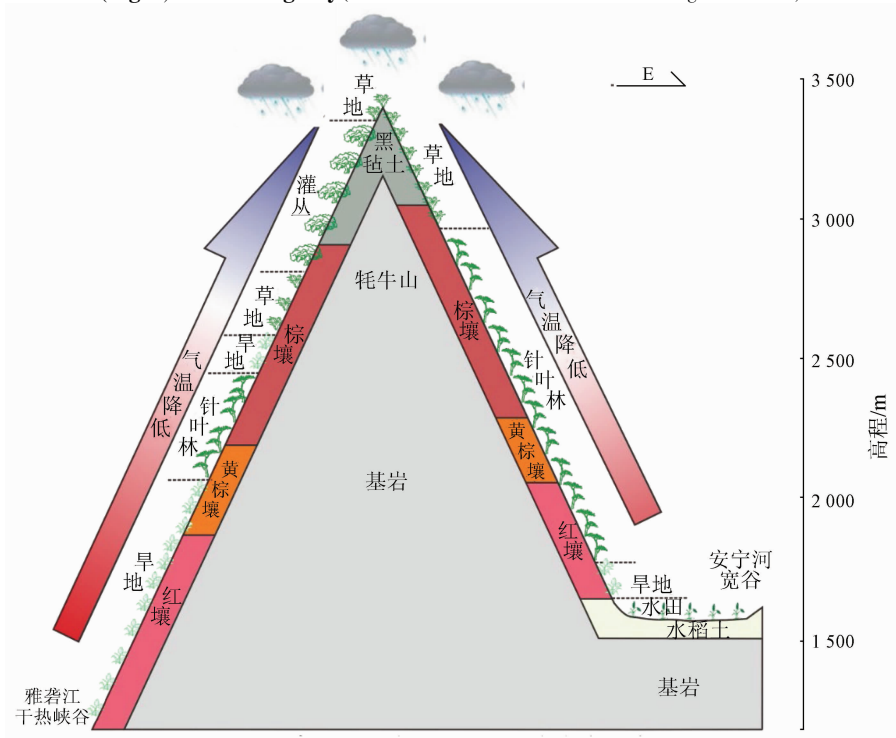


图7 牦牛山区土壤和植被的垂向分带示意
Fig.7 Vertical zoning of soil and vegetation in Maoniushan mountain area

4.2 新构造与水资源环境

新构造是水系发育的基础,水系是新构造的反映。新构造运动对地下水的形成、分布、运移和富集以及化学性质都具有重要的控制作用^[46]。

4.2.1 新构造与河流演化

西昌市主河道有雅砻江、安宁河、鹅掌河、则木河、东河、西河、海河、关坝河和小青河等(图 2)。

安宁河为 NS 走向,全长 337 km,水面平均宽 73 m,平均流量 217 m³/s,是雅砻江下游左岸最大支流。安宁河谷平原面积约 1 800 km²,是川西南最大的河谷平原。如今安宁河流量与所形成的河谷规模极不匹配。大渡河支流南桲河存在大量广谷平川的残遗景观以及野鸡洞古河道的延伸方向等现象表明,安宁河和大渡河在地质历史时期可能是同一条河流,昔格达组碎屑锆石的 U-Pb 研究结果支持这一论断^[20]。安宁河昔格达组沉积物的碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱与现代大渡河的碎屑锆石具有相似的 U-Pb 年龄分布,证实在昔格达组沉积期间大渡河与安宁河之间是相互连通的^[20],我们把这一时期相连通的河叫古大渡河。上新世(N₂),古大渡河由今南桲河河道经菩萨岗沿今安宁河谷向南流,最后汇入古雅砻江(图 7)。然而,安宁河

现代河沙的碎屑锆石年龄谱特征迥异于大渡河碎屑锆石,这说明大渡河与安宁河的连接在早-中更新世(Q₁₋₂)或之后被切断^[20]。可见,今安宁河河道和南桲河河道在早-中更新世(Q₁₋₂)或之前是古大渡河的河道(图 8),随后,青藏高原南东块体顺时针旋转,使鲜水河-小江断裂系反向弧突部位积累巨大势能,形成小相岭(菩萨岗)隆起^[20],该事件造成古大渡河下游总体偏移 11 km 和左旋 7 km。这种位移可能使古大渡河南北两段断开,导致河网重组^[47-48]:北面的古大渡河北段被迫向东切开大瓦山,流向四川盆地,形成今大渡河下游汇入岷江;古大渡河在菩萨岗以南的河道则成为断头河,继续南流,形成安宁河汇入雅砻江;而古大渡河的菩萨岗-石棉段掉头往北流,形成南桲河,并在石棉汇入今大渡河(图 8)。此外,在更新世晚期-全新世(Q₃-Q₄)的共和运动阶段,大箐梁子强烈隆起导致古则木河在大箐梁子以南从 NW 流向改道 SE 流向,而古则木河在大箐梁子以北的河道则继续 NW 流向^[33],形成现在鹅掌河汇入邛海(图 3,图 8)。可见,河流演化除受制于水文、气候等外营力条件外,又受新构造运动、地质构造、基岩等内营力作用的影响。

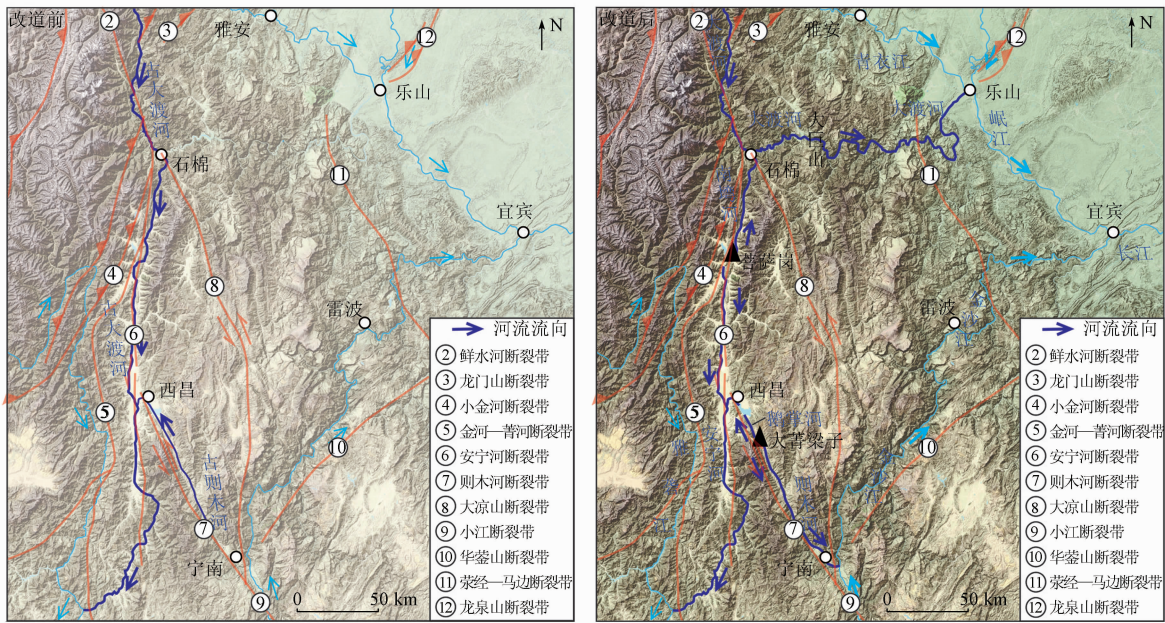


图 8 大渡河和则木河改道示意图^[20-33]

Fig.8 Sketch map of Dadu river's and Zemu river's diversion^[20-33]

河流及水系的平面格局明显反映了新构造运动特征。由于新构造活动断裂带内岩石破碎,未固结,易侵蚀,便于河流取道,因而河流总是沿断裂带

发育。雅砻江西昌段总体上受 NNW 向断裂控制,从北往南流,仅在马鞍山、银厂、白马等地河道出现较大的“U”型弯曲。安宁河受单一的 NS 向断裂控

制,呈平直状从北往南流。鹅掌河则沿则木河断裂呈 NWW 向展布。牦牛山、磨盘山、螺髻山受新构造运动的影响而相继隆起,构成重要的分水岭。牦牛山、磨盘山东侧和螺髻山西侧水系汇入到安宁河中,而牦牛山、磨盘山西侧水系流入雅砻江中。这些次级水系顺地形坡面呈树枝状和平行状展布,这种展布格局与近 EW 向的平行断裂和轴向 SN 的褶皱构造有关。邛海—太和是安宁河断裂和则木河断裂的交汇部位,属于下沉的凹陷地区,因而官坝河和鹅掌河流域的水系集中汇入邛海再流入安宁河。安宁河谷一般宽 3~5 km,但在太和段,由于构造的交汇,其宽度最大可达 11 km。安宁河断裂带的差异隆升致使安宁河东西两侧形成不对称水系:西岸水系呈树枝状和平行状且密度大,水短流急,而东岸水长流缓,密度小,呈平行状。此外,安宁河断裂的左旋水平运动常使东侧支流的河口向北错移或受牵引而朝北弯曲。

4.2.2 新构造与地下水

西昌市地下水资源丰富,主要类型为平原、盆地孔隙水、裂隙水和层间水^[49]。研究认为,活动断裂对地下水的运移、连通更具有重要意义,断裂规模越大和活动性越强,富水性也越强。总体来看,西昌市地下水分布格局及含量特点与安宁河等新构造位置、性质和强度相吻合。

安宁河、则木河断裂带出现各种泉,主要有尔乌泉、太和温泉群、川兴温泉等。尔乌泉域泉水 H-O 同位素研究显示,尔乌泉泉水补给来源于非现代大气降水,且泉水的补给来源较远,经历较长的径流时间。可见,活动断裂可构成大气降水、潜水和基岩水的通道,使其相互补给,还可使地壳深处的水沿断裂喷出,形成泉水或热水泉^[50]。安宁河构造不仅控制地下水资源在水平方向上的分布,还控制着地下水资源在垂直方向上的分布^[49]:安宁河谷的第一含水层分布在漫滩和一级阶地中的全新统河流冲洪积物中,厚 10~70 m,埋深 0.5~7 m,钻孔出水量 1 000~5 000 m³/d^[49];第二含水层由上更新统冰水堆积的含泥砂砾石层组成,富水性变化大,埋深 1~18 m,钻孔出水量 30~500 m³/d^[49];第三含水层为中下更新统冰碛、冰水堆积含泥砂砾石层,顶板埋深 60~170 m,含水层有效厚度 9~88 m,承压水位 4~32 m,钻孔出水量 100~1 000 m³/d^[49];第四含水层为上新统昔格达组,深埋在 200 m 以上,含水层厚度大于 300 m,钻孔出水

量 100~1 000 m³/d^[49]。

4.3 新构造与地质灾害

根据西昌市地质灾害详查报告,西昌市地质灾害发育,目前已发现 153 处地质灾害点,其中,安宁河流域的地质灾害点达 122 处,雅砻江东岸发育的地质灾害点有 31 个。这些灾害点和安宁河断裂、雅砻江断裂的展布方向基本一致(图 9),表明新构造运动与地质灾害存在成因联系^[51-53]。

地质构造控制了地貌的发育,地貌的形成成为地质灾害发育提供了地形条件^[54]。前已述及,安宁河、则木河等断裂活动造成的地壳差异化隆升,是西昌谷岭地貌形成的根本原因。雅砻江、安宁河等河流深切,与周边螺髻山、牦牛山等岸坡间重力势差增大,从而为崩滑流灾害的发生提供了基本运动条件。此外,断裂差异化抬升也会造成地质灾害点数量在断裂两盘不对称的分布。安宁河断裂差异化抬升,东侧高于西侧,因而地质灾害具有东强西弱的特征^[51-52]。新构造多期次构造运动的叠加使岩体完整性降低,易于风化,同时由于破碎带的影响,其风化深度更大,形成大量堆积的松散土体或岩体,为地质灾害的形成提供了物源条件^[54]。砂泥岩等软弱岩组节理裂隙发育,极易风化,经构造破碎,形成较厚的残坡积层,从而利于滑坡、崩塌及不稳定斜坡的形成。据统计,安宁河、则木河等活动断裂通过昔格达组、小坝组等砂砾泥岩地层时的地质灾害最为发育,地质灾害点分布面密度达到 13.5 处/100 km²。此外,断裂破碎带重叠区域地质灾害更易发生。则木河断裂、大箐断裂和核桃村断裂交错重叠,致使鹅掌河地区地质灾害呈簇状分布,灾害十分严重^[33,51-53]。构造裂隙及断层面常与卸荷裂隙组成向临空面的不利组合,为崩塌及岩质滑坡的形成提供条件^[54]。沿则木河断裂变形带向南至大箐梁子,可见多处沿断裂走向串珠状发育的滑坡,均反映出了构造面对灾害的制约。鹅掌河 4 号滑坡前缘由于则木河主断裂带通过,其滑坡区由东向西主要表现为构造碎裂岩带—强劈理化带—弱劈理化带的分带特征,变形强度由东向西递减;由于顺坡向的陡倾片理为地表水的入渗提供了良好的通道,加之斜坡前缘的河流切割,最终导致滑坡整体下滑^[51-53]。

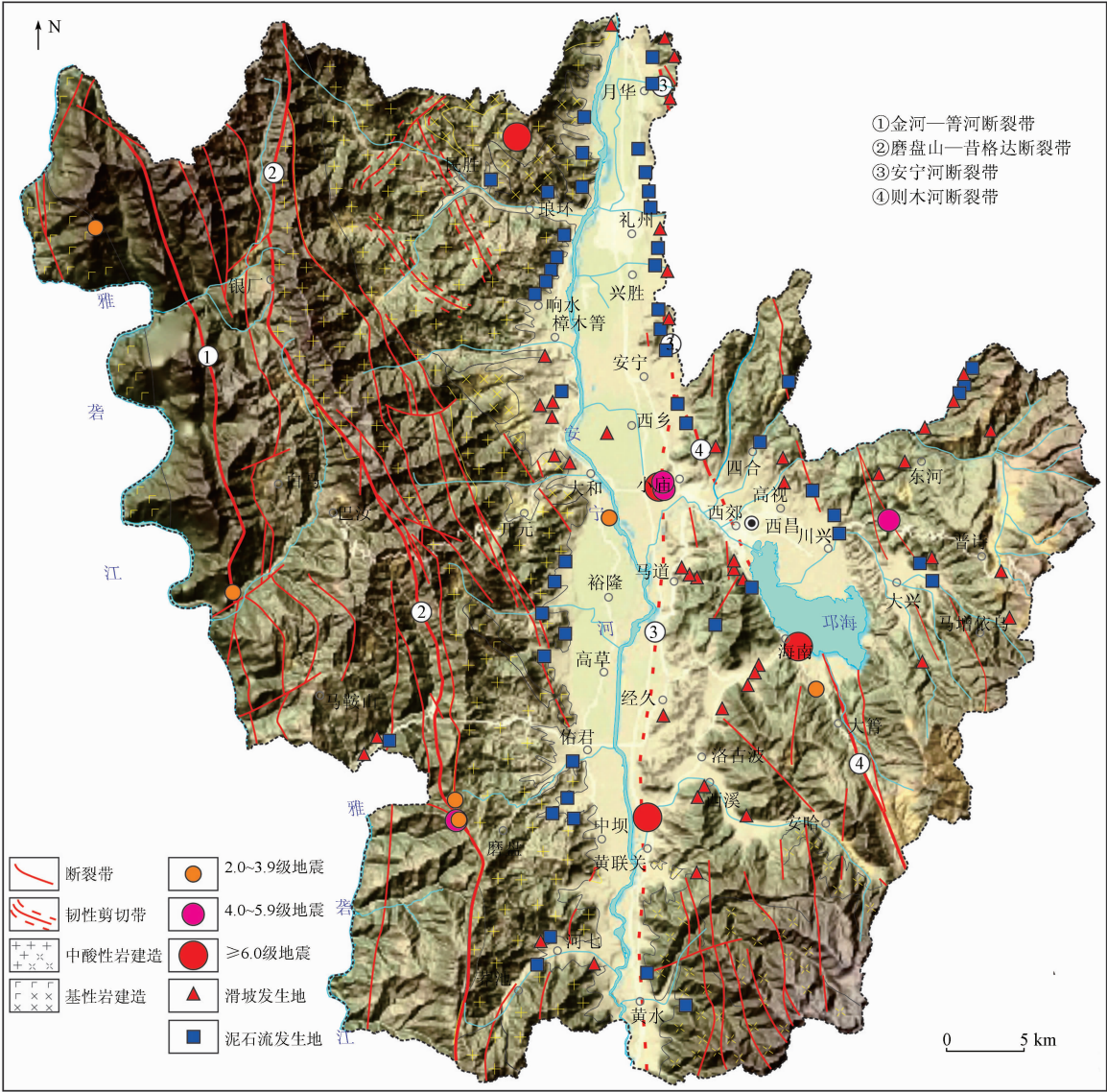
4.4 新构造与地震

西昌地处安宁河、则木河断裂带交汇部位,是地震高发区之一,历史上发生过多强烈地震。地

震震中分布与安宁河和则木河断裂带走向基本一致,反映断裂带与地震之间的关系极为密切^[35-36]。

西昌 1850 年 7.5 级地震的震源机制解节面错动方式与安宁河—则木河断裂的力学性质及活动方式一致,也支持这一看法。印亚板块持续碰撞,安宁河—则木河断裂带、鲜水河断裂带、小江断裂带和大凉山断裂带构成“川滇菱形块体”,安宁河—则木河断裂带就是“川滇菱形块体”东边界上的一条重要的活动断裂带。安宁河—则木河断裂带受 NW—NWW 向压应力作用影响,在新生代得以继承和发展,目前仍以左旋走滑兼挤压为主。“川滇菱

形地块”在现今 NW 向构造应力场作用下向 SE 方向滑动,相应的安宁河—则木河断裂带也会向 NW 发生反时针的水平错动^[33]。地震是断裂构造强烈活动的反映(图 9)。深部重力异常图显示,西昌市存在一 EW 向的隐伏构造。则木河断裂、安宁河断裂和隐伏的 NW 向断裂相交,形成地质上特殊的三角形构造部位。由于则木河断裂比安宁河断裂深度浅且生成晚,则木河断裂的反扭受安宁河断裂和隐伏断裂所阻,断裂构成的三角形地块成为应力集中区,当应力达到足够的强度,骤然释放,产生地震^[33,37]。



注: 地震数据据四川省地震局公开数据,地质灾害数据据西昌市地质灾害详查报告

图 9 西昌市主要地质灾害点和部分记录的历史地震分布简图

Fig. 9 Main geological disaster points and some recorded historical earthquakes in Xichang City

5 结论

(1) 西昌市新近纪以来的 5 阶段新构造运动造成了该地区普遍褶皱和断裂,表现出强烈性、差异性、振荡性、继承性和新生性等特征。

(2) 新构造运动导致了西昌市现今的地貌格局,控制了山河湖泊的分布,形成了独特的局部气候,也直接或间接地控制着本区地质灾害和地震的发育。

(3) 新构造运动直接或间接地控制着西昌市地质环境的演化,在地质灾害防治、生态保护修复和国土空间用途管制等工作中,需要充分考虑新构造运动这一要素,最大限度地达到人类活动和自然环境的协调。

致谢: 中国自然资源航空物探遥感中心聂洪峰正高级工程师、肖春蕾高级工程师和郭兆成高级工程师,中国地质调查局成都地质调查中心李建星教授级高级工程师、李富正高级工程师、陈敏华高级工程师和黄勇工程师,中国地质大学(北京)张振杰副教授,四川省地质矿产勘查开发局攀西地质队谢恩顺高级工程师、李雁龙高级工程师、肖启亮高级工程师、曾建高级工程师、文登奎工程师,成都理工大学赵银兵副教授、李榭博士研究生,以及华东冶金地质勘查局段声义助理工程师对本研究的开展和本文的撰写提供了大量帮助,土壤数据收集自凉山彝族自治州农村农业局,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

[1] 吴中海,张会平. 新构造与环境[J]. 地质力学学报,2021,27(2):157-158.
Wu Z H, Zhang H P. Neotectonics and environment[J]. J Geomechan, 2021, 27(2): 157-158.

[2] 刘洪,黄瀚霄,欧阳渊,等. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山地区西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质,2020,40(1):91-105.
Liu H, Huang H X, Ouyang Y, et al. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2020, 40(1): 91-105.

[3] 王京彬,卫晓锋,张会琼,等. 基于地质建造的生态地质调查方法——以河北省承德市国家生态文明示范区综合地质调查为例[J]. 中国地质,2020,47(6):1611-1624.
Wang J B, Wei X F, Zhang H Q, et al. The eco-geological survey based on geological Formation, exemplified by integrated geolog-

ical survey of National Ecological Civilization Demonstration area in Chengde City, Hebei Province[J]. Geol China, 2020, 47(6): 1611-1624.

[4] 卫晓锋,樊刘洋,孙紫坚,等. 河北承德柴白河流域地质建造对植物群落组成的影响[J]. 中国地质,2020,47(6):1869-1880.
Wei X F, Fan L Y, Sun Z J, et al. The influence of geological formation on plant community composition in Chaibai River Basin, Chengde, Hebei province[J]. Geol China, 2020, 47(6): 1869-1880.

[5] 殷志强,卫晓锋,刘文波,等. 承德自然资源综合地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查,2020,7(3):1-12.
Yin Z Q, Wei X F, Liu W B, et al. Progresses and main achievements of comprehensive geological survey project of natural resources in Chengde[J]. Geol Surv China, 2020, 7(3): 1-12.

[6] 何泽新,樊刘洋,卫晓锋,等. 基于地质建造和流域地貌的河北省承德蟠龙湖地区大比例尺地质遗迹调查[J]. 中国地质,2020,47(6):1881-1893.
He Z X, Fan L Y, Wei X F, et al. Large-scale survey of geological heritage in the Panlong Lake area of Chengde, Hebei province: based on geological formations and watershed landforms[J]. Geol China, 2020, 47(6): 1881-1893.

[7] 聂洪峰,肖春蕾,戴蒙,等. 生态地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查,2021,8(1):1-12.
Nie H F, Xiao C L, Dai M, et al. Progresses and main achievements of ecogeological survey project[J]. Geol Surv China, 2021, 8(1): 1-12.

[8] 何登发,李德生,王成善,等. 活动论构造古地理的研究现状、思路与方法[J]. 古地理学报,2020,22(1):1-28.
He D F, Li D S, Wang C S, et al. Status, thinking, and methodology of studying on the mobile tectono-palaeogeography[J]. J Palaeogeogr, 2020, 22(1): 1-28.

[9] 莫宣学,赵志丹,周肃,等. 印度-亚洲大陆碰撞的时限[J]. 地质通报,2007,26(10):1240-1244.
Mo X X, Zhao Z D, Zhou S, et al. On the timing of India-Asia continental collision[J]. Geol Bull China, 2007, 26(10): 1240-1244.

[10] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质,2009,36(1):1-28.
Pan G T, Xiao Q H, Lu S N, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geol China, 2009, 36(1): 1-28.

[11] Zhu Z M, Sun Y L. Direct Re-Os dating of chalcopryrite from the Lala IOCG deposit in the Kangdian Copper Belt, China[J]. Econ Geol, 2013, 108(4): 871-882.

[12] 李文昌,江小均. 扬子西缘陆内构造转换系统与构造岩浆成矿效应[J]. 地学前缘,2020,27(2):151-164.
Li W C, Jiang X J. The Cenozoic tectono-magmatism-mineralization effect of the intracontinental tectonic transformation system in the western margin of Yangtze Block[J]. Earth Sci Front, 2020, 27(2): 151-164.

[13] 张永双,刘筱怡,吴瑞安,等. 青藏高原东缘深切河谷区古滑

- 坡:判识、特征、时代与演化[J]. 地学前缘,2021,28(2):94-105.
- Zhang Y S, Liu X Y, Wu R A, et al. Cognization, characteristics, age and evolution of the ancient landslides along the deep - cut valleys on the eastern Tibetan Plateau, China [J]. Earth Sci Front, 2021, 28(2): 94 - 105.
- [14] 张岳桥, 杨安, 孟晖, 等. 四川攀西地区晚新生代构造变形历史与隆升过程初步研究[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 23 - 33.
- Zhang Y Q, Yang N, Meng H, et al. Late Cenozoic tectonic deformation history and uplift process of the Panxi region, western Sichuan[J]. Geol China, 2004, 31(1): 23 - 33.
- [15] 冯希杰. 再探中国大陆第四纪地壳运动时程[J]. 地震地质, 1999, 21(1): 83 - 87.
- Feng X J. Another study on the time and process of Quaternary crustal movement of the Chinese continent [J]. Seismol Geol, 1999, 21(1): 83 - 87.
- [16] 葛肖虹, 王敏沛, 刘俊来. 重新厘定“四川运动”与青藏高原初始隆升的时代、背景: 黄陵背斜构造形成的启示[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 206 - 217.
- Ge X H, Wang M P, Liu J L. Redefining the Sichuan Movement and the age and background of Qingzang Plateau's first uplift: The implication of Huangling anticline and its enlightenment[J]. Earth Sci Front, 2010, 17(4): 206 - 217.
- [17] Li J J, Zhou S Z, Zhao Z J, et al. The Qingzang Movement: The major uplift of the Qinghai - Tibetan Plateau[J]. Sci China Earth Sci, 2015, 58(11): 2113 - 2122.
- [18] 张岳桥, 李海龙. 青藏高原东部晚新生代重大构造事件与挤出造山构造体系[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 1829 - 1852.
- Zhang Y Q, Li H L. Late Cenozoic tectonic events in east Tibetan Plateau and extrusion - related orogenic system[J]. Geol China, 2016, 43(6): 1829 - 1852.
- [19] 卞爽, 于志泉, 龚俊峰, 等. 青藏高原近南北向裂谷的时空分布特征及动力学机制[J]. 地质力学学报, 2021, 27(2): 178 - 194.
- Bian S, Yu Z Q, Gong J F, et al. Spatiotemporal distribution and geodynamic mechanism of the nearly NS - trending rifts in the Tibetan Plateau[J]. J Geomechan, 2021, 27(2): 178 - 194.
- [20] Ahmed S. 青藏高原东缘的隆升及其对河流演化和地貌形成的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 1 - 115.
- Ahmed S. Uplift of the Eastern Margin of Tibetan Plateau and Its Impact on River Network Pattern and Landscape Formation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 1 - 115.
- [21] 张森琦, 李永国, 尚小刚, 等. 黄河源区新构造运动对生态环境恶化的影响[J]. 地质通报, 2006, 25(1): 213 - 220.
- Zhang S Q, Li Y G, Shang X G, et al. Effects of neotectonic movement in the source area of the Yellow River, China on eco - environmental deterioration[J]. Geol Bull China, 2006, 25(1): 213 - 220.
- [22] 冯嘉辉, 陈立春, 王虎, 等. 大凉山断裂带北段石棉断裂的大地震[J]. 地震地质, 2021, 43(1): 53 - 71.
- Feng J H, Chen L C, Wang H, et al. Paleoseismologic study on the Shimian fault in the northern section of the Daliangshan fault zone[J]. Seismol Geol, 2021, 43(1): 53 - 71.
- [23] 徐杰, 李祥根, 魏顺民. 安宁河断裂带新构造运动的初步研究[J]. 地质科学, 1978, 13(3): 235 - 246.
- Xu J, Li X G, Guo S M. A preliminary study of Neotectonic movement along the Anninghe faulting belt [J]. Chin J Geol, 1978, 13(3): 235 - 246.
- [24] 高萌萌, 李瑞敏, 徐慧珍, 等. 基于 MapGIS 建立的中国地质环境图系数据库[J]. 中国地质, 2019, 46(S2): 130 - 140.
- Gao M M, Li R M, Xu H Z, et al. Database of geological environmental map system of China based on MapGIS [J]. Geology in China, 2019, 46(S2): 130 - 140.
- [25] 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 等. 中高山区土壤成土母质理化特征及主控因素初探——以西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(1): 106 - 114.
- Zhang T J, Liu H, Ouyang Y, et al. A preliminary discussion on the physical and chemical characteristics and main controlling factors of soil and parent material in the Middle and high mountain area——take Xichang as an example[J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2020, 40(1): 106 - 114.
- [26] 张景华, 欧阳渊, 陈远智, 等. 基于无人机遥感的四川省昭觉县农业产业园土地适宜性评价[J/OL]. 中国地质. [2020 - 08 - 06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200806.1013.002.html>.
- Zhang J H, Ouyang Y, Chen Y Z, et al. Land suitability evaluation of agricultural industrial park based on unmanned aerial vehicle's remote sensing in Zhaojue County of Sichuan province [J/OL]. Geol China. [2020 - 08 - 06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200806.1013.002.html>.
- [27] 李槌, 刘小念, 刘洪, 等. 西昌普诗地区中 - 下白垩统小坝组岩石 - 紫色土剖面稀土元素地球化学特征分析[J/OL]. 沉积与特提斯地质. [2021 - 06 - 08]. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.06002>.
- Li T, Liu X N, Liu H, et al. Geochemistry of rare earth elements of purple soil layers in the Middle - Lower Cretaceous Xiaoba Formation, Pushi area, Xichang [J/OL]. Sediment Geol Tethyan Geol. [2021 - 06 - 08]. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.06002>.
- [28] 张慈, 赵银兵, 欧阳渊, 等. 青藏高原东缘地质环境对植被覆盖度的影响研究: 以冕宁县为例[J/OL]. 沉积与特提斯地质. [2021 - 03 - 15]. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010>.
- Zhang C, Zhao Y B, Ouyang Y, et al. Influence of geological environment on vegetation coverage in the eastern edge of Qinghai - Tibet Plateau: a case study of Mianning [J/OL]. Sediment Geol Tethyan Geol. [2021 - 03 - 15]. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010>.
- [29] 从柏林, 赵大升, 张雯华, 等. 西昌地区岩浆活动特征及其与构造地质的关系[J]. 地质科学, 1973, 8(3): 175 - 195.
- Cong B L, Zhao D S, Zhang W H, et al. Characteristics of magmatic activity in the Xichang area and its bearing on the tectonic geo-

- logical development[J]. Chin J Geol, 1973, 8(3): 175 - 195.
- [30] 尹福光, 王冬兵, 王保弟, 等. 西南三江造山带地层区划[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(4): 1 - 8.
- Yin F G, Wang D B, Wang B D, et al. Stratigraphic classification in the Nujiang - Lancangjiang - Jinshajiang orogenic zone in southwestern China[J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2017, 37(4): 1 - 8.
- [31] 任飞, 潘桂棠, 尹福光, 等. 西南三江地区洋板块地层特征及构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(4): 9 - 16.
- Ren F, Pan G T, Yin F G, et al. Oceanic plate stratigraphy and tectonic evolution of the Nujiang - Lancangjiang - Jinshajiang area in southwestern China[J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2017, 37(4): 9 - 16.
- [32] 高慧, 吴文贤, 张建龙. 西南山区遥感蚀变异常信息提取综合研究——以云南酒房地区为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(4): 107 - 112.
- Gao H, Wu W X, Zhang J L. Remote sensing information extraction of alteration anomalies in the Jiufang region, Yunnan, southwestern China: A case study[J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2017, 37(4): 107 - 112.
- [33] 闻学泽. 则木河断裂的第四纪构造活动模式[J]. 地震研究, 1983, 6(1): 41 - 50.
- Wen X Z. Model of active tectonic of the Quaternary Period of Zemu River Fault[J]. J Seismol Res, 1983, 6(1): 41 - 50.
- [34] 谢吉尊, 冯文凯, 杨少帅, 等. 则木河断裂带活动特征和地质灾害对地貌演化的影响——以鹅掌河流域为例[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 772 - 783.
- Xie J Z, Feng W K, Yang S S, et al. Active characteristics and Geohazard of Zemuhe fault and their influence on morphological evolution in Ezhang River[J]. J Eng Geol, 2017, 25(3): 772 - 783.
- [35] 黄祖智, 唐荣昌. 则木河断裂与地震[J]. 地震研究, 1983, 6(2): 167 - 177.
- Huang Z Z, Tang R C. The Zemuhe fault and earthquakes[J]. J Seismol Res, 1983, 6(2): 167 - 177.
- [36] 刘辛中, 刘志广, 朱爽, 等. 安宁河—则木河断裂带断层活动特征及其与地震活动的关系[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(2): 253 - 261.
- Liu X Z, Liu Z G, Zhu S, et al. Research on seismic activity feature of Anninghe - Zemuhe fault[J]. Technol Earthq Disaster Prev, 2015, 10(2): 253 - 261.
- [37] 何宏林, 池田安隆. 安宁河断裂带晚第四纪运动特征及模式的讨论[J]. 地震学报, 2007, 29(5): 537 - 548.
- He H L, Ikeda Y. Faulting on the Anninghe fault zone, Southwest China in Late Quaternary and its movement model[J]. Acta Seismol Sin, 2007, 29(5): 537 - 548.
- [38] 冉勇康, 程建武, 宫会玲, 等. 安宁河断裂紫马跨一带晚第四纪地貌变形与断层位移速率[J]. 地震地质, 2008, 30(1): 86 - 98.
- Ran Y K, Cheng J W, Gong H L, et al. Late Quaternary geomorphic deformation and displacement rates of the Anninghe fault around Zimakua[J]. Seismol Geol, 2008, 30(1): 86 - 98.
- [39] 程建武, 郭桂红, 岳志军. 安宁河断裂带晚第四纪活动的基本特征及强震危险性分析[J]. 地震研究, 2010, 33(3): 265 - 272.
- Cheng J W, Guo G H, Yue Z J. Basic characteristics and earthquake risk analysis of the Anning River fault zone in the West of Sichuan province[J]. J Seismol Res, 2010, 33(3): 265 - 272.
- [40] 范柱国, 李峰, 谈树成, 等. 丽江—大理地区新构造运动特征及环境效应[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(1): 6 - 9.
- Fan Z G, Li F, Tan S C, et al. The characteristics and environmental effects of Neotectonic Movement in Lijiang - Dali region[J]. Geotecton Metall, 2002, 26(1): 6 - 9.
- [41] 蒋实. 攀枝花青龙山昔格达剖面地球化学特征及其古气候环境演变[D]. 成都: 成都理工大学, 2010: 1 - 100.
- Jiang S. Geochemical Characteristics and Paleoclimate Evolution of Qinglongshan Xigeda Formation in Panzhihua[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010: 1 - 100.
- [42] 程建武, 宫会玲, 郭雪莲. 川西安宁河 I ~ III 级阶地孢粉记录反映晚更新世以来古气候变化[J]. 西北地震学报, 2010, 32(4): 349 - 356.
- Cheng J W, Gong H L, Guo X L. Pollen records reflecting paleoclimate change since Late - Pleistocene in the terraces I ~ III of Anning river in western Sichuan province[J]. Northwestern Seismol J, 2010, 32(4): 349 - 356.
- [43] 张建平, 王道杰, 王玉宽, 等. 元谋干热河谷区生态环境变迁探讨[J]. 地理科学, 2000, 20(2): 148 - 152.
- Zhang J P, Wang D J, Wang Y K, et al. Discusses on Eco - environment changes in dry - hot valley of Yuanmou[J]. Sci Geograph Sin, 2000, 20(2): 148 - 152.
- [44] 明庆忠, 潘保田, 苏怀, 等. 山区河谷 - 水系演化及环境效应研究——以金沙江为例[J]. 云南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 33(2): 1 - 10.
- Ming Q Z, Pan B T, Su H, et al. Study on the valley & drainage evolution and its effects on environment: A case study of Jinsha River[J]. J Yunan Normal Univ, 2013, 33(2): 1 - 10.
- [45] 魏晓玥, 黄晓荣, 潘萃, 等. 金沙江上游近 60 年径流变化对气候的响应[J]. 水力发电, 2019, 45(8): 12 - 17.
- Wei X Y, Huang X R, Pan L, et al. Response of runoff change to climate in the upper reaches of Jinsha River in past 60 years[J]. Water Power, 2019, 45(8): 12 - 17.
- [46] 金德生, 乔云峰, 杨丽虎, 等. 新构造运动对冲积河流影响研究的回顾与展望[J]. 地理研究, 2015, 34(3): 437 - 454.
- Jin D S, Qiao Y F, Yang L H, et al. A research of influence of neotectonic movement on alluvial rivers: Review and prospect[J]. Geograph Res, 2015, 34(3): 437 - 454.
- [47] 安艳芬, 韩竹军, 万景林. 川南马边地区新生代抬升过程的裂变迹年代学研究[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2008, 38(5): 555 - 563.
- An Y F, Han Z J, Wan J L. Fission track dating of the Cenozoic uplift in Mabian area, southern Sichuan Province, China[J]. Sci China Ser D: Earth Sci, 2008, 51(9): 1238 - 1247.

- [48] 何宏林,池田安隆,何玉林,等. 新生的大凉山断裂带—鲜水河—小江断裂系中段的裁弯取直[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2008,38(5):564–574.
He H L, Ikeda Y, He Y L, et al. Newly – generated Daliangshan fault zone – shortcutting on the central section of Xianshuihe – Xiaojiang fault system[J]. Sci China Ser D: Earth Sci, 2008, 51(9):1248–1258.
- [49] 郑义加,孙丽娟,李敏刚. 安宁河河谷平原地下水资源分布的初步分析[J]. 中国农资,2014(4):184–186.
Zheng Y J, Sun L J, Li M G. Preliminary analysis of groundwater resources distribution in Anninghe valley plain[J]. China agri – production news, 2014(4):184–186.
- [50] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等. 西昌市尔乌泉域泉水水文地球化学特征及成因[J]. 水文地质工程地质,2017,44(4):15–22.
Yuan J F, Deng G S, Xu F, et al. Hydrogeochemical characteristics and genesis of springs in the catchment area of the Erwu spring of Xichang[J]. Hydrogeol Eng Geol, 2017, 44(4):15–22.
- [51] 张永双,郭长宝,姚鑫,等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报,2016,37(3):277–286.
Zhang Y S, Guo C B, Yao X, et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geosci Sin, 2016, 37(3):277–286.
- [52] 曹楠,申太丽,罗水莲,等. 西昌市地质灾害发育分布规律及防灾建议[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):127–132.
Cao N, Shen T L, Luo S L, et al. Development and distribution patterns of geologic hazards in Xichang City and prevention suggestion[J]. Chin J Geol Hazard Control, 2010, 21(1):127–132.
- [53] 铁永波,徐如阁,刘洪,等. 西昌市泸山地区典型火后泥石流特征与成因机制研究——以响水沟左岸3#支沟为例[J]. 中国地质调查,2020,7(3):82–88.
Tie Y B, Xu R G, Liu H, et al. Study on the characteristics and Formation mechanism of the typical post – fire debris flow in Lushan area of Xichang City: A case study of 3# branch on the left bank of Xiangshuigou[J]. Geol Surv China, 2020, 7(3):82–88.
- [54] 王帅,王深法,俞建强. 构造活动与地质灾害的相关性——浙西南山地滑坡、崩塌、泥石流的分布规律[J]. 山地学报,2002,20(1):47–52.
Wang S, Wang S F, Yu J Q. Study on the relationships between Neotectonism and Geological Hazards[J]. J Mt Sci, 2002, 20(1):47–52.

Discussion on the eco – geo – environment effects of Neotectonic activities: A case study of Xichang City in western Yangtze block

LIU Hong^{1,2}, HUANG Hanxiao¹, OUYANG Yuan¹, LI Wenchang¹, ZHANG Jinghua¹, ZHANG Tengjiao¹

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Sichuan Chengdu 610081, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China)

Abstract: The environmental changes and geological disasters in Xichang City of western Yangtze block are closely related to the Cenozoic tectonic activities. The Cenozoic tectonic movement in this area is divided into five stages. ① During the Qinghai – Tibet movement stage (N_{1-2} , 11.6 ~ 1.0 Ma), the strata were strongly squeezed to the east to form a series of compound fold systems, and the fault zone was dominated by compressional strike – slip activity. ② During the extensional fault depression stage (N_2 — Q_1 , 3.6 ~ 1.0 Ma), the fault zone was dominated by oblique strike – slip activity and the activity intensity was weak, forming faulted basins such as Anning river Valley. ③ During the Yuanmou movement stage (Q_{1-2} , 1.0 ~ 0.6 Ma), the strata were further squeezed eastward to thicken the crust by thrusting, and the early fold mountain system accelerated uplift. ④ During the tectonic relaxation stage (Q_2 , 0.6 ~ 0.126 Ma), the fault subsidence occurred again in the Anning river valley and other areas. ⑤ During the Republican movement stage (Q_{3-4} , 0.126 Ma to present), the left – lateral strike – slip activity was dominant, and the fold mountain system was slowly denudated and uplifted as a whole. The Neotectonic movement in Xichang City has characteristics of strong intensity, difference, oscillation, inheritance and neogenesis. And it led to the present geomorphological pattern in this area and controlled the distribution of mountains, rivers and lakes, which formed a unique local climate and had great impacts on soil, vegetation and other ecological environment. Besides, the Neotectonic movement also directly or indirectly controls the evolution of geological environment, and the development of geological disasters and earthquakes in this area.

Keywords: western Yangtze block; Daliangshan; Neotectonics activities; ecogeological survey; environmental geology (责任编辑: 沈效群)