

Tectonic Stress Field Character and Balanced Cross Section of Guangping Thrust in Southeastern Fujian*

Sen Wang¹, Liangji Lv¹, Da Zhang¹, Quansheng Lin^{1,2}, Yaoyao Zhang¹, Xu Zhang¹, Yuan Yuan¹, Yongjun Di¹, Linkuo Zhang¹

¹State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing

²The Western Geological Party of Fujian, Xiamen

Email: wangsen20062006@126.com

Received: Feb. 24th, 2013; revised: Mar. 11th, 2013; accepted: Mar. 24th, 2013

Copyright © 2013 Sen Wang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: With the backward method of the stress field about the conjugate joints and the theory of balanced cross section, the writer analysed the kinematic characteristics and the deformation degree of the Guangping thrust. In accordance with the survey of conjugate joints in the quartz sandstone of Lindi formation in 9 places, we draw a conclusion that the direction of the maximum compressive principal stress is NW-SE; the balanced cross section of the coal district shows that strata shortened at a rate of 38.4%, and that shortening is the result of the thrust moving. Combined with the basic characters of nappe structure and the regional tectonic analysis, the thrust moved from northwest to southeast under the action of the regional compressive stress and result in a large scale of shortening. The above results indicated that the lithosphere of southeastern Fujian, as well as southeastern China experienced strong compressional deformation from the later Mesozoic, and moved with a large scale and a long distance from northwest to southeast.

Keywords: Southwestern Fujian; Guangping Thrust; Tectonic Stress Field; Balanced Cross Section; Shortening Rate

闽西南广平推覆构造应力场特征及平衡剖面研究*

王森¹, 吕良冀¹, 张达¹, 林全胜^{1,2}, 张焱焱¹, 张旭¹, 袁远¹, 狄永军¹, 张林阔¹

¹中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京

²福建省闽西地质大队, 厦门

Email: wangsen20062006@126.com

收稿日期: 2013年2月24日; 修回日期: 2013年3月11日; 录用日期: 2013年3月24日

摘要: 本文采用共轭剪节理应力反演方法及平衡剖面复原原理分析了闽西南广平推覆构造的运动学特征及变形缩短程度。通过对分布于广平推覆体林地组石英砂砾岩中9个测点的共轭剪节理测量结果分析, 得出形成推覆构造的构造应力场最大主压应力为NW-SE向; 通过对煤田勘探剖面开展平衡剖面研究, 估算出由于推覆构造导致的地层缩短率为38.4%; 结合推覆构造基本特征及区域构造综合分析, 推断广平推覆构造在区域挤压应力作用下由NW向SE运动, 并造成地层大幅缩短。以上结果表明闽西南及其所在的中国东南大陆岩石圈自晚中生代以来经历了强烈挤压变形, 形成了自NW至SE向运移且规模巨大的推覆构造。

关键词: 闽西南; 广平推覆构造; 构造应力场; 平衡剖面; 缩短率

*资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“武夷山成矿带中生代推覆构造与铜多金属找矿方向研究”(编号: 1212010813064)和“武夷山植被覆盖区成矿地质背景研究与成矿要素综合推断”(编号: 1212010070203)。

1. 引言

闽西南地区地处华南大陆东南缘,自早元古代以来,该区经历了华夏古陆的形成、裂解,新元古代与扬子古陆聚合,早古生代区域隆升以及晚古生代裂陷盆地形成等重要构造演化阶段。特别是中生代以来,该区经历了强烈的构造热事件,其中中侏罗世晚期以来由于东亚岩石圈板块汇聚^[1]而形成显著的推覆构造,使该区早期形成的地层层序及位置发生了强烈改造,并形成相应的岩浆与成矿作用。闽西南地区推覆构造普遍发育,其中广平推覆构造是福建境内发育最完整,面积较大的一个推覆构造,其南北长大于 20 km,东西宽大于 12 km。区内多期构造演化及不同阶段岩浆活动等复杂的特征引起了地质学者的广泛关注,并建立了一系列几何学、运动学、动力学模式^[2-5]。陶建华^[2]通过大量的野外调查及煤田勘探资料,认为广平推覆“岩席”鳞次栉比,为叠瓦状构造,并伴有平卧或斜歪向斜构造。关玉祥等^[3]根据外来岩系分布规律和原地岩系褶皱构造特征,认为广平推覆构造运动方向由 NW 向 SE 推覆,并且外来岩系的推覆距离大于 100 km。周珍奇^[4]认为广平推覆构造主要经历了海西期陆内裂陷、早印支期伸展滑脱-挤压变形滑动、晚印支期向斜构造发育、早燕山早期裂陷、晚燕山期逆冲推覆构造等阶段,并讨论了推覆构造的形成和演化。

然而,由于研究区构造变形复杂,以及中生代以来多期次岩浆叠加改造,导致推覆构造结构和变形等特征发生较大改变,增加了该区推覆构造的研究难度。对闽西南广平推覆构造特征的研究仍然存在如下问题:1) 直接的推覆构造证据由于受后期构造变形的改造而较为缺乏;2) 由于该区不同层次推覆构造发育以及后期岩浆等叠加改造,导致推覆构造变形缩短量的估算存在较大差别,需根据新的野外调查及勘探资料进一步细化。

本文运用构造应力场测量方法及平衡剖面原理,通过详细的野外地质调查及井田勘查资料,对广平推覆构造应力场方向进行分析,并估算了地层缩短量,在此基础上,探讨闽西南地区推覆构造动力学背景。

2. 区域地质概况

闽西南地区在构造上处于欧亚大陆板块东南缘,

濒临太平洋板块,为环太平洋中、新生代巨型构造-岩浆带边缘活动带的一部分^[6],是全球构造-岩浆活动最活跃的地区之一。广平推覆构造位于闽西南凹陷带中部,大田-龙岩凹陷东北边缘,主要发育中深层次推覆构造,局部伴随拆离(滑脱)、褶皱拆离构造。广平推覆体与永安、清流、宁化等诸多推覆体共同构成了闽西南推覆构造带。

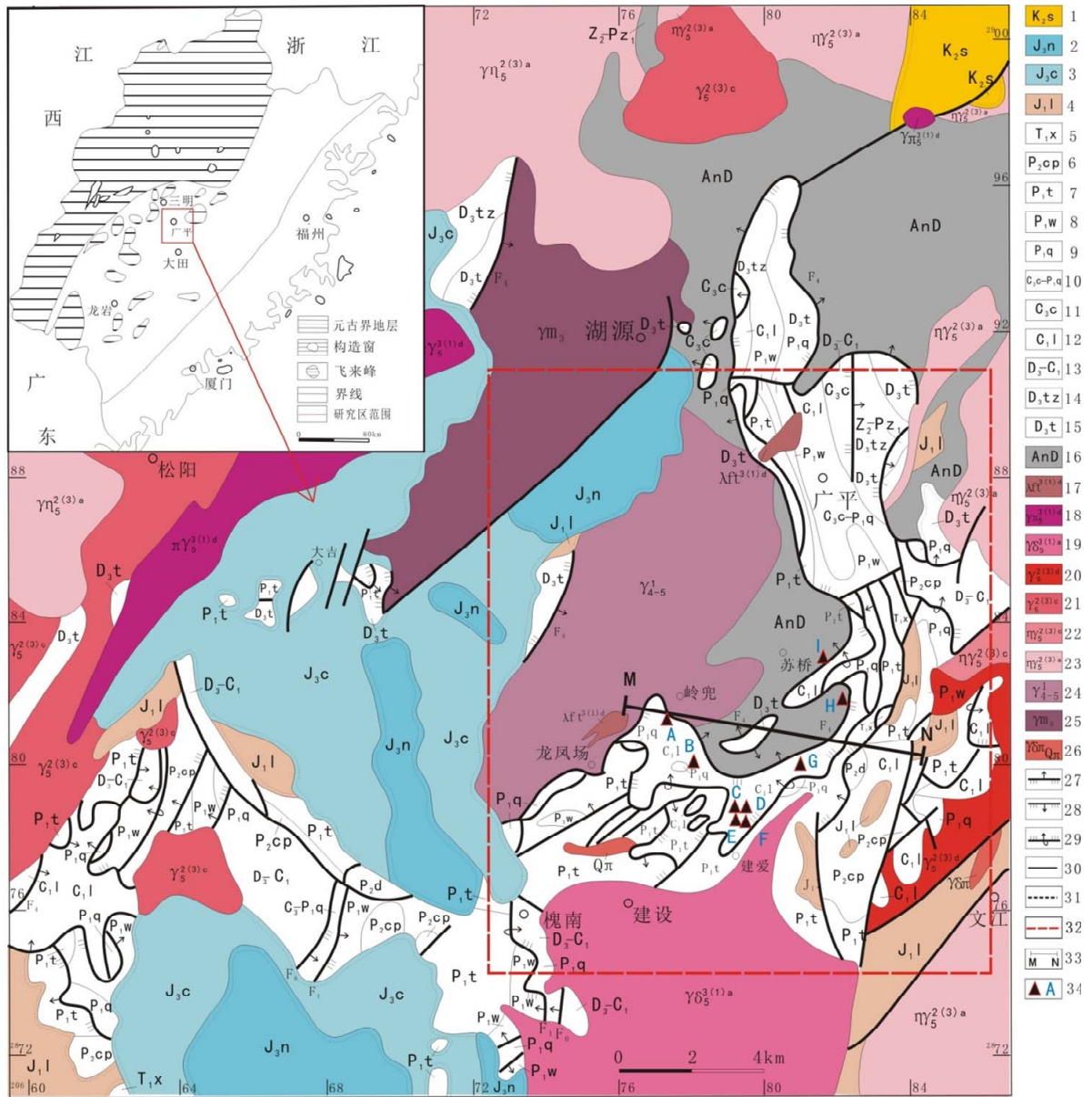
闽西南地区除了缺失志留系及下泥盆统地层外,其它地层均有发育,尤以晚古生代-早中代地层发育为特色^[7]。其中,上古生界-中下三叠统地层分布广泛,侏罗系陆相火山岩呈孤岛状沿断陷盆地分布。上古生界-中下三叠统以浅相、海陆交互沉积为主,从老至新有上泥盆-下石炭统(D₃-C₁)粗碎屑岩,上石炭统船山组-下二叠统栖霞组(C_{3c}-P_{1q})灰岩、硅质岩,下二叠统文笔山组-中三叠统(P_{1w}-T₂)海陆交互相含煤细碎屑岩、浅海相含钙细碎屑岩。

区内 NE 向褶皱发育,主要有大帽山背斜、广平-龙岩复式向斜、太华-长塔复式背斜以及大田复式向斜等。这些褶皱轴面以 NE 向展布为主,次级褶曲比较发育,并且局部可见倒转褶皱。大田广平倒转向斜轴向 NE,向北渐转向 NW,出露长约 20 km,翼间角在 20°~40°之间,向斜被 NE 向断裂破坏导致出露不完整。区内断裂构造以 NNE、NE 和 SN 向为主,属于政和-大埔、永安-晋江断裂带的组成部分。此外,沿上古生界不同地层界面(如 D₃-C₁ 与 C_{3c}-P_{1q}、Pt_{3my} 与 C_{3c}-P_{1q}、P_{1q} 与 P_{1w}、P_{1t} 等)普遍发育的缓倾斜推覆构造和层间滑脱断裂破碎带,往往造成地层大量重复或缺失,并成为十分有利的控矿容矿构造。在平面上,断层呈醒目的圆弧状展布,受地形限制多呈蛇曲状展布(图 1)。

区内岩浆活动强烈,以中生代酸性-中性侵入岩体及岩脉为主,岩体的形态及展布特征明显受推覆构造控制。此外还发育 NE 向展布的混合岩浆花岗岩(如本区西侧的湖源岩体、新桥岩体、龙凤场岩体等),均为无根岩体,属于广平推覆体的一部分,并且明显受推覆构造控制。

3. 推覆构造基本特征

广平地区推覆构造广泛发育,在空间上外来岩系以大面积“飞来峰”形式直接覆盖在原地岩系之上,



1. 上白垩统沙县组; 2. 上侏罗统南园组; 3. 上侏罗统长林组; 4. 下侏罗统梨山组; 5. 下三叠统溪口组; 6. 上二叠统翠屏山组; 7. 下二叠统童子岩组; 8. 下二叠统文笔山组; 9. 下二叠统栖霞组; 10. 上石炭统船山组一下二叠统栖霞组; 11上石炭统船山组; 12. 下石炭统林地组; 13. 上泥盆统一下石炭统; 14. 上泥盆统桃子坑组; 15. 上泥盆统天瓦紫组; 16. 前泥盆系; 17. 燕山晚期第一阶段第四次隐爆流纹岩; 18. 燕山晚期第一阶段第四次花岗斑岩; 19. 燕山晚期第一阶段第一次花岗闪长岩; 20. 燕山早期第三阶段第四次黑云母花岗岩; 21. 燕山早期第三阶段第三次黑云母花岗岩; 22. 燕山早期第三阶段第三次二长花岗岩; 23. 燕山早期第三阶段第一次二长花岗岩; 24. 海西一印支期白云母花岗岩; 25. 加里东期二云母花岗岩; 26. 花岗闪长斑岩及石英斑岩; 27. 逆断层; 28. 正断层; 29. 翻转断层; 30. 性质不明断层; 31. 推测断层; 32. 工作区范围; 33. 剖面位置; 34. 节理观测点及编号

Figure 1. The geologic map of Guangping thrust
图 1. 广平一带推覆构造及区域地质略图

两者呈断层接触，并且外来岩系之间仍存在多组推覆构造界面。推覆构造之外来岩系为上元古界 - 下古生界片岩、变粒岩等以及不整合其上的上泥盆 - 下石炭统地层，并包括侵入于以上地层的加里东期混合花岗岩、白云母花岗岩。原地岩系呈半构造窗形式出露于广平、桃舟、大竹林一带，位于低洼地带，由上泥盆

统 - 下三叠统溪口组及侏罗系下统梨山组地层组成，并以煤系地层强烈褶皱、倒转平卧褶皱发育并伴生小型逆冲、顺层断裂构造为特征。沿上古生界不同地层岩性界面普遍发育缓倾斜逆冲断层，如 D_3-C_1 与 C_3c-P_1q 、 P_1t 与 C_3c-P_1q 等之间的界面^[8]。在空间上，广平推覆构造整体上呈 NE-SW 向延伸，受地形控制

呈弧形展布，弧顶指向 SE。

剖面显示^[6]，广平推覆构造由一系列产状相近的低角度逆冲断层及夹于其间的薄层岩席组成，局部伴随滑脱构造，以发育复杂倒转、歪褶皱为特征。断层面在近地表产状较陡，沿断裂面向下逐渐变缓，总体上表现为“犁状”产出。推覆构造断面倾向 NW，倾角 10°~30°，并且沿走向、倾向波状起伏。原地岩系和外来岩系这两套构造层在区内呈上下岩片重叠，共同构成了双重推覆构造带^[6]。由于逆冲推覆侧向挤压作用，推覆岩席沿不同地层界面发生滑动，一方面造成了部分地层的大量缺失，另一方面造成地层的强烈褶皱，其中以广平龙凤场倒转向斜较为典型。广平推覆体南西侧龙凤场疏、多金属矿区勘探资料表明^[3]，区内发育一倒转向斜，其核部由下二叠统童子岩组(P₁t)和文笔山组(P₁w)地层组成，两翼为上石炭统船山组-早二叠统栖霞组(C₃c-P₁q)地层，褶皱轴面倾向 NNW，北东翼地层倒转。

4. 推覆构造应力场特征

闽西南地区早中生代存在着指向 SE 的大规模逆冲断层系^[9]，推覆构造形成于区域挤压应力场，因此必然导致其所卷入地层发生构造变形，如褶皱、次级断裂、节理、劈理等，其中共轭剪节理特征可以反映推覆构造形成时的挤压应力状态^[10]。研究区推覆构造外来岩系及原地岩系共轭剪节理分布不均匀，以外来岩系下石炭统林地组石英砂岩中最为发育，究其原因可能与林地组脆性程度较高有关。除此之外，共轭剪节理在该区较为发育，远离推覆体的其它地方明显不发育，表明林地组共轭剪节理与推覆构造关系密切。通过测量林地组共轭剪节理产状，可以揭示广平推覆构造最大主应力分布特征，进一步为广平推覆构造运动学方向研究提供可靠依据。

4.1. 测量原理

构造应力场是指在一个空间范围内构造应力大小和方向的分布状况^[11]，构造应力场研究是在确定各地质点的应力状态基础上，研究一定区域范围内各个构造活动时期的构造应力状态分布。为了测量一个地区某一构造运动时期的应力状态，通常用同一应力场作用下形成的共轭剪节理的产状计算出三个主应力轴的空间方位。根据构造地质学理论^[12]，同一构造应

力场形成的节理与主应力轴方位具有以下几何关系：一对共轭剪节理的交线平行于中间应力轴 σ_2 的方向，共轭剪节理的锐角等分线通常平行于最大主应力轴 σ_1 的方向， σ_3 垂直于共轭剪节理锐角平分面。

4.2. 共轭剪节理测量

林地组地层作为广平推覆体的主要组成部分，岩性为厚层石英砂砾岩、石英砾岩、石英砂岩，局部夹有粉砂岩、泥岩。岩石物理性质表现为硬度高、能干性强，并且易发生脆性变形。经野外调查发现林地组地层局部发育共轭剪节理，节理面平直光滑且延伸较远，两组节理相互切割，为同期形成。

通过野外地质观察，在广平地区 9 个观测点(图 1)共测量了 73 对共轭剪节理。在构造位置上，取样点位于广平倒转向斜弧东南部；在层位上，均取自于下石炭统林地组石英砂岩、砂砾岩。运用赤平极射投影方法^[12]，可以计算出每一对共轭剪节理三维空间的最大主压应力轴(σ_1)的方向位(表 1)，然后根据最大主压应力方向绘制出具有优势方位的玫瑰花瓣图，其分布特征如图 2 所示：南西测区(A-B 区)共轭剪节理的产状整体上倾向 SSW、NNE 向，最大主压应力 σ_1 优势方位为 NNE-SSW 向，并且近似垂直弧形推覆体弯曲段；南部测量区(C-G 区)位于弧形推覆体的最大弯曲

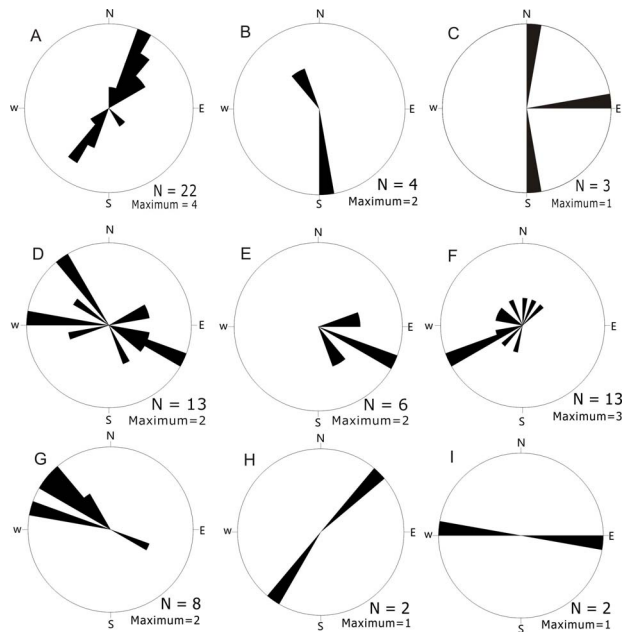


Figure 2. Diagram showing the direction of the maximum compressive principal stress of each fixed point from A to I
图 2. A-I 观测点最大主压应力(σ_1)方向玫瑰花瓣图

Table 1. Attitudes of the conjugate joints and the maximum principal stress directions
表1. 测区共轭剪节理产状及最大主应力数据

位置	编号	产状 1	产状 2	σ_1	位置	编号	产状 1	产状 2	σ_1	
A	1	190 \angle 38	33 \angle 51	23 \angle 7		38	124 \angle 40	305 \angle 54	129 \angle 83	
	2	210 \angle 30	34 \angle 46	32 \angle 8		39	150 \angle 42	289 \angle 66	62 \angle 62	
	3	171 \angle 32	18 \angle 56	8 \angle 12		40	84 \angle 25	283 \angle 45	276 \angle 10	
	4	255 \angle 14	46 \angle 51	53 \angle 19		41	98 \angle 28	276 \angle 32	277 \angle 2	
	5	195 \angle 31	25 \angle 59	21 \angle 14		42	179 \angle 24	313 \angle 47	329 \angle 12	
	6	218 \angle 25	41 \angle 47	40 \angle 11		E	43	151 \angle 42	329 \angle 31	150 \angle 6
	7	258 \angle 14	30 \angle 61	40 \angle 25			44	175 \angle 25	316 \angle 84	114 \angle 55
	8	212 \angle 41	20 \angle 31	207 \angle 5			45	150 \angle 43	324 \angle 14	149 \angle 15
	9	246 \angle 58	357 \angle 25	224 \angle 19			46	167 \angle 32	318 \angle 74	111 \angle 64
	10	229 \angle 41	32 \angle 47	40 \angle 3			47	178 \angle 43	303 \angle 73	78 \angle 52
	11	231 \angle 32	53 \angle 59	236 \angle 76		48	160 \angle 45	315 \angle 68	89 \angle 69	
12	215 \angle 28	32 \angle 83	209 \angle 62	F	49	235 \angle 56	94 \angle 25	248 \angle 16		
13	209 \angle 26	47 \angle 53	41 \angle 14		50	246 \angle 62	104 \angle 26	258 \angle 19		
14	279 \angle 22	35 \angle 50	55 \angle 16		51	235 \angle 63	107 \angle 41	8 \angle 60		
15	194 \angle 37	29 \angle 43	22 \angle 3		52	216 \angle 73	90 \angle 17	228 \angle 30		
16	235 \angle 47	31 \angle 53	145 \angle 76		53	130 \angle 40	335 \angle 60	199 \angle 73		
17	197 \angle 18	27 \angle 62	24 \angle 22		54	106 \angle 31	296 \angle 54	292 \angle 12		
18	215 \angle 45	29 \angle 46	131 \angle 87		55	115 \angle 41	212 \angle 69	245 \angle 18		
19	221 \angle 43	26 \angle 40	214 \angle 2		56	105 \angle 35	258 \angle 68	46 \angle 68		
20	227 \angle 42	28 \angle 36	218 \angle 3		57	96 \angle 25	227 \angle 73	22 \angle 58		
21	224 \angle 44	28 \angle 35	217 \angle 5		58	97 \angle 24	236 \angle 69	248 \angle 24		
B	22	164 \angle 46	41 \angle 53	14 \angle 4	59	73 \angle 26	333 \angle 65	309 \angle 24		
	23	111 \angle 41	3 \angle 54	331 \angle 8	60	182 \angle 21	329 \angle 59	339 \angle 20		
	24	112 \angle 31	324 \angle 63	175 \angle 68	61	174 \angle 34	251 \angle 59	288 \angle 19		
	25	306 \angle 57	97 \angle 40	174 \angle 72	G	62	305 \angle 51	132 \angle 18	307 \angle 17	
26	354 \angle 52	103 \angle 32	326 \angle 12	63		294 \angle 65	336 \angle 14	281 \angle 36		
C	27	182 \angle 37	302 \angle 80	85 \angle 49		64	325 \angle 74	323 \angle 31	327 \angle 52	
	28	240 \angle 74	319 \angle 87	8 \angle 10	65	321 \angle 54	344 \angle 32	288 \angle 34		
	29	239 \angle 75	297 \angle 72	179 \angle 3	66	94 \angle 25	320 \angle 63	306 \angle 20		
D	30	170 \angle 10	307 \angle 85	119 \angle 51	67	335 \angle 55	98 \angle 38	311 \angle 10		
	31	164 \angle 24	307 \angle 90	107 \angle 52	68	319 \angle 39	103 \angle 56	118 \angle 9		
	32	165 \angle 25	312 \angle 84	112 \angle 56	69	286 \angle 51	110 \angle 62	317 \angle 84		
	33	65 \angle 80	306 \angle 14	76 \angle 35	H	70	58 \angle 52	85 \angle 19	41 \angle 32	
	34	204 \angle 19	60 \angle 80	255 \angle 56		71	24 \angle 69	194 \angle 24	212 \angle 67	
	35	171 \angle 45	309 \angle 53	329 \angle 4	I	72	322 \angle 35	58 \angle 53	92 \angle 12	
	36	151 \angle 38	336 \angle 30	153 \angle 4		73	304 \angle 46	72 \angle 41	279 \angle 3	
	37	164 \angle 34	281 \angle 61	305 \angle 16						

部位,最大主压应力(σ_1)整体上为NW-SE向,在不同部位应力方向有所差异,可能因推覆构造弧顶部分挤压强烈、变形复杂或岩石力学性质各向异性所致,但总体上为NW-SE向,尤以D、E和G区较为明显。在推覆构造弧形顶端位置,运用最大主压应力方向来指示推覆构造的运动方向显得更有说服力;东部测区(H-I区)可观测的共轭剪节理产状较少,最大主压应力(σ_1)分别为NE和EW向,总体上近似垂直于弧形弯曲部位。总的看来,推覆构造不同部位的最大主压应力方向垂直于弧形弯曲部分,总体上为NW-SE向。

5. 平衡剖面分析

推覆构造形成于区域挤压环境,并造成所卷入地层大幅缩短,地层缩短量反映了推覆构造形成时的挤压强度和运动规模。应用平衡剖面技术估算造山带地壳的缩短量^[13],为广平推覆构造运动学特征提供了更有力的依据。平衡剖面技术是一种遵守几何守恒原则而建立的地质剖面的正、反演方法^[14],并且作为构造演化恢复的一种重要手段,为构造定量化解释开辟了道路。通过野外地质调查,并结合区内苏桥、龙凤场井田钻孔剖资料分析,对广平推覆构造进行地层缩短率计算,并对其运动规模进行讨论。

5.1. 平衡剖面原理

平衡剖面技术是根据物质守恒原理提出的^[15]。平衡剖面是可以恢复到原始沉积地层状态的变形剖面,它是一条可以接受的、合理的剖面。平衡剖面的制作

应遵守以下原则^[16,17]: 1) 变形前岩石体积(或面积)基本不变,即在岩石变形过程中没有物质的流入与流出,或体积损失很小; 2) 变形前后岩层的厚度和总长度保持不变; 3) 变形前后各标志层长度一致。

5.2. 剖面选取与制作

研究区主要构造线为NE-SW向延伸,根据剖面线与主体构造线方向垂直的原则,以广平地区近东西向的苏桥、铭溪井田18线钻井剖面(图3)为基础,制作了一条长8525m的剖面M-N(图1)。限于研究区多期变形的叠加以及大量侵入岩的分布,要编制完整的平衡剖面还很困难。本文选取林地组和栖霞组地层作为标志层,运用面积守恒原则对剖面M-N进行复原(图1)。

区内地层特征表明,下石炭统林地组(C₁l)地层以石英砾岩、砂砾岩为主,下二叠统栖霞组(P₁q)为一套含燧石条带灰岩,顶部常有厚几米至几十米的硅质岩。这两套地层相对硬度高、能干性强,在挤压变形中不易发生韧性流动变形。而其他地层如童子岩组、文笔山组等相对软弱,沿地层薄弱带易发生顺层流动的塑性变形。鉴于以上特点,选取能干性较强的林地组和栖霞组地层作为标志层。

5.3. 地层缩短率估算

钻孔剖面显示(图3),龙凤场井田为一个倒转斜歪向斜,其中倒转翼(NW翼)受推覆构造改造导致大部分地层缺失,而正常翼保存比较完整。勘探资料表明,

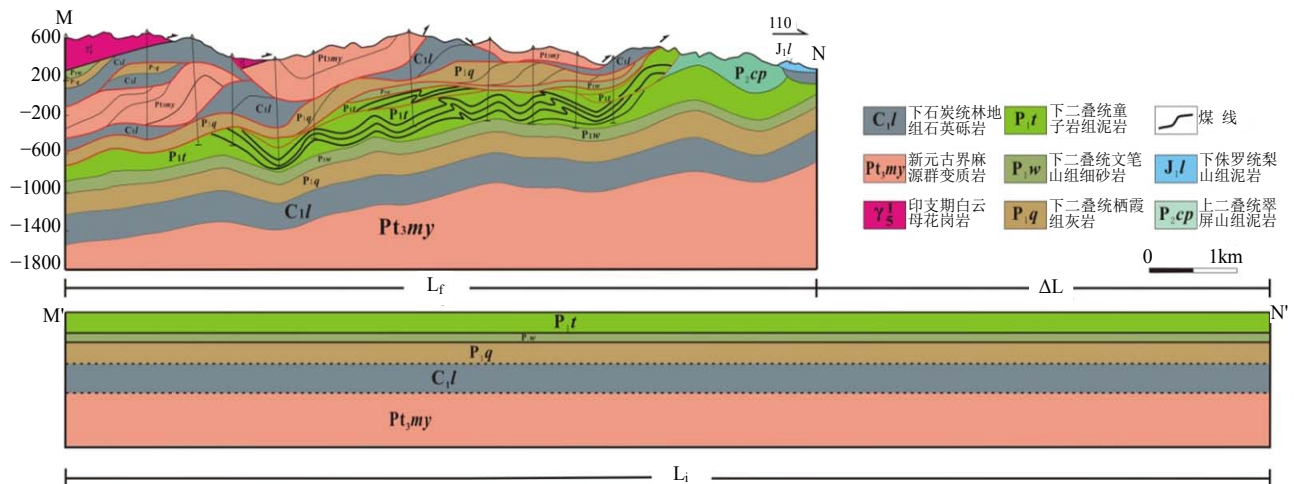


Figure 3. Balanced cross section and palinspastic map of Guangping thrust
图 3. 广平推覆构造剖面与复原图

龙凤场钻孔底部为倒转向斜正常翼的童子岩、文笔山组地层，为正常沉积序列，并且变形不明显，因此推测钻孔底部为原始正常层序沉积地层。区域地质资料表明^[18]，广平地区林地组地层厚度为 302.0 m 栖霞组地层厚度为 220.4 m，代表推覆构造发生前的原始地层厚度。根据绘制好的剖面，运用 CoreDRAW 软件对各主要岩层进行面积测量，并计算出所有岩层的总面积 A(表 2)。现以林地组作为标志层进行地层缩短量计算，根据变形前后标志层的面积(A)保持不变的原则，已知林地组地层变形前厚度(T)，可以计算出其原始地层长度(L_i):

$$L_i = A/T = 4180571 \text{ m}^2/302 \text{ m} = 13875 \text{ m}$$

因此，地层缩短量为:

$$\Delta L = L_f - L_i = 8525 - 13875 = -5350 \text{ m}$$

因此，地层缩短率为:

$$S\% = \Delta L/L = (L_f - L_i)/L_i = -38.4\%$$

在复原过程中，为了检验平衡剖面恢复的准确性和合理性，另外选取了栖霞组(P_{1q})地层作为标志层进行对比，按照上述计算方法得出地层缩短率为-38.6%。

岩石学特征表明，林地组石英砂岩和栖霞组含燧石条带灰岩均具有相对强的能干性及抗压强度，相对其它层位(如 P_{2cp}、P_{1t}、P_{1w} 等)变形较弱，不易发生顺层压缩及褶皱等变形，地层厚度相对稳定。结合以上计算结果，两套标志层缩短量比较接近，在误差允许的条件下标志层缩短量保持一致，推覆构造总体缩短率为 38.4%~38.6%。

6. 讨论

6.1. 运动学方向讨论

根据推覆构造逆冲断层的展布方向、褶皱形态、原地岩系与外来岩系分布特征，并结合区域构造综合分析，我们认为广平推覆构造由 NW 向 SE 运动。证据如下：区内主要逆冲断层线整体上为 NE-SW 向延伸，并且呈弧形展布(图 1)，弧顶指向 SE；广平推覆

构造以发育褶皱为特色，为一巨大褶皱推覆体^[2]，区内褶皱轴面总体上倾向 NW、NNW，向 NW 倾斜，并且与主滑动面相关的次级断层、劈理带、牵引褶皱均反映了由 NW 向 SE 方向的推挤作用；广平推覆构造的外来岩系为上元古界麻源群(Pt_{3my})和不整合在其上的上泥盆统-下石炭统地层，与福建西部的地层特征具有极高的相似性^[18]，并且福建西部以逆冲岩系为主，并发育“构造窗”，而向东则逐渐过渡为“飞来峰”(图 1)，表明推覆构造外来岩系可能来源于西部。

勘探剖面显示^[6]，逆冲断面倾向 NW、NNW，断面产状地表较陡，向深部逐渐变缓，表现为“犁状”，这些特征表明推覆体运动方向指向 SE。龙凤场 57 线地质剖面显示^[3]，原地岩系倒转向斜是不对称的：东翼地层倾角较陡，地层相对变薄，次级断裂和小褶皱比较发育；西翼地层产状比较平缓，构造变形相对简单，并且倒转向斜轴面倾向 NE。以上特征表明，推覆构造运动方向为自 NW 向 SE 运动。

根据应力场方向测量原理，对发育于推覆体之林地组中的共轭剪节理进行了测量与分析，认为广平推覆构造形成于 NW-SE 向挤压应力场。根据 9 个测区最大主应力(σ₁)方位玫瑰花瓣图显示(图 2)，区内挤压应力以 NW-SE 向为主，不同部位应力场方向有所差异，可能为推覆构造弧形弯曲所致，但是各区段最大主压应力整体上垂直于弧形推覆体。测区南部区段(C-G 区)位于推覆构造弧形顶端位置，除 F 区应力场方向比较分散之外，其他区均反映了推覆构造 NW-NE 挤压方向。东南区段(A-B 区)最大主压应力近 NS 向，垂直于局部 NE-SW 向展布的地层及构造线，表明推覆构造在斜侧断坡压力不均匀。北东区段(H-I 区)受弯曲弧段影响，主压应力整体为 NEE-SWW 向。根据以上特征，认为弧形推覆岩席顶端部位最能直观反映推覆构造应力场特征，对位于弧顶区段 C-G 测区分析发现，最大主压应力方位玫瑰花图和等密度图(图 4)具有明显的 NW-SE 优势方位。林地组作为广平推覆体的主要组成部分，其中发育的共轭剪节理是区内特有构造，在远离推覆构造区域不发育，因此林地组共轭剪节理反映了推覆构造形成时的挤压特征。

广平推覆构造属于闽西南推覆构造的组成部分，其形成和演化受闽西南地区板块构造动力学控制。晚三叠时的印支运动，华南板块与扬子板块碰撞并且褶

Table 2. The shortening rate of guiding bed of Guangping thrust
表 2. 广平推覆构造标志层缩短率计算数据表

主要标志层	面积 A (m ²)	厚度 T(m)	原始长度 (m)	缩短量 (m)	缩短率 (%)
林地组(C _{1l})	4,180,571	302.0	13,845	-5320	-38.43
栖霞组(P _{1q})	3,057,714	220.4	13,875	-5350	-38.57

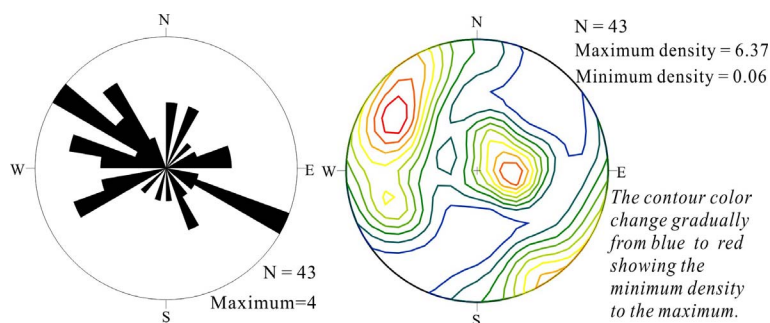


Figure 4. Diagram showing the direction of the maximum compressive principal stress of the fixed points near the coping of the arc nappe structure

图 4. 推覆构造弧顶部位(C-G 区)最大主压应力方位玫瑰花瓣和等密度图

皱造山^[8,19], 印支期以东西向构造为主的特提斯构造域向燕山早期以 NE 向构造为主的滨太平洋构造域转换^[20], 从中 - 晚侏罗世古太平洋板块开始向亚洲板块俯冲, 直接导致了东亚晚侏罗世大陆内部的广泛变形和陆内造山^[21]。采自推覆构造断裂带并且与其展布一致花岗斑岩脉的锆石测年结果显示, 该岩脉形成于距今 142 ± 1 Ma(吕良冀等, 尚未发表), 该岩脉是伴随推覆构造结束的同时侵入, 为同期构造花岗岩脉, 代表了推覆构造年龄上限。该年龄与广泛认为的大约 145 Ma 古太平洋板块向欧亚板块 NW 方向的俯冲达到高潮^[22]非常相近。陶建华^[2]根据与广平推覆构造有成因联系的龙凤场多金属矿石铅同位素年龄测定, 认为广平推覆构造发生于印支期末。以上特征说明, 推覆构造形成时代和运动方向均与区域上板块构造的演化相吻合, 表明推覆构造是在区域 NW-SE 向挤压应力场作用下形成, 并且沿推覆面向 SE 运动。

6.2. 地层缩短量讨论

广平推覆构造发生于印支期末, 形成于燕山早期, 定位于燕山晚期^[2], 并且以燕山早期的逆冲为主^[6]。晚侏罗世太平洋板块向东亚的俯冲^[1], 导致福建大陆边缘遭受 NW-SE 向的强烈挤压, 并造成地层大幅缩短。推覆构造所卷入地层的缩短量不仅反映了地层层压缩程度, 也间接反映了推覆构造的运动规模, 现以平衡剖面缩短量计算为基础, 对广平推覆构造的地层缩短特征及形成规模进行讨论。

由于区内推覆构造广泛发育, 构造变形复杂, 目前对闽西南推覆构造地层缩短量的研究仍然处于薄弱环节。陈爱根^[23]根据层长守恒原理, 对宁化湖村、永安大湖和大田广平推覆构造进行地层缩短率估算,

认为这些地区推覆构造的地层缩短率分别为 45%、41.6%和 37.3%, 可见闽西南地区从西向东地层缩短率依次减少, 因此可以推断广平推覆构造可能为整个闽西南推覆构造带的前缘部分, 并且指示推覆构造由西向东运动。根据野外地质调查及井田钻孔剖面资料, 运用面积守恒原理对广平推覆构造地层缩短量进行估算, 显得更精确。我们选自苏桥 - 铭溪井田 NWW 向的一条长为 8525 m 剖面 MN(图 1), 并选取下石炭统林地组作为标志层, 经剖面复原估算出地层缩短量为 5350 m, 缩短率为 38.4%。由于本条剖面共有 10 个实际钻孔控制, 并选取栖霞组作为标志层进行对比, 故认为推覆构造缩短量估算是比较合理、可靠的。

地层缩短量表明, 广平推覆构造的运动规模是比较大的, 并且外来岩系可能是闽西南凹陷的西部边缘或更远的地区向东南方向推移而来^[3]。地层学研究表明^[18]: 出露于东部的震旦系下古生界地层, 与 NW 部的岩性组合特征基本相似, 把东部的外来岩系恢复到其原来位置, 最东边的“飞来峰”和最西边的“构造窗”就是最小推覆距离^[24], 可以估算出推覆构造的运动距离大于 100 km。陈爱根等^[9]根据湖村、大湖和广平地区地层缩短量, 并取 45%作为闽西南地区地壳的平均缩短量, 估算出建宁到大田这一区段地层缩短量为 120 km, 暗示了推覆构造之规模巨大。广平地区晚古生代以来地层缩短由古太平洋板块向华南板块之下俯冲所产生, 并在强烈的挤压应力场下沿推覆构造界面由 NW 向 SE 发生大规模运动, 推覆构造地层缩短率与其基本特征及其构造变形程度相吻合。

7. 结论

根据推覆构造空间展布、结构组成、应力场分布

等特征,并结合井田勘探资料,经系统分析认为广平推覆构造的运动学方向由NW向SE运动,并且导致所卷入地层发生不同程度的变形。在野外地质调查和区域构造综合分析基础上,运用共轭剪节理测量计算出广平地区最大主压应力方向为NW-SE向。广平推覆构造形成于区域挤压应力场,其形成和演化主要经历了印支期末和燕山期。在以上认识基础上结合煤田勘探剖面开展平衡剖面研究,计算出广平推覆构造地层缩短量为5350m,缩短率为38.4%,说明广平推覆构造是一个长距离运移且规模巨大的推覆构造,其形成机制受中国东部中生代构造环境制约。

参考文献 (References)

- [1] 董树文,张岳桥,陈宣华等.晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J].地球学报,2008,29(3):306-317.
- [2] 陶建华.闽西南地区东部逆冲推覆构造及形成机制[J].福建地质,1987,6(4):249-270.
- [3] 关玉祥,黄耀明,陶建华.初论福建推覆构造[J].福建地质,1989,8(1):14-34.
- [4] 周珍琦.闽西南地区推覆构造形成的动力学机制——以广平推覆构造为例[J].石油实验地质,2007,29(2):128-132.
- [5] 陶建华.福建推覆构造研究与找矿突破[J].福建地质,2008,27(2):105-124.
- [6] 陶建华,陈福龙.福建推覆构造研究[J].石油实验地质,2006,28(3):259-263.
- [7] 张达,高天钧,吴淦国等.武夷-台湾走廊带成矿作用、深部过程与资源潜力[M].北京:地质出版社,2006:1-165.
- [8] 张达,吴淦国,狄永军等.闽西南中生代推覆构造对铁矿床控矿特征研究[J].矿物学报,2011,S1:128-129.
- [9] 陈爱根,吴正文.闽西南地区推覆构造格局及其演化[J].中国区域地质,1996,4:335-343.
- [10] 万天丰.古构造应力场[M].北京:地质出版社,1988:22-144.
- [11] 万天丰.构造应力场研究的新进展[J].地学前缘,1995,2(1/2):226-235.
- [12] 何绍勋.构造地质学中的赤平极射投影[M].北京:地质出版社,1979:173-176.
- [13] J. R. Hossack. The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: A review. Journal of the Geological Society, 1979, 136(6): 705-711.
- [14] 陈伟,卢华复,施央申.平衡剖面计算机模拟及其应用[M].北京:科学出版社,1993:1-195.
- [15] C. D. A. Dahlstrom. Balanced cross sections. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6: 743-757.
- [16] D. Elliott. The construction of balanced cross-section. Journal of Structural Geology, 1983, 5(2): 101-136.
- [17] 宋鸿林.平衡剖面及地质意义[J].地质科技情报,1985,4(1):18-28.
- [18] 福建省地质矿产局.福建省区域地质志[M].北京:地质出版社,1986:1-166.
- [19] 王桂梁,刘登桃,姜波等.福建天湖山区推滑叠加型滑脱构造模式[J].中国科学,1995,25(1):85-92.
- [20] 吴淦国,张达,陈柏林等.中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例[J].地球科学,2000,25(4):390-396.
- [21] 张岳桥,董树文,李建华等.华南中生代大地构造研究新进展[J].地球学报,2012,33(3):257-279.
- [22] D. Zhang, W. C. Liu, G. G. Wu, et al. Magnetic fabric and emplacement of the Fengnangshan Pluton, Tongling, Anhui Province, East-Central China. International Geology Review, 2008, 50(11): 994-1007.
- [23] A. Chen. Mirror-image thrusting in the South China Orogenic Belt: Tectonic evidence from western Fujian, southeastern China. Tectonophysics, 1999, 305(4): 497-519.
- [24] 朱志橙.逆冲推覆构造[M].武汉:中国地质大学出版社,1989:92-101.