

## 青藏铁路沿线活动断裂带对地质选线的影响

袁炳祥<sup>1,2</sup>, 谌文武<sup>1,2</sup>, 梁收运<sup>1,2</sup>, 李金城<sup>3</sup>

(1. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学), 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 铁道第一勘察设计院, 陕西 西安 710043)

**摘要:**青藏铁路横穿了青藏高原上大量的活动断裂带。本文研究了青藏铁路沿线的29条活动断裂带分布规律和地质病害。通过分析崩塌、滑坡、泥石流地质病害特点和典型路段的地质选线,总结了断裂带地质选线的原则,主要包括:尽量在断裂带活动性较弱、宽度较窄的地段以垂直或高角度通过;尽量不设大中桥、高桥、隧道、高填深挖等难以修复的大型建筑物。事实证明,以上原则在绕避和通过活动断裂带时是正确可行的,可以在青藏线改建和其它铁路工程上借鉴运用。

**关键词:** 青藏铁路; 地质选线原则; 活动断裂带; 地质灾害

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)02-0121-05

### The Influence of Active Fault Belts along Qinghai-Tibet Railway on Geologic Route Selection

YUAN Bing-xiang<sup>1,2</sup>, CHEN Wen-wu<sup>1,2</sup>, LIANG Shou-yun<sup>1,2</sup>, LI Jin-cheng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou 730000, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. The First Survey and Design Institute of China Railway, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The Qinghai-Tibet Railway intersects with many active fault belts distributed on Qinghai-Tibet plateau. In this paper, the distribution laws of 29 active fault belts along the railway and geological hazards caused by the faults are studied. Through analysing the characteristics of geological hazards such as collapse, landslide, debris flow, and typical sections of the route line, some principles for geological route selection in fracture zones are summarized as follows: the route should be arranged to pass across active fault segment with weaker activities and narrower width of the belt in right angle or higher angle, avoid as could as possible to build large and medium-size bridge, high bridge, tunnel, high-filling, deep-dugging which are difficult to be repaired after damage. It has been proved that these principles are right and feasible for avoid or pass the active fault belts, and can be used in rebuild of Qinghai-Tibet Railway or other railway project.

**Key words:** Qinghai-Tibet Railway; Geological route-selection principle; Active fault belts; Geological hazards

## 0 引言

青藏铁路全长1 956 km,其中格尔木至拉萨段位于青藏高原腹地,穿越昆仑山、可可西里,横跨唐古拉山哑口至安多县、那曲县、当雄县,经堆龙曲河、

拉萨河至拉萨市,长1 142 km。这其中有960 km建在4 000 m以上高海拔地区。

喜马拉雅造山运动中的板块推挤和俯冲在青藏

收稿日期: 2009-01-06

基金项目: 教育部直属高校聘请外籍专家重点资助项目“中外多年冻土区铁路重大工程地质问题对比研究”(07号)

作者简介: 袁炳祥(1983-),男(汉族),博士研究生,主要从事岩土工程与新材料研究工作。

高原内部产生了许多规模较大的活动断裂带<sup>[1-2]</sup>。在大陆内部一些重要的活动断裂,尤其是活动块体边界断裂的平均位移速度达4~12 mm/a,能够孕育6~7级以上甚至8级左右的大地震,导致严重的地震及地质灾害<sup>[3]</sup>。青藏铁路沿线不同期次、不同方向和不同规模的断裂构造极为发育,由此引发了不良地质现象如滑坡、泥石流、错落、崩塌和岩堆等<sup>[4]</sup>。国内对青藏铁路沿线活动断裂带进行过一些研究,如吴珍汉<sup>[3,5]</sup>、易明初<sup>[6]</sup>、吴云生等<sup>[7]</sup>就较为详细的研究了青藏铁路沿线活动断裂带的新活动特征及其产生的地质危害等;张倬元等<sup>[8]</sup>从构造地质角度研究了活断层与区域构造稳定性的关系,论述了活断层地区建筑物的设计原则。通过研究青藏铁路格尔木至唐古拉北段的154条断层与青藏铁路的关系发现,病害大多以断裂带为中心呈放射状分布,线路与断层交角大于等于50°的占80%以上,断层分布影响了青藏线的选线<sup>[9]</sup>。因此,本文阐述活动断裂带诱发的地质危害,研究青藏铁路沿线活动断裂带分布规律以及断裂带对地质选线的影响,并以实例说明。

## 1 青藏铁路沿线活动断裂带诱发的地质危害

### 1.1 活动断裂带诱发地震

活断层和地震是两种密切相关的工程动力地质作用,活动断裂带和强震区的分布具有内在本质关系<sup>[8,10]</sup>。大量震例表明,稳定地块边缘的活动大断裂带或第四纪断陷盆地是强震发生带。如1951年11月18日在青藏高原南部的崩错盆地周边,发生了崩错 $M_s 8.0$ 地震,地震及诱发地质灾害包括房屋倒塌、地面塌陷、地面裂缝、喷砂冒水、湖啸和岩石崩塌<sup>[11]</sup>;昆仑山走滑断裂带位于昆仑活动地块与可可西里活动地块的边界,2001年11月14日沿该断裂带西段库赛湖活动断裂发生了昆仑山口西8.1级地震,在地表产生长达350~426 km的地震破裂,穿切青藏公路、通讯光缆、青藏铁路施工便道等工程设施,导致昆仑山雪崩和西大滩房屋破坏<sup>[11-12]</sup>。此外频繁而强烈的地震活动不仅会导致地表产生明显的形变破坏,而且为西北地区黄土的重力和流水侵蚀提供了良好的边界条件<sup>[13]</sup>。

### 1.2 断裂活动带引起滑坡和泥石流

在倾角较大的边界断裂和走滑断裂带上,沿上升盘与下降盘之间的断层面常形成规模较大、陡峭的断层坡面,加之地下水水位较浅、岩石较破碎,是

形成滑坡和泥石流的有利构造部位。王治华<sup>[14]</sup>认为,沿各条活动断裂带均有密集的滑坡分布,通过遥感和实地考察,查出青藏铁路和公路沿线50 km宽的条带内有覆盖面积大于0.01 km<sup>2</sup>的滑坡552处。图1显示了从格尔木起青藏线50 km宽的范围内各处的滑坡分布面积,主要分布在惊仙谷断裂( $F_2$ )、风火山北麓断裂( $F_6$ )、雁石坪断裂带( $F_{13}$ )、温泉弧形断陷带( $F_{14}$ )、唐古拉山北坡断裂( $F_{15}$ )、安多北山弧形断裂带( $F_{20}$ )、谷露—桑雄断裂带( $F_{25}$ )、当雄—羊八井断裂带( $F_{28}$ )(见图2)。

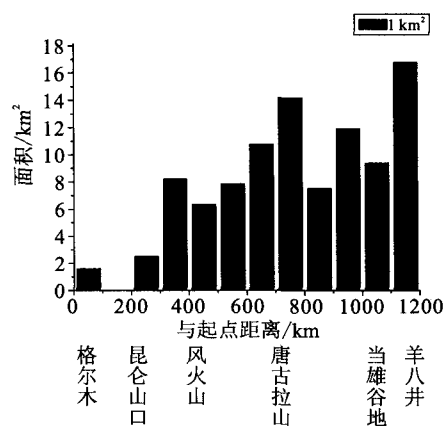


图1 青藏线调查区滑坡面积的分布(据文献[14])

Fig. 1 The covering areas and distribution of landslides along the Qinghai-Tibet Railway (after reference[14]).

### 1.3 构造裂缝带及其工程危害

活动断裂带形成了大量宽度达上百米、长度上千公里的构造裂缝带,横穿或斜切铁路、公路和沿线的输油管道、光缆等。由于能够深切路基,导致路基的保温性能与冻胀的失衡,产生路面和路基破裂,影响线路的工程质量和行车速度,缩短工程使用寿命。如风火山地区的风火山北麓活动断裂带为三条走向NNW的活动断层,构造裂缝带宽度分别为150 m、660 m、300 m,而且都横穿青藏铁路和公路,具有很大的工程危害。断裂带伴随水体侵蚀作用还易形成侵蚀性沟谷<sup>[13]</sup>。在断裂带不断的运动中,深部裂缝逐步向表层扩展,表层土体因此受到拉张而疏松和强度下降,并在地表产生一个逐步变宽的地面沉降带和局部次级裂缝带;沉降带上的局部地段由于疏松、次级裂缝或黄土湿陷性的影响,一旦发生地表降水就会产生渗漏、冲蚀,使裂缝顺其走向和下延方向不断扩展并与深部主裂缝贯通。强烈的侵蚀作用由此而发生,并在裂缝带两端逐步向裂缝带中心区域侵蚀并形成侵蚀性沟谷。

### 1.4 沿活动断裂带地下水产生的工程危害

活动断裂带是地下水和地下流体运移和富集的良好通道,由于活动断裂深切多年冻土,在夏季形成线性泉水群,在冬季形成串珠状斜列冰丘群<sup>[5]</sup>。沿活动断裂分布的冬季冰丘,尤其是移动冰丘,将导致铁路路基隆起和铁轨变形,严重威胁铁路运输的安全。并且沿断裂破碎带地下水的分布不均匀导致冰丘的不均匀冻胀,常常产生铁路、公路变形和沿断裂带的冰裂缝。如在乌鲁西断带( $F_{10}$ )经常形成冰丘和移动冰丘,2001年底至2002年初在与青藏铁路近平行的86道班公路东侧沿乌鲁活动断层发育一个长达15 m、高约1.8 m的椭圆形移动冰丘,导致长达15 m的地下输油管道发生高约2 m的拱曲变形。北麓河 NWW 向活动断裂斜切青藏铁路,断裂附近地下水较富集并且水位较低,毛细上升作用较强,湿润路堤在冬季产生冻胀,造成轨面不均匀抬

高和路基土石不均匀松动,大大缩短了铁路的使用寿命,影响行车速度。

## 2 青藏铁路沿线活动断裂带空间分布

青藏铁路沿线分布了大量的活动断裂(或断层),通常按其构造性质和运动属性可分为左旋走滑断层、右旋走滑断层、正断层和逆断层<sup>[8]</sup>。如果以青藏铁路为参照物,以断裂带和线路相交角度为原则,可以将其分为与青藏线大角度或垂直相交断裂,以及小角度或近平行相交断裂(图2)。通过统计,青藏线格尔木至唐古拉北共154条断层<sup>[9]</sup>,从图3可以看出绝大部分的断层都是与线路大角度相交的,其中交角大于等于 $50^\circ$ 的占81.8%;与线路交角较小的断层较少,小于 $50^\circ$ 的仅占18.2%。

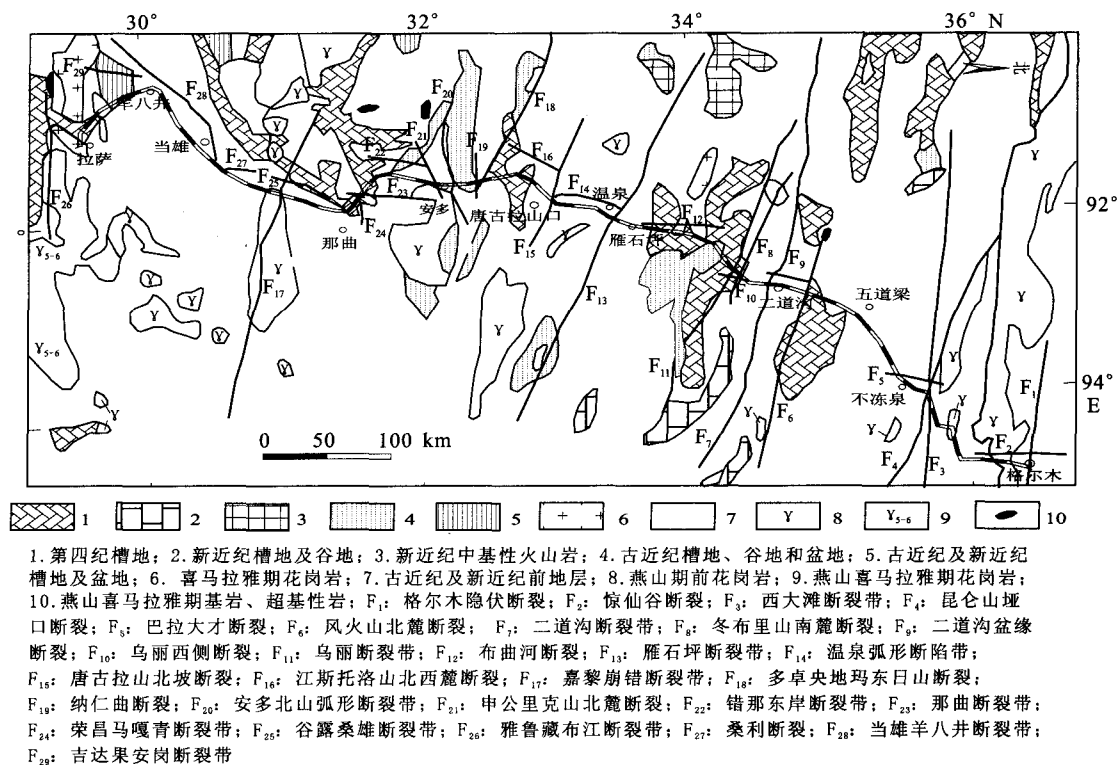


图2 青藏铁路格尔木—拉萨地段活动断裂带略图

Fig. 2 Sketch map of active fault belts in Golmud-Lhasa segment, Qinghai-Tibet Railway.

从图2中可以看出,与线路大角度或垂直相交的断裂带其影响范围仅仅就是其交点及其附近的一个小区域,影响范围较小。由前述可知,断裂带可以诱发地震、滑坡、泥石流、冰丘、温泉和不均匀冻胀等很多地质灾害。由于影响范围较小,其工程设置相对简单。而每条活动断裂带是由几条不同期次、不同方向和不同规模的断裂(或断层)组成,并且每条

断裂(或断层)的不同区段的活动速率、运动规模也是不同的(表1)。因此只要处理好相交部位就可以。地质选线时,在大方向不变的情况下可以选择活动时期老、运动速率慢、地质病害少的区段以路堤、路堑等简易方式通过。如风火山北麓断带( $F_6$ ),在区内断裂产生于古近系及新近系地层之中。断裂倾角为 $40^\circ \sim 60^\circ$ ,倾向SW,与线路斜交在CK1137。

线路在此以路堤通过,对工程影响不大。这类断裂主要有格尔木隐伏断裂( $F_1$ )、昆仑山垭口断裂( $F_4$ )、风火山北麓断裂( $F_6$ )、二道沟断裂带( $F_7$ )、冬布山南麓断裂( $F_8$ )、乌丽断裂带( $F_{11}$ )、雁石坪断裂带( $F_{13}$ )、唐古拉山北坡断裂( $F_{15}$ )、多卓央地玛—东日山断裂( $F_{18}$ )、纳仁曲断裂( $F_{19}$ )、安多北山弧形断裂带( $F_{20}$ )、申公里克山北麓断裂( $F_{21}$ )、荣昌马—嘎青断裂带( $F_{24}$ )、嘉黎—崩错断裂带( $F_{17}$ )、雅鲁藏布江断裂带( $F_{26}$ )。在图3统计的154条断层中,线路以特大桥、大桥40座,中桥3座,隧道1座通过,其它均以路基、涵洞、小桥等简易工程通过。

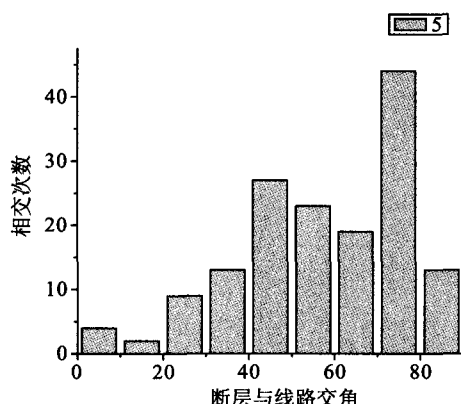


图3 青藏线格尔木至唐古拉北断层与线路交角统计图

Fig. 3 Statistical graph of faults and route intersection angle from Golmud to north of Tanggula, Qinghai-Tibet Railway.

表1 东昆仑活动断裂平均位移速率(据文献[7])

| 断裂分段      | 活动时期                      | 平均位移速率/ $[\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}]$ |
|-----------|---------------------------|-------------------------------------------|
| 库赛湖—昆仑山口  | $Q_3$ 中~ $Q_4$ 初          | 13~14                                     |
| 东西大滩—西藏大沟 | $Q_4$                     | 7.5~9.0                                   |
| 阿兰克湖—托索湖  | $Q_3$ 末~ $Q_4$ 中、 $Q_4$   | 5.0~6.0、8.0                               |
| 托索湖—东倾沟   | $Q_3$ 末~ $Q_4$ 中、 $Q_4$ 末 | 4.0~6.0、6.0~8.0                           |
| 玛沁—玛曲     | $Q_3$ 末~现代、 $Q_4$ 末       | 9.0、12.6                                  |

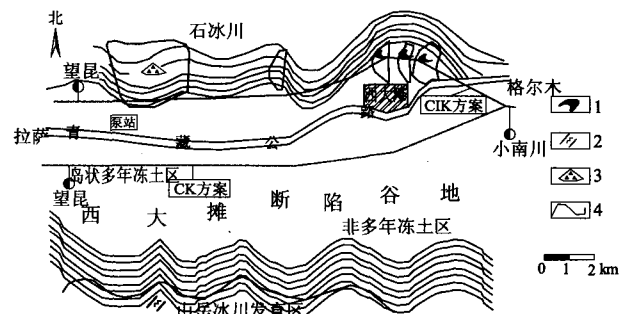
与线路小角度相交或近平行的断裂带影响范围比较大,如当雄—羊八井断裂带( $F_{28}$ ),该断裂带为NE走向,与线路几乎平行,沿断裂有地热分布,泉水多、温度高,多出现喷气现象,而且构造裂缝大,断层破碎带较严重,对工程危害较大。由于断裂带诱发的地质病害较多,并且断裂带与铁路近平行分布,影响区域为较大的条带,进行工程设置较为复杂,因此选线时就尽量远离这些断裂带。又如小南川至望昆地段位于西大滩压性断裂带的边缘附近,北方案是沿该断裂带附近行进,而南方案则远离该断裂带,主要走行于青藏公路左侧的山前洪积扇及河漫滩上而至望昆车站,因此选择了南方案。这类断裂带还

有惊仙谷断裂( $F_2$ )、西大滩断裂带( $F_3$ )、巴拉大才断裂( $F_5$ )、二道沟盆缘断裂( $F_9$ )、乌丽西侧断裂( $F_{10}$ )、布曲河断裂( $F_{12}$ )、温泉弧形断陷带( $F_{14}$ )、江斯托洛山北西麓断裂( $F_{16}$ )、错那东岸断裂带( $F_{22}$ )、那曲断裂带( $F_{23}$ )、谷露—桑雄断裂带( $F_{25}$ )、桑利断裂( $F_{27}$ )、吉达果—安岗断裂带( $F_{29}$ ) (图2)。

### 3 通过活动断裂带地质选线工程实例

由于断裂带容易诱发许多地质病害,因而青藏线的许多区段都是由断裂带决定或影响其线路方案。以下以小南川至望昆地段地质选线和工程布置方案。

青藏铁路小南川至望昆段全长约18 km,线路在该段进入多年冻土地带的边缘—岛状冻土与融区的交汇地区。初步设计方案就工程地质角度而言,可以简化为两大方案:即以青藏公路为界的北方案和南方案,北方案最具代表性的为CIK线路方案,而南方案以CK线路方案最为典型<sup>[15-16]</sup> (图4)。



1. 新月形流动沙丘; 2. 山岳冰川; 3. 石冰川; 4. 不良地质界线

图4 小南川至望昆线路方案及工程地质示意图

Fig. 4 Railway route scheme from Xiaonanchuan to Wangkun and engineering-geological schematic diagram.

在该段青藏公路以北是西大滩压性断裂带的边缘,由于断裂构造的推挤作用,导致岩层松动,地下水发育,加之气候寒冷发育有石冰川,并且属高烈度地震区,所以该断裂对线路是有影响的。而南方案则远离该断裂带,主要走行于青藏公路左侧的山前洪积扇及河漫滩上而至望昆车站。北方案线路在靠近望昆车站附近,在大型石冰川前缘或坡脚一带主要以路堤、局部以路堑形式通过。由于石冰川规模大,又地处高烈度区,加之坡脚一带地下水发育,以下降泉与冰锥形式出露。如果该方案施工一旦破坏了它的极限平衡状态,随时都有可能产生大面积滑塌,给人身、机械安全带来极大威胁。一旦运营,火车的震动也会为石冰川的滑塌产生诱发作用。北方

案线路在石冰川坡脚及下方洪积扇顶部一带有大量落石分布,距离线路近,并且该区处于高烈度地震区,潜在的地质病害极大。在南方案中,地表漫流发育,漫流水源除少量的大气降水外,主要来自其左侧发育的现代山岳冰川暖季的冰雪融水。针对这一现象可以通过适当增加或增大桥涵密度、孔径及导流堤等措施,来解决漫流问题。

综上所述,小南川至望昆段地质选线在充分研究且利用既有地质资料和适当的勘测、勘探手段的基础上,进行了大面积的工程地质调查工作,发现由于北线方案距离西大滩压性断裂带较近,易诱发滑坡、崩塌等病害,因此选定了通过不良地质少、工程地质条件相对较好且断裂构造影响小的CK线路方案。

## 4 结论及讨论

青藏铁路不可避免地要通过活动断裂带,而活动断裂带又容易诱发地震、滑坡、泥石流、温泉、冰丘、地裂缝等一系列地质病害。基于青藏线各典型路段通过的活动断层选线方案和采取相应工程措施,并结合崩塌、滑坡、泥石流等病害选线原则<sup>[16]</sup>,得到通过活动断层采取的主要原则有:

(1) 尽可能避开高级别的活动断层,而选择低级别的;避开活动时期新的断层,选择活动时期老的;避开全新世(12 000 a)内有活动的断层,选择全新世内无活动的断层。

(2) 在与线路平行时若为逆断层或正断层类型,尽可能避开有强烈地表变形和分支、次生断裂发育的断层上盘(逆断层的上升盘、正断层下降盘)。

(3) 线路应选择在工程地质条件良好、地形开阔平坦或缓坡地段,并宜避开近期活动的断层破碎带、易液化砂土、粉土及软土等地基、较厚的松散坡积层、严重的泥石流发育地区以及不稳定的悬崖深谷、严重的山坡变形和易塌陷的地下空洞等不利地段。

(4) 线路尽量与活动断层垂直或高角度(大于 $50^\circ$ )斜交,以使活动断裂对路基影响仅限于横切点及其附近,影响范围小;若与断裂小角度相交或平行,断裂的影响面是相互平行或近于平行的沿线分布的条带状范围,尽量远离断裂带。

(5) 通过主要活动断裂时,尽量在断裂带宽度较窄的地段采用以简易工程大角度通过的选线原则

和尽量不设大中桥、高桥、隧道、高填深挖等难以修复的大型建筑物的原则。

(6) 通过一般活动断裂时,则采取尽量大角度穿越,尽量避免设置高桥,压缩孔跨缩短桥长,对墩台位置进行优化,避免墩台置于断裂带,桥改涵等工程设置原则。

在选线时除了要考虑断裂带以外,还要考虑线路选择对国民经济建设的作用、对生态环境的影响、节省投资等多个方面。因此,铁路选线是多学科、交叉性的科学难题,为此今后还必须进行深入研究。

## [参考文献]

- [1] 李建彪,甘卫军,冉勇康,等. 青藏高原东部构造块体的运动学及形变特征分析[J]. 西北地震学报,2006,28(2):97-103.
- [2] 袁道阳,张培震. 青藏高原新生代构造和第四纪研究的进展及问题讨论[J]. 西北地震学报,2001,23(2):199-205.
- [3] 吴珍汉,叶培盛,吴中海,等. 青藏铁路沿线断裂活动的灾害效应[J]. 现代地质,2003,17(1):1-7.
- [4] 李金城. 拉日铁路雅鲁藏布江峡谷区线路方案比选研究[J]. 铁道勘察,2007,(5):1-6.
- [5] Wu Zhenhan, Patrick J Barosh, Hu Daogong, et al.. Hazards Posed by Active Major Faults along The Golmud-Lhasa Railway Route, Tibetan Plateau[J]. China. Engineering Geology, 2004, 74(3-4):163-182.
- [6] 易明初,吴珍汉,胡道功,等. 青藏铁路沿线南北向活动构造及对路基工程的影响[J]. 地质力学学报,2003,9(4):352-353.
- [7] 吴云生,易明初. 青藏铁路西大滩—拉萨地段活动构造、地质灾害及其工程评价[J]. 地质力学学报,2002,8(2):97-135.
- [8] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994:194.
- [9] 铁道第一勘察设计院. 青藏线格拉段格尔木至唐古拉山地震区划及活动断裂勘察专题工作报告[R]. 兰州,2002:27.
- [10] 周民都. 青藏高原东北缘深地震测深研究成果回顾[J]. 西北地震学报,2006,28(2):189-191.
- [11] 吴珍汉,胡道功,吴中海等. 青藏高原中段活动断层及诱发地质灾害[M]. 北京:地质出版社,2005.
- [12] 刘小凤,杨立明,范兵. 昆仑山口西8.1级地震后青藏高原北部地区地震活动初步研究[J]. 西北地震学报,2003,25(1):52-58.
- [13] 润勇,彭建兵,袁志东,等. 青藏高原隆升的黄土高原构造侵蚀效应[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(7):289-293.
- [14] 王治华. 青藏公路和铁路沿线的滑坡研究[J]. 现代地质,2003,17(4):355-362.
- [15] 魏国俊. 青藏铁路小南川至望昆不良地质地段地质选线[J]. 岩土工程界,2003,6(7):41-45.
- [16] 铁道第一勘察设计院. TB10012—2001 铁路工程地质勘察规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2001.