

“集中降雨”与浅层承压井水位及 区域地震活动关系的初步研究^①

赵小茂¹, 黄辅琼², 王新¹, 戴王强¹, 韩美涛¹

(1. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068; 2. 中国地震台网中心, 北京 100036)

摘要:以陕西省宝鸡市凤翔井为例, 统计分析了2001—2006年降雨与地下水位之间的关系, 发现“集中降雨”对浅井水位的影响较为明显, 并在一定降雨量范围内呈指数关系。讨论了降雨通过荷载、进入断层面及改变地下水位埋深三个方面的作用改变了断层的有效应力, 这种区域构造应力场的调整可能对区域中强地震活动具有触发作用。

关键词: 凤翔井; 集中降雨; 降雨影响系数; 地下水位; 地震活动

中图分类号: P315.72⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2009)03-0259-06

Preliminary Study on Relationship among the Concentrated Rainfall, Groundwater Level and Regional Seismicity

ZHAO Xiao-mao¹, HUANG Fu-qiong², WANG Xin¹, DAI Wang-qiang¹, HAN Mei-tao¹

(1. Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China;

2. China Earthquake Network Center, CEA, Beijing 100045, China)

Abstract: The relationship between rainfall and groundwater level is statistically analyzed from 2001 to 2006 at Fengxiang well in Baoji city of Shaanxi province. The result shows that Concentrated Rainfall obviously affect shallow well level and the both relate with a index within a definite confine. The influences of rainfall to effectively stress of fault are discussed in three ways such as rainfall loaded, filtering into fault surface and groundwater level altered. The effect to regional stress field can trigger moderate-strong earthquakes.

Key words: Fengxiang well; Concentrated rainfall; Influence coefficient of rainfall; Groundwater level; Seismic activity

0 引言

人们很早就注意到地震前的气象异常现象。早在1755年(清乾隆二十年)汪绎辰所撰写的地方志《银川小志》中就有关于降雨与地震关系的记载:“宁夏地震, 春冬居多, 至若秋多雨水, 冬时未有不震者”, 即道出了地震与降雨的关系。由于降雨是地下水主要的补给来源, 地下水又是地壳中十分活跃的组成部分, 因此在研究地震地下水时须将降雨作为一个重要因素加以分析。

1966年邢台地震后, 我国地下水位观测井网逐步建立起来, 研究人员对地下水位的映震理论进行了广泛、深入的研究, 取得了多方面的成果。地震的孕育和发生, 实质上是地壳岩石受力变形破坏的过程。车用太等人经过一系列的理论与实验观测分析指出:“地下水微动态形成机理可分解为岩土力学过程和水动力学过程”^[1]; 黄辅琼系统分析了八宝山断层与降雨的关系后指出, 降雨和地下水有可能通过改变断层变形行为方式而影响着区域构造应力、

① 收稿日期: 2008-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(40674024)和(40374019); 地震科学联合基金(1040106); 陕西省科技厅抗雪救灾应急计划项目(2008KBZ03)及陕西省地震局青年科研基金

作者简介: 赵小茂(1976-), 男(汉族), 陕西三原人, 工程师, 主要从事地下流体分析预测及研究工作。

应变的调整^[2];陆明勇研究了北京大灰厂台地下水与地壳变形的相互作用及关系,指出断层活动受构造应力和降雨及地下水产生的流体力的双力源的共同作用,地震前兆的产生是双力源即构造应力和流体力联合作用的结果;同时指出构造应力的作用是第一位的,地下流体力则是附加的、调制性的,只有那些能与地震孕育构造应力增强过程产生力学耦合的地下流体力才能调制与诱发出地震前兆异常并促使地震发生^[3];王吉易在研究了 20 世纪 60 年代以来国内外地震学者提出了许多地震前兆模式,如扩容模式(DD 模式),裂缝串通模式(IPE 模式)等,认为“已有的一些主要孕震模式在解释某些实际大地震前兆现象时也会遇到困难”,于是提出“水诱发浅层异常机理”^[4];汪万红等对秦岭北缘断裂带温泉水循环深度与地震活动性的关系进行了分析,从水对断裂及围岩有弱化角度讨论了温泉水深循环对地震活动性的影响^[5]。

众多学者的研究与探索可以概括为两个方面,一是岩石在受构造应力引起的变形破坏过程中产生的流体微动态变化;二是地下流体动态变化对于岩石变形破坏的反作用。得到的普遍认识是:地下流体既可以极其灵敏地反映岩石的变形过程,又能对岩石变形产生不可忽视的影响。

笔者通过对凤翔井近年来资料的分析发现,在每年的降雨期或降雨期结束后的一段时间,鄂尔多斯块体周缘或南北地震带的中北段大都会发生 5~6 级地震,本文统计分析陕西省宝鸡市凤翔井的降雨特别是“集中降雨”与水位的关系,并结合跨断层水准测量结果讨论降雨与水位变化及周邻地震的关系。

1 凤翔井观测条件及区域地质概况

1.1 区域地质背景

凤翔井位于陕西省宝鸡市凤翔县董家河乡枣子河陕西省少年劳教所(107°20'3"E,34°38'8"N),构造上处于渭河断陷盆地的西部,位于 NW 向岐山—马召断裂带的北侧。在大地构造上位于鄂尔多斯块体的西南缘,与西邻的甘东南同属南北地震带的北中段。区内 NE 向突出的弧形断裂较为发育,第四纪以来以强烈的挤压及左旋走滑运动区别于鄂尔多斯边缘的其它活动断裂^[6]。鄂尔多斯周缘及甘东南部分地壳厚度和重力变化明显,地质构造复杂,活动断裂发育。受青藏板块水平挤压作用和垂直差异运动的影响,鄂尔多斯周缘及南北地震带甘东南部分强

震活动频繁,历史上曾发生过多次 8 级以上大震。

1.2 观测条件

凤翔井 1971 年 10 月由建工部综合勘察院西北分院钻探成井,完钻深度 125 m,成井深度 120 m,套管下至 120.00 m 深处。透水段在 48.20~116.83 m 之间;观测含水层为白垩系砂砾岩层间承压水层;地下水补给类型以异地补给为主。井区地貌为浅山区河流一级阶地。

凤翔井现使用 SW40-1 型自记水位仪观测,仪器精度达毫米级。该井远离干扰区,观测环境较为优越。就多年的观测情况来看,凤翔井水位具有清晰的年变动态,水位上半年下降,下半年上升,水位回升的迟早与区内雨季到来的迟早有关。该井潮汐及气压效应较为明显。降雨为凤翔井水位变化的主要影响因素。

2 降雨与井水位变幅的关系

2.1 年降雨量与井水位年动态的关系

大气降水渗入补给是地下水最主要的补给来源,其数量受到众多因素的影响,与降水的强度及形式、植被、地形、包气带岩性、地下水的埋深等密切相关。

多年的观测资料表明,凤翔井水位受降雨影响明显,为降雨补给型年变动态。由于凤翔井地下水补给类型以异地补给为主,水位在每年雨季中后期开始回升,次年 1—2 月份达到最高值,水位峰值较降雨峰值滞后时间约半年。

2.2 “集中降雨”与短期水位变化的关系

从短期观测资料来看,每次“集中降雨”时段后的凤翔井水位都会出现快速上升过程。由于凤翔井补给类型主要为异地补给,分析认为这一水位上升过程主要受制于地表径流所引起的荷载作用。当降雨增强时荷载作用明显增加,如 2003 年(见图 1)。

由于凤翔井为浅层承压井,透水段在 48.20~116.83 m 之间,降雨对水位的影响较为明显。本文对该井 2001—2006 年“集中降雨”时段进行逐一分析。

根据降雨及影响特征,这里提出的“集中降雨”指降雨量在 20 mm 以上的单次或降雨间隔不超过 6 天的降雨过程。

将每一次集中降雨时段的降雨量、水位变幅、降雨降雨影响系数分别进行了统计(表 1)。其中降雨影响系数为水位变幅与降雨量之比,即单位降雨量水位的变化幅度。

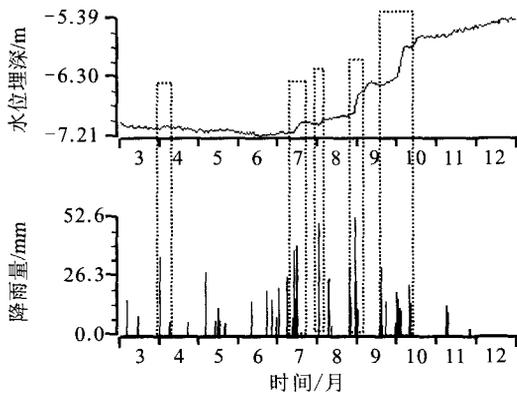


图1 2003年凤翔井水位与降雨曲线图

Fig.1 Comparison diagrams of groundwater level in Fengxiang well and rainfall.

表1 凤翔井“集中降雨”时段的水位变化数据及降雨影响系数表

| 年份 | 降雨时段 | 降雨量/mm | 水位变幅/mm | 降雨影响系数 |
|------|-------------|--------|---------|--------|
| 2001 | 4-19 | 24.0 | 17 | 0.71 |
| | 6-8~6-15 | 38.8 | 35 | 0.90 |
| | 7-24~7-28 | 41.3 | 28 | 0.68 |
| | 8-30~9-2 | 48.0 | 45 | 0.94 |
| | 9.16~9.26 | 113.2 | 103 | 0.91 |
| 2002 | 4-28~5-5 | 45.5 | 60 | 1.32 |
| | 5-16~5-22 | 37.7 | 27 | 0.72 |
| | 6-9 | 23.5 | 8 | 0.34 |
| | 6-17~6-29 | 40.0 | 56 | 1.4 |
| | 7-23~8-17 | 161.8 | 65 | 0.4 |
| 2003 | 9-11~9-20 | 73.6 | 73 | 0.99 |
| | 3-31 | 35.0 | 58 | 1.66 |
| | 7-11~7-15 | 101.5 | 137 | 1.35 |
| | 8.1 | 50.0 | 68 | 1.36 |
| 2004 | 8.24~8.31 | 154.5 | 514 | 3.33 |
| | 9.16~10.10 | 172.9 | 604 | 3.49 |
| | 7-15 | 41.6 | 31 | 0.75 |
| | 7.25~7.31 | 52.2 | 34 | 0.65 |
| 2005 | 8.15~8.23 | 61.5 | 42 | 0.68 |
| | 9.17~9.24 | 66.5 | 63 | 0.94 |
| | 10.10~10.23 | 29.8 | 103 | 3.46 |
| | 6-30~7-2 | 64.8 | 34 | 0.52 |
| 2006 | 7-24~8-2 | 80.0 | 41 | 0.51 |
| | 8-18~8-19 | 27.0 | 40 | 1.48 |
| | 9-16~10-1 | 144.3 | 320 | 2.22 |
| | 5-4~5-11 | 32.0 | 59 | 1.84 |
| 2006 | 7-21~7-22 | 51.0 | 32 | 0.63 |
| | 8-14 | 50.0 | 27 | 0.54 |
| | 8-24~9-3 | 77.3 | 114 | 1.47 |
| | 9-22~9-29 | 62.8 | 122 | 1.78 |

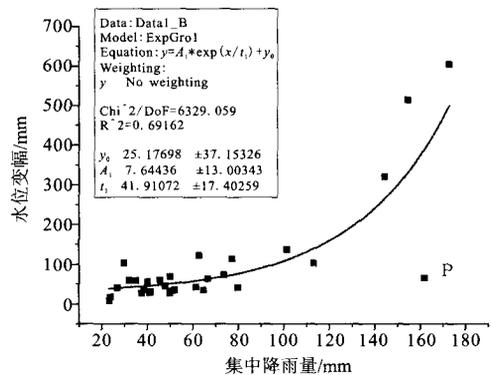
通过分析发现,降雨量加载对水位的影响呈明显的指数关系,图2(a)中P点数据远离拟合线,是因为2002年7-8月凤翔井附近一水塘底部漏水,对7月23日-8月17的一组数据影响较大(表1)。

对P点剔除后拟合相关系数 R^2 达0.94;图2(b)拟合的水位变幅(y)受降雨量(x)影响的优势公式为

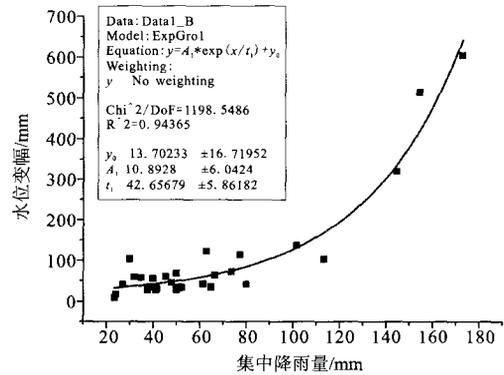
$$y = 10.89 \times e^{(x/42.66)} + 13.70$$

$$(24.0 \leq x \leq 172.9)$$

上式可做经验公式应用于该井降雨量与水位变化关系的分析中。由于水位对降雨的响应程度还受降雨强度、降雨量、水位埋深、区域构造应力场等众多因素的制约,故这一经验公式应具有相应的边界条件。我们这里将本次研究的最小与最大集中降雨量即 $24.0 \leq x \leq 172.9$ 作为其边界条件,当超越这一边界条件后需作重新分析。



(a) 全部数据分析结果



(b) 剔除干扰点(P)后分析结果

图2 凤翔井水位的降雨影响系数图

Fig.2 The influence coefficients of rainfall effect to groundwater level in Fengxiang well.

3 “集中降雨”与断层及地震活动关系的讨论

3.1 “集中降雨”与断层活动关系

地壳变形与地下流体之间既相互联系又相互影响,而地壳形变异常是地壳构造活动最直接的表现,是物理含义最为明确的地震前兆之一^[7]。短水准是观测区域地壳变形的一个重要手段,为此我们收集了2001-2006年岐山-马召断裂带上的大源、广济、南大同三条跨断裂水准测量结果(图3、4)。从

资料分析结果看,三条跨断层水准测量都不同程度地受到降雨的影响作用,“集中降雨”后,水准数据都产生了较为明显的转折,其中2003年的强降雨对水准影响作用较为显著。

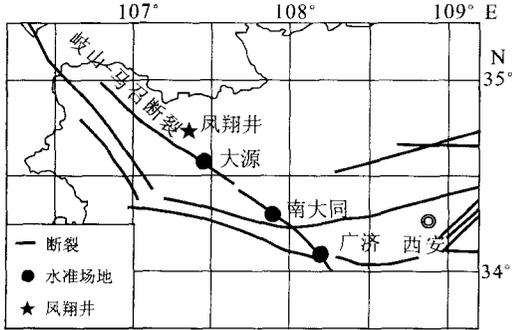


图3 凤翔井与岐山—马召断裂及水准测点位置图
Fig. 3 Location of Fengxiang well and leveling point along the Qishan-Mazhao fault.

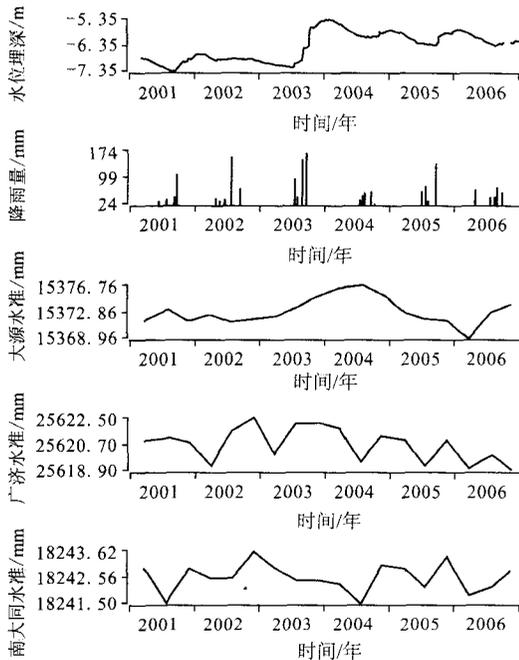


图4 凤翔井水位、区域降雨量与附近跨岐山—马召断裂水准测量曲线对比图

Fig. 4 Comparison diagrams of groundwater level in Fengxiang well, regional rainfall and leveling curves at some points along Qishan-Mazhao fault.

实验表明,对于一个应力状态尚未达到破坏或滑动水平的岩体(断层)而言,水的进入会使它更接近破坏或滑动状态,从而降低系统的稳定性^[8]。降雨对地壳形变的影响作用可以分为三个过程:(1)降雨的荷载作用。(2)降雨下渗进入断层面改变其作用力,表现在增大空隙压力,减小断层面的剪切强度,或者减小断层面间的摩擦力,从而引起区域地壳

形变。还有学者认为,水对岩石的物理、化学作用改变了断层间的作用力,同样引起区域地壳形变。(3)降雨引起地下含水层的上升而引起应力的调整,进而引起地壳形变。

3.2 “集中降雨”与地震活动关系

由于凤翔井处于鄂尔多斯块体的西南缘,西临甘东南地震活动区,故以鄂尔多斯块体及甘东南(103°00'E~114°00'E,30°00'N~42°00'N)为研究区域。地震目录选取研究区域内2001—2006年 $M_s \geq 5.0$ 的地震(图5)。研究区该时间段内共发生 $M_s \geq 5.0$ 地震6次,其中甘东南发生的3次地震与凤翔井的井震距在300 km左右,其它3个地震距离稍远(表2)。

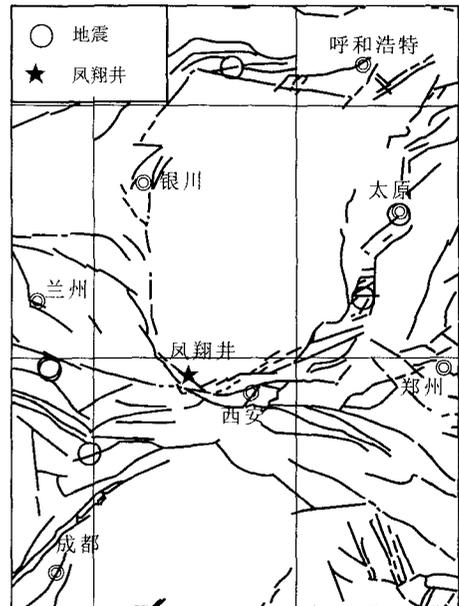


图5 凤翔井区域构造及区内5~6级地震分布图

Fig. 5 The sketch map of regional structure and $M5 \sim 6$ earthquake at Fengxiang Station.

表2 2001—2006年鄂尔多斯周缘及甘东南5级以上地震目录

| 日期 | 震级/M | 震中位置 | 井震距/km |
|------------|------|--------|--------|
| 2001-06-05 | 5.0 | 内蒙古杭锦旗 | 720 |
| 2002-09-03 | 5.0 | 山西太原市 | 620 |
| 2003-11-13 | 5.5 | 甘肃卓尼县 | 310 |
| 2003-11-25 | 5.0 | 山西洪洞县 | 450 |
| 2004-09-07 | 5.2 | 甘肃岷县 | 310 |
| 2006-06-21 | 5.4 | 甘肃文县 | 260 |

通过凤翔井水位的降雨影响系数与地震关系可以看出(图6),研究区域内地震都发生在降雨期或降雨期后两个月内。其中2003年降雨量为40年来最大的一次,年降雨量达767.6 mm(表3),远大

于近年来的 488.0 mm 的平均降雨量,这一集中降雨结束后的两个月连续发生了 11 月 13 日甘肃卓尼县 $M_s5.5$ 地震和 11 月 25 日山西洪洞县 $M_s5.0$ 地震。

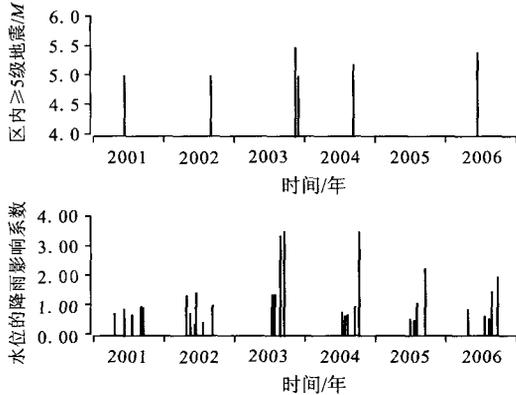


图 6 凤翔井水位降雨影响系数与地震关系图

Fig. 6 Relationship of seismicity and the influence coefficients of rainfall in Fengxiang well.

表 3 凤翔井年降雨量表 (2001—2006)

| 年份 | 水位变幅/mm | 年降雨量/mm |
|------|---------|---------|
| 2001 | 700 | 441.5 |
| 2002 | 90 | 499.9 |
| 2003 | 1 860 | 767.6 |
| 2004 | 250 | 377.8 |
| 2005 | 510 | 451.3 |
| 2006 | 160 | 390.0 |
| 均值 | 595 | 488.0 |

降雨初期,水在重力、毛细力和分子力的综合作用下开始下渗,由于降雨前期土壤大都比较干燥,最初入渗的水分子受分子力的作用首先被土壤颗粒吸附形成结合水(薄膜下渗),当薄膜水饱和以后,水继续下渗则被吸入细小的毛细空隙,形成悬挂毛细水(毛细下渗),因此降雨初期的渗入大多被吸收于包气带中而达不到潜水面,不能补给地下水。随着降雨量的增大,当包气带中的结合水和薄膜水饱和后,降雨则在重力的作用下沿空隙向下运动,一直渗入到潜水面,补给地下水,即重力下渗。潜水得到降雨的补给,水位开始上升,受潜水补给的浅层及中深层承压水由于压力传递作用,水位也逐步上升。

黄辅琼指出降雨作为垂直加载和直接入渗双重作用影响断层的活动方式^[2],而直接入渗进行断层深部可能需要一个过程,这个过程很可能与地震都发生在降雨后的两个月有关。由于降雨入渗过程较为复杂,受地表覆盖物、地表坡度、断层出露等多种因素影响,故在此不做深入分析。

虽然本文所采用的降雨资料为凤翔井单点的降雨资料,但由于降雨范围具有区域性,从长期观测来看的单点降雨与区域降雨进程大体一致,与邻区降雨资料的对比分析也证明了这一点。本文的资料显示每年的降雨期内或降雨期后(2005年除外),鄂尔多斯块体周缘及甘东南都会发生 5~6 级地震,其中 2003 年的降雨量明显强于近年的降雨量,之后研究区内地震活动也为近几年来最强。说明降雨活动可能是该区地震的重要触发因素。

4 结论与建议

通过对陕西宝鸡凤翔井降雨、水位及鄂尔多斯块体及甘东南中强地震之间的关系分析,初步得到以下两点认识:(1)降雨对浅井水位影响明显,在一定范围内与地下水位的变化呈指数关系;(2)降雨通过荷载效应、下渗进入断层及改变地下水位埋深三个方面对区域构造应力场产生影响,对区内中强地震活动可能具有触发作用。

由于震源深度大多在地壳数十公里以下,多年来众多研究者都把目光放在震源深度的地壳深部,如板块等运动等,而忽视了地壳浅层变化在孕震过程中的作用,对外界环境的变化如降雨等都作为干扰来排除。而地壳浅层不仅受深部构造活动的影响,是深部构造活动的窗口,同时还受大气降水、人文活动等外界环境变化的影响,因此外界对浅层的影响程度同样应该受到足够的重视。

目前我们对地震孕育的过程还不甚清楚,要实质的推进地震预测,现在阶段仍要加强多学科、多方法的综合研究。只有将地球内构造变化与外界如天体运行、气象、人文等多方因素都有机的结合起来分析,才是通往地震物理预测的有效途径。因此我们在研究深部地壳构造变化的同时,也应注重浅层地壳的研究工作。

本文在完成过程中受到车用太研究员的悉心指导,在此谨表谢忱!

[参考文献]

- [1] 梅世蓉,冯德益,张国民,等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社,1993,160.
- [2] 黄辅琼、陈颖,白长清,等. 八宝山断层的变形行为与降雨及地下水的关系[J]. 地震学报, 2005,27(6):637-646.
- [3] 陆明勇. 2006,地壳形变与地下水相互作用及“双力源”前兆观点[J]. 大地测量与地球动力学,26(1):76-83.
- [4] 王吉易,宋贯一,曹志成,等. 地下水诱发的浅层前兆异常及其机理与有关的地震预报问题[J]. 华北地震科学,2002,20(3):

- 1-13.
- [5] 汪万红,张慧,苏鹤军. 秦岭北缘断裂带温泉水循环深度与地震活动性的关系研究[J]. 西北地震学报 2008,30(1):36-41.
- [6] 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组[M]. 鄂尔多斯周缘活动断裂系,北京:地震出版社,1988,143.
- [7] 陆明勇,牛安福,鲁德顺,等. 地壳形变与地下水动态异常特征研究进展[J]. 西北地震学报 2005,27(1):89-95.
- [8] 黄建国,张流. 水对断层摩擦滑动稳定性的影响[J]. 地震地质, 2002,24(3):387-399
- [9] 陈连旺,杨树新,谢富仁,等. 中国大陆构造应力应变场现今变化特征的数值模拟[J]. 中国地震,2005,21(3):341-349.

(上接 258 页)

[参考文献]

- [1] 范重,吴学敏. 带有双塔楼高层建筑结构动力特性分析[J]. 建筑结构学报,1996,(6):11-17.
- [2] 薛彦涛,魏琏. 底部整体裙房上部多塔楼结构地震反应分析[J]. 建筑结构学报,1989,(3):21-28.
- [3] 包世华,王建东. 大底盘多塔楼结构的振动计算[J]. 建筑结构, 1996,(6):3-9.
- [4] 包世华,王建东. 大底盘多塔楼连体结构的振动计算和动力特性[J]. 建筑结构,1997,(6):40-44.
- [5] 黄坤耀,孙炳楠,楼文娟,等. 非对称双塔连体结构的动力特性和地震响应分析[J]. 工业建筑,2001,(8):27-29.
- [6] 黄坤耀,孙炳楠,楼文娟. 连体刚度对双塔连体高层建筑地震响应的影响[J]. 建筑结构学报,2001,(3),21-26.
- [7] 建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [8] 刘大海. 高层建筑抗震设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1993.
- [9] 李君如. 高层建筑结构分析[M]. 北京:民交通出版社,1990.
- [10] 周优文,李宏. 双塔楼连体结构抗震性能分析[J]. 四川建筑, 2006,(1):124-127.