

南水北调西线工程区地震危险性分析及预测

彭华^{1,2}, 马秀敏²

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 作者已在《青藏高原地质过程与环境灾害效应》文集中, 对南水北调西线调水区地震与活动断裂的关系及其特征进行了论述, 本文通过南水北调西线工程区地震活动特点, 利用区域地震资料采用统计的方法研究地震发生的时空分布特点及预测未来发生地震的可能性。

关键词: 南水北调; 地震; 危险性分析; 地震趋势; 预测

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

南水北调西线工程是从长江上游引水入黄河, 解决我国西北地区和华北部分地区干旱缺水的战略性工程, 是史无前例的巨型跨流域水利工程。工程计划分三期完成, 其中第一期工程由甘孜州的仁达引雅砻江支流鲜水河、达曲、泥曲及大渡河支流麻尔曲、杜柯河水到黄河支流贾曲, 输水线路长 260.3km。工程主体为: “五坝”、“七洞”、“一渡槽”和“一明渠”^①, 穿越不同的地质单元和活动性极强的断裂、地震带, 这些断裂活动速率较快, 地震活动频繁, 对工程施工及安全运营将是一个严峻的考验。

1 地震活动的时空分布特征

从历史地震震中分布图(图1)上看, 工程区范围内地震活动十分频繁, 强震在空间和时间分布上具有明显的不均匀性, 这与地壳应力的分布有着密切的关系^[1~2]。地震活动尤其是南部的甘孜-炉霍一带强度大、频度高、分布密集。工程区南部的雅砻江-达曲引水枢纽位于这一带, 尤其是阿安坝址 1919 年曾发生过 6¼ 级地震。引水隧道的中部 1982 年、1973 年及 1866 年发生过 6 级、5.6 级和 7½ 级强震。工程区西北部是达日-久治地震高发区, 历史上曾发生过 7¾ 级达日莫坝地震, 4 次 6 级地震和 14 次 5 级地震。

据 1990 年中国地震区划, 青藏高原区共分 8 个地震带, 西线调水区全部位于可可西里-金沙江地震带内, 该带是强震活动带, 调水工程区位于该带内中北部地区。相对东西部而言, 地震活动属中等偏下地区, 强震相对较少, 震级多以中等水平为主, 其中有多次大于 7

收稿日期: 2007-02-01

基金项目: 中国地质调查局“南水北调西线第一期工程地壳稳定性调查与评价”项目(编号: 200113000092)。

作者简介: 彭华(1964-), 男, 研究员, 主要从事地应力测量、地质灾害、围岩稳定性和岩石力学与工程施工等方面的研究工作。E-mail: penghuabgs 2005@yahoo.com.cn。

① 彭华等. 南水北调西线第一期工程地壳稳定性调查与评价成果报告[R]. 地质力学研究所, 2004.

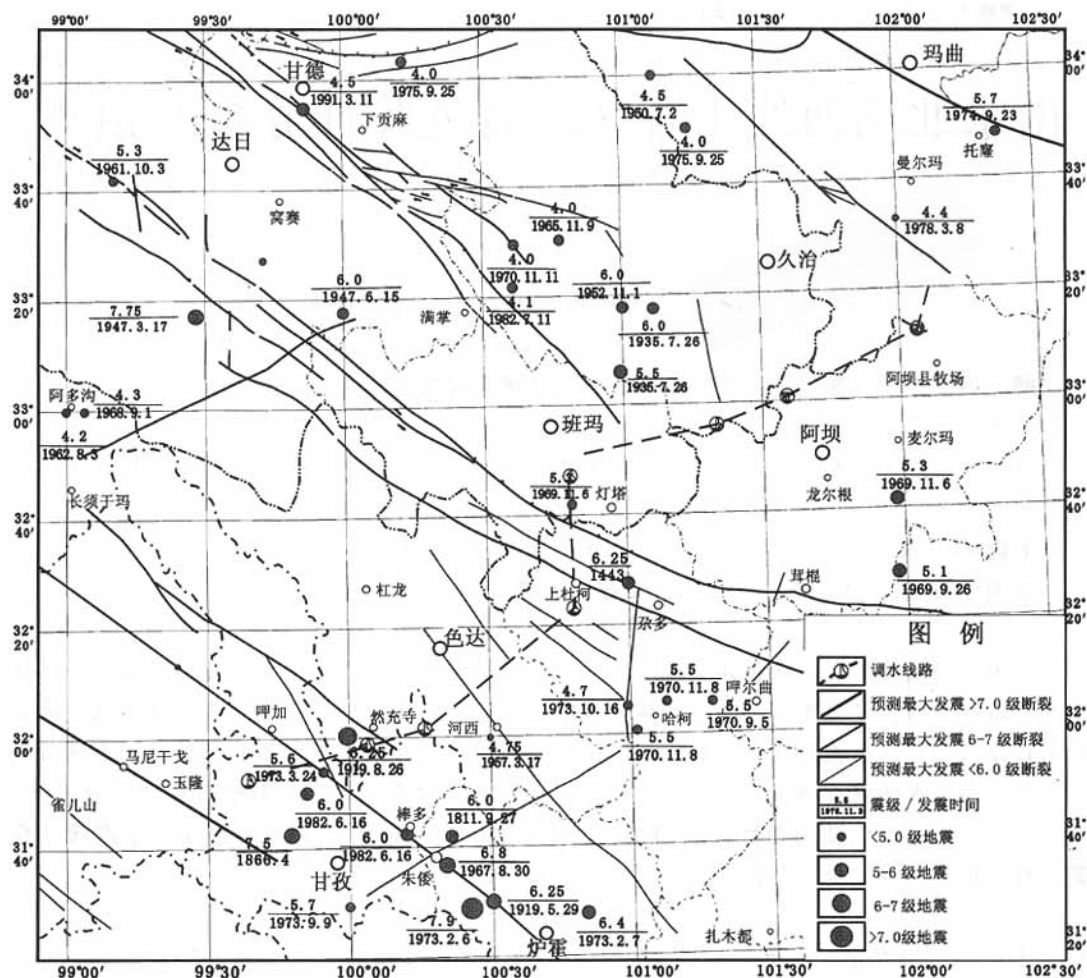


图1 工程区发震断裂及地震震中分布图

Fig.1 Distribution of epicenters and earthquake-triggering faults in the construction area

级的地震。1986年石渠邓柯地震，发震构造为玉树-甘孜断裂，史料记载的大型滑坡堵塞金沙江，即是此次地震所致；1947年达日地震，发震构造为桑日麻断裂的东南活动段，至今沿断裂带保留有长约60km的地震形变带。此外沿甘孜-玉树断裂从石渠向西北方向还发生过两次6级以上地震，鲜水河断裂是区内最强的发震断裂^[3]。

2 工程区地震危险性分析

2.1 地震频度、活动度、能量密度的空间分布

为定量的揭示地震在空间上的不均匀性，利用研究区1866~1991年 $M_s \geq 2.0$ 级地震资料^[4]，对研究区的地震频度、活动度和能量密度进行计算，并绘制它们的等值线图。

1. 地震频度， $N(\phi, \lambda)$ 是指位于纬度 ϕ 、经度 λ 处，在 T 时间段内，平均每年在单位面积(km^2)上发生的 $M_s \geq M_0$ 的地震次数。计算如下：

万方数据

$$N(\phi, \lambda) = N/(S \cdot T)$$

式中: N 为以节点为中心的 $d \times d$ 的矩形面积内 $M_s \geq M_0$ 级地震个数, 这里取 $d = 50\text{km}$ 。

在工程区存在 4 个震中分布集中区, 分别是炉霍 - 甘孜、哈柯、甘德白玉和长须干玛, 地震频度为 23.0、12.0、11.0、8.0 ($\times 10^{-6}$ 个/平方公里·年), 见图 2。

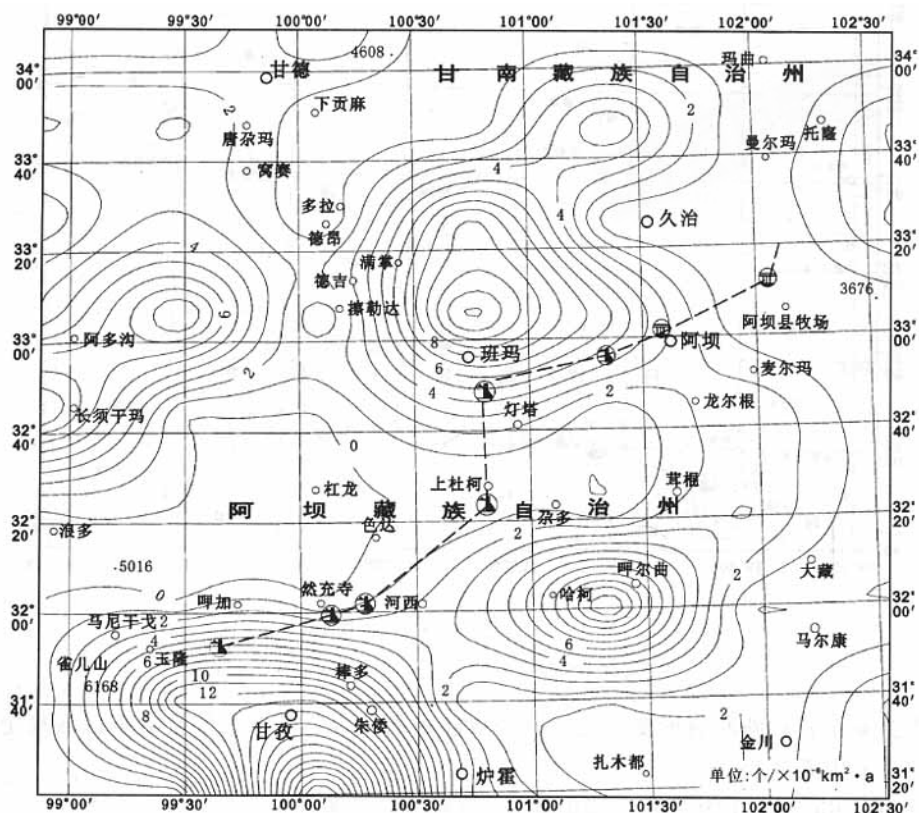


图 2 工程区地震频度图

Fig.2 Frequency of earthquakes in the construction area

2. 地震活动度 $A(\phi, \lambda)$, 是指位于纬度 ϕ 、经度 λ 处, 在 T 时间段内平均每年在单位面积上按震级-频度关系折合成震级为 M 的地震次数。其计算公式如下^[5]:

$$A(\phi, \lambda) = \left(\sum_{i=1}^n 10^b (M_i - M_0) \right) / S \cdot T$$

式中: b 为震级频度关系中的 b 值; M_i 为第次地震的震级; M_0 为折合震级; N 为 S 矩形面积内 $M_s \geq 2.0$ 级地震个数; 其余符号同前。

在工程区存在 4 个地震活动分布集中区, 分别是炉霍 - 甘孜、阿多沟和哈柯, 地震活动度为 7500、500、150 ($\times 10^{-9}$ 个/平方公里·年), 计算结果见图 3。

3. 地震能量密度 $E(\phi, \lambda)$, 是指位于纬度 ϕ 、经度 λ 处, 在 T 时段内平均每年在单位面积上释放的能量。其计算公式如下:

$$E(\phi, \lambda) = \left(\sum_{i=1}^n 10^{11.8+1.5M_i} \right) / S \cdot T$$

式中符号同前。

万方数据

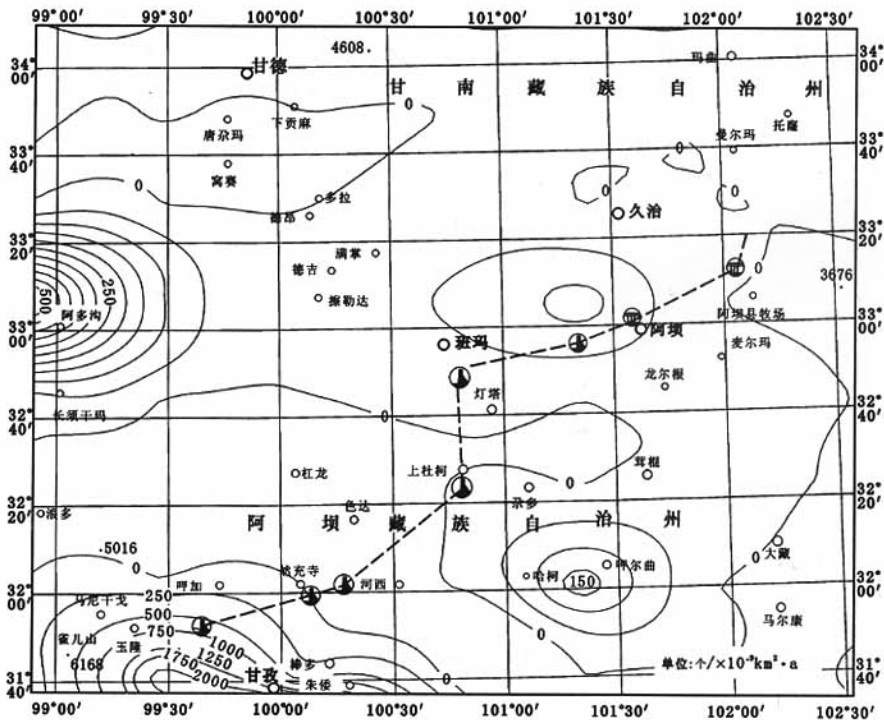


图 3 工程区地震活动度图

Fig.3 Seismicity of the construction area

地震主要是岩石圈断裂形变、位错、释放能量的表现，其活动性是影响区域稳定性评价和分级的重要因素之一。

Gutenberg-Richter (1956) 指出辐射能 E_s 与面波震级关系为：

$$\lg E_s = 1.5 M_s + 11.8$$

式中： E_s —地震辐射能，单位：尔格； M_s —面波震级。

将有史以来所记录到的所有地震按其震级所对应的能量叠加起来，绘制出南水北调西线第一期工程区地震释放能量等值线图（图 4），地震能量释放最多的两个地区是炉霍的旦都和甘孜，分别代表鲜水河发震断裂带和甘孜拉分盆地。85% 的地震能量集中在该区释放，同时也表明了它们是工程区最活动的地震构造^[4]。

工程区的上红科—莫坝一带，是另外一处地震能量释放区，释放了该区 10% 的能量，代表了达日地震带，其发生过的典型地震有达日 8 级地震。

工程区内还有年保玉则—阿坝—壤塘地震能量释放区，面积较大，但释放地震能只占该区的 5%，该带对调水工程影响不大。

无论是频度、活动度还是能量密度，数值较高的地区均在鲜水河西北段的东谷—英达—甘孜—炉霍地区、桑日麻—达日地区、久治果洛山地区和壤塘的南木达—耿达地区，其中鲜水河地区值为最高，桑日麻—达日地区次之。

2.2 地震活动的时序特征

为了判断未来地震活动的趋势，给地震活动性参数的确定提供依据，本文研究了地震时间序列特征。图 5 和图 6 是南水北调西线工程区 $M_s > 4.0$ 级地震频度曲线和累积频次曲线，万方数据

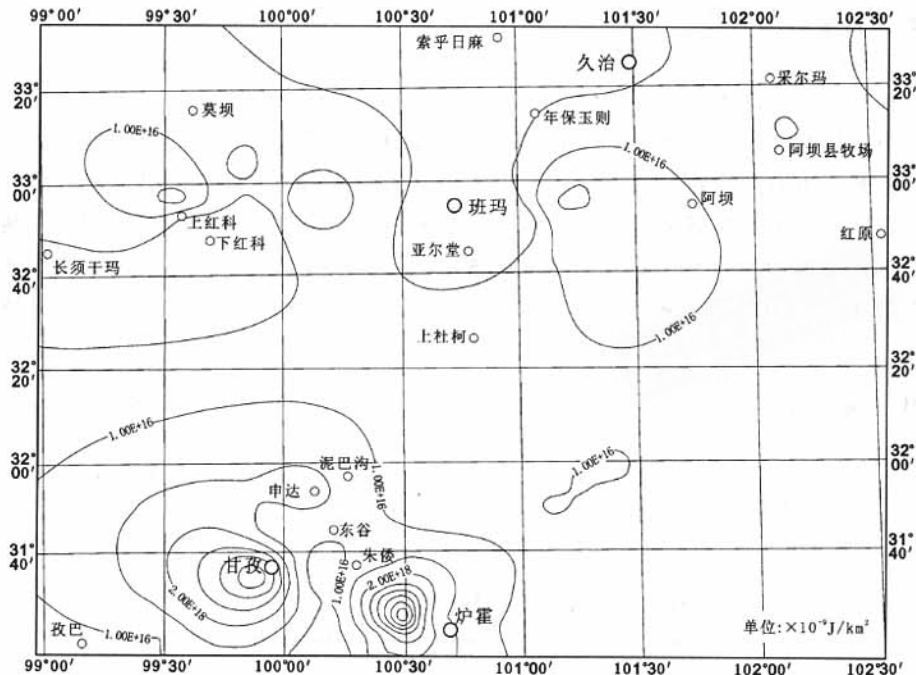


图 4 工程区地震释放能量等值线图

Fig.4 Isopleths of earthquake release energy in the construction area

通过对地震空间分布的研究可以看到，尽管 1900 年以前地震记录不完整，但还是可以看出研究区的地震活动在时间序列上主要集中在 1730 ~ 1750、1775 ~ 1825、1900 ~ 2000 年 3 个活动时段，活动期与非活动期相对出现，大致有 50 年的周期。最近两次活动期是 1925 ~ 1940 年和 1950 ~ 1990 年。

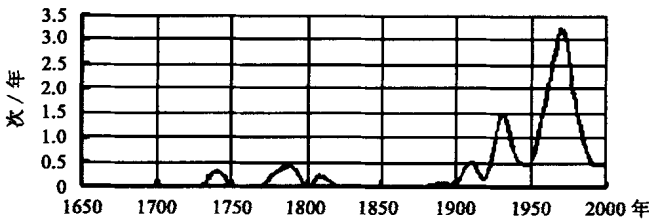


图 5 南水北调西线地区地震 $M_s > 4.0$ 级频度曲线

Fig.5 Frequency curve of earthquakes of $M_s > 4.0$ in the construction area

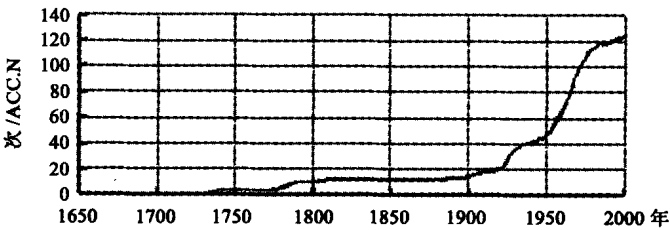


图 6 南水北调西线地区地震 $M_s > 4.0$ 级累积频次数曲线

Fig.6 Cumulative frequency curve of earthquakes of $M_s > 4.0$ in the construction area of the west line of the south-to-north water diversion project

2.2.1 地震活动的周期性

地震活动随时间分布是不均匀的,具有活跃、平静互相交替的周期性变化。在活跃期,地震活动频度高,强度大,而在平静期,地震活动水平较低^[6~8]。

鲜水河地震断裂带北段是影响工程区稳定性的主要地震带,工程区范围内 80% 的破坏性地震与该断裂带有关,在此重点论述工程区南部的鲜水河带北段的地震活动趋势。在时间尺度上地震期是一个地震盛衰过程,在鲜水河地震带上,它的时间约 160~220a,其中盛期约 90~120a,衰期约 70~100a。为了显示地震活动的周期性变化,图 7 给出了工程区鲜水河地震断裂带北段的 M-T 图。从图中可以看出,西线调水区和鲜水河带北段都有明显的周期性。

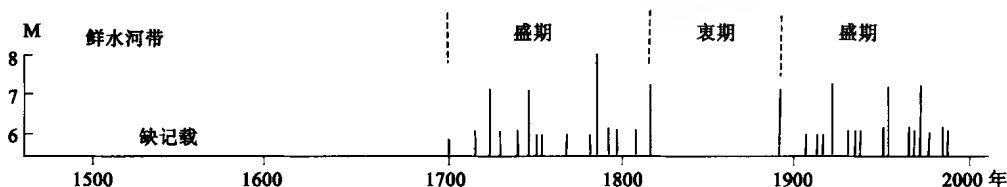


图 7 鲜水河断裂地震 M-T 趋势图 (据四川地震局)

Fig. 7 M-T trend of the earthquake related to the Xianshuihe fault

鲜水河地震带 1700 年以后的盛、衰交替的活动过程如下:鲜水河带在 1725~1816 年地震盛期内,北西段及南段各自相邻重复发生了一对地震,即北西段的 1747 年与 1816 年地震、南东段的 1725 年和 1786 年地震,重复间隔的时间分别为 69a 及 61a。其中最大地震为 1786 年 6 月 1 日泸定磨西大地震。在 1891 年以来的最近一次盛期内,鲜水河带上发生了 1893 年、1923 年、1955 年、1973 年 4 次大地震,其发震间隔、重复方式、迁移路径,类同于 1725~1816 年的前一盛期。

而西线调水区自 1493 年以来也显示和川西高原地震区大致相对应的地震活动期。第三活动期的频度、能量都小于第二活动期,能量释放曲线也显示第三活动期所释放的能量小于第二活动期所释放的能量,因而可以认为,该调水区第三活动期处于剩余应变释放阶段,活动水平会持续一段时间。

2.2.2 熵谱分析

设有等间隔 Δt 的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 其中 n 为样本数。对于这一过程的最大熵值 $f(T)$ 为^[3]:

$$f(T) = \frac{\sigma_{k_0}^2 \Delta t}{\left| 1 - \sum_{j=1}^{k_0} b_{jk_0} e^{ij2\pi/T\Delta t} \right|}$$

式中: T —周期长度;

b_{jk_0} —阶数为 k_0 的预报误差过滤系数;

σ_{k_0} —阶数为 k_0 的预报误差方差。

对研究区内鲜水河北段的地震资料均以等间隔 10a 取样,并进行平滑处理,得到了研究区存在 50a 的显著周期,达日-久治地区存在 150a 显著周期。

2.2.3 周期图分析

将地震序列 $x(t)$ 看成随机过程,用周期图分析方法对 $x(t)$ 进行分析,识别由随机

干扰而失真的隐含周期，取以下隐含周期模型拟合 $x(t)$ 。

$$x(t) = a_0 + \sum_{j=1}^l (a_j \cos \omega_j t + b_j \sin \omega_j t) + Y(t)$$

式中： $a_0, a_j, b_j, \omega_j, l$ 为待定系数； $Y(t)$ 为随机干扰； $T = 2\pi/\omega_j$ ($j = 1, 2, \dots, l$) 为经识别得到的隐含周期。

如果地震序列 $x(t)$ 存在周期，可能的周期有 $T_k = N/k$ ，为了从这些可能周期 T_k 中得到 $x(t)$ 的真正周期，给出 Fisher 分布，利用 Fisher 检验来确定 $x(t)$ 的真正周期。经分析计算得到了鲜水河带北段存在 50a 的显著周期。

3 未来百年地震趋势的评估

3.1 根据震级 - 频度关系的预测

地震活动符合古登堡 - 里克特的震级 - 频度关系式：

$$\lg N = a - bM$$

式中的 b 值为一个区域内不同大小地震频数的比例。它和该区应力状态与地壳破裂强度有关，不同的地震区或地震带有其相应的 b 值分布。

b 值的统计由该区域或地震带内实际拥有的地震数据统计而得，它与实际资料的完整性、可靠性、统计样本量的大小、取样的时空范围、样本的起始震级和取样间隔等都有关系。

利用上式对最大震级和未来百年地震进行估计。

1. 最大震级的估计

利用公式 $\lg N = a - bM$ ，可以进一步导出其最大震级：

$$M_u = \frac{a}{b} + \frac{1}{b} \lg(b \ln 10) - \frac{1}{2b} \lg(1 + \ln 10)$$

对研究区使用自公元 1300 年以来的地震资料，运用国内的研究结果^[9]，鲜水河断裂带 a/b 值统计结果为： $b = 0.736$ ， $a = 6.416$ ，方差 $s = 0.05$ ，相关系数 $r = 0.997$ 。

鲜水河地震带北段震级 - 频度关系为：

$$\lg N = 6.416 - 0.736M$$

根据上式，分别求出 M_u ，具体预测震级值如表 1 所示。

从表 1 可以看出，自公元 1493 年以来，在研究区和鲜水河地震带北段上所发生地震的最大震级与计算值基本相符（见图 8），因此，认为达日 - 久治地震带和鲜水河地震带北段再发生最大震级为 7.5 和 8.0 级。

表 1 最大震级估计

Table 1 Estimation of the greatest magnitudes

地震区、带	计算最大震级 M_s	实际发生地震
达日 - 久治带	7.5	7.25
鲜水河带北段	8.0	7.9

3.2 应变释放速率估计

利用能量与震级的关系： $\lg E_s = 1.5M_s + 11.8$ ，可以求出不同震级的平均地震应变能量释放速度，依此预测未来百年研究区和鲜水河地震带北段可能积累的应变能，从而对研究区和鲜水河地震带北段未来百年地震趋势加以估计。

对调水区和鲜水河地震带北段，均选用公元 1493 年以来的 5 级以上地震资料，分别计万方数据

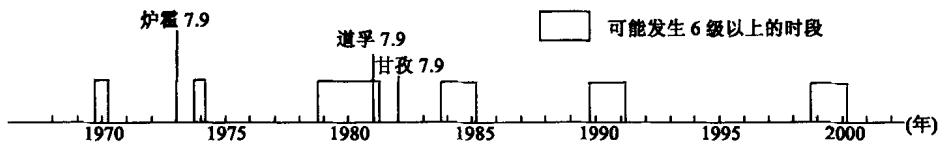


图 8 鲜水河断裂地震趋势图 (据四川地震局)

Fig.8 Earthquake trends of the Xianshuihe fault

算出 5 级、6 级、7 级地震平均地震应变能释放速率, 得到未来百年研究区和鲜水河地震带北段可能积累的应变能如表 2 所示。

表 2 应变能量释放速率估计

Table 2 Estimation of strain energy release rates

地震区、带	计算震级/M	未来百年所积累的能量/J	震级与能量换算表	
			能量/J	震级/M
调水区	5	3.09×10^{14}	3.55×10^{14}	6.5
	6	2.43×10^{14}	2.51×10^{14}	6.4
	7	1.21×10^{14}	1.26×10^{14}	6.2
鲜水河带北段	5	2.80×10^{14}	2.51×10^{14}	6.4
	6	2.21×10^{14}	1.79×10^{14}	6.3
	7	1.73×10^{14}	1.79×10^{14}	6.3

巴颜喀拉山地震带自 1923 年以来, 该带 6 级以上地震平均发生率为 27%。应变释放出现了两个不同斜率的线性阶段, 1923 ~ 1947 为第一个阶段, 1949 ~ 2000 年为第二个阶段, 6 级地震发生率为 23%。

鲜水河地震带自 1493 年以来经历了三个活动期, 1493 ~ 1687 年是一个比较完整的活动期, 1725 ~ 1816 年为第二个活动期, 1891 年以来为第三个活动期, 三个活动期长度分别是 106a、143a 和 95a, 其间共发生 8 级以上地震 6 次。由图 9 可见, 自 1893 年以来所释放的能量不高于前一个活动期所释放的能量。由此可以推测, 第三活动期还没有结束。

研究区属于青藏高原 - 川西 - 青南地震区的一部分, 与整个青藏高原东部及周边地区的序列特征进行比较, 可以对研究区的序列特征认识更加清楚^[10-14]。川西地震区从 17 世纪以来, 已经历了两个完整的地震活动期, 第一活动期为 1725 ~ 1816 年, 第二活动期为 1893 年至今。自公元 1700 年以来, 该区发生过 7.0 ~ 7.9 级地震 8 次, 6.0 ~ 6.9 级地震 17 次。这些地震交替发生, 如 1967 年 8 月 30 日, 位于鲜水河断裂带北西段的炉霍县朱倭附近发生了一次 6.8 级地震, 1973 年 2 月 6 日炉霍又发生了一次 7.9 级的地震, 1981 年 1 月 24 日在道孚发生 6.9 级地震, 1982 年 6 月 16 日在甘孜又发生 6.0 级的地震, 呈现出了若干次地震活动期和平静期, 规律性较强。

我国西北地区大地震迁移的研究结果表明: 该区存在 7.5 级以上地震沿着深大断裂带迁移, 迁移方向总的趋势是由南向北、自东向西, 迁移距离为 300 ~ 500km, 迁移的下一个地段一般为大地震的空段。100 余年来, 在这个迁移轮回中, 沿此迁移路线未曾发现 7.5 级以上地震的重复发生现象, 由此推测, 近几十年甚至上百年内再在达日附近发生较大地震的可能性不大。但线路区南部的鲜水河 - 甘孜 - 玉树地震带活动性较强, 近几十年来发生了 6 级

万方数据

以上的地震 10 余次，统计 7 级以上地震重现期为 50a，因此，在工程有效期 100 年内，工程区发生 7 级以上强震的可能性非常大。

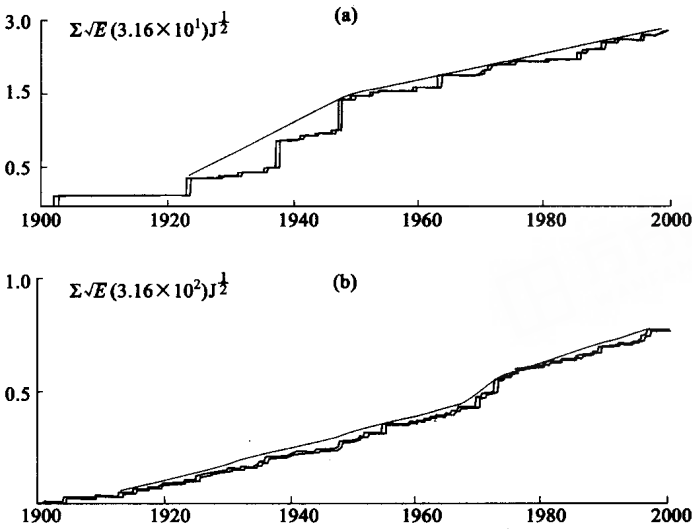


图 9 区域地震带对应变释放曲线图（据四川地震局）

Fig.9 Strain release curve corresponding to regional earthquake belts

a. 巴颜喀拉山地震带；b. 鲜水河地震带

4 结论

1. 通过对工程区地震频度、活动度、能量密度分析，结果表明在工程区存在 4 个震中分布集中区，分别是炉霍 - 甘孜、哈柯、甘德白玉和长须干玛，地震频度为 23.0、12.0、11.0、8.0（个/ $\times 10^{-6}$ 平方公里·年）；3 个地震活动分布集中区，分别是炉霍 - 甘孜、阿多沟和哈柯，地震活动度为 7500、500、150（个/ $\times 10^{-9}$ 平方公里·年）；地震能量释放最多的两个地区是炉霍的旦都和甘孜，分别代表鲜水河发震断裂带和甘孜拉分盆地，有 85% 的地震能量集中在该区释放。

2. 根据震级 - 频度关系，运用古登堡 - 里克特的震级 - 频度关系式，估计出达日 - 久治地震带和鲜水河地震带北段再发生最大震级为 7.5 和 8.0 级。

3. 根据调水区的应变释放速率，推测巴颜喀拉山地震带和鲜水河地震带北段的地震发生概率。自 1923 年以来，巴颜喀拉山地震带 6 级以上地震的平均发生率为 27%。自 1493 年以来，鲜水河地震带北段的地震活动显示了与整个鲜水河地震带相对应的地震活动期，且第三活动期还没有结束。

4. 综合前述地震活动时序分析结果，调水工程所在的川西地震区从有史记录以来，已经历了两个完整的地震活动期，第一活动期为 1725 ~ 1816 年，第二活动期为在 1893 年至今。这些地震交替发生，呈现出了若干次地震活动期和平静期，规律性较强。

5. 对西北地区历史地震的迁移规律和地震活动的阶段性分析认为，近几十年甚至上百年内，在达日附近发生较大地震的可能性不大；但线路区南部调水工程区在未来百年内发生 7 级以上强震的可能性在非常大。研究区存在 50a 左右的活动周期。

参考文献

- [1] 彭华, 崔巍, 马秀敏, 等. 南水北调西线第一期工程调水区水压致裂地应力测量及其工程意义 [J]. 地质力学学报, 2006, 12 (2): 182~190.
- [2] 马秀敏, 彭华, 李金锁, 等. 新疆西部地应力测量在隧道工程中的应用 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (4): 386~393.
- [3] 四川地震局. 鲜水河断裂带地震学术讨论会文集 [C]. 地震出版社, 1985.
- [4] 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录 [M]. 地震出版社, 1995.
- [5] 国家地震局震害防御司. 地震安全性评价工作规范 [S]. 国家地震局工程地震研究中心, 1994.
- [6] 赵成斌, 孙振国, 刘保金, 等. 邢台地震浅部构造特征及其与深部构造的耦合关系 [J]. 地震地质, 1999, 21 (4): 417~424.
- [7] 毓顺民, 李志义, 程绍平, 等. 唐山地震区地质背景和发震模式讨论 [J]. 地质科学, 1977 (4).
- [8] 向宏发, 方仲景, 徐杰, 等. 三河-平谷 8 级地震区的构造背景与大震重复性研究 [J]. 地震地质, 1988, 10 (1): 15~37.
- [9] 黄纬琼, 时振梁, 曹学锋. b 值统计中的影响因素及危险性分析中 b 值的选取 [J]. 地震学报, 1989, 11 (4): 351~361.
- [10] 中国地震局地质研究所. 地震危险性预测研究 (1999 年度) [M]. 地震出版社, 1998.
- [11] 中国地震局分析预报中心. 中国地震趋势预测研究 (2001 年度) [M]. 地震出版社, 2000.
- [12] 中国地震局分析预报中心. 中国地震趋势预测研究 (2003 年度) [M]. 地震出版社, 2002.
- [13] Xiang Hongfa, Zhang Wanxia, Li Rucheng. Deformation zone of the 1679 Sanhe-Pinggu M = 8. 0 earthquake and buried active faults. In: Proceedings of the 30th International Geological Congress, 1996, Beijing, China.
- [14] King C. Y. Episodic radon change in subsurface soil: Gas along active faults and possible relation to earthquakes [J]. J. G. R. 1980, 85 (B6): 3065~3078.

RISK ANALYSIS AND PREDICTION OF EARTHQUAKES IN THE CONSTRUCTION AREA OF THE WEST LINE OF THE SOUTH-TO-NORTH WATER DIVERSION PROJECT

PENG Hua^{1,2}, MA Xiu-min²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The paper discusses the distinguishing features of earthquake activities in the construction area of the west line of the project of water diversion from the upper Yangtze River in the south to the upper Yellow River in the north. According to these features, by using the regional earthquake data and statistical method, the characteristics of temporal-spatial distribution of earthquakes occurring in the area are discussed, and in addition, the possibility of occurrence of earthquakes in the area in the future is predicted.

Key words: water diversion from the upper Yangtze River in the south to the upper Yellow River in the north; earthquake; risk analysis; earthquake trend; prediction