

南水北调西线一期工程区地壳活动有关问题

陈智梁, 刘宇平, 孙志明, 赵济湘, 唐文清, 张清志, 潘忠习

(国土资源部成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘 要: 南水北调西线一期工程位于川青地块及其南缘鲜水河断裂带, 地质条件复杂。GPS 监测表明, 川青地块及其邻区的地壳运动水平速度, 具有自西向东递变下降的顺时针涡旋转动的总趋势; 鲜水河断裂带有较高的移动速率; 工程区东、西两侧的测站之间有一定的水平速度矢量差。工程区为高地应力区, 并可产生局部高应变能带。鲜水河断裂带为我国西部的强震带; 川青地块内部已发生 5 级以上地震 25 次。与中强震有关的断裂带通过工程区, 并表现出工程区地壳活动性。地壳活动性将对南水北调西线一期工程建设产生重大影响。

关键词: 南水北调; 西线一期工程; 地壳活动; GPS 监测; 活动断裂; 地震

中图分类号: P642. 27

文献标识码: A

南水北调西线工程区位于青藏高原东北部, 平均高程海拔 3 500~ 4 500 m。主体工程将穿越巴颜喀拉山分水岭, 贯通长江、黄河两大水系。南水北调西线工程所规划的一期工程, 为西起甘孜东北雅

砻江支流达曲, 连接大渡河, 东至阿坝附近黄河支流贾曲的自流线路。一期工程主要由 6 座水坝和 7 条隧道, 即“六坝七洞”组成 (图 1)。坝高 150 ~ 25 m, 4 座坝高 120 m 以上。洞长合计约 253

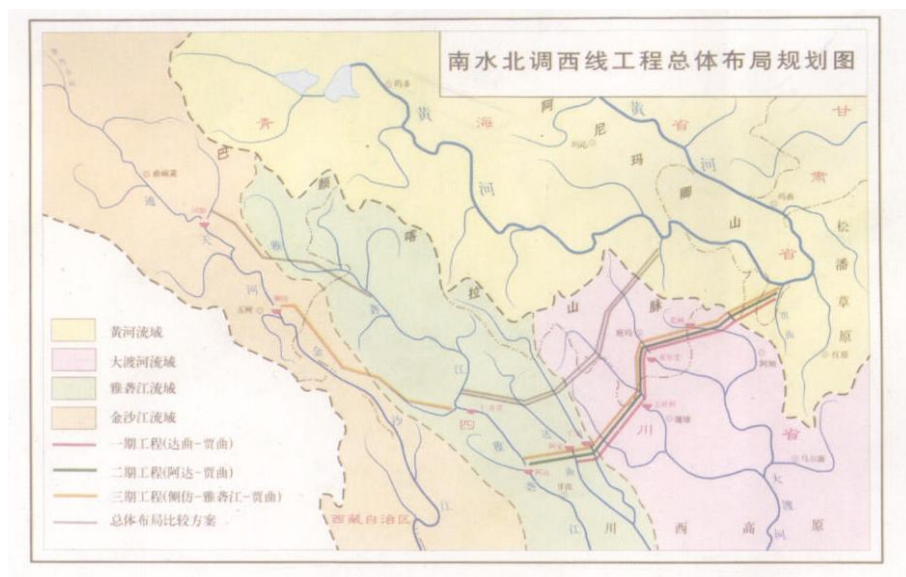


图 1 南水北调西线工程总体布局规划图

Fig. 1 Planning map of the project of water division from the south to the north via the western course

收稿日期 (Received date): 2005- 09- 15.

基金项目 (Foundation item): 国土资源部重大基础项目 (2001010203)、国家自然科学基金主任基金项目 (40342017) 和美国科学基金大陆动力学项目 (EAR- 9614970) 资助。[Supported by the Major Basic Research Project of the Land and Resources Ministry, China (2001010203), Director's Foundation project of the National Natural Science Foundation of China (40342017) and the Continental Dynamic Research Project of the National Science Foundation, USA (EAR- 9614970).]

作者简介 (Biography): 陈智梁 (1940-), 男, 浙江绍兴人, 研究员, 主要从事构造地质研究。[Chen Zhiliang (1940-), male, Born in Shaoxing of Zhejiang, professor, major in structure geology.]

km, 洞埋深一般为 300~ 600 m, 最深为 1 100 m。为高寒地区水库枢纽- 深埋长隧洞组合工程。

工程区位于川西高原, 在地质上为川青地块及其南缘鲜水河断裂带。

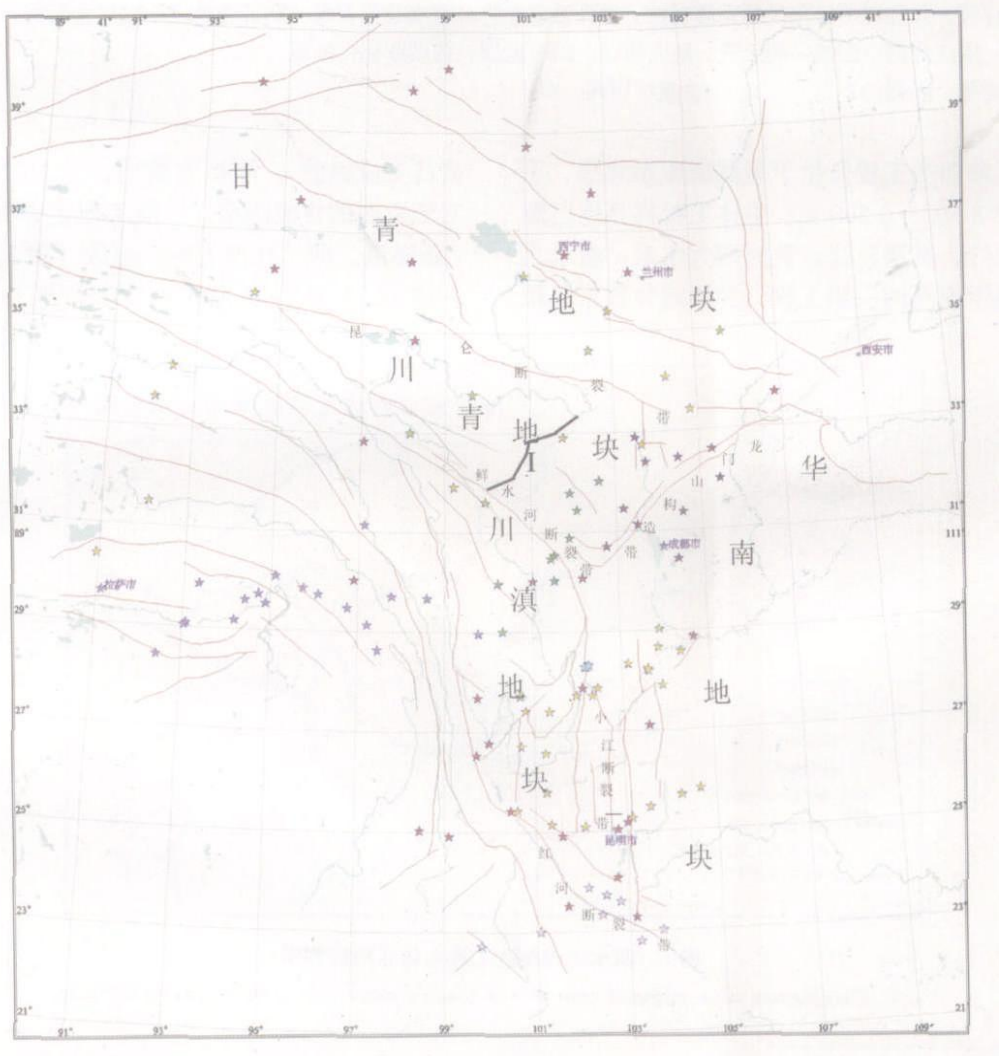
由于工程区地质条件复杂, 有其特殊性, 与工程相关的地形变、活动断裂、地震活动以及地质灾害引起广泛的关注和讨论, 普遍认为需要进一步深入研究^[1- 10]。

1 地质背景

川青地块是青藏高原东北缘最重要的构造单元。一般认为, 龙门山构造带为川青地块的东界;

其北, 以昆仑断裂带和西倾山断裂带与甘青地块(柴达木、祁连和西秦岭) 分开; 其南, 鲜水河断裂带分隔了川青地块和川滇地块, 使两个地块表现出各自不同的特征(图 2)。

在地质演化历史中, 川青地块是在三叠纪末至早侏罗世时(约 $2 \times 10^8 \sim 1.4 \times 10^8$ a) 由海变陆形成的大陆地壳。当时, 地壳运动和地壳变形极为强烈, 并伴随着大规模的岩浆活动, 形成一系列的北西方向的地壳褶皱和断裂, 形成松潘- 甘孜造山带。其时, 鲜水河断裂带就是强烈的地壳活动带。以后, 一直持续隆升, 并遭受侵蚀。特别是在约 50 Ma 以来, 由于受到印度/ 欧亚板块碰撞和直至现今的板块会聚作用的影响, 川青地块及其周边的



折线: 主要断裂; 星号: GPS 测站; 粗折线 I: 为一期工程

Broken line: main fault; Star: GPS station; Heavy broken line and I: 1st stage construction project of water course

图 2 青藏高原东北部及邻区地质构造轮廓及 GPS 监测站分布略图

Fig. 2 Simple map showing the tectonic outline and distribution of GPS stations in the northeastern Tibetan Plateau and adjacent regions

断裂带再次趋于活跃。地壳变形的叠加作用, 不但产生了新的地质构造并使之隆升成为高原, 并且导致早期的地质构造在新条件下进一步活化, 尤其是断裂构造表现了明显的活动。鲜水河断裂带成为我国西部的强震带。

因此, 川青地块是周边为断裂带所围限、内部既连续又不均一, 经过长期地质演化形成的地壳块体。这一基本特征和性质制约了它的地壳运动和形变。

规划中的南水北调西线二、三期工程区将直接在鲜水河断裂带 (广义) 地区实施, 需另文讨论。

2 现代地壳变形和位移

2.1 区域 GPS 监测

2.1.1 川青地块及邻区

高精度 GPS (Global Positioning System, 全球定位系统) 是当前监测现代地壳运动和形变的有效

高新技术。成都地质矿产研究所和美国麻省理工学院合作, 在开展地质、地球物理学研究的同时, 自 1991 年开始在青藏高原东部及邻近地区部署了高精度 GPS 动态监测网, 研究现代地壳运动和形变。2001 年增设新的监测站。其中, 在甘青川交界地区设置了 7 个新的测场予以加密, 填补了龙门山地区 and 甘肃-青海地区监测网之间的空缺, 涵盖了南水北调西线工程区。同时, 增添了 10 个新的测场, 和原有的相关测站一起, 组成横穿川滇地块中部和川青地块东部、大致垂直鲜水河断裂带、测站较为密集的 GPS 监测剖面 (见图 2)。所有的测站建立在稳定的基岩上, 并在主测站附近备有若干辅助测站。基线的内符合相对精度为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 。

高精度 GPS 监测成果表明, 青藏高原东北部地区, 在欧亚板块框架内, 即相对于中欧和西伯利亚为代表的欧亚板块的稳定部分, 大范围地呈现出由北东转变至南东方向运动的顺时针转动的、由强而弱的现代地壳运动总趋势 (图 3)。

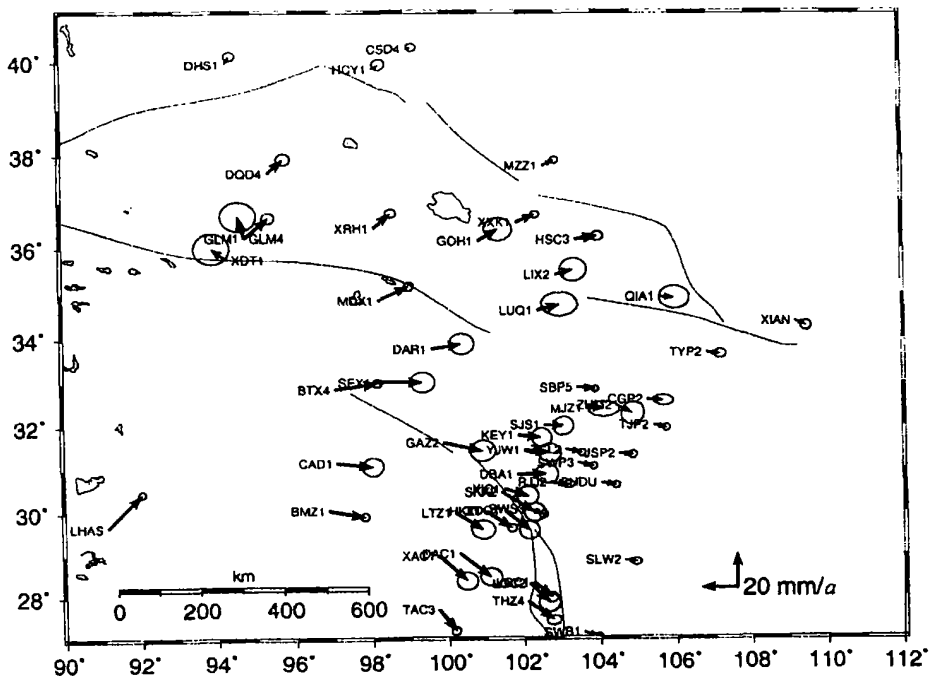
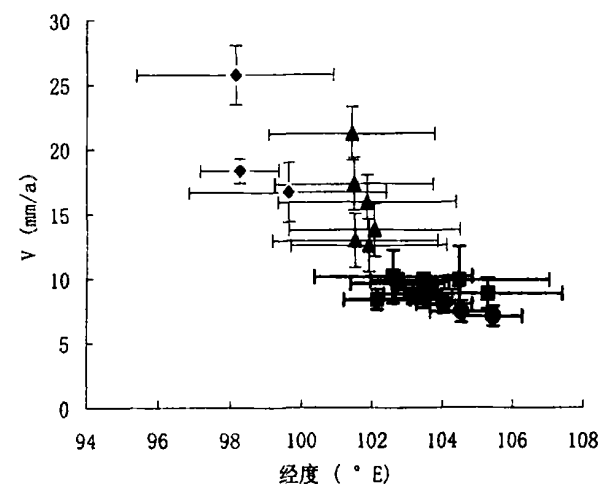


图 3 青藏高原东北部及邻区现代地壳运动速度场 (欧亚框架)

Fig. 3 Velocity field of recent crustal motion in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas in the Eurasia Frame

川青地块及其东缘的龙门山构造带和华南地块西缘的地壳运动水平速度, 自西向东, 由 25.66 mm/a 递变下降到 6.99 mm/a 的总趋势表明, 川青地块内部为具有局部应变积累的非均一的区域剪

切。作为一种陆内弹-塑性应变场, 它部分地调节和吸收了由印度和欧亚碰撞后会聚引起的区域应变, 特别是印度和华南之间的区域右旋剪切 (图 4)。



横坐标为测站经度 ($^{\circ}\text{E}$)，纵坐标为测站速度值 (mm/a ，欧亚框架)

园点为华南地块西缘测站，方块点为龙门山带测站，三角点为川青地块东部测站，菱形点为川青地块西部测站
每个站点的纵向、横向误差棒分别示速度值的北向量、东向量的不定度，其比例尺按相应的坐标轴的刻度值

Abscissa: longitude ($^{\circ}\text{E}$); ordinate: velocity of station (mm/a , Eurasia frame)

Point: station in western margin of South China Block; square: station in Longmen Shan Belt; triangle: station in eastern Sichuan-Qinghai Block; rhombus: station in western Sichuan-Qinghai Block

Error bars showing uncertainties of north component (longitudinal) and east component (traverse) of velocity by scales in graduation of coordinate axes

图 4 川青地块及东侧邻区现代地壳运动速度/测站经度递变图

Fig. 4 Diagram showing progressively decreasing of horizontal velocity of recent crustal motion with the increasing of longitude at which the GPS station lies in the Sichuan-Qinghai Block and adjacent areas to the east

川青地块内部速度场自西向东的递变也是非常有意义的。首先，这种变化中是否存在“速度阶跃带”，即断裂带，把川青地块再划分为若干次级地块。这样，“速度阶跃带”可以进一步调节地壳的应力和应变。吕江宁等 (2003) 利用中国地壳运动观测网络的 GPS 数据的处理成果，初步提出以北东向折线型的“马尔康速度阶跃带”，认为它把川青地块划分为东部“岷山地块”和西部“阿坝地块”^[11]。GPS 监测的新成果所得出的地壳运动总的递变趋势表明，地壳运动强度自西向东衰减，运动的速度矢量向东—南东转向。但是，不能证实存在这样的“速度阶跃带”。虽然在一些地段，其测站速度变化可稍有超常的表现。但是，总体表现为连续形变的

基本特征。即使是龙门山构造带及其东、西两侧也不能截然分开。另外，依据和吕江宁等人所采用的同样原始材料的计算成果，虽显示了测站速度有超前或滞后变化的现象，但也没有认可“马尔康速度阶跃带”^[12]。更重要的是，正如吕江宁等 (2003) 自己所评述的那样，在地质上不能支持“马尔康速度阶跃带”的存在，因为该区的断裂走向大多为北西向。只有延伸不远的南北向岷山断裂可能符合“马尔康速度阶跃带”的设想。特别要强调的是，一些重要的活动地震断裂，例如松岗乡断裂、抚边河断裂、松平沟断裂、黑水断裂^[13-16]为北西向，与“马尔康速度阶跃带”几乎垂直相截。

如是，川青地块内部主要表现为连续的地壳形变。这样，由地壳运动在方向上和速率上的递变所引起的应力和应变，在地块内部又是如何被吸收和调节，是一个发人深思的大问题。这不仅有重大的学术意义，而且关系到对地块内部地壳稳定性的评定以及相关大型工程的决策和举措。

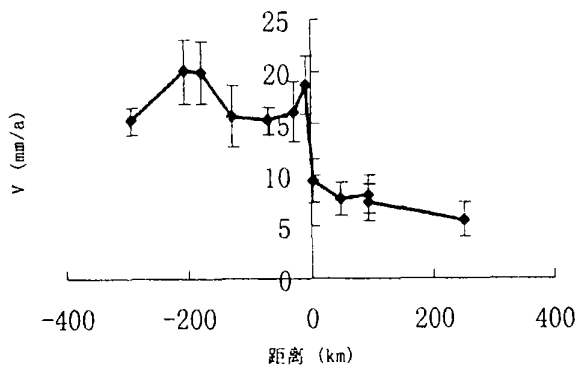
川青地块历来被认为是相对稳定区。然而，出乎预料地在地块内部发生了小金地震 ($M = 6.6$, 1989-09-22) 及其前震 ($M = 5.0$, 1989-03-01) 和余震 ($M = 5.0$, 1991-02-18) 等一系列地震^[16]，是川青地块内部近期最大的地震群集。这些地震都是浅源地震，震源机制解表明为左旋走滑发震。实地考察认为，北西向抚边河断裂是它们的地震断裂。地震序列反映出该地震断裂为自南东向北西相继破裂。但是，多次地面考察都没有发现成规模的地震破裂带。断裂带也没有明显的主断裂面，仅有数条宽数十厘米~数米的次级断层。它们大致平行展布，组成宽约 50 m 的破碎带，全长仅 40 km。地面考察和 TL 测龄估算，晚更新世~全新世以来的水平滑移速率仅 $0.85 \sim 1.7 \text{ mm/a}$ ^[14-16]。高精度 GPS 监测显示，抚边河断裂两侧的 SJS/YJW 测站间速度差约为 3.6 mm/a ；SJS/KEY 的速度差仅为 2.4 mm/a 。说明抚边河断裂的现代运动速率不大，而且其西延不会超过马尔康以西很远。

不仅小金地震是这样，在川青地块内部发生的中强震及其地震断裂之间，例如 1443 年的中壤塘 6.25 级地震与南木达—中壤塘断裂 (估计长约 20 km)、1933 年的叠溪 7.5 级地震与松平沟断裂 (断续分布的断裂带，估计长约 60 km)、1941 年的黑水石碉楼 6.0 级地震与黑水色尔古断裂 (估计

长约 20 km), 这些中强震都不是沿着大的断裂带上发生的, 似乎表现出彼此不相称的特征。在青藏高原强烈活动及其岩石圈-地壳物质向东涡旋运动的背景下, 这种长度不大、运动速率也不大、而且可能是没有主剪切面的剪切带, 可以累积高应变能发生中强震, 是该区陆内岩石圈-地壳非均一的应变场的特有性质。在这样的地区实施大型工程建设时, 需要考虑这种地壳变形的特有性质, 识破地震前的“稳定”假象, 作进一步的深入研究。

2.1.2 鲜水河断裂

沿横切鲜水河断裂带中段观测剖面的高精度 GPS 测量成果揭示, 两侧地块间的平均左旋滑动速率约 8 mm/a。GPS 资料还表明, 由于局部应变积累, 断裂带南西侧的主断裂的位错速率高于断裂系两侧地块间的平均左旋滑动速率, 为 9.3 mm/a (图 5)。根据地质填图, 断裂带北东侧的另一个断裂的位错速率可能为 2 mm/a。这两个断裂组成左阶斜列的左旋滑动断裂对, 其间为拉分盆地和次级的斜向伸展断裂。同时, 断裂带两侧各测站在垂直断裂带走向上的水平速度的分量分布, 也表明断裂带不仅有中等强度的左旋走滑, 而且还兼有复杂的伸展特征 (图 6)。



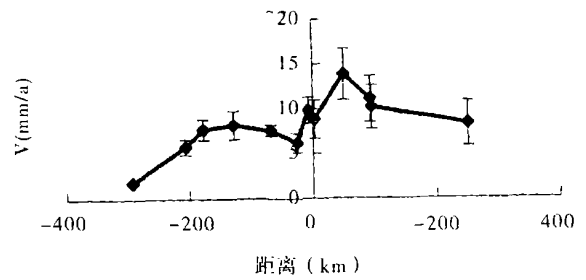
横坐标为测站到鲜水河断裂的垂直距离 (km), 东北盘为 (+), 西南盘为 (-); 纵坐标为测站速度值分量 (mm/年, 欧亚框架)

每个点的速度误差棒示速度值的不定度, 其比例尺按坐标轴的刻度值

Abcissa: distance of stations to Xianshuihe Fault (km), + : stations on northeast side of the fault, - : stations on southwest side of the fault; ordinate: horizontal components of velocity of stations (mm/a, Eurasia frame)

图 5 鲜水河断裂带两侧各测站在断裂带走向上的水平速度的分量剖面

Fig. 5 Profile showing horizontal components of velocity of stations on direction of Xianshuihe Fault



横坐标为测站到鲜水河断裂的垂直距离, 东北盘为 (+), 西南盘为 (-); 纵坐标为测站速度值分量 (mm/a, 欧亚框架)

每个站点的速度误差棒示速度值的不定度, 其比例尺按坐标轴的刻度值

Abcissa: distance of stations to Xianshuihe Fault (km), + : stations on northeast side of the fault, - : stations on southwest side of the fault; ordinate: horizontal components of velocity of stations (mm/a, Eurasia frame)

Error bars showing uncertainties of velocity by scales in graduation of coordinate axis

图 6 鲜水河断裂带两侧各测站在垂直断裂带走向上的水平速度的分量剖面

Fig. 6 Profile showing horizontal components of velocity of stations perpendicular to direction of Xianshuihe Fault

需要提到的是, 由 GPS 监测得出的断裂带的活动特征, 符合地质调查和地貌分析的结论^[13]。

作为典型的地块边界断裂, 鲜水河断裂带是不对称的活动体系, 弹性-破裂形变的特征明显。鲜水河断裂带的伸展-左旋断裂滑动作用, 这种不连续形变分划了两侧的地壳块体, 是与川青地块内部不同的另一类重要的陆内形变。

2.2 南水北调西线工程区

2.2.1 GPS 监测和地应力测量

高精度 GPS 成果表明, 一期工程区西侧石渠地段强烈地向东运动, 与其北的达日地段之间有显著的差异性地壳运动。两者在东西方向上可产生速率为 9.2 mm/a 的左旋剪切运动, 并兼有伸展运动。这启示达曲断裂、色达断裂 (玉科断裂西段) 和桑日麻断裂有较强的现代活动性。

南水北调西线一期工程区东、西两侧的测站 DAR/KEY 和 SEX/YJW 之间的水平速度差分别为 4.1 mm/a 和 11.93 mm/a, 矢量方向分别向东偏转 15.3° 和 5.8°。因此, 由此引起的地应力和应变能必然需要工程区及外围地区的地壳形变所吸收和调节。

中强地震的震源机制解析、卫星影像水系信息宏观资料分析及地应力 Kaiser 效应测量结果, 表

明本区现代构造应力场的最大主应力轴方向由西向东,由 $\text{NNE}19^\circ \sim 32^\circ$ 逐渐东偏至 $\text{NE}50^\circ \sim 60^\circ$ 左右^[5]。这与上述高精变 GPS 监测成果一致。

据长恰引水线路 CQK01 钻孔原地应力测试,在 208~235 m 深度的主应力值为:最大水平主应力 σ_H 为 7.57~8.81 MPa,最小水平主应力 σ_h 为 5.55~6.20 MPa,垂直主应力 σ_V 为 5.23~5.88 MPa,最大水平主应力方向为 $\text{NE}57^\circ$;水平主应力占主导地位,即 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ ^[18]。在长须和莫坝乡 140~235 m 深度,实测的最大水平主应力为 10 MPa,最小水平主应力为 6 MPa^[9]。

水压致裂和地面 Kaiser 测量结果显示,构造应力的量值: σ_1 为 6.0~11.7 MPa,平均值为 8 MPa 左右; σ_2 变化在 1.0~6.0 MPa 之间,平均为 3 MPa 左右; σ_3 变化于 0.3~4.3 MPa 之间,平均 2 MPa 左右。有限单元计算表明,断裂带的应变能密度一般为 1 000~1 500 J/m²,但会出现高达 3 500 J/m² 应变能的 NWW 向高应变能断裂带^[5]。因此,根据谷登堡公式可以粗略估算:一条 18 km 长、1 km 宽的断裂如达到这样的高应变能密度,就会积累一次 6 级地震所需的应变能。或者,在这样高应变能密度地段,一次 6 级地震形成的破裂带仅 18 km、宽 1 km。

值得注意的是,这些地应力数据总体上大于青藏铁路沿线测量所得的地应力值^[19]。说明工程区乃至川青地块内部存在相当高的地应力,且以水平应力为主,其主应力方向有向东递变偏转的趋势。地应力还可能在合适的条件下积累形成高应变能带,引发中强地震等突发性地质灾害。在隧洞开挖时,还可能会遇到高水平挤压应力所引发的强岩爆。

2.2.2 主要的活动断裂

近年来,对一期工程区引水线路开展了廊带式地质调查^①。虽然尚缺乏进一步的区域性地质调查的支持,但已初步认为,除了鲜水河断裂带紧邻工程区西南端外,区内存在 5 条主要的断裂带。自南而北为:达曲断裂带、色达断裂带、上杜柯断裂带、亚尔堂断裂带和阿坝断裂带。它们总体都是北西-南东走向,和鲜水河断裂带平行,即与一期工程引水线近于垂直相交或大角度斜交,使主体工程不可能避让。已有资料表明,上杜柯断裂带、达曲断裂带和阿坝断裂带是重要的活动断裂。色达断裂带也有活动迹象。

达曲断裂带为鲜水河断裂带北延分支。断裂带宽数十至数百米,由多个断层分支复合组成。有明显的左旋活动的遥感影像特征和透水性。断裂带横向切穿引水线路。

色达断裂带亦称巴颜喀拉主峰断裂、玉科断裂西段。以强劈理化为主要特征的断裂带宽达 2~3 km,地质-地貌标志表明有明显的左旋活动特征和透水性。断裂带横向切穿引水线路。与玉科断裂东段的弱活动性相对照,该断裂带活动性有自东而西增强的变化。

上杜柯断裂带的西北延伸与桑日麻断裂相接,后者是青海东南地区重要的活动断裂,被认为是达日地震(1947-03-17, $M = 7 \frac{3}{4}$)的地震断层。断裂带由多个断层分支复合组成,宽达 2 km。地质观察和地震机制解表明有明显的左旋活动特征。断裂带横向切穿引水线路。

阿坝断裂带包括了阿坝盆地南北两侧的多条断裂,至少组成南、北两条亚带。断裂结构复杂,活动的地质-地貌标志明显。断裂带横向贯穿引水线路。

对于在一期工程区西侧发生的达日地震(1947-03-17, $7 \frac{3}{4}$ 级),人们十分关注,因为它是青海省有史以来最大的地震。对此,研究者分别提出在达日地区可能存在北东向,或北北西向,或近南北向的活动断裂,并与北西向主体断裂交汇,导致地壳强烈变形,诱发强震。后者被称为“横向构造”^[4,20,21]。在四川壤塘地区历史地震调查中,也提出了北北西向、北北东向活动断裂是中强震的发展断层^[22]。一期工程区引水线廊带式地质调查初步证实,“横向构造”是上述的达曲断裂带、色达断裂带、上杜柯断裂带和阿坝断裂带的组成部分。但是,整个工程区除了上世纪 80 年代作过 1:20 万区域地质调查外,至今没有进一步的区域性野外考察和系统的专题研究,来验证与大型工程兴衰攸关的活动构造,以深入认识川青地块内部的地壳变形的特征和性质。

3 地震活动性

3.1 历史地震

鲜水河断裂带四川境内段,1901 年以来发生 7

级以上地震 3 次, 6~ 6.9 级地震 6 次, 5~ 5.9 级地震 10 次, 4~ 4.7 级地震 7 次。其中, 7 级以上和 6~ 6.9 级地震都发生在紧接一期工程区西南端的炉霍- 甘孜- 道孚一带。

在川青地块内部, 尤其是川、青交界高原腹地, 历史地震资料零星, 地震活动性研究不详。

据报导, 在壤塘县中壤塘一带 (上杜柯断裂带), 1443 年发生过 6 $\frac{1}{4}$ 级, 638~ 1991 年发生 4.7 级以上地震 5 次。例如, 1973- 10- 16 壤塘 (32°06' N, 101°00') 4.7 级地震。

在达日县莫坝附近, 桑日麻断裂带发生过青海省有史以来最大的地震——达日地震 (1947- 03- 17, 7 $\frac{3}{4}$ 级), 以及多次 4 $\frac{3}{4}$ 级以上地震。北西向地震变形带长 130~ 150 km, 宽 10~ 25 km。

阿坝断裂带, 曾发生 5~ 5.3 级地震 (1935、1952、1969) 多次。例如, 阿坝 5.1 级地震 (1969- 09- 26, 32°30' N, 101°48' E) 和 5.3 级地震 (1969- 11- 06, 32°42'、101°48' E)。

表 1 川青地块内部 $M \geq 5$ 级地震

Table 1 Earthquakes ($M \geq 5$) in the interior of Sichuan-Qinghai Block

时间	经度 (°E)	纬度 (°N)	震级	参考地名
1443	101.2	32.3	6.25	中壤塘
1790	100.7	32.3	5.5	壤塘热窝- 格达
1915- 04- 28	96	34.5	6.5	曲麻莱
1928- 07- 20	102.5	31.5	5.75	小金北
1932- 03- 07	02.2	31.8	5	马尔康
1933- 08- 05	103.4	31.9	7.5	叠溪
1935- 07- 26	101	33.1	5.5	久治西南
1935- 07- 26	101.1	33.3	6	久治
1941- 10- 08	103.3	32.1	6	黑水石碉楼
1947- 03- 17	99.5	33.3	7.75	达日
1950- 09- 19	95	35	5.25	曲麻莱
1952- 11- 01	101	33.3	6	久治
1961- 05- 18	99.2	33.7	5.2	达日西
1969- 09- 26	101.8	32.5	5.1	阿坝南
1969- 11- 06	101.8	32.7	5.3	阿坝南
1970- 09- 05	101.3	32.1	5.5	壤塘
1970- 11- 08	101.1	32.1	5.5	壤塘
1977- 09- 11	101.05	32	5	壤塘
1978- 07- 13	102.95	32	5.1	黑水打古泽、日南间
1989- 03- 01	102.4	31.5	5	小金东北
1989- 09- 22	102.35	31.6	6.6	小金北
1991- 02- 18	102.45	31.5	5	小金东北
1992- 11- 30	98	33.2	5.1	石渠北
1995- 12- 18	97.36	34.5	6.2	玛多
2005- 01- 05	101.37	32.2	5	马尔康

包括上述工程区的地震在内, 现有资料统计, 川青地块内部共发生 5 级以上地震 25 次 (表 1) (不包括地块边缘断裂带的地震)。这些地震的分布, 具有面上分散布局的特征, 而不像鲜水河强地震带那样具有显著的成带的群集性 (图 7)。

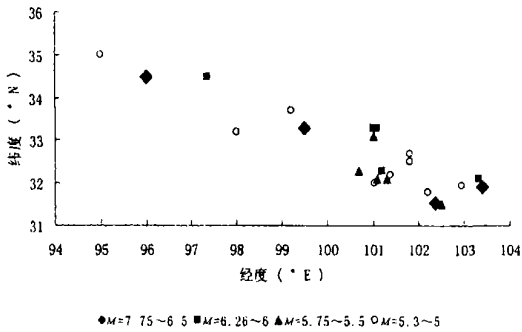


图 7 川青地块内部 $M \geq 5$ 级地震分布

Fig. 7 Distribution of earthquakes ($M \geq 5$) in the interior of Sichuan-Qinghai Block

川青地块内部的地壳连续形变的性质也表现为地震迁移性。上世纪以来, $M \geq 5$ 的地震东西方向上的迁移具有一定周期性 (图 8)。特别是地震能的释放, 既在时间上可划分有一定的周期性, 但一个周期所释放的应变能又大致保持在同一水平上 (图 9), 但是, 没有表现出震中的原地重复性。

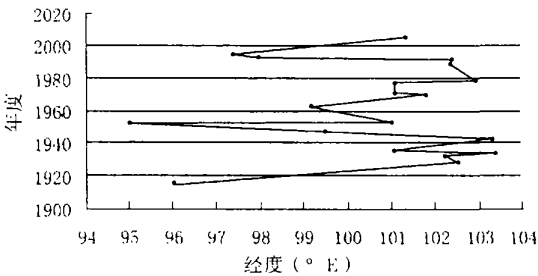


图 8 川青地块内部 $M \geq 5$ 级地震 (1915~ 2005) 震中迁移图

Fig. 8 Diagram showing epicenter shift of earthquakes ($M \geq 5$, 1915~ 2005) in the interior of Sichuan-Qinghai Block

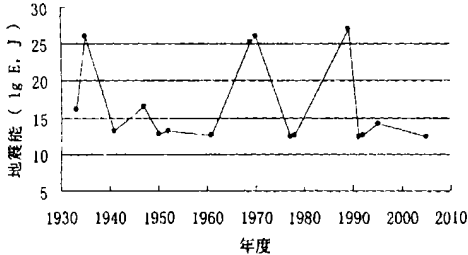


图 9 川青地块内部 $M \geq 5$ 级地震 (1933~ 2005) 能量图

Fig. 9 Diagram showing shock energy of earthquakes ($M \geq 5$, 1933~ 2005) in the interior of Sichuan-Qinghai Block

3.2 当前地震活动

据四川地震局地震目录报导,四川及邻区周边地区 2004-12~2005-02 期间共发生地震 130 次。其中,马尔康-壤塘地区就有 53 次,占总数的 41%,地震的震级为 5~2.5。尤其是 2005-01,一个月内所登录的 49 个地震中,马尔康-壤塘地区有 30 个地震,以 01-05 马尔康地震 ($M = 5.0$) 为代表,形成高潮。其震中所覆盖的地区坐标约为 $101.04^{\circ} \sim 101.40^{\circ} \text{E}$ 、 $31.46^{\circ} \sim 32.22^{\circ} \text{N}$ 。这个突出的异常区位于西线工程区的东南翼。

有必要提及的是,小金-马尔康地区 1989-02~1991-07 期间的小震综合机制解所得出的 P 轴分布方向与 1989 年小金地震 ($M = 6.6$) 的前震及主震的震源机制解均呈较好的一致性,说明震前较长时段内平均应力场方位与中强震的主压应力轴方向相符,可以代表该区域应力场特征,即受 $\text{NWW}-\text{SEE}$ 向压应力的控制。而且,中强震产生的不稳定状态对应力场的扰动有限,应力场的调整大体仅被限制在范围不大的余震区内^[23]。上述 2005 年马尔康地震 ($M = 5.0$) 的特征也和小金地震十分类似,推测也经历了相似的形变过程,都反映了川青地块地壳形变的性质。

对于南水北调西线一期工程来说,虽然引水线上没有 5 级以上的历史地震纪录,但是仍然不清楚能否排除发生中强震的可能性。因为,工程区处于具有差异地壳运动和高地应力特征的地壳地块内,已知历史上发生过中强震的有关活动断裂带都切过了主体引水线。而且,工程区所在的地块具有连续形变的基本特征,是否可能存在“安全岛”,值得研究。

工程区内是否存在潜在震源区,是南水北调西线一期工程亟待解决的问题。不言而喻,工程区内及外围的中强震,是工程设计、施工和将来水利枢纽的运行首要考虑的。

4 结论与讨论

南水北调西线一期工程区位于川西高原,在地质上为川青地块及其西南缘鲜水河断裂带。

川青地块是经过长期地质演化形成的地壳块体,周边为断裂带所围限,内部既连续又不均一。

川青地块并非不活动的稳定地块。GPS 监测资料表明,在欧亚框架内,川青地块及其邻区的地

壳运动水平速度,具有自西向东由 25.66 mm/a 递变下降到 6.99 mm/a 顺时针涡旋转动的总趋势。鲜水河断裂系中段的两侧地块间的平均左旋滑动速率约 8 mm/a 。由于局部应变积累,鲜水河断裂的主断裂的移动速率为 9.3 mm/a 。

川青地块一方面,它具有地壳连续形变的基本特征;另一方面,在印度/欧亚板块碰撞后的会聚作用驱动下,产生青藏高原东部岩石圈-地壳物质向东涡旋运动,导致川青地块内部在适当的条件下,产生局部应力集中,累积高应变能,形成长度不大、运动速率也不大的弥散性剪切带或破裂带,发生中强震。同时,在地块西南边缘的鲜水河断裂带,为我国西部的主要强震带。

川青地块内部已发生 5 级以上地震 25 次。但是,这些中强地震分布没有显著的成带群集性。在时间上,有周期性;在空间上,沿地块长轴方向有迁移性。

南水北调西线一期工程区东、西两侧的测站 DAR/KEY 和 SEX/YJW 之间有明显的水平速度差,分别为 4.1 mm/a 和 11.93 mm/a ,矢量方向自西向东相应地分别向东偏转 15.3° 和 5.8° 。地应力测量表明,工程区最大主应力为 $6.0 \sim 11.7 \text{ MPa}$,平均值为 8 MPa 左右,属高地应力区,并可产生局部高应变能带。地表考察也揭示,与中强震有关的断裂带,诸如达曲断裂带、色达断裂带、上杜柯断裂带、和阿坝断裂带等都通过工程区,并表现出活动性。

目前,GPS 动态监测网虽然基本覆盖了全国。但是,测站主要分布在交通沿线和某些重要的地震带,青藏高原腹地观测站密度稀疏,甚至空白。西线一期工程区及其外围地区,应该像三峡工程区及外围那样,不失时机地布设地壳运动动态监测网长期观测,与活动构造和地质灾害的详细调查相配合,建立防灾减灾预警体系^[10]。

参考文献 (References):

- [1] Li Changhui. Evaluation on regional crust stability in the region of west line of Transferring water from the South to the North and the modern tectonic stress field and massive faulting [J]. *Qinghai Geology*, 1994, (2): 35~40. [李长辉. 南水北调西线区域地壳稳定性评价思路和地壳现代构造应力场及块断作用 [J]. 青海地质, 1994, (2): 35~40.]
- [2] Liu Hongxing, Bi Hailiang. On problems of regional engineering geology in the region of west line of Transferring water from the South to the North [J]. *Qinghai Environment*, 1998, 8 (2): 78~82. [刘红星, 毕海良. 论南水北调西线工程区域工程地

- 质问题 [J]. 青海环境, 1998, **8** (2): 78~ 82.]
- [3] Li Jindu, Chen Shutao. Analyses of geological conditions and key engineering geological problems in the Transferring water Region of West line of Transferring water from the South to the North [J]. *People's Yellow River*, 1999, **21** (2): 22~ 24. [李金都, 陈书涛. 南水北调西线调水区地质条件与关键工程地质问题分析 [J]. 人民黄河, 1999, **21** (2): 22~ 24.]
- [4] Wang Xuechao, Zhang Hui, Liu Zhenhong, *et al.* Geological features of transverse structures in Yalongjiang Water-transferring region and its mechanics [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 1999, **20** (2): 30~ 35. [王学潮, 张辉, 刘振红, 等. 南水北调西线工程雅砻江调水区横向构造的地质特征及成因机制 [J]. 华北水利水电学院学报, 1999, **20** (2): 30~ 35.]
- [5] Wang Xuechao, Zhang Hui, Liu Zhenhong, *et al.* Geological hazards about West-line Project of Water Diversion from upper Yangtze River into upper Yellow River [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2001, **26** (1): 297~ 303. [王学潮, 张辉, 刘振红, 等. 南水北调西线工程地质灾害初步研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, **26** (1): 297~ 303.]
- [6] Wang Xuechao, Ma Guoyan. Introduction to engineering project of water diversion from the upper Yangtze River into the upper Yellow River and its main engineering geological problems [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, **10** (1): 3~ 10. [王学潮, 马国彦. 南水北调西线工程及其主要工程地质问题 [J]. 工程地质学报, 2002, **10** (1): 3~ 10.]
- [7] Huang Zhiquan, Qi Jiafu, Wu faquan, *et al.* Main engineering geological Problems in the 1st-Stage Project of West-line for Transferring Water from southern to northern China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, **13** (3): 1~ 8. [黄志全, 漆家福, 伍法权, 等. 南水北调西线一期工程的主要工程地质问题 [J]. 中国地质灾害与防治学报, **13** (3): 1~ 8.]
- [8] Ma Dongtao, Cui Peng, Chen Shutao, *et al.* Geological hazards in the Project of Water Division from the south to the north via the western course, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, **21** (5): 582~ 588. [马东涛, 崔鹏, 陈书涛, 等. 南水北调西线工程调水区地质灾害问题 [J]. 山地学报, 2003, **21** (5): 582~ 588.]
- [9] Wu Faquan, Wang Xuechao, Guo Lianjie, *et al.* Fault activity and its effect on the West line of Water Division project from south to north of China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23** (8): 1370~ 1374. [伍法权, 王学潮, 国连杰, 等. 南水北调西线一期工程区断层活动性及其对工程的影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23** (8): 1370~ 1374.]
- [10] Chai Jianfeng, Wu Faquan, Chang Zhonghua, *et al.* Main engineering geological problems of active faults in the 1st stage Project of Western Line for Transferring Water from southern to northern China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, **35** (1): 64~ 69. [柴建峰, 伍法权, 常中华, 等. 南水北调西线一期工程区断层活动性及工程地质评价 [J]. 吉林大学学报, 2005, **35** (1): 64~ 69.]
- [11] L Jiangning, Shen Zhengkang, Wang Min. Contemporary crustal deformation and active tectonic block model of the Sichuan-Yunnan Region, China [J]. *Seismology and Geology*, 2003, **25** (4): 543~ 554. [吕江宁, 沈正康, 王敏. 川滇地区现代地壳运动速度场和活动块体模型研究 [J]. 地震地质, 2003, **25** (4): 543~ 554.]
- [12] Qiao Xuejun, Wang Qi, Du Ruilin. Characteristics of current crustal deformation of active block in the Schuan-Yunnan region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **447** (5): 805~ 811. [乔学军, 王琪, 杜瑞林. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征 [J]. 地球物理学报, 2004, **447** (5): 805~ 811.]
- [13] Tong Rongchang, Han Weibin. Active Faults and Earthquakes in Sichuan Province [M]. Beijing: Seismology Press, 1993, 67~ 172, Appendices 57~ 66. [唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1993, 67~ 172, 附件 57~ 66.]
- [14] Gong Yu, He Yulin, Wu Xianguo. Discussion on the recent active feature of the Fubianhe Fault [J]. *Sichuan Earthquake*, 1995, (4): 31~ 36. [龚宇, 何玉林, 伍先国. 抚边河断裂新活动特征的探讨 [J]. 四川地震, 1995, (4): 31~ 36.]
- [15] He Yulin, Gong Yu, Wu Xianguo. Activity features of the Fubian River Fault in Sichuan province [J]. *Sichuan Earthquake*, 1997, **19** (1): 31~ 36. [何玉林, 龚宇, 伍先国. 四川抚边河断裂的活动特征 [J]. 四川地震, 1997, **19** (1): 31~ 36.]
- [16] Zhou Rongjun, He Yulin, Ma Sheng hao, *et al.* Late Quaternary active characteristics of Fubianhe Fault in Sichuan's Xiaojin [J]. *Journal of Seismological Research*, 1999, **22** (4): 376~ 381. [周荣军, 何玉林, 马声浩, 等. 四川小金抚边河断裂的晚第四纪活动特征 [J]. 地震研究, 1999, **22** (4): 376~ 381.]
- [17] Qian Hong, Zhou Rongjun, Ma Shenghao, *et al.* South segment of Minjiang Fault and Diexi Earthquake in 1933 [J]. *Earthquake Research in China*, 1999, **15** (4): 333~ 338. [钱洪, 周荣军, 马声浩, 等. 岷江断裂南段与 1933 年叠溪地震研究 [J]. 中国地震, 1999, **15** (4): 333~ 338.]
- [18] Chen Shutao, Shi Shouliang, Qin Jianpu. Environment geology analyses of the West Route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. *People's Yellow River*, 1999, **21** (10): 29~ 40. [陈书涛, 石守亮, 秦建甫. 南水北调西线工程环境地质问题分析 [J]. 人民黄河, 1999, **21** (10): 29~ 40.]
- [19] Wu Manlu, Zhang Chunshan, Liao Chunting, *et al.* The recent state of stress in the central Qinghai-Tibet Plateau according to in-situ stress measurements [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, **48** (2): 327~ 332. [吴满路, 张春山, 廖椿庭等. 青藏高原腹地现今地应力测量与应力状态研究 [J]. 地球物理学报, 2005, **48** (2): 327~ 332.]
- [20] Dai Huaguang. On the Dari Earthquake of 1947 in Qinghai Province [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1983, **5** (3): 71~ 77. [戴华光. 1947 年青海达日 7 3/4 级地震 [J]. 西北地震学报, 1983, **5** (3): 71~ 77.]
- [21] Yan Weide. Approach to the mechanics of the Dari Earthquake ($M = 7\frac{3}{4}$) in 1947 [J]. *Qinghai Information of Geological Science and Technology*, 1994, (2): 14~ 15. [严维德. 关于 1947 年 7 3/4 级达日地震发震机制探讨 [J]. 青海地质科技情报, 1994, (2): 14~ 15.]
- [22] Jiang Zaxiong, Xu Jiating, Zong Jiaming, *et al.* Investigation of the historical earthquakes in Rangtang Region, Sichuan [J]. *Journal of Seismological Research*, 1996, **19** (3): 239~ 245. [江在雄, 徐吉廷, 曾佳明, 等. 四川壤塘地区历史地震调查 [J]. 地震研究, 1996, **19** (3): 239~ 245.]
- [23] Diao Guiling, Cheng Wanzheng, Li Guifang, *et al.* The stress field in source region of the Xiaojin earthquake sequence in Sichuan

[J]. *Earthquake Research in China*, 1995, 11 (2): 168~173. [刁桂苓, 程万正, 李桂芳, 等. 小金地震序列的震源

区应力场 [J]. *中国地震*, 1995, 11 (2): 168~173.]

Geological Problems on Crustal Activity in the 1st Stage Construction Project of Water Division from the South to the North via the Western Course, China

CHEN Zhiliang, LIU Yuping, SUN Zhiming, ZHOU Jixiang,
TANG Wenqing, ZHANG Qingzhi, PAN Zhongxi

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: The 1st Stage Construction Project of Water Division from the South to the North via the Western Course, China, is a construction group that consists of 6 dams and 7 tunnels. It is located in a high-elevation and cold region within the western Sichuan Plateau, and geologically in the Sichuan-Qinghai Block and along its southern margin—Xianshuihe Fault Zone. Due to complex geological conditions in the construction region, and it is very important to study and measure crustal deformation and earthquake activity.

The Sichuan-Qinghai Block and its marginal fault zones have been rejuvenated because of driving of plate collision and post-collision convergence between India and Eurasia since about 50 Ma. GPS monitoring data document that in the Eurasia frame, the crustal movement velocity field shows a general tendency of clockwise rotation vortex of progressively decreasing of horizontal velocity from 25.66 mm/a in the west to 6.99 mm/a in the east in the Sichuan-Qinghai Block and adjacent areas. An average left-lateral slip rate between blocks in both sides of the Xianshuihe Fault Zone is ca. 8 mm/a, and the movement rate on the main fault is 9.3 mm/a of left-lateral slipping with local strain accumulation. The horizontal velocity differences between GPS stations DAR/KEY and SEX/YJW located on the east and west sides of 1st Stage Construction region are 4.1 mm/a and 11.93 mm/a respectively, and orientations of vector decline eastwards 15.3° and 5.8° correspondingly. The in-situ stress measurement data reveal that the construction region is a high in-situ stress area, and local belts with higher strain-energy may be formed in the area.

Existing records document that the Xianshuihe Fault Zone is a strong earthquake belt; 25 historical earthquakes ($M \geq 5$) once occurred within the Sichuan-Qinghai Block. Therefore, the Sichuan-Qinghai Block is not an inactive and stable block. In the Sichuan-Qinghai Block, continuous crustal deformation is a basic character, and another hand, stress concentration and strain accumulation locally occurs, resulting in a moderate-strong earthquake, and a diffuse shear or/and fracture belt with short length and less offset rate in a suitable situation. However, no dominant association of the earthquakes happened, but there were temporal periodicity and spatial migration along the long-axis of the block for the earthquakes. The fault zones relative to moderate-strong earthquakes, such as Daqu Fault, Srtar Fault, Upper Dokog Faults, and Aba Fault, cut through the construction region, indicating crustal activity in the region.

The crustal activity will exert a notable impact on the 1st Stage Construction Project of Water Division from the South to the North via the Western Course, China.

Key words: Water Division from the South to the North, 1st Stage Construction Project of the Western Course, crustal activity, GPS monitoring, active fault, earthquake