

https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.975



河南省嵩山区元古代嵩山群底部的主滑脱带

索书田^{1,2}, 游振东², 闻立峰², 韩郁菁²

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 河南省嵩山区位于中朝地台南部, 区内发育被2个角度不整合面分隔开的3个前寒武纪岩群, 一个主滑脱带沿着嵩山群与登封群间不整合面发育。滑脱带之上的早元古代嵩山群形成近南北向的褶皱带, 因此, 嵩山群岩石在主滑脱带之上形成无根的独立构造, 与滑脱带下伏的太古宙登封群很少有关系。主滑脱带厚4~30 m, 沿着主滑脱带, 登封群角闪岩相岩石强烈退变质到绿片岩相矿物组合, 主滑脱带发育在脆韧性过渡域。多尺度的观察指出, 主滑脱带的形成受地壳成分分层导致的流变学分层性所制约, 而且地层柱底部软弱面或地质界面是近水平的滑脱带发育的优选位置。显然, 对滑脱带的发育还必须考虑水解弱化作用。

关键词: 嵩山区; 流变学; 变形分解作用; 流变学分层性; 滑脱带; 角度不整合; 水解弱化作用; 构造地质。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1537-07

收稿日期: 2019-01-06

A Master Décollement Horizon below the Proterozoic Songshan Group in Songshan Area, Henan Province

Suo Shutian^{1,2}, You Zhendong², Wen Lifeng², Han Yujing²

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Songshan area of Henan Province is tectonically located in the southern part of the Sino-Korean craton. It is marked by the three groups of Precambrian separated by two unconformities. A master décollement horizon developed along the unconformity between the Dengfeng Group below and the Songshan Group above. The lower Songshan Group above the décollement horizon formed a nearly N-S trending folded belt. Therefore, Songshan Group structures have little relation with the Archaean Dengfeng Group below the décollement. The thickness of the master décollement horizon ranges from 4 to 30 m. Along this décollement horizon, the Dengfeng Group amphibolite facies rock assemblage was strongly retrograded to that with superimposed greenschist facies mineral paragenesis. The development of the décollement occurs near the brittle/ductile transition field. Our observations in various scales show that the formation of the décollement horizon is controlled by the rheological stratification which was induced by compositional layering of the crust. It is suggested that the weak interval or interface at the base of a stratigraphic sequence may be preferred structural level for the localization of sub-horizontal décollement zones. It is also clear that consideration of hydrolytic weakening is necessary to unravel the development of the décollement horizon.

Key words: Songshan area; rheology; deformation partitioning; rheological stratification; décollement; unconformity; hydrolytic weakening; tectonics.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.49972067); 长江水利委员会综合勘测局项目。

作者简介: 索书田(1936-), 男, 教授, 构造地质学专业。

引用格式: 索书田, 游振东, 闻立峰, 等, 2019. 河南省嵩山区元古代嵩山群底部的主滑脱带. 地球科学, 44(5): 1537-1543.

0 引言

中岳嵩山是中国大陆内部5个著名的山岳之一,地质上地层发育齐全,出露良好,是中朝地台不同时代地层出露较完整的典型地区,号称“五代”或“七代”同堂(程胜利等,2008)。因此,长久以来特别是在新中国成立以后,众多的地质单位和地质学者,到此进行地质矿产调查和基础地质科学研究(张伯声,1951;张尔道,1954;马杏垣,1957;王曰伦,1960)。从1964年开始,以马杏垣为首的原北京地质学院科学研究集体,与西北大学、河南省地质研究所、河南省区调队和中南地质研究所等单位相互配合,对嵩山地质构造进行了连续长达20年的较深入研究,取得了丰硕的成果。其中,《嵩山构造变形——重力构造、构造解析》(马杏垣等,1981),就是其中之一。近些年来,嵩山地区的基础地质研究又有了新的进展,特别是在岩石地球化学、同位素地质年代学和古老地壳演化等领域,成果丰硕,进展显著(劳子强等,1996;胡国辉等,2012)。本文是在以往工作基础

上,受新的研究成果启发,主要讨论嵩山群与登封群间的主滑脱带(décollement)发育特征及其构造意义,以便从宏观流变学(macrorheology)尺度更好地认识嵩山地区古老地壳结构和演化历史。

1 地质背景

河南省嵩山区位于中朝地台南部,在不足1000 km²的范围内分布着前寒武纪及显生宙不同时代的地层,且出露良好,各个时代地层或岩石组间接触关系清楚,是基础地质研究和矿产评估的经典地区之一。尤其是由少林运动(王曰伦,1960;图1a,1b)、中岳运动(张尔道,1954;图1c)和嵩阳运动(张伯声,1951;图1d)形成的3个角度不整合面,露头清楚,含义明确。其中,被寒武系沉积岩不整合覆盖的中一新元古代五佛山群岩系,由重力滑动形成的近东西向延伸的弧形褶皱—断裂带(马杏垣等,1981),延长30 km有余,南北向最宽出露约6 km,几何学、运动学和动力学均有独特之处。北部被寒武

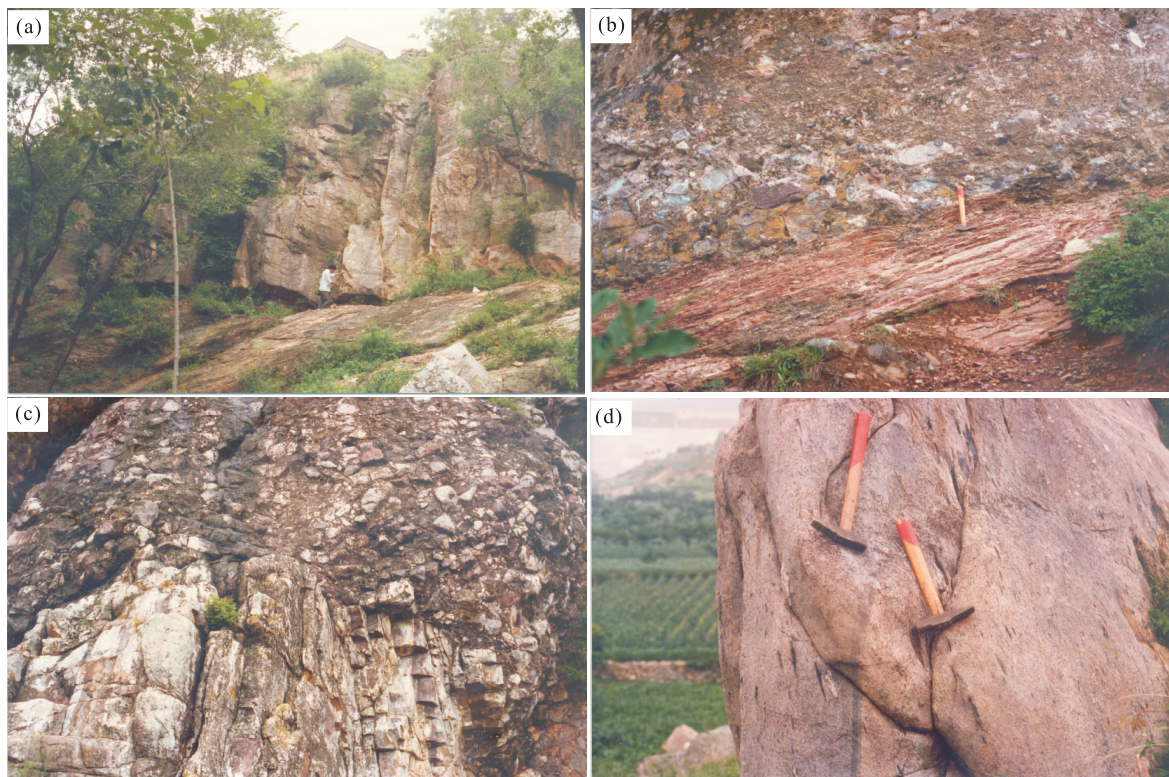


图1 河南省嵩山区前寒武纪代表性的角度不整合面露头照片

Fig.1 Representative outcrop-scale photographs of unconformities in the Songshan area, Henan Province

a. 偃师县东窑村寒武系(Є_1D)与中晚元古代五佛山群($\text{Pt}_{2+3}W$)间不整合;b. 偃师县柏峪沟东坡寒武系(Є_1D)与中晚元古代五佛山群($\text{Pt}_{2+3}W$)间不整合;c. 登封县少林寺水库南山中晚元古代五佛山群($\text{Pt}_{2+3}W$)与早元古代嵩山群(Pt_1S)间不整合;d. 登封县玄天庙早元古代嵩山群(Pt_1S)与太古宙登封群($\text{Ar}D$)不整合;décollement.底滑脱带

系沉积岩层不整合覆盖,出露不完整.中岳运动主要表现为早元古代嵩山岩群近南北向强烈褶皱、逆冲带和区域低绿片岩相变质作用.整体造山带东西向缩短量是很大的.太古宙登封群为角闪岩相变质结晶基底岩系,是中朝克拉通早前寒纪古老地壳的组成部分.主要岩石为黑云母斜长片麻岩、白云母钾长片麻岩和斜长角闪岩.有的学者认为登封群是花岗—绿岩带,而且其中相当大的一部分原岩为具TTG岩系地球化学特征的深成侵入体(赵太平等,2012).据我们的观察和初步研究,登封群有可能是绿岩建造的一部分,但至今尚没有发现和报导绿岩建造底部超镁铁质岩系(如科马提岩),因此,能否完全与典型地区绿岩建造对比,尚需作进一步深入研究.登封群遭受多期变形和变质作用,残留的一期主体构造近东西向延伸.新的同位素年代学资料指出,少林运动、中岳运动和嵩阳运动的大体时限分别为800 Ma、1 900~1 800 Ma和2 500 Ma.详细的地质背景可参阅马杏垣等(1981)、劳子强等(1996)、赵太平等(2012)及贾承造等(2014)相关论著.

2 滑脱带(décollement)

滑脱带(décollement)是一个描述性的术语,是指变形构造沿底层面带剪切滑动拆离(法文为 unglue),造成拆离带上和带下岩石独立的变形样式(Suppe,1985),具薄皮构造(thin-skinned tectonics)特征.这个概念,最初是由Lugeon(1900)创立的,指的是沉积岩体在阿尔卑斯褶皱作用期间变得彼此脱离开了,特别是年轻的岩层形成的平卧褶皱直接覆于陡立的基底褶皱之上.Haug(1912)使用“滑脱构造”表示褶皱构造沿不整合面的滑动脱离.通过近百年来各国地质学者对大陆造山带结构和演化规律的研究,逐渐认识到地壳不同层次和不同尺度的滑脱带是造山带重要的结构要素之一,在造山带的形成和演化过程中,作为重要的地质界面,起着重要作用.滑脱带的发育反映了造山带的构造特征,是受组成岩层序列的不均一性和各向异性制约的.滑脱带往往沿着低岩石强度(或粘度)和高流体压力层发育(Ranalli,1997;游振东等,2001;Treagus,2003).例如,在阿尔卑斯和侏罗山,大的滑脱带是沿着三叠纪蒸发岩层发育的,阿帕拉契亚几个滑脱带分别沿着泥盆纪黑色页岩层、志留纪含盐层、奥陶纪页岩层和中寒武纪页岩层等发育的(Harris and Bayer,1979).

20世纪80年代以来,随着大陆伸展构造研究的进展,在变质核杂岩内部发现了大型的拆离断层(detachment fault)或剪切带,位于韧性变形的糜棱岩带顶部,是变质核杂岩的重要结构要素(Davis,1983).近些年来,不少地质工作者把拆离断层与滑脱带等同起来,这是一种误解(Coney,1974,1989).实际上,与滑脱带有关的构造组合是受远程挤压动力学体制控制的,而拆离断层必然出现在岩石圈伸展带,拆离断层上盘地质体,由于重力失稳沿着拆离面向下坡滑动.滑脱带与拆离断层在几何学、运动学和动力学上均有明显区别.不过,岩石圈沿着地幔顶部热边界带的滑脱,可以导致由挤压到伸展体制的转换(Ranalli,1997),是值得引起关注的.

3 早元古代嵩山群底部主滑脱带

自张伯声(1951)在嵩山南坡发现早元古代嵩山群与下伏的太古宙登封群间角度不整合,并命名为嵩阳运动,大多数地质研究和工作者都有了共识.但亦有少数学者曾提出异议.他们根据露头上观察到登封群顶部的部分岩石片状构造与上覆嵩山群岩石层理的平行性,推断登封群与嵩山群是平行和连续的,之间不存在角度不整合.充其量只是因地壳振荡运动产生的一个地质界面.这曾是一种具有积极意义的见解,推动了对早元古代嵩山群底滑脱带乃至嵩山地区整体古老地壳构造演化的研究.

太古宙登封群,前面已经提到主要岩石为角闪岩相变质的黑云母斜长片麻岩、白云母钾长片麻岩、斜长角闪岩及变质变形的TTG深成侵入体,强烈混合岩化,经多期褶皱、韧性剪切和断裂变形,形成最古老的中朝克拉通结晶基底一部分.在登封县城西由斜长角闪岩层和片麻理形成的褶皱呈近东西向展布(马杏垣等,1981).

早元古代嵩山群由层状低绿片岩相石英岩、千枚岩、白云质大理岩及假象赤铁矿夹层岩系组成,最下部为砾岩层,具底砾岩特征.中岳运动过程中,在东西向远程挤压动力学条件下,嵩山群沿着底滑脱带脱顶剪切滑动形成近南北向、降向(vergence)指向东的紧闭褶皱逆冲带(图2),整体上缩短是很明显的,发育褶皱轴面板劈理.

沿着嵩山群与下伏的登封群间接触带观察,登封群角闪岩相结晶岩系的片麻理及相关变形构造,其主体基本上未受中岳运动影响,即叠加或复合在登封群上的中岳运动烙印是很轻微的和局部的,从



图 2 嵩山东西向地质剖面

Fig.2 Simplified E-W geological cross-section in the Songshan area

图 2 表示嵩山群、登封群和主滑脱带间关系;Pt₁S.嵩山群;décollement.主滑脱带;ArD.登封群

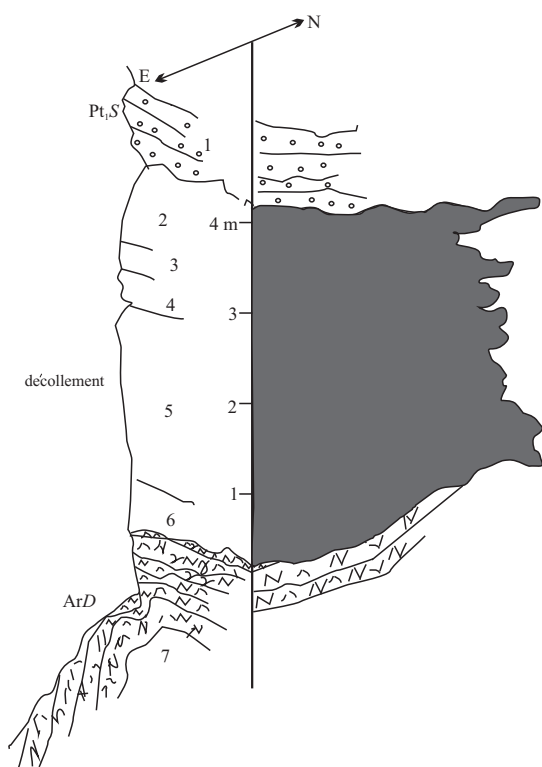


图 3 大仙沟嵩山群与登封群间的滑脱带

Fig.3 Field sketch of the exposure showing the décollement between Songshan Group and Dengfeng Group

Pt₁S.嵩山群;Décollement.滑脱带;ArD.登封群;1.嵩山群石英岩;2.灰色绢云母片岩;3.含磁铁矿晶体的绢云母片岩;4.黄色绢云母片岩;5.糜棱岩化绢云石英片岩;6.绿泥石化长英片岩;7.登封群斜长角闪岩

某种意义上来说,嵩山群的主体构造是独立的和无根的,主要发育在滑脱带之上,属于薄皮式构造(thin-skinned tectonics; Harris, 1976).

主滑脱带(décollement)厚 4~30 m,主要由绿片岩相构造片岩、碎裂岩和变晶糜棱岩组成,其原岩

为登封群混合岩化的角闪岩相片麻岩和变形的 TTG 岩系深成侵入体岩石.由于不同地区登封群的岩石类型及组合不同,滑脱带内的绿片相岩石类型也有区别(图 3).但以白云母石英片岩、绢云石英片岩、绿泥石石英片岩为主.且一般还有后期不对称共轭折劈理叠加.

主滑脱带的矿物组合及结构构造特征,总体显示出现在脆-韧性过渡域流变学环境中,一些石英颗粒发生韧(塑)性变形,形成延长的条纹和丝带状,白云母常有波状消光和折劈构造;钾长石以脆性变形为主,部分被绢云母代替.局部岩石中还有石榴子石、十字石和黑云母残晶,其边缘多被绿泥石所取代,显示了典型的化学不平衡现象.

伴随着主滑脱带的发育,水解弱化作用(hydrolytic weakening)必有重要功能(游振东等,2001).这可以从滑脱带内绿片岩相矿物组合出现大量的含水矿物(绢云母、绿泥石、绿帘石等)得以佐证.在滑脱带内尚有大量的石英脉体穿插,部分脉体在递进变形中被拉断和旋转形成含砾片岩层中的砾石(Phillip, 2012; 赵太平等, 2012).伴随着沿底滑脱带的剪切滑动及地壳抬升减压,导致水流体逸出,形成退变质流体,必然促进滑脱带内岩石进一步退变质和变形.

底滑脱带内部结构是不均一的,常具应变或流变分解作用形成的“域行为(domained behaviour)”或“残斑-基质(block in matrix)”特有的流变学格式(Burg, 1999)(图 4).

从图 1d 及图 4 可以看到,滑脱带以网结状为特征的片理总体产状与嵩山群的层理近平行或小角度斜交,与登封群的片麻理(置换原始层理)大角度斜交.在滑脱带(此处宽约 40 m)内变形或流动分解产生的弱应变域透镜体内,仍残留着登封群片麻岩和

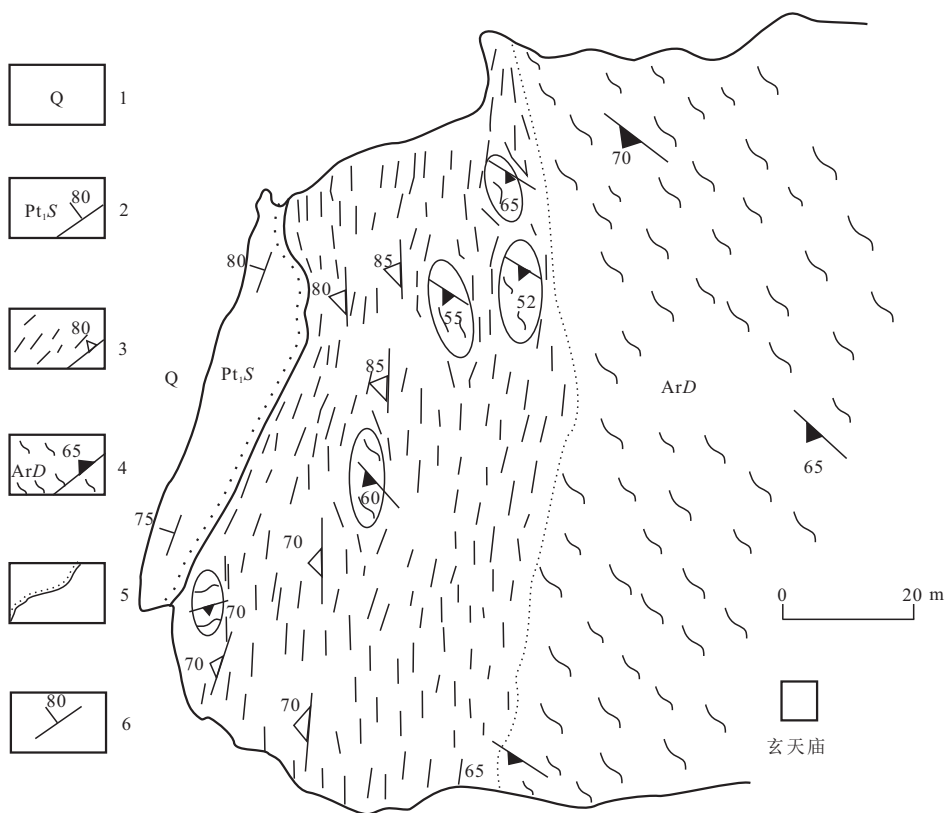


图 4 玄天庙地区简化的构造图

Fig.4 Simplified structural map of Xuantianmiao area

图 4 表示嵩山群、登封群及滑脱带间关系;1.第四系;2.嵩山群;3.滑脱带;4.登封群;5.角度不整合面;6.产状(°)

片麻理构造,推测滑脱带的发育和递进变形过程中,变形的透镜体椭圆率(ellipticity)会逐步增加,透镜状个体减小,数量增多,几何学上具分形(fractal)特征,最终形成较均一的片理化动力变质岩石,造成与上覆嵩山群层理近平行的格局.露头上,底滑脱带这种“残斑-基质”流变学样式,与多矿物岩石固态流变形成的特有格式(Handy,1990)是非常相似的.

大量的岩石组构测量和分析结果指出(Liu *et al.*,1980;马杏垣等,1981),滑脱带下伏的太古宙登封群片麻岩中石英和云母组构图复杂,对称性较低,石英组构以三斜对称为主,罕见单斜对称.主滑脱带上覆的嵩山群岩石组构图较为简单,具有较高的对称性.其中石英组构图多为单斜对称.从主滑脱带内获取的白云母石英片岩样品,组构图与上覆嵩山群石英岩组构类似,白云母岩组构图多为单斜对称,属B构造岩.凡白云母显示S构造岩的,石英组构图则具S+B构造岩特点.单斜对称均表示云母和石英绕*b*轴旋转,显示嵩山群低绿片岩相层状岩石顺着底滑脱带(décollement horizon)剪切滑动,褶皱变形形成紧闭褶皱和逆冲断裂带.与此同步,滑脱带自身也发育较宽缓的褶皱变形,因此,滑脱带的发育是一

个长命的构造要素.仅在图 2 所示范围内估算,由近水平延展的滑脱带因褶皱缩短约 18%~21%.

早元古代嵩山群底部砾岩层厚 2~5 m,最大厚度达 30 m,直接覆于滑脱带片岩之上.嵩山群的原始层理面与滑脱带片岩的片理或面理面近平行.据唐克东和杨杰华(1981)的岩石样品化学分析结果,滑脱带内片岩与登封群片麻岩比较,二氧化硅、钙、钠等成分明显减少,而钛、铝、三价铁、钾、水和五氧化二磷等则显著增多,表明在嵩山群物质沉积前,登封群片麻岩曾经受过一定程度风化剥蚀作用,氧化度约为 2.4~4.1.可见,嵩山群与下伏的登封群之间,是一个多种成因的复合的地质界面(带).

4 讨论与结论

马杏垣教授曾多次指出,先进的构造学方法和构造观,能够提高地质学者认识构造现象的能力.起初,他认为解析构造学至少应包括几何学、运动学和动力学解析 3 个方面.随着国内外构造学研究的进展和亲自实践,又反复教导我们要运用物理学概念

去认识和解决地质问题,使解析构造学提升为几何学、运动学、动力学和流变学解析的完整的构造方法学新体系(马杏垣,2004)。

流变学(rheology)是物理学的一个分支学科,是研究物体变形和流动现象的学科。在地球科学领域可以通过野外和室内的宏观观察(宏观流变学)和实验室内显微—超显微(显微流变学)(Jin *et al.*, 2001)尺度进行流变学研究。两者可互为补充,以便克服局限性(Paterson, 1987)和偶然性。本文就是从宏观流变学尺度分析和解读嵩山群和登封群之间滑脱带的。就嵩山地区而言,地壳具有的流变学分层性,是受其成分层力学性质及所处物理环境制约的(Ranalli, 1997)。嵩山群和登封群的岩石组合,宏观上相当于二相叠合体系,各自具有独特的岩石组合、不均一性和结构构造特征,在统一的远程挤压动力学体制下,表现了不同的强度特征和宏观变形行为(Treagus, 2003);两者之间的不整合面,是嵩山地区上地壳层次内一个主要的地质界面,它在中岳运动过程中,起着重要作用(马杏垣等, 1981),嵩山群底部的主滑脱带,就是沿其剪切滑动形成的。滑脱带由登封群退变质的绿片岩相矿物组成,具有脆—韧性过渡性变形行为,也是一个应变局局部化(strain localization)带,是造山带尺度变形分解作用的必然结果。同时反映了水解弱化作用也是很明显的。2002年9月,美国国家科学基金地学部构造分部曾召集20多位知名学者,还专门讨论了大陆流变学与造山作用的关系,总结了流变学在地学领域已有的研究成果,指明了未来发展方向,很值得参考学习和进一步创新(索书田和钟增球, 2004)。由此可以得出下列结论:

(1)大陆地壳组成上的分层性,导致了其流变学分层性。各分层间地质界面,如角度不整合面,是滑脱带发育的优选位置。嵩阳运动形成的早元古代嵩山群与太古宙登封群间角度不整合面,本身就是主滑脱带发育的优选位置。

(2)所研究的滑脱带厚4~30 m,由登封群角闪岩相片麻岩及TTG岩系退变质的绿片岩相岩石组成,具脆—韧性过渡流变行为。水解弱化作用也是很明显的。滑脱带的成分和构造是不均一的,具有流变分解作用形成的“域组构”行为,在弱应变的透镜体内部,仍保留有登封群片麻岩的矿物组合和片麻理构造。

(3)中岳运动不仅形成嵩山群近南北向的褶皱—逆冲断裂带,而且沿底部不整合面发生剪切滑

动,形成滑脱带。滑脱带也是中岳运动的主要应变局部化带及其组成部分,是造山带的主要结构要素之一。

致谢:谨以此文纪念著名的构造学家、地震地质学家和地质教育学家马杏垣院士诞辰一百周年,深切怀念我们的恩师、原北京地质学院副院长和区地教研室主任马杏垣老师。

References

- Burg, J. P., 1999. Ductile Structures and Instabilities: Their Implication for Variscan Tectonics in the Ardennes. *Tectonophysics*, 309(1-4): 1-25. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00129-8)
- Cheng, S. L., Sun, B. L., Miao, Y. G., et al., 2008. Guide Book to Geological Practice in the Songshan Area, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Coney, P. J., 1974. Structural Analysis of the Snake Range 'Décollement', East-Central Nevada. *Geological Society of America Bulletin*, 85(6): 973. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85<973:saotsr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85<973:saotsr>2.0.co;2)
- Coney, P. J., 1989. Structural Aspects of Suspect Terranes and Accretionary Tectonics in Western North America. *Journal of Structural Geology*, 11(1-2): 107-125. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90038-2)
- Davis, G. H., 1983. Shear-Zone Model for the Origin of Metamorphic Core Complexes. *Geology*, 11(6): 342. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1983\)11<342:smftoo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1983)11<342:smftoo>2.0.co;2)
- Handy, M. R., 1990. The Solid-State Flow of Polyminerale Rocks. *Journal of Geophysical Research*, 95(B6): 8647. <https://doi.org/10.1029/jb095ib06p08647>
- Harris, L. D., 1976. Thin-Skinned Tectonics and Potential Hydrocarbon Traps, Illustrated by a Seismic Profile in the Valley and Ridge Province of Tennessee, U.S.. *Geological Survey Journal of Research*, 4: 379-386.
- Harris, L. D., Bayer, K. C., 1979. Sequential Development of the Appalachian Orogen above a Master Decollement—A Hypothesis. *Geology*, 7(12): 568. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1979\)7<568:sdotao>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1979)7<568:sdotao>2.0.co;2)
- Haug, E., 1912. Traité de Géologie. *Nature*, 89: 551-552.
- Hu, G. H., Zhou, Y. Y., Zhao, T. P., 2012. Geochemistry of Proterozoic Wufoshan Group Sedimentary Rocks in the Songshan Area, Henan Province: Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3692-3704 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., Lei, Y. L., Chen, Z. X., 2014. Progress and Development Features of Structural Geology and Tectonics. *Geological Review*, 60(4): 709-720 (in Chinese with

English abstract).

- Jin, Z. M., Zhang, J., Green II, H. W., et al., 2001. Eclogite Rheology: Implications for Subducted Lithosphere. *Geology*, 29(8): 667. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0667:erifsl>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0667:erifsl>2.0.co;2)
- Lao, Z. Q., Wang, S. Y., Zhang, L., et al., 1996. Precambrian Geological Structures and Evolution in the Songshan Area, Henan Province, China. Environmental Science Press, Beijing, 87—95 (in Chinese).
- Liu, R. Q., You, Z. D., Suo, S. T., et al., 1980. Deformation and Metamorphic History of the Presinian Rock Groups in the Songshan Area, Henan Province, China. *Scientia Sinica*, 23(8): 1022—1088.
- Lugeon, M., 1900. Les Dislocation des Bauges (Savoie). *Bull. Serv. Carte Géol. France*, 11(77): 359—474.
- Ma, X. Y., 1957. On the Pre-Cambrian Stratigraphy of the Songshan Area, Honan, and the Problems of Its Correlation. *Acta Geologica Sinica*, 31(1): 11—32, 129—134 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. Y., 2004. Analytical Tectonics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ma, X. Y., Suo, S. T., You, Z. D., et al., 1981. Tectonic Deformation of the Songshan Area, Henan Province, China—Gravitational Tectonics, Structural Analysis. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Paterson, M. S., 1987. Problems in the Extrapolation of Laboratory Rheological Data. *Tectonophysics*, 133(1—2): 33—43. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90278-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90278-2)
- Philipp, S. L., 2012. Fluid Overpressure Estimates from the Aspect Ratios of Mineral Veins. *Tectonophysics*, 581: 35—47. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.015>
- Ranalli, G., 1997. Rheology of the Lithosphere in Space and Time. *Geological Society, London, Special Publications*, 121: 19—37. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1997.121.01.02>
- Suo, S. T., Zhong, Z. Q., 2004. Chief Study about beyond Plate Tectonics: Rheology and Orogenesis of the Continents. *Geological Science and Technology Information*, 23(1): 72 (in Chinese).
- Suppe, J., 1985. Principle of Structural Geology. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Tang, K. D., Yang, J. H., 1978. Discussion on the Problem of Songyang Movement. Proceedings of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Shenyang (in Chinese).
- Treagus, S. H., 2003. Viscous Anisotropy of Two-Phase Composites, and Applications to Rocks and Structures. *Tectonophysics*, 372(3—4): 121—133. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00239-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00239-7)
- Wang, Y. L., 1960. Observation of Songshan Geology. *Geological Review*, 20(5): 191—196 (in Chinese).
- You, Z. D., Zhong, Z. Q., Zhou, H. W., 2001. The Role of Fluid Flow during Regional Metamorphism. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 157—164 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. S., 1951. Songyang Movement and Wutai System in the Songshan Area. *Geological Review*, 16(1): 79—81 (in Chinese).
- Zhang, E. D., 1954. Precambrian Succession in the Songshan Area, Henan Province. *Acta Geologica Sinica*, 34(2): 197—208 (in Chinese).
- Zhao, T. P., Zhang, Z. H., Zhou, Y. Y., et al., 2012. Precambrian Geology of the Songshan Area, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 程胜利, 孙宝玲, 苗雨国, 等, 2008. 嵩山地质实习指南. 北京: 地质出版社.
- 胡国辉, 周艳艳, 赵太平, 2012. 河南嵩山地区元古宙五佛山群沉积岩的地球化学特征及其对物源区和构造环境的制约. *岩石学报*, 28(11): 3692—3704.
- 贾承造, 雷永良, 陈竹新, 2014. 构造地质学的进展与学科发展特点. *地质论评*, 60(4): 709—720.
- 劳子强, 王世炎, 张良, 等, 1996. 嵩山地区前寒武纪地质构造及演化. 北京: 中国环境科学出版社, 87—95.
- 马杏垣, 1957. 关于河南嵩山区的前寒武纪地层及其对比问题. *地质学报*, 31(1): 11—32, 129—134.
- 马杏垣, 2004. 解析构造学. 北京: 地质出版社.
- 马杏垣, 索书田, 游振东, 等, 1981. 嵩山构造变形——重力构造、构造解析. 北京: 地质出版社.
- 索书田, 钟增球, 2004. 超越板块构造——大陆流变学和造山作用的主要研究课题. *地质科学情报*, 23(1): 72.
- 唐克东, 杨杰华, 1981. 关于嵩阳运动问题的讨论. 沈阳: 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所文集.
- 王曰伦, 1960. 嵩山地质观察. *地质论评*, 20(5): 191—196.
- 游振东, 钟增球, 周汉文, 2001. 区域变质作用中的流体. *地学前缘*, 8(3): 157—164.
- 张伯声, 1951. 嵩阳运动和嵩山区的五台系. *地质论评*, 16(1): 79—81.
- 张尔道, 1954. 河南嵩山区前寒武纪地层. *地质学报*, 34(2): 197—208.
- 赵太平, 张忠慧, 周艳艳, 等, 2012. 中国嵩山前寒武纪地质. 北京: 地质出版社.