

三峡库首区河长坡降指标及其地质构造意义

刘小利¹ 李 雪¹ 李井冈¹ 王秋良¹

¹ 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉市洪山侧路 40 号,430071

摘 要: 利用数字高程数据和空间分析方法,提取三峡库首区长江支流的河长坡降指标(S_L)以及标准化坡降指标(S_L/K),对该区构造活动进行分析。结果显示,研究区水系发育主要受断裂构造、地层岩性和新构造运动的影响,在空间上存在一定差异性,说明研究区构造活动存在区域性差异。在不同岩性地区,特别是三叠系地层区,水系响应较为明显,这与地层的抗水流侵蚀强度有关。该区水系发育受断裂构造控制作用较小,但受新构造抬升影响较大。

关键词: 三峡库首区;河长坡降;断裂构造;新构造运动

中图分类号: P546 **文献标识码:** A

大量研究证实,河流地貌与构造活动有密切关系^[1-3],河长坡降指标常被用于探讨中-小时空尺度的构造运动或岩性差异等问题^[4]。张会平的研究表明,黄河水系河流纵剖面形态特征是晚新生代强烈构造活动和岩性差异共同控制的结果^[5]。吉亚鹏的研究显示,渭河上游河流的 Hack 剖面皆呈上凸形态,表明第四纪以来渭河上游整体上处于构造抬升状态^[6]。

长江三峡地区的新构造活动对现今库岸稳定性及其生态环境变化有重要影响^[7]。本文利用 ASTER GDEM 数据(具有 20 m 垂直精度和 30 m 水平精度),计算三峡库首区内长江主要支流水系的河长坡降指标(S_L)以及标准化坡降指标(S_L/K),综合分析 S_L/K 与地层岩性、断裂构造、新构造运动之间的相关性,探索三峡库首区河流地形演化情况。

1 河长坡降分析

三峡库首区范围为北纬 29.92°~31.75°,东经 108.33°~112°。地貌类型以侵蚀溶蚀与侵蚀剥蚀为主,区内地层出露齐全,发育良好,除缺失泥盆系下统、石炭系上统、白垩系一部分和第三系外,自前震旦系至第四系均有出露^[8]。

1.1 水网提取

对研究区 DEM 数据进行洼地填平、水流方向计算、水流积聚计算和河网矢量转化等处理,得到研究区原始水系网。对不同流域水系进行识

别,删除不完整的分支水系网,获得研究区水系网分布(图 1)。

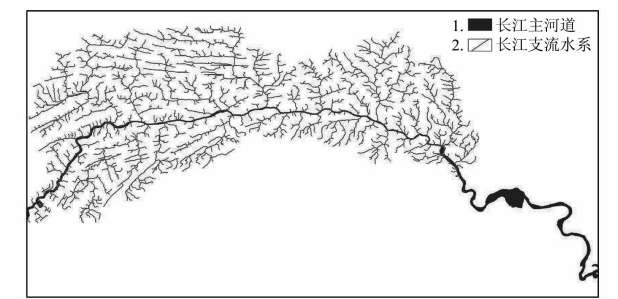


图 1 研究区水系网分布图
Fig. 1 Drainage network map of the study area

1.2 S_L/K 指标

Hack 研究河流纵坡面时提出以高度为纵轴,以河段距河流源头的距离取对数,将河流纵剖面表现为简单对数方程^[9]:

$$H = C - K \log L \quad (1)$$

其中, H 为纵剖面高度, C 为常数, K 为斜率, L 为河流从源头沿河道至流域出口的长度。河长坡降指标为:

$$S_L = (\Delta H / \Delta L) L' \quad (2)$$

其中, ΔH 为每单位河段的高程差, ΔL 为每单位河段的距离, L' 为河流源头至河段中点之距离。

本文以最长路径原则,提取研究区长江水系网中水流源头距出水点距离大于 25 km 的 22 条主要支流,依次编号为 R_1 至 R_{22} ,其长度、高程信息和河长坡降斜率 K 值见表 1。由表 1 可知,长江左岸水系平均长度为 89.0 km,平均高程落差

为 1 199.5 m,平均 K 值为 15.7;长江右岸水系平均长度为 55.8 km,平均高程落差为 1 009 m,平均 K 值为 23.5。说明研究区长江两岸水系发育存在一定差异。

表 1 主要水系参数
Tab. 1 Parameters of the main streams

编 号	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}	R_{16}	R_{17}	R_{18}	R_{19}	R_{20}	R_{21}	R_{22}
长度/km	167.7	96.7	98.7	160.3	28.1	57.2	52.9	98.6	44.3	133.2	41.5	156.4	93	78.5	34.9	36.7	30.3	33.4	52.6	26.7	38.3	32.7
源头高程/m	1 957	1 120	985	2 186	730	2 134	1 452	1 127	872	1 170	400	1 171	1 176	1 439	1 208	823	1 480	1 366	818	921	1 068	585
出水口高程/m	90	90	90	90	90	85	85	85	78	78	78	85	90	90	90	90	90	90	90	85	78	78
高程落差/m	1 867	1 030	895	2 096	640	2 049	1 367	1 042	794	1 092	322	1 086	1 086	1 349	1 118	733	1 390	1 276	728	836	990	507
K 值	11.1	10.7	9.1	13.1	22.8	35.8	25.8	10.6	17.9	8.2	7.8	6.9	11.7	17.2	32.0	20.0	45.9	38.2	13.8	31.3	25.8	15.5

由于不同河流的长度、高程均不一致,导致 S_L 值不具有类比性。本文采用标准化河长坡降指标(S_L/K)对 22 条主要支流的纵剖面进行对比分析,即将每条河流上各小河段的河流坡降指标值都除以该河流的均衡坡降指标值, S_L/K 越高说明该河段受构造或地层控制作用越明显。将不同 S_L/K 值的河段用不同颜色表示,获得 22 条主要支流的 S_L/K 异常分布图(图 2)。

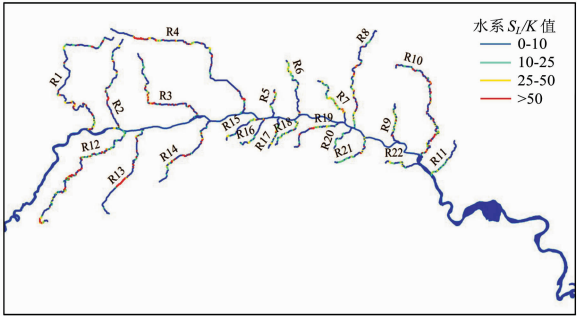


图 2 主要水系 S_L/K 值异常分布图
Fig. 2 S_L/K anomaly map of the main streams

2 相关性分析

有些河流的 S_L/K 值变化受地层岩性控制作用明显^[6],有些河流则主要受构造活动的影响^[10]。本文从地层岩性和断裂构造两个方面研究 S_L/K 值与二者的相关性。

2.1 与地层岩性的相关性

将图 2 与本区地质构造图叠加,可以获得主要水系 S_L/K 值与河流流经的地层岩性的关系,图 3 为 R_{12} 的河长坡降曲线与地层岩性的叠加图。

为定量分析水系 S_L/K 值异常与地层岩性的相关性,本文统计了不同水系流经相同地层岩性的每 km 河段的 S_L/K 值均值(表 2)。其中向量 $\langle A, B \rangle$ 表示河段沿流水方向地层由 A 转变为 B ,若 A 与 B 相同,则表示该河段地层未变化。

由表 2 可知,三峡库首区长江 22 条主要支流每 km 河段的地层岩性向量总共有 45 类,其中 R_6 流经的地层岩性向量类型最多,为 18 类;而 R_9 、 R_{14} 、 R_{15} 流经地层岩性未发生变化。矩阵中大部分为空值,仅有 173 项有数值(其中左岸 $R_1 \sim R_{11}$ 占

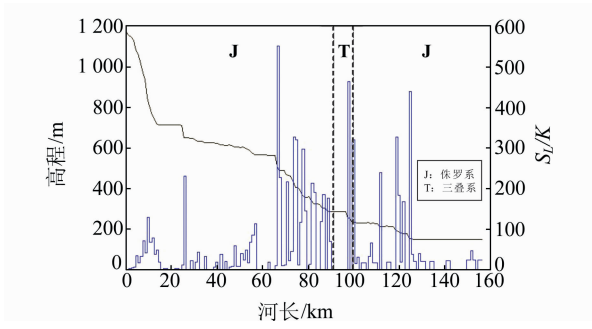


图 3 R_{12} 的 S_L 参数、 S_L/K 与岩性变化图
Fig. 3 S_L index, S_L/K and lithostratigraphic change of R_{12}

114 项,右岸 $R_{12} \sim R_{22}$ 占 59 项),占矩阵总项数的 17.5%。研究区主要水系流经地层岩性变化情况较少,且左岸水系流经地层岩性变化较右岸大。

将各水系段在不同地层向量中的 S_L/K 值分为空值、 $[0, 25)$ 、 $[25, 50)$ 、 $[50, \infty)$ 4 个区间。据此可将 S_L/K 值与地层岩性的相关性分为 3 类:1)影响最显著者,以 R_4 沿渡河为例,其穿越震旦至三叠系地层,尤其在切割二叠系硅质、燧石灰岩这类强岩层,和侵蚀三叠系中统巴东组泥质岩、粉砂岩等弱岩层时,地层强度具有很大的反差。此外,由于源头与入河高度有 2 037 m 的落差,水流具有较大的能量,加大了地层对 S_L/K 值的影响。2)影响较大者,以 R_1 、 R_4 、 R_8 、 R_{12} 、 R_{13} 、 R_{17} 、 R_{19} 、 R_{21} 为代表,它们大都与志留系、三叠系和侏罗系内部强岩层灰岩、砂岩与软岩层碎屑岩,或不同岩性的分层带有关,或者与泥盆系石英砂岩与志留系泥、页岩区强度差异很大的地层有关。3)影响较小者,如 R_2 、 R_3 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 、 R_{14} 、 R_{15} 、 R_{16} 、 R_{18} 、 R_{22} 。

从地层向量矩阵可知,三叠系中巴东组($T_2 b_2$)因其为巨厚的泥质岩类,故对水系的 S_L/K 值影响最大。其次为志留系、二叠系和侏罗系地层,并且水系流向由奥陶系地层流向志留系地层、由志留系地层流向泥盆系和二叠系地层、由二叠系地层流向三叠系地层、由三叠系地层流向二叠系和侏罗系地层时,水系 S_L/K 值易出现异常。这均与地层的抗水流侵蚀强度有关。

表 2 主要水系 S_L/K 值异常与地层向量矩阵
Tab. 2 Matrix of the S_L/K abnormality of the main streams and stratum vector

S_L/K 地层	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}	R_{16}	R_{17}	R_{18}	R_{19}	R_{20}	R_{21}	R_{22}
<Q,Q>										14.2												
<Q,K>										10												
<Q,T>						0																
<K,Q>										19.5												0
<K,K>										21.8	5.9											2.1
<J,Q>																			0			
<J,J>	31.7	29	47.2				22.4	34.3	14.6			48.1	24.4					3.9	5.6			
<J,T>	35.9	3.8	0					0				0							14.7	0		
<T,Q>						0											0					
<T,K>											0											
<T,J>	0	1.6	8.0				14.5	161				0	0					4.0	1.5			
<T,T>	18.9	19.4	17.7	45.1	14.3	5.04	10	21.8			0	77.3	50.1	35.2	10.8	28.2	13.1	13.4	21.5	10.0	0	
<T,P>	4.9	28.3	0	56.4	17.2													14.2			4.7	
<T,S>				0																		
<P,T>	11.8	3.07	0	46.1	8.1	0	20.5									0	57.4	20.6	0	0		
<P,P>	8.6	22.8	0	60.4	15.1	15.4	0									19.5	11.2	8.9	8.3		12.3	
<P,D>																24					9.9	
<P,S>	14.6	0		25.5																		
<P,O>		0																				
<D,P>						0.8	13.7									0			9.57			
<D,D>							19.4									3.7						
<D,S>																21.2					0	
<S,T>								0														
<S,P>		6.74	0	52																		
<S,D>						0	0.5									0			53.4			
<S,S>	58	3.4	0	10.0		3.9	31.3	60.3		16.4						4.12			0		0	
<S,O>	0					0		4.3		0									2.3		0	
<S,ε>																					31	
<O,K>										14.2												
<O,S>						17.6	25.5	2.6		0									0.8		56.5	
<O,O>		2.8				2.0	0	0		42.9									5.3			
<O,ε>	0	8.4					2.48			6.93												
<ε,Q>																					30.8	
<ε,K>																						45.8
<ε,T>		0																				
<ε,P>	0																					
<ε,O>						16.7	0	0		6.81												
<ε,ε>		0				10.6		21.9		45.6											15	12
<ε,AnZ>								8.9														
<Z,ε>						15.4		6.0		0												
<Z,Z>						18.4		14.4		48.2												
<Z,AnZ>						32.6																
<AnZ,ε>								0														
<AnZ,Z>						28.3		0														
<AnZ,AnZ>						21.3		8.8														

2.2 与断裂构造的相关性

将研究区主要水系与断裂构造进行叠加,可以获得每段水系与最近断裂构造的空间关系。图 4 为 $R_1 \sim R_{22}$ 各分段水系 S_L/K 值与该段水系最近断层距离的散点分布图。对所有散点进行一次拟合后,获得拟合公式,见图 4。其中 x 表示分段水系与最近断层的距离, y 表示分段水系的 S_L/K 值, R 表示 x 与 y 之间的相关系数。由图 4 可知,研究区主要水系各分段水系的 S_L/K 值与该段水系距最近断层的距离相关性不高。

分别对 R_1 至 R_{22} 各水系分段的 S_L/K 值和最近断层距离进行拟合(表 3)。其中,大多数水系

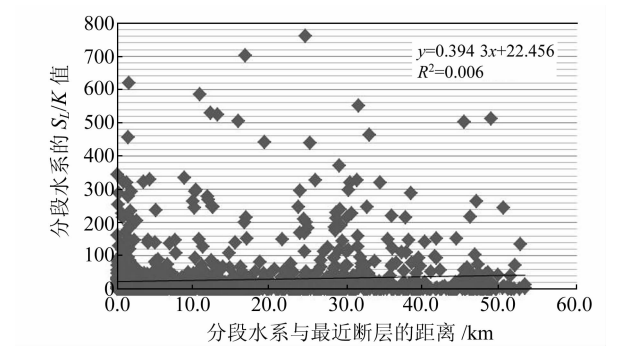


图 4 分段水系的 S_L/K 值与最近断层距离关系
Fig. 4 The relationship of S_L/K value of segment streams and distance with the nearest fault

的 S_L/K 值与断层距离相关性较低,仅 R_{11} 、 R_{18} 和

R_{20} 相关性较高,后两条水系均发源于磨坪复背斜南翼,并穿过 NE 的磨坪逆断层带和近东西向文化(幺棚)断层, S_L/K 高值与断层距离甚至活动性密切相关。其原因可能是在距长江主流线相同范围,长江左岸的水系大都斜切或直切近东西向区域构造线,水流的能量大都消耗于深切打通褶

皱构造带上,而长江右岸的水系几乎都发育在 NE、NEE 向隔槽式向斜内,具顺向流特征。此外,由于新构造期以来三峡地区隆起最大的地段也在右岸绿葱坡一带,地壳强烈抬升、河流下切,形成反差较大的峡谷地貌,导致右岸水系 S_L/K 值比左岸要高。

表 3 主要水系 S_L/K 值与断层距离拟合
Tab. 3 The fitting of S_L/K value and fault distance of main streams

水系编号	一次拟合公式	相关系数	水系编号	一次拟合公式	相关系数
R_1	$y = 0.517\ 4x + 9.017\ 7$	$R^2 = 0.019\ 2$	R_{12}	$y = 2.485x - 23.765$	$R^2 = 0.004\ 1$
R_2	$y = 0.407\ 9x + 9.535\ 4$	$R^2 = 0.024\ 2$	R_{13}	$y = -0.417\ 6x + 50.864$	$R^2 = 0.002\ 8$
R_3	$y = 0.595\ 3x + 14.974$	$R^2 = 0.017\ 6$	R_{14}	$y = 1.562\ 4x + 5.133\ 3$	$R^2 = 0.019\ 1$
R_4	$y = -1.442x + 53.501$	$R^2 = 0.005\ 6$	R_{15}	$y = -0.979\ 5x + 15.762$	$R^2 = 0.062$
R_5	$y = -0.321\ 4x + 15.33$	$R^2 = 0.001$	R_{16}	$y = -8.266x + 33.788$	$R^2 = 0.074\ 4$
R_6	$y = 0.921\ 7x + 4.780\ 8$	$R^2 = 0.031\ 9$	R_{17}	$y = -1.471\ 8x + 18.136$	$R^2 = 0.074\ 2$
R_7	$y = -1.277\ 1x + 21.585$	$R^2 = 0.033\ 5$	R_{18}	$y = -1.848\ 3x + 21.111$	$R^2 = 0.103$
R_8	$y = -0.760\ 5x + 24.253$	$R^2 = 0.001\ 3$	R_{19}	$y = -2.156x + 23.93$	$R^2 = 0.016\ 8$
R_9	$y = 0.099\ 1x + 12.925$	$R^2 = 0.001\ 3$	R_{20}	$y = -1.046\ 2x + 9.887\ 1$	$R^2 = 0.109\ 5$
R_{10}	$y = 0.116\ 2x + 38.817$	$R^2 = 0.000\ 07$	R_{21}	$y = -0.587\ 2x + 16.246$	$R^2 = 0.014\ 8$
R_{11}	$y = 1.341\ 9x - 8.208\ 8$	$R^2 = 0.292\ 6$	R_{22}	$y = -0.942\ 6x + 19.088$	$R^2 = 0.060\ 3$
左岸支流的拟合相关系数绝对值均值		0.137\ 8	右岸支流的拟合相关系数绝对值均值		0.199\ 8

3 结 语

1) 三峡库首区长江两岸水系的发育特征在空间上存在一定的差异,具体表现为左岸水系平均长度和平均落差均大于右岸水系,但左岸水系平均河长坡降斜率比右岸水系略低。

2) 不同水系受地层岩性影响程度不一致,三叠系地层对水系发育影响最大,其次为志留系、二叠系和侏罗系地层。不同岩性交界面对水系的发育也存在一定影响,影响较大的岩性交界面按水流方向地层向量可表示为 $\langle O, S \rangle$ 、 $\langle S, D \rangle$ 、 $\langle S, P \rangle$ 、 $\langle P, T \rangle$ 、 $\langle T, P \rangle$ 、 $\langle T, J \rangle$ 。

3) 三峡库首区长江水系发育具有区域性差异,右岸水系的发育受构造影响程度略大于左岸水系。总体而言,水系发育受断裂构造控制作用并不显著,但与新构造期以来地壳隆升、河流深切有关。

参考文献

[1] Holbrook J, Schumm S A. Geomorphic and Sedimentary Response of Rivers to Tectonic Deformation; a Brief Review and Critique of a Tool for Recognizing Subtle Epeirogenic Deformation in Modern and Ancient Settings [J]. Tectonophysics, 1999, 305(1): 287-306

[2] Bagha N, Arian M, Ghorashi M, et al. Evaluation of Relative Tectonic Activity in the Tehran Basin, Central Alborz, Northern Iran[J]. Geomorphology, 2014, 213: 66-87

[3] Pérez-Peña J V, Azatón J M, Azor A, et al. CalHypso: an ArcGIS Extension to Calculate Hypsometric Curves and Their Statistical Moments. Applications to Drainage Basin Analysis in SE Spain[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(6): 1 214-1 223

[4] 赵洪壮, 李有利, 杨景春. 北天山流域河长坡降指标与 Hack 剖面的新构造意义[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2010, 46(2): 237-244 (Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun. Implication of Active Structure along the Northern Tianshan by Stream Length-Gradient Index and Hack Profile[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(2): 237-244)

[5] 张会平, 张培震, 吴庆龙, 等. 循化-贵德地区黄河水系河流纵剖面形态特征及其构造意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 299-309 (Zhang Huiping, Zhang Peizhen, Wu Qinglong, et al. Characteristics of The Huanghe River Longitudinal Profiles around Xunhua-Guide Area (Netibet) and Their Tectonic Significance [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(2): 299-309)

[6] 吉亚鹏, 高红山, 潘保田, 等. 渭河上游流域河长坡降指标 S_L 参数与 Hack 剖面的新构造意义[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2011, 47(4): 1-6 (Ji Yapeng, Gao Hongshan, Pan Baotian, et al. Implication of Active Structure in the Upper Reaches of Weihe River Basin from Stream Length-Gradient Index (S_L Index) and Hack Profile[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2011, 47(4): 1-6)

[7] 杨武年, 濮国梁, 郑平元, 等. 长江三峡库区多类型、多时相遥感图像数字处理和地质构造信息提取[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2003, 30(4): 378-385 (Yang Wunian, Pu Guoliang, Zheng Pingyuan, et al. Digital Processing and Information Extraction of Multi-type and Multi-temporal Remote Sensing Images for Geological Hazard in the Yangtze Three Gorges Project Region, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2003, 30(4): 378-385)

[8] 田陵君, 王兰生, 刘世凯. 长江三峡工程库岸稳定性[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992 (Tian Lingjun, Wang Lansheng, Liu Shikai. Bank Stability of Three Gorges Pro-

ject Reservoir Yangtze River[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992)

[9] Hack J T. Stream-Profile Analysis and Stream-gradient Index[J]. Journal of Research of the US Geological Survey, 1973, 1(4): 421-429

[10] 曹凯, 王国灿, 王岸. 东昆仑山昆仑河纵剖面形貌分析及构造涵义[J]. 地球科学, 2007, 32(5): 713-721 (Cao Kai, Wang Guocan, Wang An. The Analysis of the Tectonics and the Behavior of the Longitudinal Section of Kunlun River in East Kunlun[J]. Earth Science, 2007, 32(5): 713-721)

Implications of Active Structures in Head Area of the Three Gorges Reservoir by Characteristics of Stream Longitudinal Profiles

LIU Xiaoli¹ LI Xue¹ LI Jinggang¹ WANG Qiuliang¹

¹ Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China

Abstract: We examine the stream length-gradient S_L index and gradient index S_L/K for concavity studies, and analyze the tectonic activities in the head area of the Three Gorges reservoir based on DEM data and spatial analysis method. Consequent analysis reveals that the main factor causing the landform is tectonic uplifting. Tectonic fault exhibits a strong influence on river profile in the study area. However, the tectonic processes are distinct in different tributaries. The tectonic activities are very strong in the left bank and weak in the right bank. The differential lithology distribution is also another aspect of the profile feature. In a general, the longitudinal profiles of the river tributaries are well controlled by neotectonic movement, tectonic faults and lithological difference.

Key words: head area of the Three Gorges reservoir; stream length-gradient; faults; neotectonic movement

(上接第 277 页)

[20] 万天丰. 古构造应力场 [M]. 北京:地质出版社,1988(Wan Tianfeng. Paleostress Field [M]. Beijing:Geological Press, 1991)

[21] Anderson E M. Facsimile Reproduction of The Dynamics of Faulting [J]. Geological Society, 2012, 367:231-246

The Analysis of Tectonic and Inversion of the Paleostress Field in the Zhangxian Salt Red Bed Basin in Northern Margin of West Qinling

MA Chuntian¹ GUO Jinjing¹ LIU Lin¹ WANG Lixiao¹ ZHAO Haitao¹

¹ School of Geological and Geomatics, Tianjin Chengjian University, 26 Jinjing Road, Tianjin 300384, China

Abstract: The northern margin fault zone of western Qinling is one of the principal tectonic boundaries in the northeastern margin of the Tibet plateau. The Zhangxian red bed basin is an important part of the northern fault zone of western Qinling. The study of the paleostress field on the basin is essential to understanding the tectonic evolution of the fault belt of western Qinling in the Mesozoic and Cenozoic periods. Our method is, first, to match the joints of same period according to the structure characteristics of the joint that are observed and measured in the field. Second, we inversed the paleostress field by using the stereographic projection method. The result shows that the study area has underwent four stages of compressive stress after the Cretaceous period, i. e. , N-W, S-W, E-W and N-S compressive stresses. The inversion results of Palaeostress field shows that the area is dominated by strike-slipping tectonics after the Cretaceous sedimentation.

Key words: red bed basin; deformation analysis; paleostress field; structural joints; fold