

向错-位错组合模型模拟渭河盆地地壳水平变形特征^①

张 永, 张永志, 瞿 伟

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:基于向错-位错组合模型模拟渭河盆地内主要断层的滑动与转动运动变形,通过数值计算获得断层滑动及转动变形引起的地表水平位移,并与盆地内实测 GPS 水平位移进行了对比。结果表明:采用向错-位错组合模型能够完整地描述断层实际的滑动与转动运动变形状态,组合模型模拟断层滑动与转动引起的地表水平位移与实测 GPS 水平位移,无论在量级或是运动趋势上均具有较好的一致性特征。

关键词:渭河盆地; 向错-位错组合模型; 断层滑动与转动; 水平位移; GPS

中图分类号: P542

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-0996-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.0996

Simulation of Crustal Horizontal Deformation in the Weihe Basin Using a Combined Disclination-Dislocation Model

ZHANG Yong, ZHANG Yong-zhi, QU wei

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Weihe Basin, which is situated in the middle of China, was the area of interest for this study. The basin is several hundred kilometers long and forms an S-shape, representing a deep rift that divides China into eastern and western parts. Bounded by the Ordos, North China, and South China blocks, the Weihe Basin is the accommodation zone for the differential motion of these three blocks and also the border and decoupled strip of tectonics between western and eastern China. We simulated the deformation state of the main fault slip and rotation in the Weihe Basin using a combined disclination-dislocation model. The horizontal displacements caused by fault slip and rotation were acquired through numerical calculation and compared with GPS-measured horizontal displacements in the Weihe Basin. The results were as follows. (1) The movements of fault slip and rotation can be described well by the combined disclination-dislocation model, and there are only small differences between the modeling results and monitoring data. (2) Use of only the dislocation model does not adequately describe the activity features of the faults within the Weihe Basin that show slip and rotation, and there are significant differences between the model results and monitoring data, particularly in the direction of crustal movement. (3) Compared to the dislocation model, there is good consistency between the simulated horizontal displacements of the combined model and the measured GPS results.

Key words: Weihe Basin; combined disclination-dislocation model; fault slip and rotation; horizontal displacement; GPS

^① 收稿日期: 2014-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(41374028; 41202189; 41274005); 中国博士后基金(2013M530412); 中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2012TD004, 2014G1261050, CHD2014G3263014); 长安大学基础研究支持计划专项基金

作者简介: 张永(1982-), 男, 在读博士, 讲师, 主要从事大地测量、地壳形变等方面的研究工作。E-mail: zhangyong@chd.edu.cn。

0 引言

断层运动与地面变形的关系是研究断层构造活动的关键问题。目前国内外多采用位错理论模型来研究断层滑动与地面变形的关系。如 Heki 等^[1]利用位错理论模型研究了日本海沟的无震滑动;陈运泰等^[2]根据地面形变观测结合位错理论模型研究了 1966 年中国邢台地震的震源参数;孙文科^[3]指出位错理论在大地变形研究中的作用与存在的问题。然而,上述研究均是利用位错理论模型研究断层的滑动状态与地表形变场的关系,实际的断层活动还包含旋转转动变形状态^[4]。

因此,本文利用向错-位错组合模型对断层实际的滑动与转动状态进行理论描述,并以构造断裂十分发育的渭河盆地作为研究对象,基于向错-位错组合模型采用数值方法对渭河盆地内主要断层的滑动与转动引起的地面变形进行数值模拟,将组合模型模拟的地表水平位移与实测 GPS 水平位移进行对比分析,验证向错-位错组合模型描述断层实际活动与地面变形的合理性和可行性。

1 断层的滑动和旋转转动与地面变形关系的向错-位错组合模型

向错理论在微观晶体理论研究中得到了应用发展^[5-7],但与其相关的断层活动的研究在国内外鲜有报道。对具体的断层活动与地面大地形变问题而言,向错理论描述了在弹性介质中断层面之间的相互转动与周边变形之间的理论关系,是位错理论在大地形变场分析应用研究中的补充和完善。完整的断层活动可分为平动(滑动)和转动两部分,平动部分可采用位错理论来描述,而转动部分在断层表面引起的位移是非均匀分布的,需要导出断层转动与地面变形关系的数学表达式,详细推导过程见文献^[4]。

为便于计算,将地球看作以地表面作为界面的各向同性介质的半无限空间,用一个矩形面来近似地描述对应的断层面,如图 1 所示。以 A 点在地面的投影 O 点为局部坐标系的原点,过 O 点平行于断层的走向为 X 轴,Z 轴过 O 点垂直于地面向上,建立局部右手空间直角坐标系,平面 $Z=0$ 为地表面,以 $A(0,0,-d)$ 为转动轴的起点,断层上盘相对于下盘以 U_1, U_2 为轴的转动角度为 ω_1, ω_2 。则断层面上任意点在平动和转动的叠加运动下的总走滑量和倾滑量可表示如下:

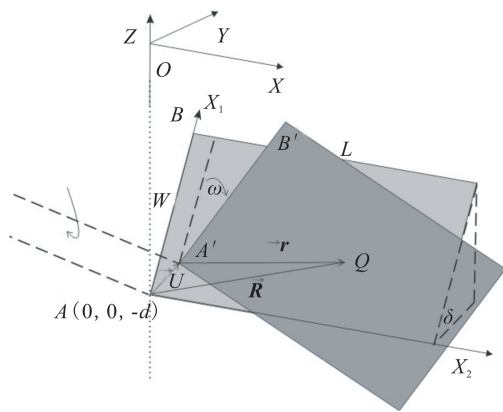


图 1 断层转动和滑动与局部坐标系位置关系

Fig.1 Geometrical sketch of the fault slip and rotation in local coordinate system

$$\begin{cases} u_1 = a_1 + r(1 - \cos \omega) \\ u_2 = a_2 + r \sin \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_1, a_2 分别为断层叠加运动在走滑和倾滑方向上引起的位移量,即 $|U|_2 = a_{12} + a_{22}$; r 是断层面上盘任意一点到旋转轴心 A' 的距离。可得 $R = r + u$, 其中 R 为断层面上盘任一点 Q 到 A 点的距离。

结合向错理论模型公式^[4], 可得由 11 个参数表示的断层的转动和滑动对地表变形的综合影响:

$$u = u(a_1, a_2, lon, lat, H, \omega, \delta, L, W, d, \alpha) \quad (2)$$

其中: u 为断层活动引起的局部空间直角坐标系下 GPS 观测点的水平位移场和垂直位移场; a_1, a_2 分别表示断层面上走滑、倾滑位错量,以上盘相对于下盘的运动为准; lon, lat 分别代表断层中心点的经度和纬度坐标; H 代表转动角度; δ 代表断层倾角; L 代表断层长度; W 代表断层宽度; α 代表断层的走向角。

2 渭河盆地的水平变形模拟结果分析

渭河盆地北接鄂尔多斯台地,东缘为山西隆起带,南邻秦岭造山带,西端与鄂尔多斯西南边界弧形断裂束相接,盆地的东南部与山西地堑系相连。盆地内地质构造较复杂,发育有多条深大断裂,现代构造运动异常强烈,对研究我国地壳现代活动性有重要的参考意义^[8-9]。

彭建兵等^[10]将分维几何学的理论应用于研究该地区的活断层与地质灾害的分形自组织结构,认为活断层与地裂、滑坡、火山、地震、岩崩、地质灾害等现象有因果上的联系,从而将活断层作为研究重点,并将该地区分为四条活动断裂系,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,渭河盆地地质构造较复杂,其

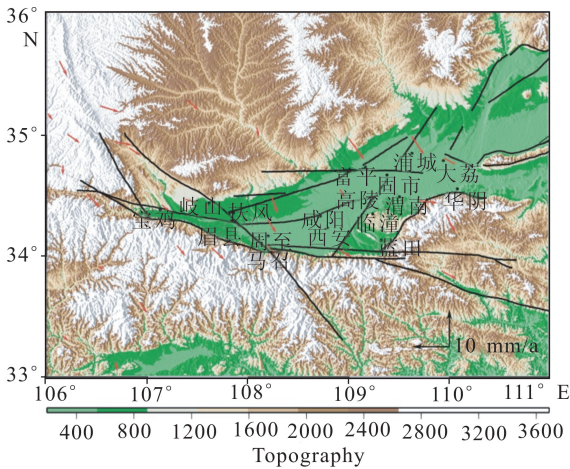


图 2 渭河盆地的主要断裂分布

Fig.2 Distribution of the main faults in the Weihe Basin

内部发育的众多断裂相互交织,纵横成网。主要发育有近 EW 向活动断裂系,横贯盆地东西,主要包括口镇—关山断裂、渭河断裂、秦岭北侧大断裂、华山西侧断裂、铁炉子断裂;NE 向活动断裂系以东部发育为主,主要有韩城—华县断裂、乾县—蒲城断裂;NNE 向活动断裂系,主要考虑的是盆地东部的临潼—长安断裂;NW 向活动断裂系,发育在盆地西部,主要有固关—宝鸡断裂、岐山—马召断裂。

2.1 渭河盆地主要断层参数获取

实际研究中,断层往往不是单一的直线断层,而是由多条相互交叉、形状结构非常复杂的断层构成,因此往往需要对断层的分段做简化处理,将每一个破裂段简单地视为断层的破裂单元^[4,11-13]。渭河盆地四条断裂系的 10 条主要断层以倾滑断层为主^[10]。依据盆地的地质构造背景,首先将这 10 条主要断层按照丁国瑜的断层分段方法,将每条断层分别分成若干条子断层。每条子断层单元的位置参数和几何参数如表 1 所列。

2.2 数值模拟与分析

基于第 2 节所述向错-位错组合模型,求解表 1 中由于各断层段滑动及转动造成的地表水平位移,并对其进行叠加处理,同时与渭河盆地实测 GPS 水平位移场进行对比分析。本文所利用的 GPS 观测数据是由中国地震局第二形变监测中心提供的青藏高原东北缘 GPS 观测网在 2004—2007 年间获得的关于渭河盆地的观测资料,并借助于 GAMIT/GLOBK 软件解算获取该地区在 ITRF2005 参考框架下相对于欧亚板块的运动速率,各点的运动速率大致为 0~10 mm/a,东西向及南北向运动速率误差大致在 0~5 mm/a^[12]。组合模型模拟与实测

GPS 速度场对比图见图 3,而仅利用位错模型模拟与实测 GPS 速度场对比图见图 4。

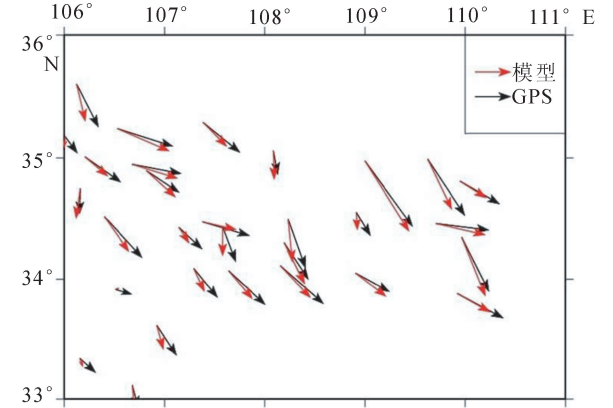


图 3 组合模型正演模拟地表水平形变场与实测 GPS 水平位移对比图

Fig.3 Comparison between the horizontal displacement diagrams based on the combined disclination-dislocation model and the measured GPS data

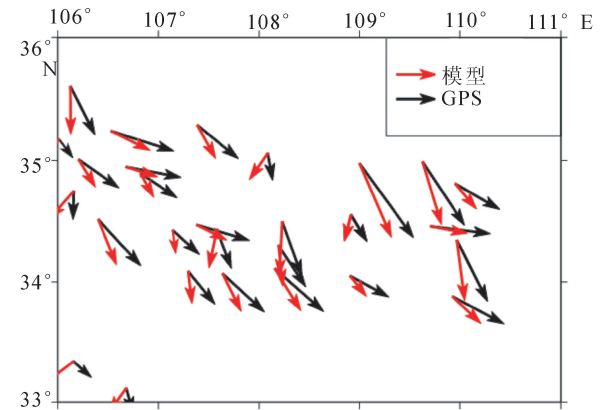


图 4 位错模型正演模拟地表水平形变场与实测 GPS 水平位移对比图

Fig.4 Comparison between the horizontal displacement diagrams based on the dislocation model and the measured GPS data

图 3 中黑色箭头代表渭河盆地内实测高精度 GPS 水平位移场,红色箭头代表组合模型模拟断层活动(包括滑动与转动)引起的地表水平位移场。图 3 表明,向错-位错组合模型模拟出的水平位移与该地区的内部场具有相同量级,且二者在大小和方向的运动趋势具有较好的一致性,只在个别点上速度方向存在一定的差异性。同时,对比图 4 也可看出,组合模型模拟获得的区域地表水平位移场与实测 GPS 速度场则更为吻合,而仅利用位错模型模拟所得地表运动速度场,虽然与实测 GPS 速度具有近似相同的量级,但在速度方向上则差别较大。由此可

见,组合模型能更好地描述区域地壳构造运动特征。

表 1 渭河盆地断裂系的各子断层参数

Table 1 Sub fault parameters of the Weihe Basin fault system

断裂带	序号	经度/(°)	纬度/(°)	转/(°)	倾角/(°)	长/km	宽/km	深/km	走向/(°)	走滑/mm	倾滑/mm
秦岭—北侧	1	106.329 503	34.629 373	1	60	80	1	60	—40	—100	—100
	2	107.000 609	34.311 871	1	60	29	1	60	—15	—100	—100
	3	107.428 053	34.272 014	—1	60	—35	—100	—100			
	4	108.383 447	34.0496 628	1	60	55	1	60	—30	—100	—100
	5	108.209 004	34.037 498	—1	60	19	1	60	—10	—100	—100
	6	107.791 38	34.125 875	—1	60	50	1	60	—35	—100	—100
	7	108.697 604	33.996 920	1	60	56	1	60	—10	—100	—100
韩城—华县	8	110.108 362	34.880 288	1	60	130	3	60	60	100	—100
口镇—关山	9	109.449 905	34.710 082	1	40	80	2	60	—2	—100	—100
	10	108.132 674	34.701 467	1	40	110	2	60	0	—100	—100
临潼—长安	11	109.500 000	37.792 792	1	50	69	2	52	55	100	100
	12	108.838 709	34.017 857	1	50	97	2	52	50	100	100
乾县—蒲城	13	107.802 027	34.176 563	2	40	100	2	70	18	—100	—100
	14	107.854 302	34.399 802	2	40	30	2	70	—10	—100	—100
	15	108.880 456	34.518 625	2	40	16	2	70	10	—100	—100
	16	109.138 077	34.176 563	2	40	55	2	70	28	—100	—100
渭河断裂	17	106.296 414	34.547 212	1	30	20	3	62	—15	100	—100
	18	106.576 755	34.516 406	1	30	115	3	62	—10	100	—100
	19	107.948 683	34.272 005	1	30	52	3	62	5	100	—100
	20	108.639 781	34.327 457	1	30	52	3	62	15	100	—100
岐山—马昭	21	106.770 887	35.018 609	2	60	35	4	60	—50	—100	—100
	22	106.938 775	34.828 828	2	60	30	4	60	—30	—100	—100
	23	107.195 652	34.672 727	2	60	20	4	60	—30	—100	—100
	24	107.326 086	34.612 612	2	60	25	4	60	—30	—100	—100
	25	107.489 130	34.540 540	2	60	135	4	60	—30	—100	—100
	26	107.695 652	34.432 432	2	60	110	4	60	—50	—100	—100
铁炉子	27	108.161 788	34.095 433	1	45	140	3	65	—10	100	0
	28	109.318 293	34.041 521	1	45	118	3	65	—8	100	0
	29	110.291 016	34.010 329	—1	45	48	3	65	—9	100	0
	30	110.452 752	33.975 671	—1	45	24	3	65	—10	100	0
华山北侧	31	109.310 332	34.042 906	1	70	25	5	60	50	—100	—100
	32	109.522 176	34.244 353	1	70	25	5	60	20	—100	—100
	33	109.763 48	34.459 664	1	70	25	5	60	10	—100	—100
	34	110.189 769	34.510 35	1	70	25	5	60	—10	—100	—100
固关—宝鸡	35	106.516 483	35.020 61	1	40	110	5	60	—65	—100	—100

此外,从图 3 组合模型模拟出的渭河盆地地壳水平运动速率可以看出,研究区西部主要受到甘青块体向东挤压的影响,渭河盆地及其周边的地壳运动主要以向东南方向运动为主。整体上,渭河盆地内活动断裂整体表现出一种不连续的逆时针旋转运动特征。

3 结论与认识

本文通过向错-位错组合模型对断层实际活动中存在的滑动和旋转转动状态进行理论描述,并以构造断裂十分发育的渭河盆地作为研究对象进行模拟计算,结果表明:

(1) 利用向位错组合模型能完整地描述断层的

滑动和转动运动状态;

(2) 向位错组合模型模拟的水平位移与该地区 GPS 观测的水平位移具有相同的量级,且二者在大小和方向的运动趋势具有较好的一致性,从而验证了向错-位错组合模型描述断层实际活动的合理性和可行性。

参考文献(References)

[1] Heki K,Miyazaki S,Tsuji H.Silent Fault Slip Following an Interplate Earthquake at the Japan Trench[J]. Nature, 1997, 386:595-597.

[2] 陈运泰,林邦慧,林中洋,等.根据体面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程[J].地球物理学报,1975, 18(3):164-

180.
CHEN Yun-tai, LIN Bang-hui, LIN Zhong-yang, et al. Study on the Seismic Source of Xingtai Earthquake in 1966, According to the Observation of Decent Deformation[J]. Chinese J Geophys, 1975, 18(3): 164-180. (in Chinese)
- [3] 孙文科. 地震位错理论在地震学研究中的作用与存在的问题[J]. 国际地震动态, 2012, 6: 17.
SUN Wen-ke. The theory of Earthquake Dislocation in Seismic Research Functions and Problems[J]. International Earthquake Dynamics, 2012, 6: 17. (in Chinese)
- [4] 张永志, 张永, 武艳军, 等. 断层转动与地表变形关系研究[J]. 大地测量学与地球动力学, 2013, 33(2): 2-6.
ZHANG Yong-zhi, ZHANG Yong, WU Yan-jin, et al. Relationship between Faults Rotation and Surface Deformation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(2): 2-6. (in Chinese)
- [5] 杨顺华, 丁棣华. 晶体位错理论基础[M]. 第二卷. 北京: 科学出版社, 1998: 546.
YANG Shun-hua, DING Li-hua. Theoretical Basis of Crystal Dislocation[M]. Second Volume. Beijing: Science Press, 1998: 546. (in Chinese)
- [6] Steketee J A. On Volterra's Dislocation in a Semi-infinite Elastic Medium[J]. Can J Phys, 1958, 36: 192-205.
- [7] Iwasaki T, Sato R. Strain Field in a Semi-infinite Medium due to an Inclined Rectangular Fault[J]. J Phys Earth, 1979, 27: 285-314.
- [8] 瞿伟, 张勤, 王庆良, 等. 渭河盆地现今地壳水平形变特征及区域构造活动性[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(7): 830-834.
QU Wei, ZHANG Qin, WANG Qing-liang, et al. Research on Present Crustal Horizontal Deformation Feature of Weihe Basin and Its Tectonic Activity[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(7): 830-834. (in Chinese)
- [9] 彭建兵, 张俊, 苏生瑞, 等. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992: 89-101.
PENG Jian-bing, ZHANG Jun, SU Sheng-run, et al. The Activity Faults and Ground Fissures Disaster of Weihe Basin[M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1992: 89-101. (in Chinese)
- [10] 丁国瑜. 活断层的分段模型[J]. 地学前缘, 1995, 2(2): 187-202.
DING Guo-yu. Sectional Model of Active Fault[J]. Frontier Science, 1995, 2(2): 187-202. (in Chinese)
- [11] 张希, 王庆良, 唐红涛, 等. 汶川地震孕震背景与同震变化的铲形断层位错模拟[J]. 地球学报, 2011, 32(2): 189-194.
ZHANG Xi, WANG Qin-liang, TANG Hong-tao, et al. Simulation of Listric Fault Dislocation in Wenchuan Earthquake and Coseismic Changes of the Background[J]. Journal of the Earth, 2011, 32(2): 189-194. (in Chinese)
- [12] 张永志, 徐海军, 王卫东, 等. 渭河盆地断裂活动速率的粒子群算法反演[J]. 西北地震学报, 2011, 33(4): 322-325.
ZHANG Yong-Zhi, XU Hai-jun, WANG Wei-dong, et al. Inversion of Particle Swarm Algorithm for Fault Activity Rate in Weihe Basin[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 322-325. (in Chinese)
- [13] 马辉青, 姚家骏, 马建新, 等. 青海东南部应力场特征及正断层小震现象的初步研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(2): 372-379.
MA Hui-qing, YAO Jia-jun, MA Jian-xin, et al. Research on Stress Field Characteristics and Normal Fault Small Earthquake of Southeastern Qinghai[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 372-379. (in Chinese)