Open Journal of Natural Science 自然科学, 2026, 14(6), 762-770
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ojns
https://doi.org/10.12677/ojns.2026.146080

Hans汉斯

从柳江盆地前陆剖面平衡看“吴庄背斜”和“柳江向斜”的构造属性

关成尧[1,2*]，伦　畅[3]，赵国春[4#]，白相东[1,2]，刘晓燕[1,2]，袁四化[1,2]

[1]应急管理大学地震科学与技术学院构造物理与岩石摩擦学实验室，河北　廊坊
[2]河北省地震动力学重点实验室，河北　廊坊
[3]中国石油大学(北京)地球科学学院，北京
[4]中国地质大学(北京)地球科学与资源学院，北京

收稿日期：2026年8月24日；录用日期：2026年10月26日；发布日期：2026年11月2日

摘　要

根据柳江盆地典型剖面的演化平衡剖面(剥蚀)恢复，认为柳江盆地可以分为西部冲段带系统、中部覆盖区系统、东部非覆盖系统三个区域性构造带，其中的西部冲段带系统可以在分为四个三级构造带。推覆褶皱区的形态整体上属于“断弯褶皱”，上部外来地体的覆盖范围达到5 km以上，覆盖了柳江向斜的大部分地域，经历大规模的覆盖、压陷及剥蚀后形成现代残留结构。柳江盆地西部的整体结构的核心属性应该是冲断带，是坡坪式构造的外来地块断弯褶皱作用的结果，西部冲断带分为寒武纪远程抬升系统、奥陶纪直立系统、石炭纪二叠纪冲断楔形系统三个部分构成。整体性的“宏观褶皱”属于断层相关褶皱。在冲断带的最西部存在向西倾斜的断阶导致了地层的系统性向西陷落和倾斜，形成和背斜体系的“地层向西变新”的整体性格局。黑山窑路线可以认为属于前陆压陷盆地结构中柳江单斜的“缩影”，反映呈现逐渐向西加强的压陷作用，柳江盆地的核心凹陷从属性上不是向斜凹陷，不属于和吴庄背斜共同组成的“背斜－向斜”组合型盆地，而是前陆压陷(单斜)凹陷，可称为“柳江单斜”。

关键词

柳江盆地，前陆盆地，构造属性，堆垛构造，演化

Tectonic Attributes of the “Wuzhuang Anticline” and the “Liujiang Syncline” from Balanced Foreland Sections in the Liujiang Basin

*第一作者。
#通讯作者。

文章引用: 关成尧, 伦畅, 赵国春, 白相东, 刘晓燕, 袁四化. 从柳江盆地前陆剖面平衡看“吴庄背斜”和“柳江向斜”的构造属性[J]. 自然科学, 2026, 14(6): 762-770. DOI: 10.12677/ojns.2026.146080

Chengyao Guan[1,2*], Chang Lun[3], Guochun Zhao[4#], Xiangdong Bai[1,2], Xiaoyan Liu[1,2], Sihua Yuan[1,2]

[1]Laboratory of Tectonophysics and Rock Tribology, School of Earthquake Science and Technology, University of Emergency Management, Langfang Hebei
[2]Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Langfang Hebei
[3]College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing
[4]School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing

Received: August 24, 2026; accepted: October 26, 2026; published: November 2, 2026

Abstract

Based on the evolution equilibrium profile (erosion) restoration of the typical section of the Liujiang Basin, it is believed that the Liujiang Basin can be divided into three regional structural belts: the western erosion section system, the central coverage area system, and the eastern non-coverage system. Among them, the western erosion section system can be further divided into four tertiary structural belts. The morphology of the erosion fault zone is generally of the "fault-bend fold" type. The coverage range of the upper allochthonous terrane reaches more than 5 km, covering most of the area of the Liujiang syncline. After undergoing large-scale coverage, subsidence, and erosion, it forms the modern residual structure. The overall structure of the western part of the Liujiang Basin should be an erosion fault zone, which is the result of fault-bend folding of an allochthonous block in a ramp-flat structure. The western erosion fault zone is composed of three parts: the Cambrian long-distance uplift system, the Ordovician upright system, and the Carboniferous-Permian erosion wedge system. The overall "macroscopic fold" belongs to the fault-related fold structures. At the westernmost part of the erosion fault zone, there is a westward-sloping fault step, causing the systematic westward subsidence and inclination of the strata, forming an overall pattern of "strata becoming younger westward" in the anticline system. The Heishanyao route can be regarded as the "snapshot" of the Liujiang single anticline in the foreland subsidence basin structure, reflecting the gradually strengthening subsidence effect moving westward. The core depression of the Liujiang Basin is not an anticline depression in terms of its attribute, and does not belong to the "anticline-syncline" combined basin formed together with the Wu Zhuang Anticline, but is a foreland subsidence (single anticline) depression, which can be called "Liujiang Single Anticline".

Keywords

Liujiang Basin, Foreland Basin, Tectonic Attribute, Stacking Structure, Evolution

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

柳江盆地是中国地学研究的发祥地之一[1]，每年数十所院校在这里展开地质相关实习。上世纪90年代，盆地区域研究初次成型[2]-[4]，近些年煤炭[5] [6]岩石[7] [8]地化[9]研究推进相对较快，构造地质方面研究仍相对薄弱[10]。在区域构造认识方面，曾出现向斜盆地观点[2] [11]-[14]、负向火山－构造盆地观[3]、拗断盆地观[4]、西部背斜观[12]-[14]、单斜与西部陡立岩层组合观(郯庐断裂系走滑诱发的断陷构造观点) [15]、现代地貌盆地观[12]等观点。关成尧等[10]依据任学义等[16]的剖面制作了初步的演化剖面，认为是响山岩体

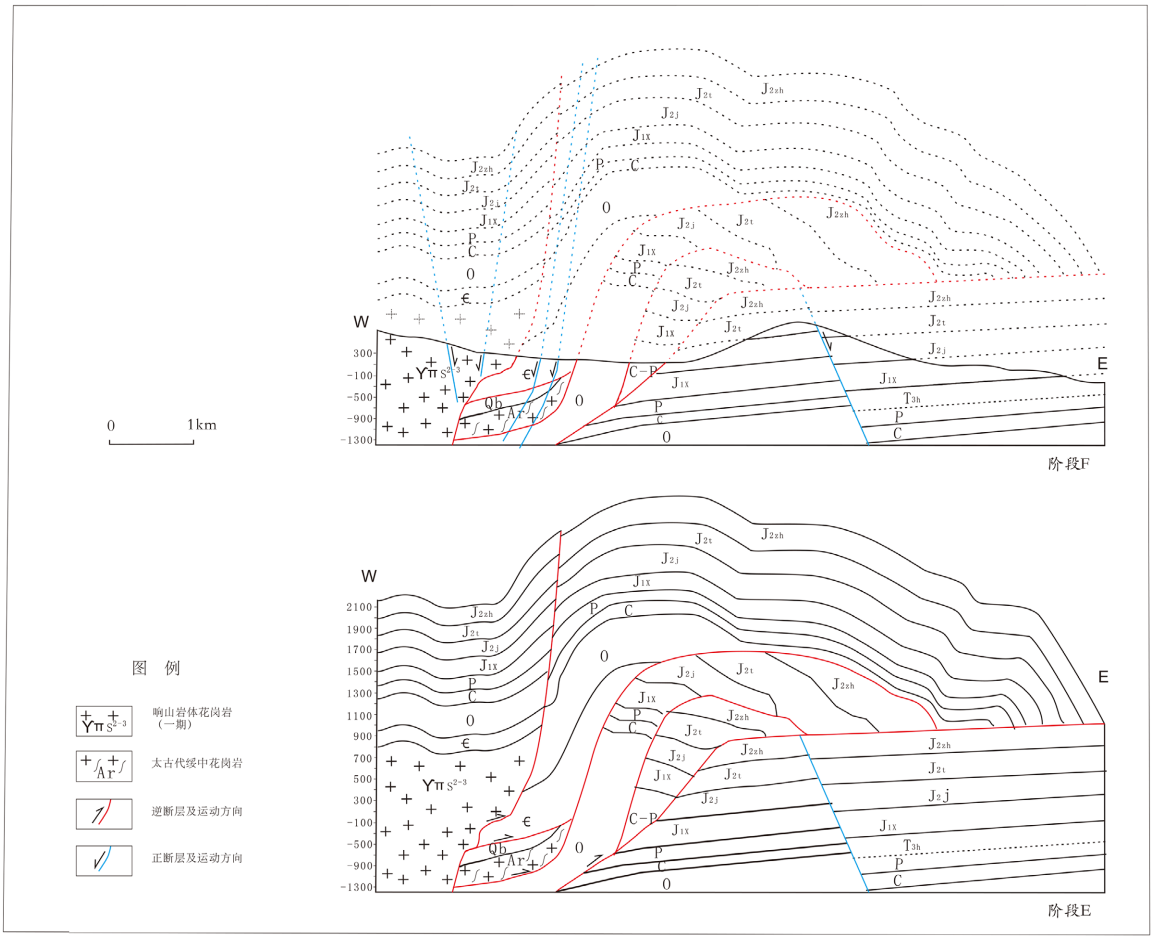
上侵就位过程中产生的水平推挤作用形成坡坪式薄皮逆冲推覆构造，该观点强化了柳江盆地的前陆盆地构造观，认为盆地西缘的局部推行距离在 4.5 km 以上，预计整体水平推移距离可达到 8~9 km 左右，相对于现今响山岩体和柳江盆地东西尺度都为 15 km 左右而言，属于“相对超大尺度”的逆冲推覆构造。本文应用任学义等[16] 50 号测线剖面结构，结合关成尧等[10]的薄皮坡坪式逆冲推覆构造模式，开展平衡剖面(剥蚀)恢复工作，并进一步讨论柳江盆地前陆盆地属性特征和吴庄背斜区域的构造属性。

2. 柳江盆地西部前陆盆地的剖面恢复

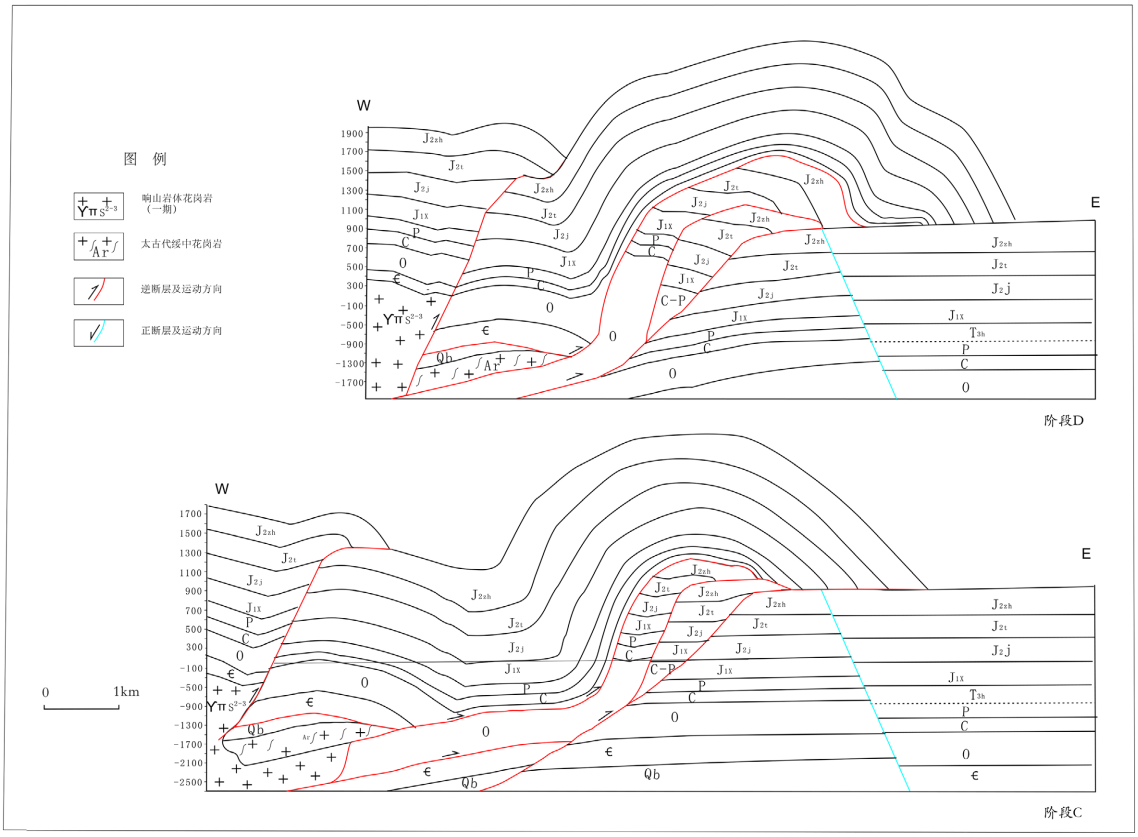
任学义(2017)文中 50 号测线在张赵庄以南的第四纪沉积槽地中测试，根据北侧张赵庄的剖面测试，本文结合边慧慧(2021) [17]和关成尧(2025) [10]对柳江盆地西部构造的解释方案，以任学义等[16] (2017)文中 50 剖面为基础，建立了剖面平衡恢复剖面如下图 1(a)~(c)所示，形成图 1(a)~(c)中 A-F 这样的整体性演化序列，剖面恢复结果显示以下特征。

(1) 大规模的覆盖、压陷及剥蚀

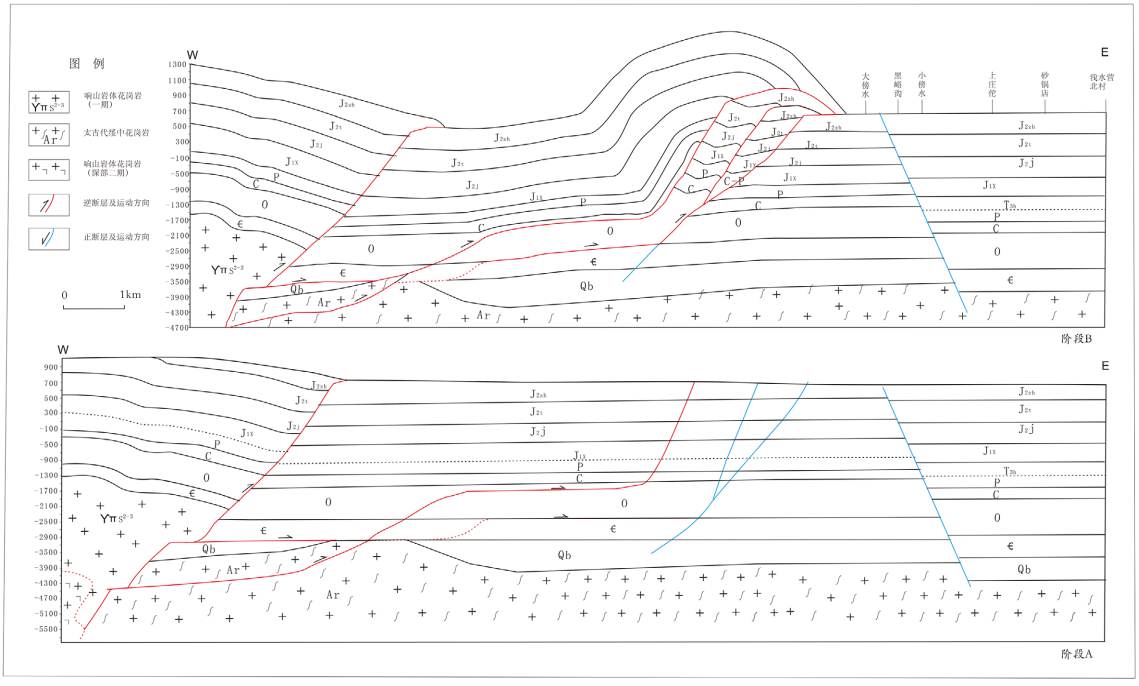
在图 1(a)~(c)中，盆地西部的逆冲岩席大规模地覆盖在大傍水村到砂锅店村一带，甚至可以到达浅水营北村一带，大傍水村到砂锅店村一带是历史上巨厚叠覆的地质体经过长时间剥蚀残余的产物。这种大规模的覆盖势必导致重力位能压陷作用，重力位能压陷作用越向西越显著，并可能在后期的剥蚀过程中会存在一定量的构造回弹(含重力均衡导致的回弹调整)。



(a)



(b)



(c)

Figure 1. (a) Tectonic evolution map of the western margin of Liujiang Basin; (b) Tectonic evolution map of the western margin of Liujiang Basin; (c) Tectonic evolution map of the western margin of Liujiang Basin

图 1. (a) 柳江盆地西缘构造演化图；(b) 柳江盆地西缘构造演化图；(c) 柳江盆地西缘构造演化图

(2) 发生大规模堆垛

逆冲推覆的岩片发生大规模堆垛，堆垛的核心区就是冲断带的前锋带，整体形成一个形态似“冲断褶隆”的构造，这个“冲断褶隆”构造范围不是很大，却是相对“高耸”的局部构造，拉高了推覆期的海拔高度。

(3) 上覆褶皱的形态

西部冲断带整体上属于 “断弯褶皱”形态，上部外来地体的覆盖范围达到 5 km 以上，覆盖了柳江向斜的大部分区域，产生奥陶系、石炭系、二叠系地层覆盖在髫髻山组地层之上(甚至还存在覆盖在张家口组火山地层之上的可能)。在造山逆冲阶段形成重力压陷沉降，这个重力压陷构造可能影响了盆地东部的西向倾斜，影响范围大致是半个柳江盆地，在西部的影响更大一些。

(4) 形成上下两套地层系统

冲断推覆的存在形成上下两套地层系统，尤其在相对稳定的东部地区，下部是稳定的原地地层，上部是“冲断褶隆”所属的构造地层，上下地层发生明显的地层重复。上层系统形成背斜，下层地层则是导致“西冲东陷”的整体性格局，只不过目前我们在野外观察到的以下层地层为主，大傍水村－砂锅店村的上层地层系统已经消失掉。

(5) 可以分为三个“二级构造带”，再细分为若干三级构造带

这三个“二级构造带”分别是西部冲段带系统、中部覆盖区系统、东部非覆盖压陷系统。西部冲段带系统又可以在分为四个三级构造带，分别是响山抬升系统、寒武纪远程抬升系统、奥陶纪直立系统、石炭纪二叠纪冲断楔形系统四个部分，这四个三级构造带的变形是不同的。

(6) 三叠纪柳江盆地成盆只在东部

任学义等(2017) [16]文中 50 剖面显示吴庄以西一带缺乏三叠纪沉积，说明三叠纪时期的柳江盆地成盆只是发生在盆地东部一隅，没有发生在盆地西部，也可能盆地西部在此时在一定程度上隆升，说明三叠纪的柳江盆地很可能属于局限湖盆。

3. 柳江盆地西部的构造属性

(1) 冲断带是核心属性

“吴庄－柳观峪背斜”区域存在的整体结构的核心属性应该是冲断带，是坡坪式构造的外来地块活动盘弯曲的结果。那么冲断带就是吴庄背斜区域的核心属性，也就是西部冲段带系统四个三级构造带中寒武纪远程抬升系统、奥陶纪直立系统、石炭纪二叠纪冲断楔形系统三个部分构成。

(2) 确实存在地层褶皱背斜

既然，前述讨论认为“吴庄－柳观峪背斜”的核心属性应该是冲断带，是坡坪式构造的外来地块活动盘，但“吴庄背斜”、“柳观峪背斜”、“义院口背斜”等区域还是存在的。一来不能否认这些局部背斜的身份，那么如何确定这些背斜的单独身份和整体身份呢？前文吴庄地区的三个岩片系统在形成过程中的挤压作用以及断层相关褶皱作用势必诱发一部分褶皱的形成，而这些诱发褶皱是不均匀的(大小不一，分布不均)。

(i) 宏观断弯褶皱的西部残留

本文认为现今反映的“吴庄－柳观峪背斜”区域被认为是和“柳江向斜”并列的构造，两者南北尺度是相当的。但事实上，这个“吴庄－柳观峪背斜”是宏观的断弯褶皱的西部残留。在发生的较大规模的坡坪式逆冲推覆构造后，曾经形成一个东西近 10 km 尺度的“古背斜”，这个古背斜以断弯褶皱为主要形态，其整体性弯曲受到堆垛作用和坡坪式构造通见的断弯作用两者共同作用下来完成的，目前的“吴庄－柳观峪背斜”是宏观的断弯褶皱的西部残留而已，“古背斜”的尺度远大于今天的背斜区域。

(ii) 整体性的“宏观褶皱关系”也存在“断层切割褶皱”(冲断带相关褶皱)

整体性的“宏观褶皱关系”指的是在地层关系方面以及整体产状上呈现的背斜形态。响山抬升系统中褶皱主要是由于“横弯褶皱作用”所导致的，这部分仅仅在响山岩体其上的局部地带还存在，整体已经剥蚀殆尽了。盆地西部大范围分布的寒武纪远程抬升系统褶皱很多，这部分大约是以纵弯褶皱作用为主，并整体呈现向西波长渐小的趋势，这一点在大绪口冲沟内看到的最为显著。奥陶纪近直立系统是一个整体[10] [15] [16]，但事实上各个区域的产状差异是较大的，整体上体现了向西部倾斜的状况，这一点在吴庄背斜区域表现较为突出，在吴庄到刘家房东山一带相对较为明显。形成明显的吴庄背斜特征。石炭纪二叠纪冲断楔形系统地层倒是较为整装，地层变形也不是很剧烈，受到的改造并不强烈，地层产状以向东倾斜为主要的地质特征。

(iii) 局部的小褶皱随处可见

在盆地西部局部的中小褶皱随处可见，“(小)吴庄背斜”、“柳观峪背斜”、“义院口背斜”可能是区域性背斜，尺度要大得多。在盆地西部寒武纪地层出露区，大大小小的背斜是较为常见的，整体上是靠近响山岩体的背斜尺度偏小，向东趋于变大，根据褶皱主波长理论[18] [19]，西部的波长较小，大约是由于西部靠近岩体而岩石的能干性更差所致。

(3) 西部沉陷带是重要的“造形要素”

本文认为西部沉陷带是重要的“造形要素”，这一点虽然在图 1(a)~(c)中未能表现出来，但关成尧等(2025) [20]中有所讨论，并形成向西倾斜的断阶，这个向西倾斜的断阶导致了地层的系统性向西陷落，形成和背斜体系“地层向西变新”的整体性格局，在这个跌落过程中，地层也更加向西倾斜，因此，从教学路线的观察来看，就产生表观上向西倾斜的“吴庄背斜”的西翼。

(4) 冲断带相关褶皱作用

这是 km 尺度的片体，寒武纪的西部片体由于呈现接近水平，既有外来推挤带，并且有抬升带，涉及到前文的两个区域，因此，其总的尺度相对较大。片体内部存在数十米尺度或者数百米尺度的褶皱，随处可见，并且整体上呈现越向西部整体来讲褶皱的波长越短的趋势。

(5) “凑出的”“吴庄－柳观峪整体性背斜”

“凑出的”“吴庄－柳观峪整体性背斜”是由于如图 2 所示的结构，这个结构的实质是经过断坡附近的逆冲推覆构造带。盆地西部的东而西存在石炭－二叠岩片(主体倾向向东)、奥陶岩片(主体倾向向西)、寒武岩片(主体倾向向西)、响山岩体。但之所以在野外勘探中整体性地体现出含有很多背斜、向斜构造的“表观背斜”。(i) 从东部石炭－二叠岩片的主体倾向向东转为奥陶－寒武的主体倾向向西，整体构成了“东部向东倾、西部向西倾斜”的“背斜”表观形象；(ii) 整体表现为在东“翼”自西向东踏勘地层逐渐变新，在西“翼”自东向西踏勘地层逐渐变新，这和一般对背斜的考察的规律是一致的。(iii) 西部存在的向西倾斜的伸展断层导致了更加剧烈的西部地层的沉降，强化了向西踏勘地层更新的局面，强化了西“翼”的跌幅。

通过以上分析，在柳江盆地火山岩区以西到响山岩体之间的地区(吴庄－柳观峪背斜区)从实质上是“表观背斜”区域，这个背斜区域在表观上形成类似于“复背斜”区域，可以称其为“吴庄－柳观峪表观复背斜区”，但这个“表观复背斜区”的成因上并不是由于区域水平水层挤压力所导致的(和一般造山带中水平挤压导致的纵弯褶皱作用成因不同)，而是由于坡坪式逆冲的冲断系所造成的。但并不是区域水平水层挤压力作用不存在，而是区域水平水层挤压力导致的是次级背斜形成和发展的控制性要素。

4. “柳江向斜”构造属性

虽然柳江盆地西部是否存在侏罗纪髫髻山组等岩浆岩以及整个柳江盆地是否存在张家口组火山岩是

存疑的，本文图 1 模式中这两个组的大规模存在性是基于推测，并无真凭实据，但意在引起人们的注意。以下内容则不是推测，是基本可靠的。

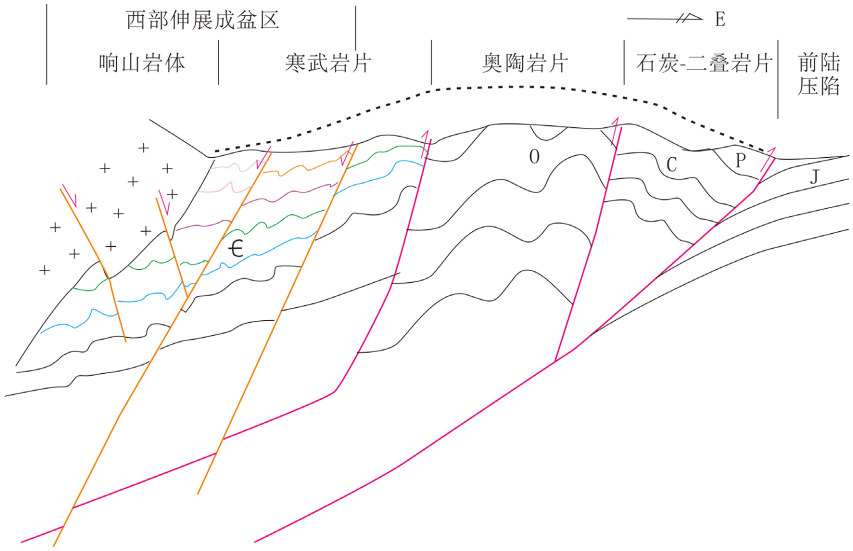


Figure 2. Generalized structural pattern diagram of the “Wu Zhuang-Liu Guan Yu Holistic Anticline”
图 2. “吴庄－柳观峪整体性背斜”基本结构模式示意图

(1) 柳江凹陷

在教学中，经常以向斜盆地来描述柳江向斜，在逆冲推覆的发展时期，大部分区域实际上并不存在独立的同期发育的向斜区域，剖面显示盆地西部的深部地层是较为平整的地层(现实中地质图中存在本图以东的向斜区域，但这个区域推测并不是逆冲发育同期的，而高概率早于响山岩体系统发育的时间)，或者西部的石炭纪、二叠纪并不是柳江向斜的“U”形的西一半翼部，而是冲断带将其带上来的，不存在“U”形的西一半翼部。

柳江盆地的核心凹陷不是向斜凹陷，而是前陆压陷凹陷，并且是单斜的凹陷，虽然，这里并不排除存在局部的向斜西翼的“向上翘倾”构成“U”的局部结构，如逆冲的拖曳等行为可能造成向斜结构，同时，也不排除存在盆地发展历史上的水平挤压形成的褶皱行为。但就盆地成型中贡献最大的核心属性来讲，这种前陆压陷是核心的属性。前人的研究中柳江向斜的概念是依据西部再次出现某些地层的现象而采用了向斜的解释模式，也大约是由于本文中的“石炭－二叠楔”的部位究竟是如何在盆地西部再次出现，而过去的研究采用最容易得出的“向斜模式”，从目前披露的地震剖面数据来看，是缺乏深部为“U”形构造的证据，因此，本文优先采用“前陆压陷”的解释方案。

(2) 传统的柳江向斜区的压陷属性与单斜构造

传统的柳江向斜区的压陷属性，可以分为两个部分，图 1 中 A-B 阶段以冲断作用为主，这个阶段的压陷作用主要发生在冲断带的前缘，整个柳江向斜区域的沉降倾斜是有限的，范围也很小，隆升的负载主要压在冲断带本身。图 1 的 C-F 逐渐发生物质的堆垛，负载向柳江向斜区域迁移，柳江向斜区受到载荷逐渐加大，受压区域逐渐扩展，柳江向斜就像受到“擀面杖”向东驱赶一样，逐渐向东传播下陷。因此，柳江向斜出现的地层倾斜应该主要发生于这种堆垛加载模式下。在响山岩体的活动期间是否发生挤压下陷较难确定，但由于西部地层整体较为平整并逐渐向东抬升，其挤压应力向柳江向斜的深部传递是相对较难的。柳江单斜的倾角进化示意见图 2 的右侧。从黑山窑路线可以认为属于盆地结构中柳江向斜的南部“缩影”，从黑山窑向西的路线存在着地质体的产状向西倾角越来越大的情况，并且地层主要倾

向于 NWW 方向，反映这里只有向西逐渐加强的压陷，而不存在渐变的向上抬起，然后在山上就快速出现了石炭纪、二叠纪地层，这个石炭纪、二叠纪地层是截然出现的。

相比之下，单斜与西部陡立岩层组合观[15]较为接近本文的地质结构的解释方案，但李越等(2009) [15]所认为的外部动力学中郯庐断裂系走滑诱发的断陷构造的观点和本文的响山岩体推动的解释方案差异很大。这里需要强调的是，柳江盆地的主体下陷区为“柳江单斜下陷区”，主体身份并非“柳江向斜”。

5. 柳江盆地区域整体性构造属性的讨论

(1) 柳江盆地存在着两级冲段带。

柳江盆地西部以“上驮”为主的冲断带，是一个整体性的冲断带，中间的变形并不强烈，形成的褶皱以横弯褶皱为主，这部分地层残留不多，主要分布在祖山的山区。紧邻响山岩体为挤压导致的逆冲冲断带，也就是“侧压”为主的冲断带，这部分是本课题踏勘的主体，“侧压”为主的冲断带就是如图 2 所示的寒武岩片(系)、奥陶岩片、石炭二叠岩片所构成的地域宽度。

(2) “残留盆地”属性

如图 1 的逆冲推覆构造曾经使得柳江盆地西部的地壳逆冲叠覆，高高隆起，成为地势较高的地貌区，然后遭受长期的剥蚀，剥蚀既去掉了上层叠覆的“断弯褶皱”(冲断褶隆)部分，并部分地剥蚀掉下层的部分岩层，那么，现代的视角看到的柳江盆地就是曾经的堆垛推覆体和叠覆体的剥蚀残留盆地，实为造山带的残留区。

(3) 前陆沉积物在哪里？

既然认为柳江盆地是前陆盆地，那么，前陆压陷盆地的沉积物在哪里呢？事实上，这部分沉积物已经在图 1 之外。由于剥蚀作用，这部分本就不广阔的白垩纪的局限沉积也被全部剥蚀，这个不广阔的白垩纪的局限沉积是由于前陆压陷作用形成的山间局限前陆凹陷，这个山间局限前陆凹陷会由于其东西的相对高地而呈现局限沉积。

这个压陷行为大大促进了“柳江单斜”的形成。早期的成盆一定程度上导致了盆地东部的一定角度的西倾斜，但最核心的导致倾斜的动力学因素应该是本文的前陆压陷行为，这个倾斜角度在冲断带附近明显变陡峭，尤其在黑山窑路线，其西部山前的侏罗系门头沟组地层的向西偏北的倾角接近 40 度的倾角。

6. 结论

(1) 柳江盆地西部(“吴庄－柳观峪背斜”区)是冲断带为主体的构造带，主体身份不是真正常规意义上的背斜或者复背斜，西部抬升上来，不是向斜的西翼，但是含有向斜要素。

(2) 石炭系、二叠系是地层抬升上来的，奥陶系地层是远程深部抬升上来的。

(3) 高度相似的剖面具有整装性，但地表的局部有很多次级背斜向斜存在。

(4) 柳江向斜从本研究涉及的时间段形成的是前陆压陷凹陷，盆地中东部为“柳江单斜”构造。

(5) 柳江盆地西部存在着两级冲段带，整体划分为西部以“上驮”为主的冲断带，可以划分为“寒武岩片(系)、奥陶岩片、石炭二叠岩片”的“侧压”为主的冲断带。

(6) 研究区是“凑出”的“吴庄－柳观峪整体性背斜”，可以称其为“吴庄－柳观峪表观复背斜区”，成因上是由于坡坪式逆冲的冲断系所造成的。区域水平水层挤压力作用导致的是次级背斜的形成和发展的控制性要素。

基金项目

2023 年度河北省创新创业课程——专创融合课程“构造地质学”(277)、防灾科技学院智慧课程建设项目(编号：ZHKC202506)联合资助支持。

参考文献

[1] 牛平山, 郭玉华. 建立柳江盆地地质遗迹自然保护区之管见[J]. 石家庄经济学院学报, 1998(4): 362-366.

[2] 姚玉君. 柳江盆地构造地貌的内应力分析[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 1996(2): 61-63.

[3] 郝素琴, 曲以秀, 杨洪英. 柳江火山-构造盆地的特征及演化[J]. 沈阳黄全学院学报, 1997, 16(1): 16-22.

[4] 刘锡文. 从秦皇岛柳江盆地岩浆活动论其大地构造性质及成矿特征[J]. 唐山工程技术学院学报, 1995(1): 76-79.

[5] 马良. 柳江盆地内岩浆侵入活动对煤层煤质的影响[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 226-234.

[6] 王海军. 柳江盆地岩浆活动对主力煤田水文地质特征的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1670-1684.

[7] 冯诗海, 李红, 蒋佳俊, 等. 华北秦皇岛地区柳江盆地马家沟组碳酸盐岩多期白云化作用[J]. 沉积学报, 2017, 35(4): 664-680.

[8] 刘书燕, 孙浩元, 胡烁, 等. 柳江盆地本溪组铁质鲕粒粉砂岩特征及成因[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(27): 11547-11557.

[9] 赵汇珍, 陈勇, 涂聪, 等. 柳江盆地髫髻山组凝灰岩地球化学与熔体包裹体水含量特征[J]. 岩矿测试, 2025, 44(1): 88-101.

[10] 关成尧, 肖雨, 白相东, 等. 中国河北柳江盆地西部构造演化及前陆盆地规律研究[J]. 自然科学, 2025, 13(5): 986-993.

[11] 林建平, 赵国春, 程捷, 等. 北戴河地质认识实习指导书[M]. 北京: 地质出版社, 2005.

[12] 柳成志, 马凤荣. 北戴河地区地质实习指导书[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.

[13] 王青春. 秦皇岛地质认识实习教程[M]. 北京: 地质出版社, 2010.

[14] 邵先杰, 褚庆忠, 马平华, 等. 秦皇岛地质实习指导书[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.

[15] 李越, 季建清, 涂继耀, 等. 燕山东部柳江地区构造属性新解与郯庐断裂系活动[J]. 岩石学报, 2009, 25(3): 675-681.

[16] 任学义, 刘强, 齐云飞. 柳江盆地西翼含煤岩系特征及构造控煤作用研究[J]. 中国锰业, 2017, 35(3): 27-39, 57.

[17] 边惠惠. 秦皇岛柳江地区中生代构造变形及其演化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.

[18] Biot, M.A. (1957) Folding Instability of a Layered Viscoelastic Medium under Compression. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, **242**, 444-454. https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0187

[19] Ramberg, H. (1963) Fluid Dynamics of Viscous Buckling Applicable to Folding of Layered Rocks. *AAPG Bulletin*, **47**, 484-505. https://doi.org/10.1306/bc743a5b-16be-11d7-8645000102c1865d

[20] 关成尧, 白相东, 刘晓燕, 等. 柳江盆地西部吴庄背斜巨型角砾区的揭层逆冲滑脱及伸展垮塌[J]. 自然科学, 2025, 13(5): 1004-1010.