

南水北调西线工程区及邻域的活动构造

冉勇康, 李建彪, 闵伟, 韩竹军, 陈立春

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 南水北调西线一期工程在构造上位于青藏高原东部的巴颜喀拉地块内部, 块体的四周边界以巨型走滑断裂和逆断裂为特征, 构造运动非常强烈, 是块体运动引发应力集中和释放能量的主要场所。但块体内部构造活动性较弱, 仅发现甘德—阿坝断裂系北支断裂在阿坝盆地的部分断裂、色达—洛若断裂和康勒断裂等晚更新世以来有过活动, 且规模和运动强度远小于地块边界断裂。晚第四纪以来地块边界断裂的位移速率大多在 7 mm/a 以上, 最大达 18 mm/a, 最小为 1~2 mm/a, 而输水隧洞附近最主要的活断层顺河断裂的位移速率仅为 0.18 mm/a, 相对地块边界断裂小 1~2 个数量级, 可以认为工程场地处于构造相对稳定的地区。给出了阿坝盆地北缘断裂、顺河断裂等活断裂在工程使用期内最大设防的倾滑位移量, 分别为 0.67 和 2.62 m。

关键词: 工程地质; 南水北调西线; 输水隧洞; 活动构造; 潜在断裂位错

中图分类号: TV 221.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)20-3664-09

ACTIVE TECTONICS ALONG SITE AND NEIGHBORHOOD OF WEST ROUTE OF SOUTH-TO-NORTH WATER TRANSFER PROJECT IN CHINA

RAN Yong-kang, LI Jian-biao, MIN Wei, HAN Zhu-jun, CHEN Li-chun

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: The first stage project of the west route of South-to-North Water Transfer Project is located in Bayankela block interior of the eastern Qinghai—Tibet Plateau. The boundary of Bayankela block is all the giant strike-slip or thrust fault systems, which have intense activity; and the boundary belts are the primary sites of the accumulation and release of stress resulted from the blocks movement. The fault activity is weaker in Bayankela block interior than that of the boundary belts. Partial faults of Gande—Aba fault system, Seda—Luoruo fault, and Kangle fault, etc., were active at one time since Late Pleistocene epoch. However, they have weaker active intensity than the boundary belt. The average displacement rates of the block boundary faults in the late Quaternary Period were generally more than 7 mm/a; the maximum value was up to 18 mm/a, and the minimum one was 1-2 mm/a; however, the slip rate of the most primary active fault at the raceway vicinity is only 0.18 mm/a. In general, the crust of the project site is relative stable. The maximum dip-offset of the faults needed to be protected for the project during useful life has been deduced; for example, for the Aba basin north marginal fault and the Shunhe fault the maximum value is 0.67 m and 2.62 m, respectively.

Key words: engineering geology; west route of South-to-North Water Transfer Project; diversion tunnel; active fault; potential dislocation of fault

收稿日期: 2005-06-13; **修回日期:** 2005-07-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418400)

作者简介: 冉勇康(1955-), 男, 博士, 1979年毕业于北京大学地理系地貌专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事活动构造、古地震和工程地震方面的教学与研究工作。E-mail: ykran@263.net。

万方数据

1 引言

输水隧洞属于长线工程场地^[1], 对该类工程场地的地震安全性问题, 国家还没有专门的工作规范。根据近年国内外类似工程的地震安全性评价实例, 基本上可以把输水隧洞工程场地的地震安全性分成 2 个部分的内容: 一是场地及附近(两侧各 25 km)的断裂活动性评价。由于输水隧洞不可避免地要经过断裂带, 评价工程场地工程使用期内断裂是否可能产生位错, 导致输水隧洞的破坏是最重要的工作; 二是坝址等点状场地的地震安全性评价^[2]。

评价断裂在工程使用期内是否会发生地表和近地表的位错是国内外地震、地质学者努力探索的问题, 其核心是客观认识断裂的活动习性和强震复发历史, 从而为工程安全提供抗震设防参数。上世纪晚期以来活动构造研究取得了长足的进展, 从定性研究发展到定量研究阶段, 为工程使用期内断裂位错的评价奠定了较好的理论基础^[2~9]。如美国学者

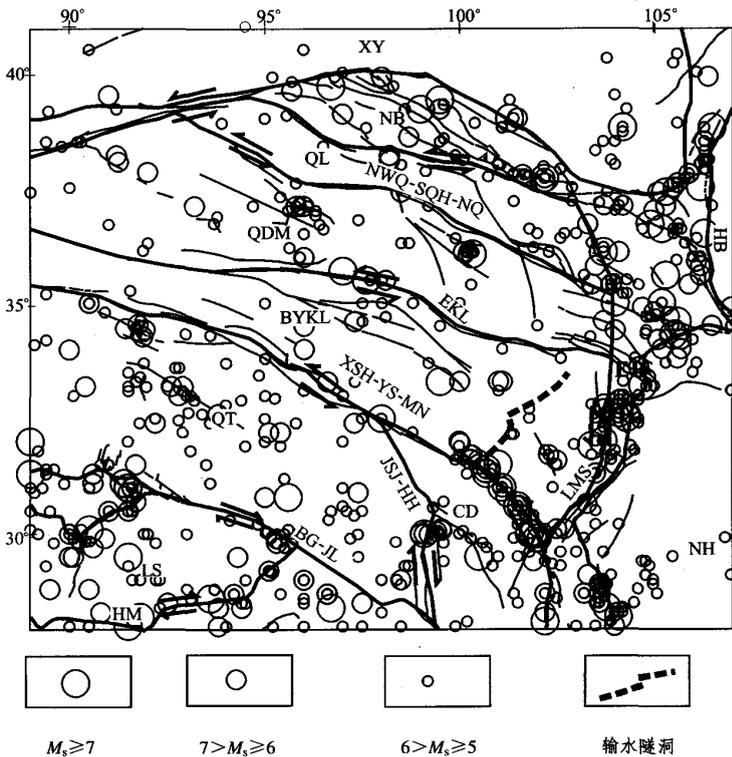
通过对阿拉斯加输油管道穿经的 Denali 断裂近期可能发生的最大地震位错进行了定量研究, 采取了相应的设防措施, 对抗御 2002 年 $M_w = 7.9$ 级地震起到了良好的效果^[9]; 我国在西气东输、青藏铁路等一系列重大工程中也探讨了相应的评价方法^[1]。

南水北调西线工程需要修建高坝和开凿超长隧洞, 由于工程的重要意义和地质背景的复杂性, 工程地震安全性问题也就显得异常突出。本文结合近年该区域及青藏高原东北部活动构造研究的最新成果, 对在输水隧洞两侧各 25 km 范围内的主要断裂活动进行研究, 探讨工程区及附近的断裂活动及潜在的最大地震位错可能对输水隧洞造成的影响。

2 区域活动构造特征

南水北调西线工程场地位于青藏高原东部, 这里活动断裂分布密集^[10], 但晚更新世以来活动的断层大部分可以归入以下 8 条活动断裂带(图 1):

- (1) 喜马拉雅活动构造带(HM), 由向南凸出的



LS—拉萨地块; QT—羌塘地块; BYKL—巴颜喀拉地块; QDM—柴达木地块; QL—祁连地块; CD—川滇地块; NB—北缘边界构造带; EB—东缘边界构造带; XY—西域地块区; HB—华北地块区; NH—南华地块区; 小箭头—剪切运动方向; 细线—晚更新世以来活动的断层; 粗线—活动地块边界

图 1 研究区活动地块与地震

Fig.1 Active blocks and earthquake in research area

主中央冲断带(MCT)—主边界冲断带(MBT)—山前冲断带(RFT)所组成,全新世滑动速率为 15~18 mm/a^[11]。

(2) 班公错—嘉黎断裂带(BG-JL), 右旋滑动速率为 4~10 mm/a 左右^[12, 13]。

(3) 鲜水河—玉树—玛尼断裂带(XSH-YS-MN), 东部玉树—鲜水河段左旋滑动速率为 10~12 mm/a^[14]; 西部左旋滑动速率约为 2.5~10.0 mm/a^[15]。

(4) 东昆仑断裂带(EKL), 左旋走滑兼向南逆冲, 晚第四纪滑动速率为 12~13 mm/a^[16]; 2001 年 11 月昆仑山口 8.1 级强烈地震在该带中部发生, 形成长达 350 km 的地表破裂带^[17]。

(5) 西秦岭北缘—青海湖南缘—柴达木盆地北缘断裂带(NWQ-SQH-NQ), 左旋走滑兼向南逆冲, 造成南祁连山系推覆于柴达木—共和盆地之上, 滑动速率较小, 一般为 2~4 mm/a^[18]。

(6) 阿尔金—海原断裂带(ALT-HY), 左旋走滑兼逆冲挤压, 左旋滑动速率约为 7~9 mm/a^[19~22]。

(7) 金沙江—红河断裂带(JSJ-HH), 右旋走滑, 晚第四纪滑动速率可达 7~8 mm/a^[23, 24]。

(8) 龙门山断裂带(LMS), 活动性不强, 但其中的岷江断裂具有左旋走滑特征, 速率为 1~2 mm/a^[25]。

中国地震、地质学家将这些活动断裂带所围限

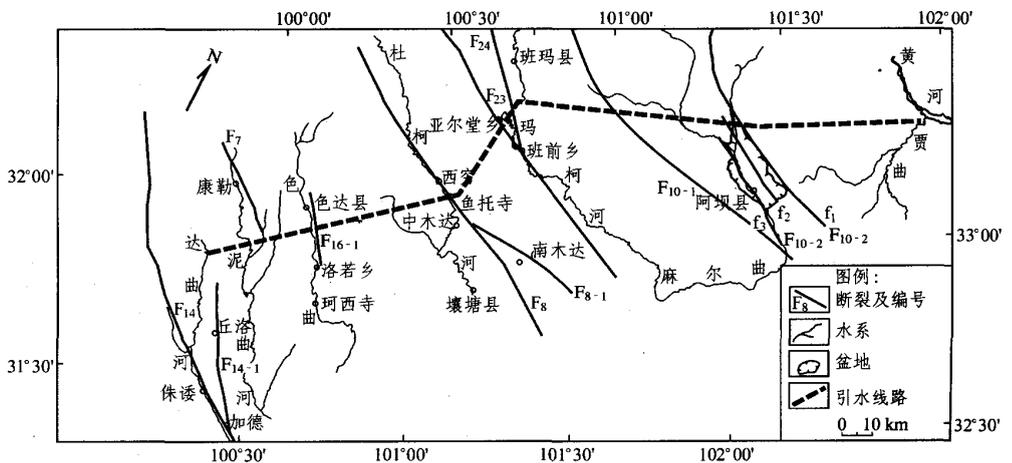
的块体定义为活动地(断)块^[10, 26](图 1)。南水北调西线工程一期方案在构造上就位于鲜水河—玉树—玛尼断裂带(南界)、东昆仑断裂带(北界)、阿尔金断裂带(西界)和龙门山断裂带(东界)所围限的巴颜喀拉地块内部。前 3 者是青藏高原内走滑速率最高的断裂带, 也是大震频繁发生的构造带; 后者为强烈活动的以逆冲—推覆为特征的断裂带, 也是中国大陆内的强震发生带。根据围限块体的断裂活动性、区域应力场和现代地壳运动观测资料分析, 巴颜喀拉地块有向东滑移的趋势, 输水线附近的主压应力轴方向为 WEE^[27, 28]。尽管巴颜喀拉块体四周边界的新构造运动非常强烈, 是块体运动引发应力集中和释放能量的主要场所, 但块体内部构造活动性较弱, 仅发现少数晚更新世以来活动的断裂, 并且规模远小于地块边界断裂, 输水隧洞附近(两侧各 25 km)没有记载过 6 级以上地震。

3 输水隧洞附近主要断裂的活动性

在输水隧洞附近有 7 条规模较大或可能在晚更新世活动过的主要断裂(图 2)。

(1) 甘德—阿坝北支断裂带

甘德—阿坝断裂系是区域内规模较大的断裂系, 由甘德—阿坝北支断裂和南支断裂组成。其南



F₇—康勒断裂(巴颜喀拉山主峰断裂); F₈—桑日麻断裂; F₈₋₁—南木达断裂; F₁₀₋₁—甘德—阿坝南支断裂; F₁₀₋₂—甘德—阿坝北支断裂(f₁—阿坝盆地北缘断裂; f₂—阿坝盆中断裂; f₃—阿坝盆地顺河断裂); F₁₄—鲜水河断裂; F₁₄₋₁—加德—丘洛断裂

图 2 输水隧洞经过的主要断裂

Fig.2 Main faults along the diversion tunnel

支展布于阿坝盆地西南十余公里, 北支从阿坝盆地通过, 北支断裂总长 240 km, 在阿坝段分别称为阿坝盆地北缘断裂、阿坝盆中断裂和阿坝盆地南缘断裂。

阿坝盆地北缘(f_1)(图 2), 主要由 2 条大致平行的断裂组成。北边的 1 条展布于三叠系砂板岩之中, 地貌上表现不明显; 南边的 1 条位于第四系冰洪积砂砾石与三叠系砂板岩之间, 总体走向 NW, 是一条具有长期活动历史的断裂, 控制了阿坝盆地的北边界。在方休一带断裂晚更新世末至全新世初的地层, 是输水隧洞要经过的活动断层(图 3)。方休探槽剖面揭露了两次位错事件: 事件一断错层①, 而后堆积层②; 事件二则断错事件一的坎前堆积地层, 之后为堆积层③及以后地层。由热释光样品(Fx - TL3, Fx - TL2, Fx - TL3)分析得到这两次事件的发生年代分别为约距今 3.635×10^4 和 1.115×10^4 a, 重复间隔约为 2.52×10^4 a, 最后一次事件的离逝时间为 1.115×10^4 a。层①顶部在剖面上的可见位移量大于 2.2 m, 一次事件北东地貌上有一高约 4~5 m

的陡坎, 开挖剖面揭示的垂直位移量在 1.2~1.4 m 左右。

盆中断裂(f_2)在多处断错第四系地层。在苟洼洛 3 条断层错断了第四纪冰洪积砂砾石层, 顶部被厚约 30 cm 的黑色腐殖土覆盖, 此剖面的测年结果(图 4), 以及其他剖面(表 1)的结果显示, 断裂的活动时代主要在晚更新世。阿坝盆地顺河断裂(f_3)的活动造成阿柯河两侧阶地高度的不对称, 东岸阶地高于西岸并且呈线性延伸, 沿东岸陡坎开挖的探槽揭示出断裂在全新世有过活动。探槽可以判断出 3 次断错事件。第 1 次事件为层⑥下部断错, 随后被堆积砾石与黄色砂粘土混杂的层⑤和堆积物层④覆盖。第 2 次事件为层⑤和④断错, 并堆积层③。最后的事件为楔层③断错崩积, 而后堆积层②及以上地层。最新一次活动距今为 $(1.6 \sim 0.9) \times 10^4$ a。第二次事件应发生在距今 $(1.6 \sim 2.9) \times 10^4$ a, 第一次事件发生年代早于距今 3.4×10^4 a。一次地震的垂直位移约为 1.6~2.3 m(图 5)。

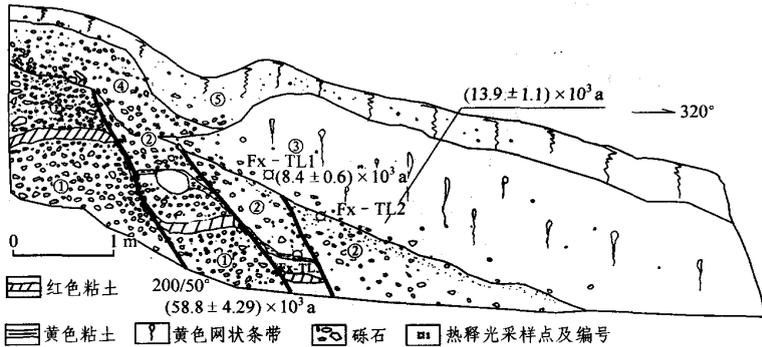


图 3 阿坝盆地北缘断裂探槽剖面

Fig.3 Cross-section of exploratory trench of north marginal fault in the Aba Basin to the northwest of Fangxiu Village

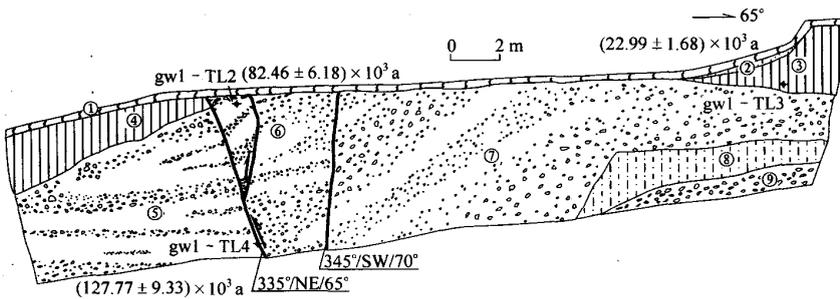
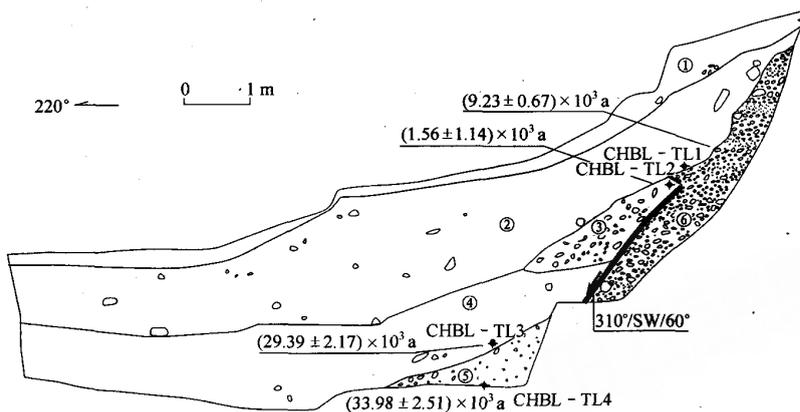


图 4 阿坝盆地盆中断裂苟洼洛东北探槽剖面图

Fig.4 Cross-section of exploratory trench of the central fault in the Aba Basin to the northeast of Gewaluo Village

- ①—黑色腐殖土, 发育草根; ②—一次生黄土; ③—黄土, 比较坚硬; ④—黑土夹砾石; ⑤—淡黄色砂砾石层, 层理基本水平, 砾石磨圆好, 粒径 2 cm 左右; ⑥—淡黄色砂砾石层, 砾石磨圆好, 粒径 2 cm 左右, 层理倾斜, 倾角 30°左右; ⑦—灰绿色砂砾石层, 砾石均匀, 磨圆好, 粒径 2 cm 左右, 层理倾斜, 倾角 30°左右; ⑧—灰绿色粘土; ⑨—淡黄色砂砾石层



- ①—黑色腐殖土；②—浅黄色砂粘土夹少量砾石；③—较粗砾石与黄色砂粘土混杂堆积；④—黄色砂粘土散布少量砾石；
- ⑤—砾石与黄色砂粘土混杂堆积；⑥—灰绿色砂砾石层，松软，砾石磨圆好

图5 阿柯河北 II 级阶地陡坎(顺河断裂)探槽西壁剖面

Fig.5 Cross-section of exploratory trench of the western wall

(2) 色达—洛若断裂

从遥感影像上可以看出色达县城到洛若乡沿线山体前缘存在线性状展布的地貌变异现象。在约若村向东南至十一道班之间，可见一系列冲沟左旋位错(图 6)。大部分冲沟长度为 100~200 m，位错量可以分为两组，一组为 6~12 m，另一组为 16~20 m。在冲沟拐弯、扭曲处，在山坡上一般可见陡坎，陡坎高 0.5~1.0 m；在西北端第三条冲沟扭曲处可见泉水出露，冲沟阶地呈“S”形分布。

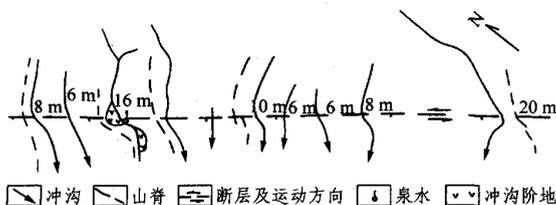


图 6 色达县约若村—十一道班之间冲沟位错示意图

Fig.6 Sketch map of gully dislocation between Yueruo Village and Shiyidaoban in Seda County

在上述冲沟扭曲点连线的延伸线上，断裂构造带宽 6~8 m，由强烈的片理化带和构造透镜体带组成。断裂“通天”，地貌上出现垭口，其中 7 条冲沟水平位错量分别为 6~12 m。由地貌的变形关系分析，其位错开始时代与 II 级阶地形成时间相当。根据区域河流阶地对比分析，II 级阶地形成于距今 $(15.77 \pm 1.20) \times 10^3 \sim (23.06 \pm 1.75) \times 10^3$ a，因此色万方数据

达—洛若断裂是一条晚更新世至全新世有过活动的断裂。

(3) 巴颜喀拉主峰断裂

巴颜喀拉主峰断裂在输水隧洞近场区的部分称为康勒断裂(下同)，在 TM 卫片影像上表现清楚。总体走向为 NW-SE。在康勒乡泥曲河对岸的假隆沟沟口东，可见发育在三叠系上统之中的断裂构造带，以构造破碎带为主，宽 15 m，局部糜棱岩化，断面产状 $30^\circ \angle 80^\circ$ (表 1)。采集热释光样品测年结果为距今 $(87.80 \pm 6.60) \times 10^3$ a。断裂从泥曲河 II 级阶地前缘通过，但未见与第四纪地层的断层接触关系，说明断裂在晚更新世早期仍有过活动，但没有发现晚更新世中晚期以来活动的证据。

(4) 其他断裂

在输水隧洞经过的地段，除上述 3 条断裂或断裂带外，还存在甘德—阿坝南支断裂，亚尔堂断裂系的宁它—灯塔断裂、亚尔堂断裂，桑日麻断裂系的 4 条支断裂和加德—丘洛断裂。这些断裂对前第四系有不同程度的控制或影响，但没有发现晚更新世以来活动的证据，不属于活动断裂(表 1)，不作详细论述。

4 活动断裂可能对输水隧洞的影响

4.1 评价方法

评估断裂活动可能对输水隧洞产生的影响，核

表 1 南水北调西线工程一期主要断裂活动性评价表

Table 1 Activity assessment of main faults for the first stage project

断裂名称	段落或次级断裂	断裂编号	断裂产状	工作区内长度/km	断裂宽度/m	运动性质	地质地貌判断的活动时间	最新活动的测年结果(距今 10^4 a)	综合判定的最新活动时间	与隧道的关系
甘德—阿坝断裂系	甘德—阿坝北支断裂	F _{10-2(f₁)}	300°/SW/50°	55	5~10	正断裂	晚更新世	1.115	晚更新世末	穿经
	阿坝盆地中断裂	F _{10(f₂)}	340°/SW/70°	26	20~50	正断裂	晚更新世	5.4 ± 3.1	晚更新世早中期	指向接近
	阿坝顺河断裂	F _{10(f₃)}	310°/SW/60°	30	15~20	正断裂	全新世	1.45 ± 0.50	晚更新世末	指向接近
	阿坝盆地南缘断裂	F _{10(f₄)}	300°/SW/80°	25	30~50	正断裂	第四纪早期		第四纪早期	指向
	甘德—阿坝南支断裂	F ₁₀₋₁	280°/SW/80°	60	50~100	逆断裂	第四纪早期	25.7 ± 2.3	第四纪早期	穿经
宁它—灯塔断裂系	宁它—灯塔断裂	F ₂₄	300°/SW/80°	46	5~10	逆断裂	第四纪早期	45.00 ± 0.34 以前	第四纪早期	穿经
	亚尔堂断裂	F ₂₃	290°/SW/60°	50	3~5	逆断裂	第四纪早期	30.8 ± 3.4	第四纪早期	穿经
桑日麻断裂系	杜柯河断裂		28°∠80°, 185° ∠78°	50	15~45	走滑	前第四纪	25.8 ± 2.4	中更新世	穿经
	擦孜德沟口断裂	F ₈	210°∠80°	7~9	28~30	走滑	前第四纪	28.5 ± 2.4	中更新世	不经过
	约木达断裂		343°∠86°	5	22	走滑	早~中更新世		第四纪早期	不经过
	杜柯河北断裂		63°∠88°, 230° ∠80°	40~45	15~25	走滑	第四纪早期	112.7 ± 22.0	第四纪早期	穿经
加德—丘洛断裂	F ₁₄₋₁	330°∠68°	10~15	80~100	走滑	第四纪早期	27.7 ± 3.8	中更新世	指向	
鲜水河断裂	色达—洛若断裂		190°∠64°	30~35	6~10	正-走滑断裂	晚更新世~全新世	5.44 ± 0.43 (地貌单元 0.45)	晚更新世~全新世	穿经
	康勒断裂	F ₇	30°∠80°	15~20	70~100	走滑断裂	晚更新世	8.78 ± 0.66	晚更新世	可能穿经

内容是客观认识断裂的活动习性和强震复发历史, 从而为工程安全提供抗震设防参数。断裂活动习性可由滑动方式(粘滑或蠕滑)、断裂某时段的累积位移量与位移速率(包括走向、倾向滑动速率)、断裂位错带宽度、古地震重复间隔、最近一次地震事件的离逝时间、同震位移量、活动褶皱的缩短量等各种活动性参数来描述。依据这些参数, 采用评估断裂未来位移量的方法, 如古地震法和非完全古地震法, 也称为滑动速率法^[1, 7, 8], 预测断裂工程使用期内发生地表位错的可能性。古地震法即当古地震重复间隔时间接近离逝时间与工程使用期限之和, 则认为断裂面临新的位错事件, 其位错大体等于古地震同震位错量; 但如果古地震重复间隔时间远远大于离逝时间与工程使用期限之和, 则不考虑该断裂突发位错的可能性。而滑动速率法则定义为: 在已知古地震位移量的情况下, 可用滑动速率乘以离逝时间与工程使用期限之和, 如果得到的潜在位

移量近于或大于断裂产生地表破裂的最小值, 则认为可能发生大体等于该值的位错事件。本文中, 南水北调西线工程运营期取值 200 a。

另外, 与一般线性场地不同的是, 输水隧洞主要是距离地表数百米至千米的隧道, 从理论上讲, 震源位错在向地表的扩展过程中有变小的可能性。换言之, 由地表破裂“经验”估计的位移量随深度的增加而变大。为此, 需要探讨位移量随深度变化的情况, 详见本期石守亮等一文。因此, 在获得活断裂地表潜在位错量后, 可根据过断裂处输水隧洞的设计深度和断裂带宽度评估可能影响输水隧洞的潜在位错增加量, 本文不再赘述。

4.2 活断裂影响输水隧洞的潜在位错

4.2.1 阿坝盆地北缘断裂

探槽揭露(图 3)阿坝盆地北缘断裂最新破裂面宽 1~2 m, 结合断裂的线性地貌分析, 其影响带宽度约为 50 m。在约距今 3.635×10^4 和 1.115×10^4 a

发生 2 次正断层破裂事件, 平均重复间隔约为 2.52×10^4 a, 最后一次事件的离逝时间为 1.115×10^4 a, 一次事件的垂直位移量在 1.2~1.4 m 左右。剖面上层①堆积以来(约距今 $(58.8 \pm 4.3) \times 10^3$ a) 的最小累积位移量为 3.6 m, 由此求得最小垂直滑动速率为 0.06 mm/a。通过古地震法判断, 平均重复间隔时间 2.52×10^4 a 大于离逝时间加工程使用期 $((1.115 + 0.020) \times 10^4$ a), 或是由不完全古地震法判断为 $1.115 \text{ a} \times 0.06 \text{ mm/a} = 0.670 \text{ m}$, 小于古地震的位移量 1.2~1.4 m, 二者都显示未来工程运营期内该断裂不会发生类似该处古地震大小的事件。但是, 由位移速率计算得到的最大潜在垂直位移为 0.67 m, 而且断裂最新活动发生在全新世初, 因此, 如果认为断裂除发生 1.2~1.4 m 大小的特征地震外, 还会发生更小事件, 那么不能排除工程运营期内断裂发生 0.67 m 地表垂直位错事件的可能。

4.2.2 阿坝盆地顺河断裂

沿阿柯河东北岸断层陡坎开挖的探槽揭露出 3 次古地震事件(图 4), 其发生时间为距今 $(1.6 \sim 0.9) \times 10^4$ a, 在沙尔港共巴, 冲沟剖面揭露的断层最后一次活动时间为距今 $(1.5 \sim 1.4) \times 10^4$ a, 因此, 该断裂最后一次事件发生的年代被限制在距今 1.45×10^4 a 左右。第二次事件发生在距今 $(1.6 \sim 2.9) \times 10^4$ a, 中间值为 2.25×10^4 a; 最早一次事件发生年代早于距今 3.4×10^4 a。三次古地震事件的重复间隔时间约为 0.8×10^4 和 1.15×10^4 a, 平均为 $(0.975 \pm 0.175) \times 10^4$ a。另外, 如果认为距今 3.4×10^4 a 以来断层的位移量为 6 m 左右(3 次事件的大体位移量), 由此求得的顺河断裂的垂直滑动速率约为 0.18 mm/a。在沙尔港共巴处, 断裂破裂带的宽度约为 15~20 m。

由上述可知, 古地震的平均重复间隔时间约为 0.975×10^4 a, 而离逝时间约为 1.45×10^4 a, 离逝时间已超过重复间隔, 因此, 未来 200 a 内该断裂有再次发生垂直位移为 1.6~2.3 m 的地表破裂事件的可能。同样, 用平均位移速率计算, 该断裂的潜在位移量为 2.62 m。

4.2.3 其他 3 条活断层对输水隧洞的影响

(1) 阿坝盆地盆中断裂

盆中断裂是一条规模相对较小的断裂, 其长度约为 26 km, 由线性垭口地貌分析得到的断裂影响带宽度约为 50 m, 以正断层活动为主。依据苟洼洛北探槽剖面, 断裂上最近一次事件发生在距今 $8.1 \sim 2.3 \times 10^4$ a, 中值为 5.2×10^4 a, 断裂的平均垂直滑动速率为 0.048 mm/a 但结合该地区断裂的活动特征分

析, 盆地北缘断裂最近一次事件发生在距今约 1.115×10^4 a, 古地震重复间隔为 2.52×10^4 a; 顺河断裂最新一次活动距今 1.45×10^4 a, 古地震重复间隔为 0.975×10^4 a, 它们的最新事件发生时间要年青的多, 而且事件的重复间隔时间都大大小于盆中断裂的最新事件。因此, 可以认为盆中断裂的主要活动时期在晚更新世中期以前, 之后已不活动, 在未来工程运营期内不会发生地表破裂事件, 可不考虑断裂位错对输水隧洞的影响。

(2) 色达—洛若断裂

色达—洛若断裂最新一期活动的位错量平均值为 8 m, 其位错开始时代与 II 级阶地相当。根据区域河流阶地对比分析, II 级阶地距今 $(15.77 \pm 1.20) \times 10^3 \sim (23.06 \pm 1.75) \times 10^3$ a, 取其平均值, 可以推算断裂的平均位移速率为 0.41 mm/a。但在隧道东南侧喇荣沟断层剖面上的电子自旋共振年龄测定结果为距今 $(337.0 \pm 61.0) \times 10^3$ a, 说明色达—洛若断裂的晚更新世~全新世活动段有可能没有经过设计中的输水隧洞。考虑到色达—洛若断裂的一些段落存在晚更新世~全新世活动证据, 由未被断错变形的曲河及其支流 I 级阶地堆积物测得的 3 个年代数据把断裂最新一次活动的时间控制在距今 4 500 a 左右, 故需要计算断裂未来位错的可能性。由位移速率法求得在工程运营期内断裂有可能发生的最大位错达 1.8 m。尽管对该断裂的研究是初步的, 也应该考虑这一潜在断层位移可能对输水隧洞产生的影响。

(3) 康勒断裂

该断裂晚更新世早期有过活动, 但没有发现晚更新世中晚期以来活动的证据。因此, 可不考虑断裂位错对输水隧洞的影响。

5 结 语

(1) 南水北调西线一期工程在构造上位于青藏高原东部的巴颜喀拉地块内部, 块体的四周边界以巨型走滑断裂和逆断裂(仅东界)为特征, 构造运动非常强烈, 是块体运动引发应力集中和释放能量的主要场所, 但块体内部构造活动性较弱, 仅发现甘德—阿坝断裂系的部分断裂、色达—洛若断裂和康勒断裂等晚更新世以来活动的断裂, 且规模和运动强度远小于地块边界断裂。如地块边界断裂的晚第四纪的位移速率大多在 7 mm/a 以上, 最大达 18 mm/a, 最小为 1~2 mm/a, 而输水隧洞附近最主要

的活断层顺河断裂的位移速率仅为 0.18 mm/a, 相对地块边界断裂小 1~2 个数量级。另外, 输水隧洞两侧各 25 km 的范围内历史上没有记载过 6 级以上地震, 由此可判断输水隧洞处于构造相对稳定的地区。

(2) 在输水隧洞经过的地段, 甘德—阿坝断裂系的阿坝盆地北缘断裂、盆中断裂、顺河断裂, 是一期工程规划输水隧洞所经过的最重要的活动断裂。色达—洛若断裂和康勒断裂等在晚更新世有过活动, 属于活动断裂; 甘德—阿坝断裂系的阿坝盆地南缘断裂、甘德—阿坝南支断裂, 亚尔堂断裂系的宁它—灯塔断裂、亚尔堂断裂, 桑日麻断裂系的 4 条支断裂和加德—丘洛断裂没有发现晚更新世以来活动的证据, 不属于活动断裂。

(3) 阿坝盆地北缘断裂、顺河断裂等活断裂在工程使用期内最大设防的倾滑位移量分别为 0.67 和 2.62 m。色达—洛若断裂的一些段落存在晚更新世~全新世活动微地貌证据, 由位移速率法求得在工程运营期内断裂有可能发生的最大位移达 1.8 m。尽管对该断裂的研究是初步的, 但也应该考虑这一潜在断层位移可能对输水隧洞产生的影响。阿坝盆地盆中断裂、康勒断裂没有发现晚更新世中晚期以来活动的证据, 因此, 可不考虑断裂位错对输水隧洞的影响。

致谢 参加该项工作的还有中国地震局地质研究所的向宏发, 张广良、于泳, 洪汉净, 刘培洵以及部分研究生, 四川省地震局的龚宇, 黎小刚等, 在此向他们表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 冉永康, 陈立春. 中国长线工程场地地震安全性评价工作中的活动构造问题[J]. 地震地质, 2004, 26(4): 733 - 741.(Ran Yongkang, Chen Lichun. Active tectonic research for seismic safety evaluation of long-line engineering sites in China[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(4): 733 - 741.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程场地地震安全性评价技术规范(GB17741 - 1999)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Seismic Safety Evaluation of Engineering Sites(GB17741 - 1999)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.(in Chinese))
- [3] Wallace R E. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1970, 81(10): 2 875 - 2 890.
- [4] Schwartz D P, Coppersmith K J. Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones[J]. J. Geophys. Res., 1984, 89(B7): 5 681 - 5 698.
- [5] Yeats R S, Pentice C S. Introduction to speccial section: paleoseismology[J]. J. Geophys. Res., 1996, 101(B3): 5 847 - 5 853.
- [6] 邓起东, 刘百麓, 张培震, 等. 活动断裂工程安全评价和位错量的定量评估[A]. 见: 国家地震局地质研究所编. 活动断裂研究(2)[C]. 北京: 地震出版社, 1992. 236 - 246.(Deng Qidong, Liu Baichu, Zhang Peizhen, et al. Research of active fault in evaluating engineering safety and assessing amount of displacement[A]. In: Institute of Geology, China Earthquake Administration ed. Research on Active Fault(2)[C]. Beijing: Earthquake Press, 1992. 236 - 246.(in Chinese))
- [7] 邓起东, 陈立春, 冉永康. 活动构造定量研究与应用[J]. 地质前缘, 2004, 11(4): 383 - 392.(Deng Qidong, Chen Lichun, Ran Yongkang. Quantitative studies and applications of active tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 383 - 392.(in Chinese))
- [8] 冉永康, 邓起东. 古地震学研究的历史、现状和发展趋势[J]. 科学通报, 1999, 44(1): 12 - 20.(Ran Yongkang, Deng Qidong. History, status and trend about the research of paleoseismology[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(1): 12 - 20.(in Chinese))
- [9] Cluff L S. Bridging the gap between earthquake science and engineering: The story of the trans-alaska pipeline performance during the M_w 7.9, 2002 earthquake[A]. In: Proceedings of the Third International Conference on Continental Earthquakes, ICCE[C]. [s. l.]: [s. n.], 2004. 63 - 68.
- [10] 邓起东, 张培震, 冉永康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 1 020 - 1 030.(Deng Qidong, Zhang Peizhen, Ran Yongkang, et al. The basic characteristic of active tectonics of China[J]. Science in China (Series D), 2002, 32(12): 1 020 - 1 030.(in Chinese))
- [11] Lave J, Avouac J P. Active folding of fluvial terraces across the Siwalik Hills, Himalayas of central Nepal[J]. J. Geophys. Res., 2000, 105(B3): 5 735 - 5 770.
- [12] Armijo R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: field observations and tectonic implications[J]. J. Geophys. Res., 1986, 91(B14): 13 803 - 13 872.
- [13] 任金卫, 沈军, 曹忠权, 等. 西藏东南部嘉黎断裂新知[J]. 地震地质, 2000, 22(4): 344 - 350.(Ren Jinwei, Shen Jun, Cao Zhongquan, et al. Quaternary faulting of Jiali fault, southeast Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 2002, 22(4): 344 - 350.(in Chinese))
- [14] 闻学洋. 鲜水河断裂带未来三十年地震复发的条件概率[J]. 中国地震, 1990, 6(4): 8 - 16.(Wen Xueze. Conditional probabilities for earthquake of recurrence in future 30 years along the Xianshuihe Fault[J]. Earthquake Research in China, 1990, 6(4): 8 - 16.(in Chinese))
- [15] 吴章明, 汪一鹏, 任金卫, 等. 青藏高原中部的活动断裂[A]. 见:

- 国家地震局地质研究所编. 活动断裂研究(3)[C]. 北京: 地震出版社, 1994. 56 - 73.(Wu Zhangming, Wang Yipeng, Ren Jinwei, et al. The active faults in the central Tibet Plateau[A]. In: Research on Active Fault(3)[C]. Beijing: Earthquake Press, 1994. 56 - 73.(in Chinese))
- [16] Woerd V D, Ryerson J F, Tapponnier P, et al. Holocene left slip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun fault (Qinghai, China)[J]. *Geology*, 1998, 26(8): 695 - 698.
- [17] 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2001年11月14日昆仑山库赛湖地震($M_s 8.1$)地表破裂带的基本特征[J]. *地震地质*, 2002, 24(1): 1 - 13.(Xu Xiwei, Chen Wenbin, Yu Guihua, et al. Characteristic features of the Hohsaihu (Kunlunshan) earthquake($M_s 8.1$), northern Tibetan Plateau, China[J]. *Seismology and Geology*, 2002, 24(1): 1 - 13.(in Chinese))
- [18] Woerd V D, Xu X, Li H, et al. Rapid active thrusting along the northwestern range front of the Tanghe Nan Shan (western Gansu, China)[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B12): 30 475 - 30 504.
- [19] 国家地震局阿尔金山活动断裂课题组. 阿尔金山活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1992.(The Research Group of the Altun Fault Zone, State Seismological Bureau. Altun Fault Zone[M]. Beijing: Earthquake Press, 1992.(in Chinese))
- [20] Bendick R, Bilham R, Freymueller J T, et al. Geodetic evidence for a low slip rate in the Altyn Tagh fault system[J]. *Nature*, 2000, 404: 69 - 72.
- [21] Shen Z K, Zhao C h, Yin A, et al. Contemporary crustal deformation in eastern Asia constrained by global positioning system measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 5 721 - 5 734.
- [22] 王 琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(7): 529 - 536.(Wang Qi, Zhang Peizhen, Niu Zhijun, et al. Contemporary crustal movement and tectonic deformation of Chinese Continent[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(7): 529 - 536.(in Chinese))
- [23] Wang E, Buechfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis[J]. *Int. Geol. Rev.*, 1997, 39: 191 - 219.
- [24] Wang E, Burchfiel B C. Late Cenozoic Xiangshuihe—Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China[J]. *Geol. Soc. Am. Special Paper*, 1998, 327: 1 - 108.
- [25] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. *地震地质*, 1994, 16(4): 389 - 403.(Deng Qidong, Chen Shefa, Zhao Xiaolin. Tectonics, scismisity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16(4): 389 - 403.(in Chinese))
- [26] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(增): 12 - 20.(Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(Supp.): 12 - 20.(in Chinese))
- [27] 丁国瑜, 卢滨涛. 板内块体的现代运动[A]. 见: 马杏垣编. 中国岩石圈动力学地图集[C]. 北京: 中国地图出版社, 1989. 72 - 77.(Ding Guoyu, Lu Yanchou. Recent motions of interplate blocks[A]. In: Ma Xingyuan ed. *Lithospheric Dynamics Atlas of China*[C]. Beijing: Sino Maps Press, 1989. 72 - 77.(in Chinese))
- [28] 张培震, 王 琪. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[A]. 见: 马宗晋, 王一鹏, 马杏垣编. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学[C]. 北京: 地震出版社, 2001. 21 - 35.(Zhang Peizhen, Wang Qi. Contemporary crustal movement and tectonic deformation of Chinese continent[A]. In: Ma Zongjin, Wang Yipeng, Ma Xingyuan ed. *Contemporary Deformation and Dynamics of Lithosphere in Qinghai—Tibet Plateau*[C]. Beijing: Seismological Press, 2001. 21 - 35.(in Chinese))