

秦巴地区地壳稳定性评价

韩金良, 吴树仁, 谭成轩, 李东林, 石 玲

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 三峡水库引水工程是南水北调的重要补充工程, 具有重要的战略意义和经济意义。本文在分析现今构造应力场、地壳结构、构造格架、活动断裂、地震活动、工程岩组等影响地壳稳定性主要因素的基础上, 利用模糊数学综合评价模型评价秦巴地区的地壳稳定性。评价结果表明, 秦巴地区地壳稳定性程度较高, 适合兴建大型引水工程。

关键词: 秦巴地区; 三峡引水工程; 地壳稳定性评价

中图分类号: P553; TU457

文献标识码: A

三峡引水工程是南水北调的重要补充工程, 引水线路介于中线与西线之间, 该线路秦巴段的起点位于重庆市开县小江, 向北穿过大巴山、东秦岭至渭河^[1,2], 具有十分重要的战略意义和经济意义。

区域地壳稳定性评价是独具中国特色的工程地质分支学科, 地壳稳定性评价已成为重大工程建设所必须研究的课题之一^[3]。经过半个多世纪的发展, 目前, 地壳稳定性评价已进入多层次、定性一半定量综合评价的阶段^[3~7]。本文主要以野外调查和 1:20 万区域地质调查资料为基础, 结合室内分析测试和地应力场模拟结果, 进行区域地壳稳定性评价。评价范围大致以引水规划线路为中心, 南起自长江南岸, 北至渭河盆地北缘, 中间横穿大巴山和秦岭, 总面积约为 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。具体的工作步骤是, 在分析现今构造应力场、地壳结构、构造格架、活动断裂、地震活动、工程岩组等影响地壳稳定性主要因素的基础上, 利用模糊数学综合评价模型评价秦巴地区地壳稳定性。

1 区域地壳稳定性分析

1.1 大地构造背景和构造格架

秦巴地区位于华北地台与扬子地台之间, 西临南北向重力梯度带 (南北向地震带), 东邻大兴安岭—太行山—武陵山重力梯度带。秦巴地区构造格架主要形成于中生代, 新生代中晚期构造活动强度降低, 除了形成一些新的北西向和北东向断裂以外, 东西向的构造格局没有发生大的变化。秦巴地区的构造格架表现为以东西向构造为主, 伴有北西向和北东向构

收稿日期: 2007-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40472153); 地质调查局地质调查项目《三峡水库引水工程秦巴段地壳稳定性调查评价》(编号: 1212010541402) 成果。

作者简介: 韩金良 (1966), 博士, 男, 副研究员。主要从事区域地壳稳定性评价、地质灾害研究。

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

造。东西向构造以一系列的大型逆冲推覆构造及其伴生的东西向褶皱为主体，而北西向和北东向构造以断裂为主（图1）。

1.2 地壳结构与地壳形变

研究表明地壳的活动性与地壳的结构关系密切，秦巴地区位于南北向的祁连山—龙门山幔坡陡倾带与武陵山幔坡陡倾带之间，两个陡倾带均自东向西倾斜，并且西边的一条地壳厚度梯度大于东边的一条。在南北方向上，北部为地幔缓倾区，汉中和宝鸡之间为秦岭幔拗带，汉中以南为四川地幔隆起区。渭河盆地处于次一级东西向地幔隆起带，并且在该隆起带上还发育三个次一级的地幔隆起中心，分别对应于上部的西安凹陷、固市凹陷和运城凹陷（图2）。三个凹陷之间对应于两条北西向延伸的地震带，并且中上地壳存在多个低速高导层。整个渭河盆地断裂活动速率较高、地震活动较强、地壳垂直形变速率较高，盆地不断下降，南北两侧的地块不断抬升，盆地南北两侧边界断裂附近垂直差异升降运动显著，整个渭河盆地地壳活动性较强。另外，秦岭幔拗带的南北边界是两条东西向延伸的地壳厚度梯度带分别对应于现今东西向地壳垂直形变梯度带，并且与秦岭北缘断裂和宁陕—略阳断裂也相对应，同时南部地壳厚度梯度带下方则对应莫霍面和岩石圈底面隆起带。整个东秦岭幔拗带地壳结构相对较简单，仅有商南—商县北西向地壳厚度梯度带存在，其上部对应商南—商县北西向断裂带，地壳中低速高导层不太发育，中上地壳呈镶嵌状结构，由不同时代花岗岩组成的各种块体分布于各种变质岩之间，中下地壳以整体块状的花岗岩为主，原商丹断裂深部地球物理特征不明显，已逐渐固化，其余的几条东西向断裂自中更新世以来活动不明显，地震活动微弱，地壳形变特征以近东西向的自北向南的掀斜运动为主，目前地壳处于较稳定状态。在四川地幔隆起区莫霍面起伏平缓，在房县—安康一线存在一条北西向地壳厚度梯度带，在地表与安康—房县断裂相对应，该区断裂活动速率和地壳垂直形变速率均较低，地震活动微弱，地壳也以近东西向的自北向南的掀斜运动为主，地壳活动性总体较低^{⑧①}（图2）。

秦巴地区位于华北地台与扬子地台之间，在中生代造山期间，上述两地向秦岭造山带相向俯冲，秦岭造山带向南北两个方向逆冲，在南北方向的横剖面上，地壳结构呈不规则的扇形^⑧。在造山运动的后期，秦岭地区的中新生代花岗岩发育，中下地壳被花岗岩重新焊接在一起，呈整体块状；大巴山地区的中下地壳主要有扬子地台的物质组成，也较完整^①。

1.3 新构造运动

自中生代大规模的造山运动结束以后，秦巴地区构造变形趋弱，地壳逐渐固化。中更新世以来，大规模的差异升降运动被区域整体性的东西向掀斜运动所取代，秦巴山区逐渐上升，并向南掀斜。但是，渭河盆地除外，逐渐整体下降，并且渭河盆地边缘断裂南北两侧差异升降较明显。新构造运动表现为继承性活动、新生性活动、间歇性抬升、抬升与凹陷共存的特点。

1.4 地应力场

据地震机制解统计分析，秦巴地区最大主应力方向为北东向、近东西向。地应力测量结果表明秦巴山区地应力场最大水平主应力方向以近南北向为主，最大水平主应力与最小水平主应力均随深度的增加而增大。在3000m深度以内，最大水平主应力随深度变化的拟合曲线为直线，其表达式为： $S_1 = 0.0329H + 10.549$ 。其中 S_1 为最大水平主应力，单位为MPa； H

① 韩金良，三峡引水工程秦巴段地壳稳定性评价研究，中国地质科学院研究生院博士论文，2006。

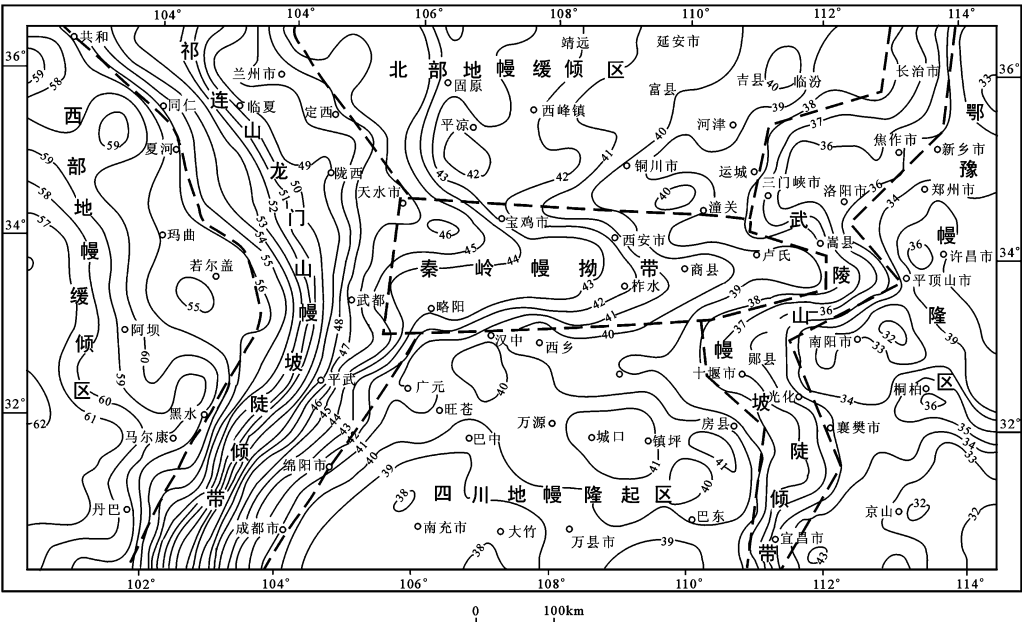


图 2 秦巴地区莫霍面等深图

Fig. 2 Map of the Moho depth below the Qinling-Daba mountains

为深度，单位为 m，拟合曲线的相关系数为 0.7629。而最小水平主应力随深度变化的拟合曲线虽然也为直线，但是相关系数较低，离散性较高。差应力表达式为： $S = 0.0111H + 2.5619$ ，其中 S 为差应力，单位为 MPa； H 为深度，单位为 m^①。

据江口地应力测量孔水压致裂法测量结果，该孔 200m 深度以下的地应力比三峡地区、鄂西地区以及鄂尔多斯地区同一深度的地应力都高；而据同一测量孔 AE 法地应力测量结果，现代构造应力的强度与中国大陆的平均值相当，属于正常范围。研究表明，秦巴山区地应力的强度之所以比三峡地区、鄂西地区以及鄂尔多斯地区都高，这与其处于中生代陆内造山带，地下一定深度以下岩层中存在古构造残余应力密切相关^{9①}（表 1）。

1.5 活动断裂

秦巴地区重要的活动断裂带有三条，即渭河盆地断裂带、勉县—宁陕断裂带和城口断裂带，除了渭河盆地中的活动断裂目前活动性较强之外，秦巴山区的活动断裂自中更新世以来活动性逐渐降低，现今活动速率均较低。在工程场地规模较大的 17 条活动断裂中，强活动断裂（ $1\text{mm/a} \leq S < 10\text{mm/a}$ ； $6 \leq M_s < 8$ ；岩石圈断裂或地壳断裂）1 条；中等强度活动断裂（ $0.1\text{mm/a} \leq S < 1\text{mm/a}$ ； $5 \leq M_s < 6$ ；地壳断裂）5 条；弱活动断裂（ $0.01\text{mm/a} \leq S < 0.1\text{mm/a}$ ； $3 \leq M_s < 5$ ；基底断裂）9 条；极弱活动断裂（ $S < 0.01\text{mm/a}$ ； $M_s < 3$ ；盖层断裂）2 条， S 代表活动断裂的位移速率， M_s 代表活动断裂的发震震级，即工程场地中的大部分活动断裂的活动强度均较低（图 1，表 2）。

① 韩金良. 三峡引水工程秦巴段地壳稳定性评价研究. 中国地质科学院研究生院博士论文, 2006.
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

1.6 地震

秦巴地区位于兰州—天水—西安地震带，西临南北向地震带。近代以来，区域上发生 5 级地震 17 次，5~6 级地震 12 次，6 级地震 1 次，6~7 级地震 4 次，7 级地震 2 次，8 级地震 1 次。中强地震主要集中在渭河盆地，在秦巴山区沿石泉—安康断裂发生过 1 次 6.5 级地震，另外，沿宁陕—略阳断裂和城口断裂等发生过几次 5~6 级地震（图 1）。秦巴地区地震活动水平总体上较低，中强地震主要位于渭河盆地中，对引水隧道的影响不太大。南部仅有的一例中强震记录，离引水线路较远，对其影响也不大。

1.7 工程岩组

工程岩体也是影响区域地壳稳定性的主要因素之一，为了更好地评价地壳稳定性，根据岩体的结构和强度的差异，进行了工程岩组的划分，共划分了 11 类：第四纪松散堆积、中薄层状软弱碎屑岩组、中厚层状软硬相间砂岩—泥岩岩组、中厚层状坚硬砂砾岩组、中厚层状坚硬碳酸岩组、块状坚硬岩体、块状坚硬变质岩组、片状—块状次硬变质岩组、中厚层状坚硬变质岩组、片状—层状软弱变质岩组、中厚层状软硬相间变质岩组。据初步统计，强度较高的工程岩组约占区域总面积的 65% 左右^①。

1.7.1 中薄层软弱砂岩、泥质岩组和中厚层状坚硬砂砾岩组

中薄层软弱砂岩、泥质岩组分布于宜昌、月河盆地和凤县一带中新生代的沉积盆地中，岩性为泥岩、砂质泥岩、砂岩、粉砂岩及砾岩等组成，胶结物一般为钙质或泥质，泥质岩与砂岩一般呈互层状产出。中厚层状坚硬砂砾岩组分布于四川盆地北部，主要由砂岩和砾岩组成，两者呈互层状产出。岩石密度一般为 1.7~2.79g/cm³，含水率为 3.26%~24.44%，抗

表 1 岩石力学实验与声发射、水压致裂法地应力测量结果

Table 1 Rock mechanics experiments and geostress measurements by acoustic emission (AE) and hydrofracturing techniques

编组	天然 密度	烘干 密度	天然 含水率	抗拉 强度	单轴压缩试验			三轴压缩试验		AE 法测量结果		水压致裂法测量结果	
	ρ_o (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ω_0 (%)		单轴抗压 强度	弹性 模量	泊松比	内聚力	内摩擦角	深度	最大主应力	深度	最大水平 主应力
				σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)	μ	C (MPa)	φ (°)	(m)	(MPa)	(m)	(MPa)
5-1	2.656	2.650	0.237		134.42	45.30	0.161	32.85	35.81	75	8.5	73	7.34
5-2	2.683	2.681	0.089		83.88	28.22	0.119	22.21	40.31	124	8.4	123	9.89
5-3	2.688	2.685	0.117		120.26	27.21	0.091	30.13	47.22	180	11.7	179	10.61
5-4	2.694	2.693	0.045		114.35	35.96	0.146	32.43	41.32	233	12.3	231	10.78
5-5	2.686	2.684	0.072		102.58	39.41	0.178	21.56	47.23	286	13.6	285	23.38
5-6	2.659	2.652	0.233		121.42	37.71	0.150	34.17	40.69	341	17.5	340	27.50
5-7	2.696	2.695	0.051		125.39	62.16	0.190	35.97	44.13	398	19.4	396	24.53
5-8	2.674	2.672	0.079	7.55	118.87	42.59	0.144	37.08	41.90	453	16.4	451	27.58
5-9	2.692	2.689	0.110		96.30	37.31	0.224	35.33	37.67	513	20.7	498	29.81
5-10	2.674	2.670	0.120	8.78	105.24	46.37	0.136	27.39	42.16	557	24.6	556	28.02
5-11	2.684	2.680	0.154		94.76	34.10	0.153	21.85	42.10	599	20.7	596	18.39

①. 韩金良. 三峡引水工程秦巴段地壳稳定性评价研究. 中国地质科学院研究生院博士论文, 2006.
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

表 2 主要断裂活动性与工程安全性评价对比表

Table 2 Comparison of the activities of main active faults and engineering safety evaluations

断裂 编号	断裂 名称	产状及规模	活动历史 活动方式 叠加断裂角	最新 活动 时代	活动速率		历史最 高地震	地球物理场	活动强度	工程安全性评价
					垂直 (mm/a)	水平 (mm/a)				
F ₂	秦岭北缘 断裂	长 210km, 宽 n * m 至 2km, 上地壳断裂	早期为逆断层, 现今为正断层。 蠕滑、粘滑	现今 730ka	0.23 ~ 1.1		7	重力梯度带和地壳厚 度梯度带, 地壳垂直 形变梯度带	II 度, 强活动断 裂	强震可能引起输水隧 洞和引水干渠变形和 破坏
F ₇	宁陕—略阳 断裂	长 50km, 宽 100 ~ 70m, 岩石圈断裂	蠕滑、粘滑	210ka			5.5	重力梯度带和地壳厚 度梯度带	II 度, 中等强度 活动断裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₈	石泉—安康 断裂	长 150km, 宽 30 ~ 160m, 上地壳断裂	蠕滑、粘滑	中更 新世			5		II 度, 中等强度 活动断裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₉	三花石—汉 王城断裂	长 170km, 宽 15 ~ 150m, 基底断裂	蠕滑、粘滑 左旋走滑		0.3		4.7		IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₁₂	城口—房县 断裂	长度大于 400km, 宽 100 ~ 100m, 地壳断裂	蠕滑、粘滑	50 ~ 70ka	1 ~ 2		5		II 度, 中等强度 活动断裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₁₄	大巴山 弧形断裂	长 200km, 宽 10 ~ 80m, 基底断裂	蠕滑、粘滑	186ka	1 ~ 2		5.5	地壳垂直形变梯度带	II 度, 中等强度 活动断裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₁	铁炉子断裂	长 350km, 宽 20 ~ 500m, 上地壳断裂	左旋走滑, 蠕滑	现今	1.5	n ~ 15	4.75	重力梯度带和地壳厚 度梯度带, 地壳垂直 形变梯度带	II 度, 中等强度 活动断裂	施工过程中可能出现 塌方
F ₃	油坊沟—皇 台断裂	长 150km, 宽 50 ~ 70m, 基底断裂	蠕滑				2.4		IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方和涌水
F ₄	商丹断裂	长 400km, 500 ~ 1000m, 岩石圈断裂	蠕滑				4		IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方和涌水
F ₅	凤镇—山阳 断裂	长 200km, 宽 n * 10m 至 400m, 基底断裂	蠕滑						IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₆	旬阳坝—板 岩镇断裂	长 80km, 宽 几 米 至 100m, 基底断裂	蠕滑				4		IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₁₀	红椿坝断裂	长 160km, 宽 n * m ~ 2km, 基底断裂	蠕滑				1.5		V 度, 极弱活动 强度活动断裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₁₁	高桥断裂	长 130km, 宽 n * m ~ 300m, 基底断裂	蠕滑				1.7		V 度, 极弱活动 强度活动断裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₁₃	大竹河—龙 泉断裂	长 220km, 宽 50 ~ 150m, 基底断裂	蠕滑						IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₈₋₁	栗子坝—铁 佛寺断裂	长 90km, 宽约 2 ~ 15m, 基底断裂	蠕滑、粘滑				4.5		IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₇₋₁	白勉峡断裂	长 60km, 宽 1 ~ 10m, 基 底断裂	蠕滑	350ka					IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方、大变形和涌水
F ₁₅	温泉断裂	长 50km, 宽 20m 左右, 盖层断裂	蠕滑				3 ~ 3.9		IV 度, 弱活动断 裂	施工过程中可能出现 塌方和涌水

压强度 $7 \sim 45\text{MPa}$, 软化系数为 $0.73 \sim 0.93$, 变形模量为 $0.15 \sim 15\text{GPa}$, 泊松比为 $0.25 \sim 0.39$, 粘聚力为 $0.025 \sim 0.5\text{MPa}$, 摩擦系数为 $0.30 \sim 0.65$ ^①。

1.7.2 中厚层状软硬相间砂岩、泥质岩组

主要分布于四川盆地东北缘, 一般分布于北东向向斜的核部和背斜的两翼, 岩性以泥岩、页岩、泥质粉砂岩和砂岩为主, 夹砾岩和灰岩。泥质岩与砂岩呈互层状产出。岩石密度一般为 $2.28 \sim 2.59\text{g/cm}^3$, 抗压强度 $4.25 \sim 163.44\text{MPa}$, 软化系数为 $0.35 \sim 0.84$ ^①。

1.7.3 中厚层状坚硬碳酸盐岩组

主要分布于四川盆地北东向背斜的核部、长江沿岸附近及其以北地区、大巴山地区及武当地块北缘至镇安一带。岩性以灰岩、泥灰岩、白云岩、大理岩为主夹中薄层状泥质岩。岩石密度一般为 $2.65 \sim 2.7\text{g/cm}^3$, 抗压强度 $130 \sim 165\text{MPa}$, 变形模量为 $45 \sim 55\text{GPa}$, 泊松比为 $0.18 \sim 0.23$ ^①。

1.7.4 块状坚硬岩体

主要分布于宝鸡至天水之间、太白山、华山、东江口、佛坪、光头山、汉南地块、凤凰山和黄陵地块等地。岩性以中酸性的花岗岩—闪长岩为主, 岩体的完整性较好。岩石密度一般为 $2.60 \sim 2.70\text{g/cm}^3$, 抗压强度 $95 \sim 180\text{MPa}$, 变形模量为 $29 \sim 55\text{GPa}$, 泊松比为 $0.12 \sim 0.18$ ^①。

1.7.5 块状坚硬变质岩组

主要分布于秦岭的北部地区, 岩性以各种片麻岩、花岗片麻岩、变粒岩、浅粒岩、云母石英片岩、石英岩等为主。岩石的强度一般较高。

1.7.6 片状—块状次硬变质岩组

分布于碧口地块、凤凰山、平利、武当地块、神农架和黄陵地块等地。岩性以绿泥石钠长石片岩、变质砾岩、板岩、白云岩、千枚岩和少量的玄武岩和安山岩组成。岩石的完整性一般, 强度较高。

1.7.7 中厚层状坚硬变质岩组

分布于留坝、宁陕—旬阳一带, 岩性以变质砂岩、石英岩、云母石英片岩为主, 夹灰岩、板岩等。呈中厚层状产出, 岩石的强度较高。

1.7.8 片状—层状软弱变质岩组

分布于汉阴—紫阳—竹溪一带, 岩性以板岩、碳质板岩、碳质页岩、云母片岩为主, 夹硅质岩、绿泥石片岩、变质砂岩等。岩体一般呈中薄层状、片状产出, 强度较低, 易于变形。

1.7.9 中厚层状软硬相间变质岩组

主要分布于留坝以北—镇安—山阳一带, 在城口断裂带以北也有出露, 岩性以变质砂岩、灰岩、泥质岩为主, 在城口一带岩性以凝灰岩、凝灰质砂岩、碳质板岩为主, 夹中薄层状灰岩。在空间上强度高的岩石与软岩呈互层状产出, 力学性质介于硬岩与软岩之间。

1.7.10 第四纪松散堆积

第四纪松散堆积分布于渭河盆地、汉中盆地和安康盆地(图1)。

此外, 秦巴地区断裂较发育, 且规模也较大, 断裂带中充填大量的断层角砾岩、碎裂岩、碎粉岩及断层泥, 其强度非常低, 断层泥遇水易于软化。

①. 韩金良. 三峡引水工程秦巴段地壳稳定性评价研究. 中国地质科学院研究生院博士论文, 2006.

2 区域地壳稳定性评价

本文在分析现今构造应力场、地壳结构、构造格架、活动断裂、地震活动、工程岩组等影响地壳稳定性主要因素的基础上，共选取有代表性的 7 个指标作为评价因子，利用模糊数学综合评价模型评价秦巴地区地壳稳定性。

2.1 模糊数学综合评判

地壳稳定性分级、分区评价是一个由众多因子综合影响的模糊概念，因此，将模糊数学方法引进到区域地壳稳定性评价中来是切实可行的。模糊数学综合评判的计算原理较简单，计算结果的准确性和可信度取决于模糊评判因子选取及其权重的分配。

2.1.1 模糊数学综合评判原理

根据区域地壳稳定性分级指标的要求，综合区域地壳稳定性级别评判集为：

$$V = \{ \text{不稳定, 较不稳定, 较稳定, 稳定} \}$$

用各指标进行评判，则分别得出各指标 X_i 在 V 上的模糊评判子集为：

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4})$$

n 个指标构成的模糊关系子集为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix}$$

在众多评判指标中，其重要程度各不相同，用指标权重表示，则构成目标权重模糊子集为：

$$W = \{w_1, w_2, w_3, \cdots w_n\}$$

则综合评判结果为： $B = W \times R = (b_1, b_2, b_3, b_4)$

将其应用于区域上的每一个单元，得到 4 个稳定性级别的隶属度，按最大隶属度原则确定其分别为不稳定、较不稳定、较稳定和稳定级别。

2.1.2 评价指标的确定及其数值化

根据影响秦巴地区地壳稳定性的主要因素，共选取有代表性的 7 个评价指标。其含义和权重分配如下：

- ①地震 (f_1)，主要是指历史地震的活动情况，包括地震活动的强度和频度，权重 0.20。
- ②地震动峰值加速度 (f_2)，地震动峰值速度主要影响未来地震基本烈度，权重 0.20。
- ③地壳形变 (f_3)，这里是指地壳垂直形变速率 (1951 ~ 1982 年)，权重 0.05。
- ④活动断裂 (f_4)，活动断裂的长度和深度、最新活动年龄、活动方式和活动强度，权重 0.20。
- ⑤地壳结构 (f_5)，地壳的厚度、莫霍面的起伏状态、重力异常特征，权重 0.15。
- ⑥现代构造应力场 (f_6)，现今构造应力的方向、大小、集中程度，权重 0.10。
- ⑦工程岩组 (f_7)，岩性组合特征、岩体结构、强度等，权重 0.10。

各评价因子的数值化指标在 0 ~ 10 之间变化，各指标的隶属度函数采用一元函数，在计算过程中由计算机自动完成。单元划分充分考虑上述指标的空间变化规律，单元的边界一般沿大的活动断裂或地块的边界展布。

2.1.3 计算结果分析

整个计算过程按所编程序进行,并由计算机自动给出计算结果(图3)。其中1、2、3、4分别代表稳定、较稳定、较不稳定和不稳定。不稳定区位于渭河盆地的华县一带,与1556年华县8级大地震的极震区相对应。不稳定区主要位于渭河盆地的西安凹陷和固市凹陷一带、天水一带,另外,还分布于石泉—安康断裂带的平利以东地区。较稳定区主要沿渭河盆地的南缘和南北地震带的东部以及主南部地区部分大断裂带内。中南部的广大地区基本为稳定区。

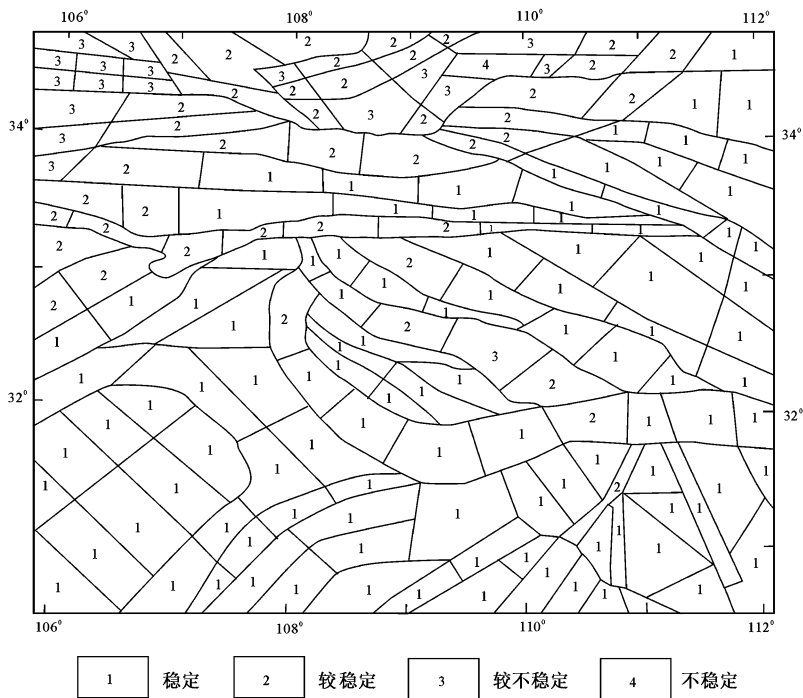


图3 区域地壳稳定性模糊数学评判结果
Fig.3 Fuzzy judgement of crustal stability in the Qinling-Daba region

2.2 区域地壳稳定性分区

模糊数学计算结果与前述各章的定性分析资料相吻合,根据这些资料将区域稳定性划分为28个区或断层带(段)。其中不稳定区1个,面积约为1200km²,占区域总面积(26×10⁴km²)的0.46%;较不稳定区带4个,面积约为1.25×10⁴km²,占区域总面积的4.80%;较稳定区带12个,面积约为4.95×10⁴km²,占区域总面积的19.05%;稳定区带11个,面积约为19.68×10⁴km²,占区域总面积的75.69%。由此可见,区域地壳稳定性总体上较好,并且南部较北部稳定(图4)。区域地壳稳定性一级区的划分主要参考模糊数学计算结果,以构造稳定性程度命名,同时考虑地域性、构造线方向、地壳形变资料等特征,以地名和构造带组合命名。

3 结论

秦巴地区地壳稳定性问题,通过调查研究、室内分析测试、模拟计算以及综合分析评

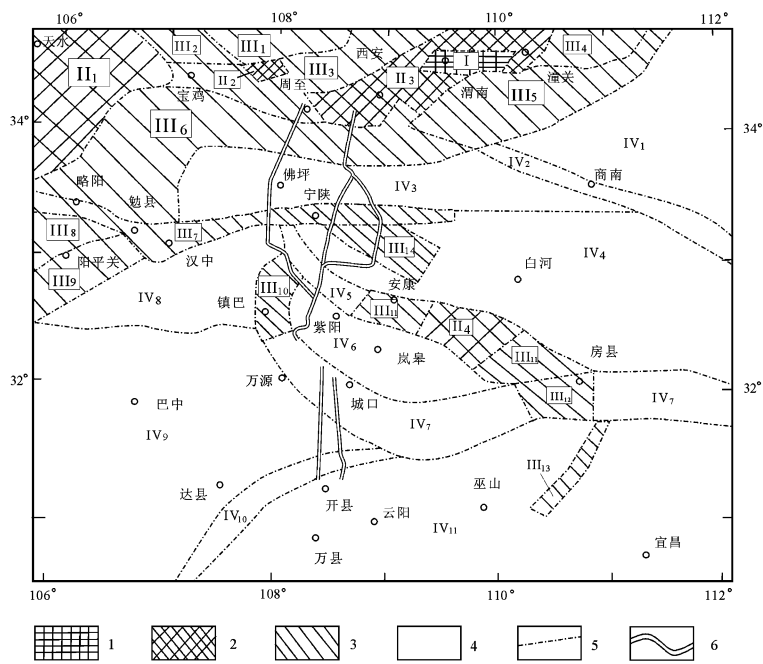


图 4 区域地壳稳定性分区

Fig. 4 Zonation of regional crustal stability in the Qinling-Daba region

1. 不稳定; 2. 较不稳定; 3. 较稳定; 4. 稳定; 5. 稳定性分区界线; 6. 引水线路

价，可以得出以下的结论：

从中国大陆地质构造环境和现代构造应力环境分析，本区地壳稳定性程度除了渭河盆地以外，总体上相对较高。秦巴山区地处中国大陆两个南北向莫霍面斜坡带之间，又位于华北地台和扬子地带之间，经历了中生代陆内造山运动以后，大规模的构造运动已经结束，整体处于较稳定状态。同时，经历了中生代大规模的岩浆作用后，中下地壳的结构较为完整，特别是秦岭地区位于秦岭慢坡带，中下地壳已被中生代花岗岩重新焊接在一起，地壳结构较完整，呈整体块状。大巴山大部分地区中下地壳为扬子地台的组成部分，稳定程度也较高。秦巴地区位于中国大陆腹地，主要受到印度板块、太平洋板块和菲律宾板块的联合挤压作用，由于与上述三大板块的距离均较远，所受到的挤压作用较弱，现今构造应力的强度与中国大陆的平均水平相当，同时，岩体的整体强度亦较高，因此，现今构造活动性较弱。

现今秦巴地区整体处于大规模的东西向掀斜运动，除渭河盆地周缘以外，差异升降运动已明显减弱。

秦巴地区地震活动水平总体上较低，中强地震主要位于渭河盆地中，对引水隧道的影响不太大。南部仅有的一例中强震记录，离引水线路较远，对其影响也不大。

区域活动断裂在中更新世期间活动较强，自晚更新世以来，活动已明显减弱。除秦岭北缘断裂属于强活动断裂以外，引水工程场地的其余 16 条重要活动断裂现今滑动速率均较低，工程稳定性较高，对引水深埋长隧道的影响较小。

秦巴地区地壳稳定性评价结果显示，区域地壳稳定性程度较高，较稳定区带 12 个，面积约为 $4.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占区域总面积的 19.05%；稳定区带 11 个，面积约为 $19.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，

占区域总面积的 75.69%。

综上所述, 秦巴地区地壳稳定性程度较高, 适合兴建大型引水工程。

参 考 文 献

- [1] 周兴志. 南水北调新线路——三峡水库引水济黄济华北段工程地质条件 [J]. 工程地质学报, 2003, 11 (2): 208 ~ 212.
- [2] 吴树仁, 张永双, 韩金良, 石菊松, 何锋, 谭成轩. 三峡水库引水工程秦巴段工程地质条件研究 [J]. 地球学报, 2006, 27 (5): 487~494.
- [3] 吴树仁, 陈庆宣, 徐瑞春, 梅应堂, 石玲. 鄂西清江流域及邻区地壳稳定性评价 [J]. 地球学报, 1996, 17 (1): 1~10.
- [4] 殷跃平, 胡海涛, 康宏达. 区域地壳稳定性评价专家系统研究 [J]. 地质论评, 1996, 42 (2): 174~186.
- [5] 孙叶, 谭成轩, 杨贵生, 王瑞江. 中国区域地壳稳定性定量评价与分区 [J]. 地质力学学报, 1997, 3 (3): 42 ~ 52.
- [6] 吴树仁, 韩金良, 石菊松, 张永双, 何锋. 区域地壳稳定性研究现状和发展趋势 [J]. 工程地质学报, 2004, Suppl: 26~30.
- [7] 易明初, 胡海涛, 殷跃平, 彭华. 发扬李四光“安全岛”思想, 认真做好工程建设地区的区域地壳稳定性评价研究工作 [J]. 地质力学学报, 2006, 12 (2): 105~118.
- [8] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京, 科学出版社, 2001.
- [9] 韩金良, 吴树仁, 谭成轩, 孙炜峰, 张春山, 丁原辰, 等. 东秦岭东江口花岗岩体水压致裂法与 AE 法地应力测量对比研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (1): 83~86.

ASSESSMENT OF CRUSTAL STABILITY IN THE QINLING-DABA REGION

HAN Jin-liang, WU Shu-ren, TAN Cheng-xuan, LI Dong-lin, SHI Ling

(*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China*)

Abstract: The Three Gorges reservoir water-diversion project is a new line of the south-north water-diversion project. There are six major factors affecting the crustal stability in the region: crustal structure, present tectonic stress fields, tectonic framework, fault activity, earthquake activity and rock properties. The authors select dominant conditions affecting regional crust stability as evaluating factors to construct a fuzzy evaluation model. Based on the above-mentioned six factors and by using the fuzzy evaluation model, the authors evaluate the crustal stability of the Qinling-Daba region. The results show that the Qinling-Daba region has a higher degree of crustal stability and is suitable for the large water diversion project.

Key words: Qinling-Daba region; Three Gorges reservoir water-diversion project; crustal stability evaluation