

# The Deep Tectonic Mechanism of the Formation and Demise of the Hebei Yangyuan-Yuxian Basin

Shuyin Niu, Aiqun Sun, Chao Chen, Fuxiang Zhang, Jianzhen Zhang, Pingshan Niu, Qiqing Pang

Hebei GEO University, Shijiazhuang Hebei  
Email: niu\_shuyin@aliyun.com

Received: Jan. 24<sup>th</sup>, 2017; accepted: Feb. 19<sup>th</sup>, 2017; published: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2017

---

## Abstract

Yangyuan-Yuxian basin is located in the eastern margin of the Datong basin. Because a large number of mammalian fossils and ancient human remains were found and excavated at NIHEWAN and the surrounding areas of the eastern basin, it became an important base of geo ecological changes and the origin and evolution study of human of China and Central Asia. Why this land, which is so suitable for mammalian faunas to produce and inhabit, becomes hilly areas with rolling hills, criss-cross ravines and gullies and bad environment in a very short period of time? Research thinks, this is closely related to the uplift of Zhangjiakou-Xuanhua region since Yanshan movement and the rifting of Fen Wei rift system since joy mountain movement. They are controlled and influenced by the deep upper mantle plume. And the changes of the natural environment, such as crustal deformation, magmatic activity, caused frequent disasters, climate change, environmental change, ecological variation, and so on. This paper, based on the theory of mantle plume (mantle branch structure) as a guide, explores the mechanism and evolution of formation and the demise of Yangyuan-Yuxian basin caused by the deep mantle upwelling plume activity.

## Keywords

Mantle Crust Movement, Deep Process, Tectonic Activities, Mantle Plume, Ecological Change, Yangyuan-Yuxian Basin

---

# 河北阳原 - 蔚县盆地形成 - 消亡的深部构造机理

牛树银, 孙爱群, 陈超, 张福祥, 张建珍, 牛平山, 庞其清

河北地质大学, 河北 石家庄

文章引用: 牛树银, 孙爱群, 陈超, 张福祥, 张建珍, 牛平山, 庞其清. 河北阳原 - 蔚县盆地形成 - 消亡的深部构造机理[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(1): 17-29. <https://doi.org/10.12677/ag.2017.71003>

Email: niu\_shuyin@aliyun.com

收稿日期: 2017年1月24日; 录用日期: 2017年2月19日; 发布日期: 2017年2月22日

## 摘要

阳原-蔚县盆地位于大同盆地东段, 由于该盆地东段泥河湾及其附近地区发现并发掘了大量哺乳动物群化石和古人类活动遗迹, 使其成为我国乃至中亚地区地质生态变化以及人类起源与演化研究的重要基地。本文的科学问题是为什么如此适宜哺乳动物群生物繁衍栖息之地, 却在很短的时期就演变成为山峦起伏、沟壑纵横、环境恶劣的丘陵地带? 本研究认为: 这与燕山运动以来张宣地区的隆起以及喜山运动以来汾渭裂谷系的断陷密切相关。它们均受深部上涌地幔热柱的控制和影响, 导致了该区的地壳变形、岩浆活动, 从而引起灾害频发、气候改变、环境变化、生态变异等。本文以地幔热柱(幔枝构造)理论为指导, 探讨深部地幔上涌柱活动导致阳原-蔚县盆地的形成-消亡的机理及其演化过程。

## 关键词

幔壳运动, 深部过程, 构造活动, 地幔热柱, 生态变化, 阳原-蔚县盆地

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

阳原盆地和蔚县盆地是大同盆地北东缘的延伸部分。近一个世纪以来, 由于在阳原泥河湾及其附近地区持续不断的野外考察、发掘和研究, 在盆地形成特征、地层古生物研究以及古人类活动遗迹研究等领域均取得了一系列举世瞩目的优秀成果。夏正楷率先探讨了泥河湾盆地黄土的形成机理及其古气候意义[1]; 邢作云等从汾渭裂谷系与造山带耦合关系方面讨论了区域地质构造演化[2]; 谢飞等专题著书详细介绍了泥河湾旧石器文化[3]; 朱日祥等则从泥河湾盆地磁性地层定年探讨了与早期人类演化的关系[4]; 袁宝印等从泥河湾古湖的形成机制与早期古人类生存环境的视角分析了该区的生态演化[5]; 庞其清等则从晚新生代微体古生物地层方面探讨了泥河湾盆地及环境变化[6]。近年来, 该区又相继发现了大量早期古人类活动遗址群, 使这里很快成为了研究古地质生态变化和古人类起源与演化研究的重要基地, 且其研究的范围也逐渐扩大到整个阳原-蔚县地区[7]-[20]。

但是, 纵览这些成果多数集中在古人类、古生物、地层、盆地沉积特征及古环境研究等方面, 区域地质构造演化方面的研究相对较少, 而区域构造的形成与演化对盆地的形成与发展起着举足轻重的控制作用。本文拟以幔枝构造理论为指导, 在分析泥河湾地区地质特征的基础上, 深入探讨深部地幔上涌柱活动导致阳原-蔚县盆地形成-形变-消亡的机理, 进而分析盆地的演化过程及其对生物繁衍的控制作用。

## 2. 泥河湾地区的地质特征

泥河湾地区位于阳原盆地的东北端, 该盆地是中-新生代形成并发展起来的裂谷型断陷盆地, 总体呈NEE走向, 长约78 km, 宽约10~20 km。盆地内部西高东低, 海拔在800~1000 m以上。盆地西缘与大同盆地相连, 区域组合称为大同-阳原盆地, 盆地南、北、东三面环山, 一般海拔1000~2000 m以上。盆地北侧为熊耳山, 最高海拔2035 m, 山前发育阳原盆地北缘断裂, 它控制着盆地的北界; 南侧为六棱

山, 最高海拔 2300 m, 其北麓山前断裂控制着阳原盆地的南界, 并以壶流河与蔚县盆地相通(图 1)。

狭义的泥河湾盆地位于桑干河流域的东段, 西起山西阳高与河北阳原县交界的许家窑 - 侯家窑遗址群, 东至石匣以东的桑干河峡谷。在区域构造上属于汾渭裂谷系东北向延伸部分, 裂谷系总体呈 NNE-SSW 向延伸, 它南起渭河盆地, 由沿 NE-NEE 方向依次排列的运城盆地、临汾盆地、太原盆地、滹沱河盆地、大同盆地等构成, 是深部机制在地壳演化过程中的综合表现形式。

第四纪早 - 中期, 泥河湾地区发育成为较为广阔的湖泊, 称之为泥河湾古湖[7]。盆地中发育有厚层的河湖相沉积, 被称为泥河湾层[18]。

### 3. 新生代地层展布及其构造活动

就一般地质规律而言, 区域构造活动往往控制着地层的形成及其空间展布, 而地层的空间展布及其变形变位特征则被用来反演构造活动特征。泥河湾盆地中主要发育古近系 - 第四系, 在华北地区具有代表性, 袁宝印等[5]由下至上进行了概况描述:

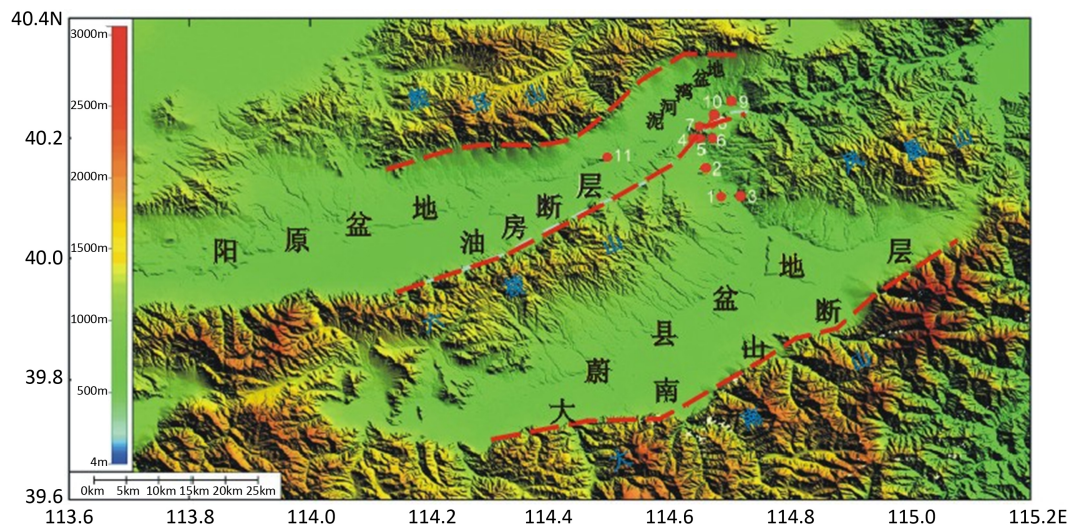
古近系砾石层: 分布于熊耳山、六棱山等山系的高夷平面上, 最厚可达 5~10 m, 其砾石成分主要为石英砂岩, 磨圆度较高, 分选度稍差。表明其搬运距离较远, 堆积速度较快, 构造活动较为强烈, 地形地貌特征已经具有较大的高差。

新近系砾石层: 多出露于阳原县北部熊耳山山麓地带, 为一套厚约 60 m 左右的灰色砾石层和红色黏土层, 底部砾石层厚 5~10 m, 砾石成分复杂, 以石英岩为主, 含有较多的硅质灰岩、石英砂岩、页岩, 还有部分玄武岩砾石。此外, 在熊耳山山前有一系列由山沟中流出沉积物堆积而成的冲积扇。典型冲积扇特征的研究往往能解读山区的隆升时间、隆升幅度以及断裂构造活动期次。

上新统红黏土: 出露于石匣一带桑干河两岸以及红崖附近壶流河两岸, 以砖红色黏土为主, 节理发育。石匣村以东出露红黏土厚达 30 m, 可划分黄土和古土壤互层组成的若干个次级旋回。

第四系泥河湾层: 指不整合于上新世红色黏土之上的一套河湖相沉积, 为巴尔博于 1924 年野外研究所命名, 主要出露于泥河湾村一带桑干河右岸及壶流河两岸湖积台地。

袁宝印等研究认为, 泥河湾地层其岩性的垂向变化比较大, 一般在顶部为砾石层, 它们是湖泊消亡时形成的河流沉积; 顶部砾石层之下以黄绿色亚黏土、亚砂土为主, 中部发育厚约 5 m 左右的砂砾层,



(左侧彩色柱代表海拔高度; 图中数字为前人研究剖面)

**Figure 1.** Topographic features of Yangyuan-Yuxian basin in Hebei province

**图 1.** 河北阳原 - 蔚县盆地地形地貌特征

反映当时湖泊演化过程中曾夹有短时间的河流冲击环境。下部以灰绿色黏土、亚黏土为主。

泥河湾层上述岩性特征清楚的表明,泥河湾古湖的地质环境变化相当大,反应在湖水的进退、湖面的大小、沉积物的多少、层面的特征以及其成分、砾级、分选性、磨圆度等均是探讨构造变形强度与构造变形期次直接证据。

#### 4. 阳原 - 蔚县地区盆 - 岭构造

从区域地质构造特征来看,中生代以来,包括泥河湾在内的阳原 - 蔚县地区经历了大幅度抬升,到晚更新世中、晚期,阳原 - 蔚县盆地东部构造抬升,桑干河和壶流河强烈下切;晚更新世末期,泥河湾古湖被断裂切割,湖水经石匣东部的峡谷东流外泄,内陆水系改变成为外流水系。桑干河向东流入涿(涿鹿)怀(怀来)盆地与洋河汇流,阳原 - 蔚县盆地现代水系格局基本形成[5][6]。

200 万年以来,以泥河湾盆地为代表的阳原 - 蔚县地区曾经历了多次温暖湿润古湖泊环境与短时期的寒冷干旱环境的交替,特别是持续时间较长的温暖湿润阶段,为植物的生长和动物的繁衍创造了条件;晚更新世以来该区逐渐转变为环境恶劣的丘陵地带。显然,如此巨大的生态环境演化过程与泥河湾盆地的构造演变有着必然的密切联系。探讨泥河湾盆地之深部构造演化,则应该与其深部过程——地幔热柱、幔枝构造的形成与演化联系起来。

华北东部地区构造演化分析表明,中生代中晚期以来,在深部大同时地幔热柱上涌的影响下,阳原 - 蔚县地区经历了燕山中期的大规模隆升→燕山晚期的差异升降活动→喜山早期中心区的热减薄断陷→喜山晚期的区域性凹陷作用,最终形成了具有代表性的、独特的地质构造格局。

自晚新近纪以来,盆地曾发生过两期玄武岩浆喷发:第一期在上新世三趾马红土形成之前,由于区域性断裂的深切,引起上地幔融熔物质上升,最终导致玄武岩喷发,在阳原县北部灰泉堡一带可以看到分布面积约占 100 km<sup>2</sup> 的玄武岩,多呈气孔状构造,气孔往往被石英充填,呈杏仁状;第二期玄武岩喷发主要集中在东井集以西,玄武岩多覆盖于早更新世湖相地层之上,晚更新世黄土之下,在桑干河强烈下蚀作用下多形成峡谷。另外,泥河湾地区频繁发生地震活动,也可以认为是泥河湾地区深部岩浆活动的重要表现形式之一。

上新世末至第四纪初,区域构造应力场发生较大变化,导致山西中部地区在持续隆起的基础上发生伸展裂陷,并逐渐扩展形成一系列呈北东东向张裂型断陷盆地。沿北北东向串联组合成独具特色的汾渭裂谷系。北段大同裂陷槽亦逐渐向北东东向延展裂陷,奠定了阳原 - 蔚县地区的盆 - 山构造格局。其构造形式多表现为掀斜式断陷特征。盆地的形成主要受北侧熊耳山山前断裂控制,断裂沿山前展布,往往成为盆地与山岭的分界线。断裂亦可以山前断裂为主,并发育多条断裂呈阶梯状展布,每条断裂的断距不一定大,但是若干条断裂组合成阶梯状断层组顺序下滑,其总体规模还是较大的(图 2);而盆地南缘断裂则往往呈铲状特征,以六棱山北缘断裂为例,它明显控制着盆地南部的盆 - 山界线,也具有上部断裂倾角较陡,往深部逐渐变缓,多条断裂组合成带的特征。甚至在盆缘较厚黄土发育的部位亦可形成阶梯式断裂组合。断距较大的黄土地带也可形成较为明显的断裂三角面(图 3)。

显然,阳原 - 蔚县裂谷的形成亦受着深部地幔隆起与浅部拗陷裂解的控制,区域上隆起与拗陷相间有序地排列,耦合成盆地 - 山岭组合构造;而阳原 - 蔚县地区新生代沉积层的展布与沉积厚度则能够反映深部区域变形的强度,如阳原 - 蔚县地区形成三山夹两盆的构造格局,就是该区强烈构造变形并经风化剥蚀所雕琢的结果,且使山岭发育成北老南新的掀斜断块式隆起,盆地呈北浅 - 南深的掀斜式断陷盆地。

##### 4.1. 熊耳山断块隆起区

熊耳山断块隆起区位于阳原县北部山前断裂带以北,总体呈北东向 - 北东东向分布。区域构造上处于山西地块的边缘。

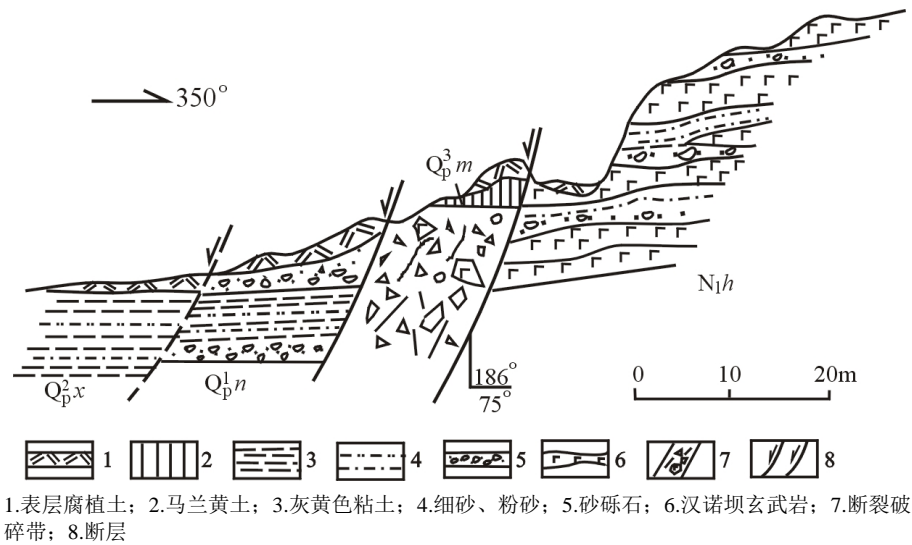


Figure 2. The Huiquanzi piedmont fault section of western in Xiong'er Mountain

图 2. 熊耳山西段灰泉子山前断裂剖面

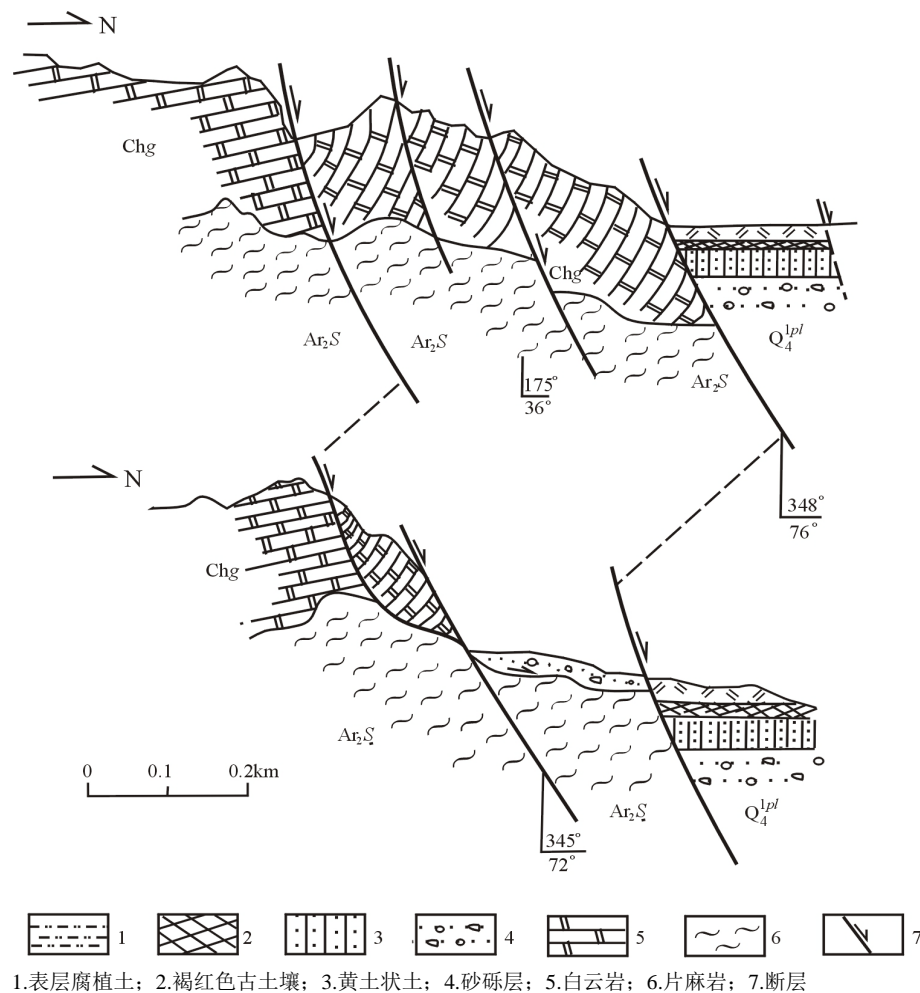


Figure 3. The composite section of Tianzhen-Zoumayi in the Liulengshan northern slope

图 3. 六棱山北坡天(镇) - 走(马驿)线联合剖面

自古生代以来, 地块长期处于缓慢的间歇性隆起状态, 且长期遭受风化剥蚀。在隆起的轴部广泛出露有太古宙基底片麻岩系, 仅在东南部尚留元古宙部分地层出露。缺失古生代、中生代地层。在熊耳山断块的西段出露有较大面积的中新世(汉诺坝)玄武岩。可见多层溢流状玄武岩、集块岩、角砾岩。其间还夹有厚薄不等的砂砾石层。这表明该区的玄武岩具有多旋回喷发的特征。

#### 4.2. 六棱山掀斜断块区

六棱山掀斜断块位于阳原盆地的南部, 六棱山北坡断裂带(油房断层)与南坡山前断裂带之间的断隆地块就是六棱山掀斜断块隆起区。该地块呈 NE-NEE 向延伸。断块长约 50 km, 宽约 20 km。

所谓掀斜断块隆起区是指抬升的地块具有一定角度的倾斜, 以六棱山掀斜断块为例, 隆起区的北部多出露有太古宙片麻岩系; 向倾斜方向的中部往往盖有中元古界高于庄组白云岩或灰质白云岩, 或雾迷山组燧石条带白云岩; 其上则盖有早古生代寒武纪和中生代侏罗纪地层, 部分地段还夹有侏罗纪煤系地层。表现出六棱山隆起断块区的地层总体是向 SE 方向缓倾斜, 总体是由老至新表现为由北西向南东方向展布, 总体由 NW 向 SE 方向, 地层由老至新展布, 依次出露太古宙变质岩系 - 中元古代碳酸盐岩 - 古生代碎屑岩、碳酸盐岩 - 中生代碎屑岩系。这些地层依次斜列堆叠构成掀斜断块。

六棱山长期缓慢抬升并遭受剥蚀, 缺失古近纪地层。基岩面上多直接覆盖有厚度不等的第四纪河湖相及黄土状堆积物。根据基岩的新老关系和同一岩层的出露高度, 亦表明断块北部上升幅度大于南部, 说明断块隆起时发生了一定程度的掀斜运动, 大部分地层向南掀斜  $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。断块中尚有一系列次级北东向断裂, 致使红崖村、西窑子头及张李堡一带的基岩和上新世地层出露于地表。

#### 4.3. 蔚县大南山断隆区

蔚县大南山隆起区系指大南山(北缘)山前断裂以南的隆升区。沿断裂可见多处壮观的断层三角面。由于断层切割, 可在不同高度出露下更新统泥河湾组、上更新统、全新统冲洪积砂砾石层和马兰黄土, 同时在下部陡坎上还可观察到被断层错断的基岩露头。多处可见第四纪松散沉积物直接覆盖在山间谷地的基岩之上, 表明本区自中生代以来, 一直处于隆起状态。在某些山地顶部还保留有古近纪时期形成的夷平面, 并残留有红色风化壳。

第四纪以来, 由于大南山断块抬升过程中受北西向断裂活动的影响, 致使夷平面解体, 出现不同地段不同高程上的差异沉积, 如小五台山已经高达 2743 m, 其它地区则多低于 2000 m。

蔚县大南山隆起区亦有与六棱山相类似掀斜特征, 自北向南分别出露有中元古蔚县系雾迷山组碳酸盐岩; 古生界寒武系碎屑岩、碳酸盐岩; 侏罗系碎屑岩等岩系。地层产状亦以中 - 小角度向南 - 南东倾斜为主, 也可见有些构造部位发育有同向拆离滑脱带。因此, 蔚县大南山隆起区的掀斜断块特征亦较为明显。

#### 4.4. 东部石匣断块隆起区

石匣断块隆起区位于阳原 - 蔚县盆地的东部, 受 NE 向断裂的影响, 南北向差异升降明显, 北部形成深井盆地, 南部形成石匣山地。

该区新生代以来一直隆起并遭受剥蚀, 使大范围基岩直接裸露地表。上新世三趾马红土层在石匣山麓带及王家贝 - 栗家湾一带仍有一定范围的残留。在姜家壤附近(标高约 1000 m)出露有湖成砾石层。穿越石匣山地的桑干河两岸普遍发育有 5~6 级河流阶地, 最高阶地高出谷底约 100 m, 表明该区山区隆升、河流下切的幅度可观, 成为泥河湾古湖泊之水外泄的主要渠道, 也是阳原 - 蔚县地区快速差异升降的主要特征, 地形地貌很快形成山岭 - 盆地的重要证据。这也表明地壳深部的地幔柱活动相当强烈, 不仅导致汾渭裂谷的快速形成, 同时也是该区强烈构造运动的深部驱动力。

#### 4.5. 泥河湾 - 阳原断陷区

泥河湾 - 阳原断陷区位于阳原县北部熊耳山山前断裂, 与阳原南部六棱山山前断裂之间的断陷盆地中, 呈 NE-NEE 向延展, 并具西宽东窄的形似喇叭状。自晚新世中、晚期开始断陷, 在山麓地带堆积了坡洪积相的三趾马红土层。自晚新世末至更新世初, 在盆地持续断陷作用过程中, 断陷较深的区段逐渐积水成湖, 茂盛的植物亦快速繁衍扩展, 同时也为动物的集聚、繁衍创造了必要的生存条件。

早更新世至中更新世, 伴随着泥河湾 - 阳原断陷的进一步扩大, 泥河湾湖泊的扩展也达到了极盛时期, 不仅湖泊面积迅速扩大, 而且快速堆积了厚层的河湖相沉积物。沉积中心在东城至浮图讲附近, 地层厚达 500~600 m 左右, 往东至化稍营一带减少到 300 m 左右, 再东到石匣地区则仅剩不足 100 m。很显然, 湖盆的深度变化和沉积物厚度的变化, 甚至沉积物的物源成分变化均主要受古地形地貌的控制和新构造运动的改造。

根据沉积地层及岩相古地理分析, 泥河湾盆地下部主要为砂砾石及含砂砾透镜体的亚沙土层沉积, 表明湖水较浅; 中部为细粒相的粘土、亚粘土及粉砂土互层, 水平层理较为发育, 表明泥河湾湖泊水位在加深, 面积在扩大, 沉积物逐渐变细, 沉积结构构造更加明显; 泥河湾上部沉积物则主要为砂、亚砂土、砂砾层和钙质胶结的砂岩层, 部分层位夹有较薄的石膏层, 表明泥河湾湖水在深度上和面积上均有较大的变化。当然, 区域性大周期的环境演变也夹杂着若干个局部性的小周期的变化。

上述沉积层具有明显的沉积韵律, 表明在断陷盆地的发育过程中, 应该是边断陷边沉积, 而新构造运动的性质则以持续的断陷为主, 兼(间)夹有明显的上下振荡; 中更新世以后, 湖水面积明显的缩小, 只在虎头梁及许家窑一带地势低洼处呈若干个浅水湖泊存在。这可能表明东部石匣一带的断裂活动已经在湖泊东部打开了泄水通道, 泥河湾湖水面积在急剧缩小; 晚更新世时, 在深部机制控制下, 由于山区渐次抬升, 湖水逐渐干涸, 并渐渐被黄土层覆盖。这时, 河流仍较为发育, 随着河流的不断下切, 逐渐形成了桑干河两岸的 1~3 级阶地, 说明本区新构造运动仍在强烈活动, 并且多表现为较强的上下震荡。

#### 4.6. 蔚县盆地断陷区

断陷区展布范围位于蔚县外围, 蔚县 - 桃花堡断裂带与蔚县大南山山前断裂带之间。它西起广灵县, 东至桃花堡, 呈 NE-NEE 向延伸, 长约 80 km。断陷区亦呈现西宽东窄形似喇叭状, 基底为侏罗纪火山岩系。基底埋藏较深, 构造活动强烈, 仅新生代沉积厚度可达 700 多米。从已有钻孔资料分析, 盆地沉降中心在西合营一带, 这是壶流河北西向地堑与蔚县 - 桃花堡东西断裂交汇的沉降地带。

更新世河湖相沉积以薄层的粉砂质粘土、粘土质粉砂和粉砂、细砂为主, 韵律明显, 以多层次交替重复出现为特征, 表明断陷盆地在沉积过程中发生过频繁的振荡式升降运动。根据地球物理探测资料分析, 蔚县大南山山前断裂向盆地中心呈阶梯状断陷, 使盆地基底呈不对称形态展布。

#### 4.7. 壶流河北西向断陷区

断陷区介于头马坊 - 大田洼 - 东金河口断裂与水峪口 - 九宫口断裂所挟持的断陷之间, 大致呈 NW 方向延展, 长约 20 km, 宽 12 km, 是沟通阳原盆地与蔚县盆地的主要构造通道。在地堑区内曾堆积了晚新世末至更新世的湖相及河流相沉积物。

晚更新世时, 由于壶流河的下蚀切割, 使河流两侧形成湖积台地和 2~3 级阶地。根据地层和岩相分析对比, 可以看出沿怀安 - 北水泉 - 松枝口断裂的东西两侧亦有地形地貌的明显差异: 西侧抬升, 上新世三趾马红土层出露; 而东侧相对下降, 三趾马红土层多被埋藏, 一般很少出露。

综上所述, 从盆 - 山组合视角来看, 包括泥河湾盆地在内的阳原盆地和蔚县盆地的松散堆积均表现出盆地北侧断距相对较小, 断裂错断断距也较小, 松散堆积物厚度亦较薄; 而南侧山前断裂规模较大,

地层错断的幅度也较大,使两个盆地均成为南侧断距大、沉积厚度大;北侧断距小、沉积厚度小的箕状断陷盆地的沉积特点。

熊耳山、六棱山、大南山等三个隆起区亦表现出地层北侧较老,向南侧逐渐变新,呈现出由北向南的掀斜地块,而断隆间所夹持的阳原断陷和蔚县断陷亦同时均具有向南掀斜(倾斜)的特点,这就更说明泥河湾地区中-新生代以来,在深部地幔上涌的区域构造背景下,其上部地壳隆拗表现出与深部地幔呈镜像对称的断陷和断隆构造。

## 5. 阳原 - 蔚县盆地的形成与演化

阳原 - 蔚县盆地与熊耳山 - 六棱山 - 大南山之盆 - 山耦合的形成及其演化,总体受控于地壳构造体制转化的控制和影响,特别是中-新生代以来,华北地块经历了覆地翻天的变化。华北地块本是中国最古老的陆块,形成于约  $30 \times 10^8$  a 之前,广泛出露有太古宇 - 元古宇基底变质岩系,后经历了复杂的区域性褶皱构造变形、逆冲推覆构造及岩浆侵入等作用的叠加,直到距今 118~116 Ma,其构造体制才转变为广泛的伸展变形机制[21]。到白垩纪晚期,大部分地区进入了长期稳定的剥蚀夷平状态,形成了北台期准平原化。距今 66 Ma,华北裂谷系开始快速裂陷成盆[22]。

袁宝印等[18]编著的《泥河湾裂谷与古人类》专著中,对古泥河湾湖的形成与演变历史做了深入研究,认为泥河湾古湖变迁是构造和气候双重作用的结果。闵隆瑞等[23]则认为泥河湾盆地自上新世末至早更新世初才拉张断陷而成,由于六棱山北麓断裂的活动强度大于阳原盆地北缘断裂,导致盆地南部下沉幅度大,北部下沉幅度小,形成南深北浅的不对称箕状断陷盆地。袁宝印等[5]则依据汾渭裂谷盆 - 山耦合模型,提出了软流圈上涌柱的不均匀上涌,是造成盆地铲式断裂的主要因素,熊耳山伸展造山,阳原 - 化稍营一带相应断陷成盆,大田洼一带则后推成台的构造模式,很好地揭示并解释了泥河湾盆地的形成过程。

阳原 - 蔚县盆地的形成,在地球物理探测资料中也有很明显的表现。阳原 - 蔚县地区深部地幔活动,导致地壳发生大幅度隆升 - 断陷,进而形成区域性盆地 - 山脉耦合,构成汾渭地区大幅度隆拗变形。邢作云等[2][24]研究认为,新生代早期深部构造的基本特征是软流圈多呈现柱状上涌,柱身大小不一。大同软流圈上涌柱属于较小的地幔柱体,上涌柱有明显的蘑菇状柱头,直径约有 100 km,一般上涌至 80 km 左右的高度,厚度约 20~25 km,面积达 40,000 km<sup>2</sup>,其展布范围涵盖了恒山 - 大同及其以北地域。当柱头穿插于岩石圈中的上下界限处,可导致大面积玄武岩喷发。取自大同热幔柱玄武岩幔源包体的测试结果表明,柱头来源深度约为 50~60 km,这与地震层析成像结果基本一致。说明软流圈上涌柱的柱头与地壳底部十分接近。柱头岩浆直接穿过上部岩石圈和地壳,沿断裂喷发出大量的玄武岩,阳原县以北的武家山 - 崔家山一带高夷平面上的渐新世玄武岩即为该区最早喷发的玄武岩,说明恒山 - 大同软流圈上涌柱的柱头向东已经延伸至阳原一带。由于软流圈不对称上涌,在上涌较高的一侧,其上部岩石圈开裂,形成盆地边缘的铲式断裂。

邢集善等[25]则在前人工作的基础上,依托 P 波地震层析原始数据,参考大地电磁测深资料 and 大地热流值相关成果,结合相应浅表构造、岩浆活动的差异特征,对有关资料进行重新开发和计算,注意到上地幔岩石圈 - 软流圈构造及其变异,特别是软流圈上涌柱,会导致岩石圈减薄及其相应浅表强烈的构造 - 岩浆活动(图 4)。并将其大体划分为两个主要时期,(1) 新生代早期形成的大型软流圈上涌柱,如华北平原区的渤海湾 - 下辽河柱,软流圈地幔可上涌至 75~80 km 深度,其宽度也可达 300~400 km,影响范围较大,其浅表往往形成大型裂谷式平原区,伴有玄武岩喷发,大地热流值为高异常区( $> 80\sim 90$  mW/m<sup>2</sup>),上涌时代以 E<sub>2</sub>-E<sub>3</sub> 期为主;(2) 新生代晚期形成的软流圈上涌柱,一般上涌至 30~50 km 深度,如大同柱,上涌表现形式为柱状,多伴有一定规模玄武岩喷发,大地热流值有时亦可较高( $> 80\sim 90$  mW/m<sup>2</sup>),上涌时代多以 N<sub>2</sub>-Q<sub>1</sub> 期为主。



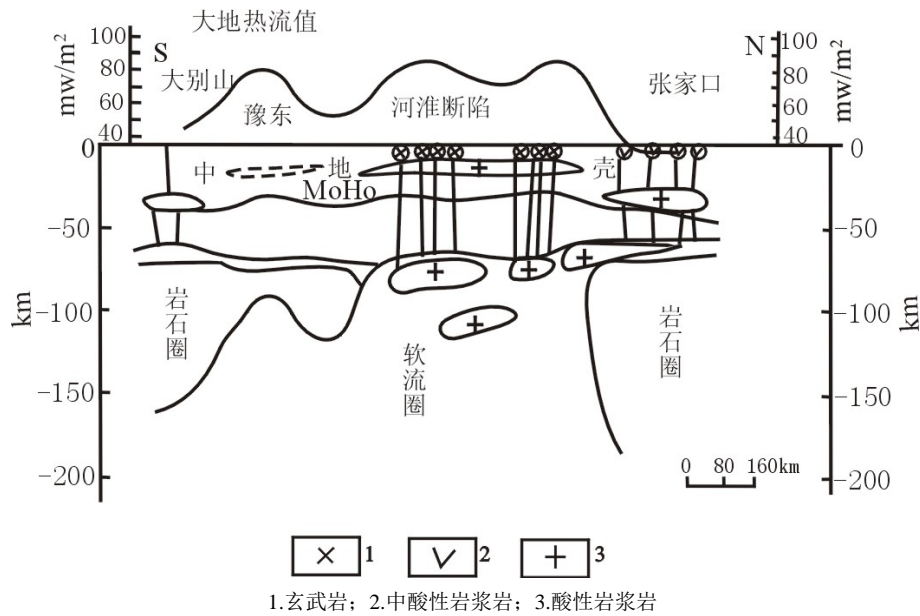


Figure 4. Upwelling plume characteristics of asthenosphere at Hehuai area (refer to ref. [25])  
图 4. 河淮地区软流圈上涌柱特征(据文献[25]略修)

## 6. 盆 - 山构造演化深部机制

新构造运动可以引起构造变形、岩浆活动、沉积作用甚至地球物理场、地球化学场等变化，而这些现象则蕴含着构造运动的时间、地点、规模、形成机制、深部过程等相关信息。

中生代以来，华北东部地区发生了覆地翻天之构造演化，在深部地幔热柱上涌的过程中，华北东部经历了燕山中期大规模的总体隆升 - 燕山晚期的差异升降 - 喜山早期中心区的热减薄断陷 - 喜山晚期的区域性凹陷作用。

### 6.1. 阳原 - 蔚县地区的构造表象

阳原 - 蔚县盆地位于恒山 - 大同软流圈上涌柱形成的断陷盆地东段，并与盆地间所夹持的隆升断块山组合成盆岭构造，包括阳原盆地北缘的熊耳山、阳原与蔚县盆地间的六棱山、和蔚县南缘的大南山，以及其间所夹持的阳原断陷和蔚县断陷，构成了典型的区域性盆 - 岭断块构造。山前湖相沉积上升成为湖积台地或湖蚀台地，山麓地带早期形成的湖蚀穴和湖蚀陡崖也多被抬升到一定的高程，得以较好的保存。

熊耳山、六棱山、大南山等山系属于隆升断块山。断块山多表现为断陷盆地间的断隆，断隆之间的阳原盆地和蔚县盆地则发生大幅度断陷，断陷盆地亦表现为北侧断浅、南侧断深的箕状断陷，堆积了大量就近风化剥蚀的沉积物，快速充填了阳原盆地和蔚县盆地，有人称为反层序快速堆积，即山区较早风化剥蚀的沉积物充填到相邻断陷盆地的下部，而较晚风化剥蚀的沉积物填充到相邻盆地的上部，相对沉积物源来说，盆地沉积物被称作反程序堆积。甚至准确测量盆地堆积物的展布范围和堆积厚度，可以大致推算相邻山区风化剥蚀的速度与规模，进而探讨陆内造山速度、升降幅度以及深部变形过程。

至于盆 - 山演化的时段仍有不同意见，袁宝印等[5]基于较为详细的地质研究，认为古近纪初恒山 - 大同一带发育软流圈上涌柱；距今 25~24 Ma，阳原 - 石匣一带开始断陷形成盆地，盆岭构造特征开始显现；晚新世末至早更新世为盆地断陷最盛时期，泥河湾古湖形成；距今 2.0~0.8 Ma，泥河湾地区转为温带气候环境，甚至间夹短时间的亚热带气候。

显然，阳原 - 蔚县地区的构造运动与生态变化均受着深部过程的控制，也即深部过程是该区地壳运

动的动力来源，而上部地壳运动以及由此引起的构造变形、岩浆作用、环境改变、生态变化等，则均先后受张宣幔枝构造和汾渭裂谷作用的控制。

## 6.2. 阳原 - 蔚县盆地的幔 - 壳运动

中生代以来，在华北东部地幔热柱强烈隆升的驱动下，张宣幔枝构造亦快速形成，位于张宣幔枝构造南西部的阳原 - 蔚县地区也全域范围发生隆升，成为其外围的主要拆离滑脱带，并接受了较为强烈的风化剥蚀；直到早侏罗世，由于张宣幔枝构造核部强烈的岩浆活动导致其核部发生大规模的热断陷，形成隆拗相间的盆 - 岭构造格局，并在部分拗陷地带堆积了早 - 中侏罗世含煤地层；中 - 晚侏罗世强烈的构造反转，则形成了具有区域规模的 NE 向或 NNE 向压性或压扭性断裂，并伴有大规模的中基性和中酸性岩浆喷发与侵入活动。

新生代以来，特别是新构造运动时期，构造应力场有较大的改变，导致深部地幔遭受挤压而引发软流圈物质上涌，并引起上隆地壳在向外拆离过程中发生引张裂陷，形成线状展布的裂陷盆地。随着开裂程度的加强以及深部地幔岩浆的喷发，汾渭地区逐渐形成了雁列式成串的一系列张性裂谷型断陷盆地，如大同裂谷、太原裂谷和临汾裂谷盆地。

阳原裂陷和蔚县裂陷则是大同地幔柱上涌形成的热断陷构造，是在晚更新世中 - 晚期拉张延展形成的断陷盆地，其个体断陷盆地展布方向为 NE 或 NEE 向，而整个汾渭裂谷串联面则明显的表现为 NNE 向展布。

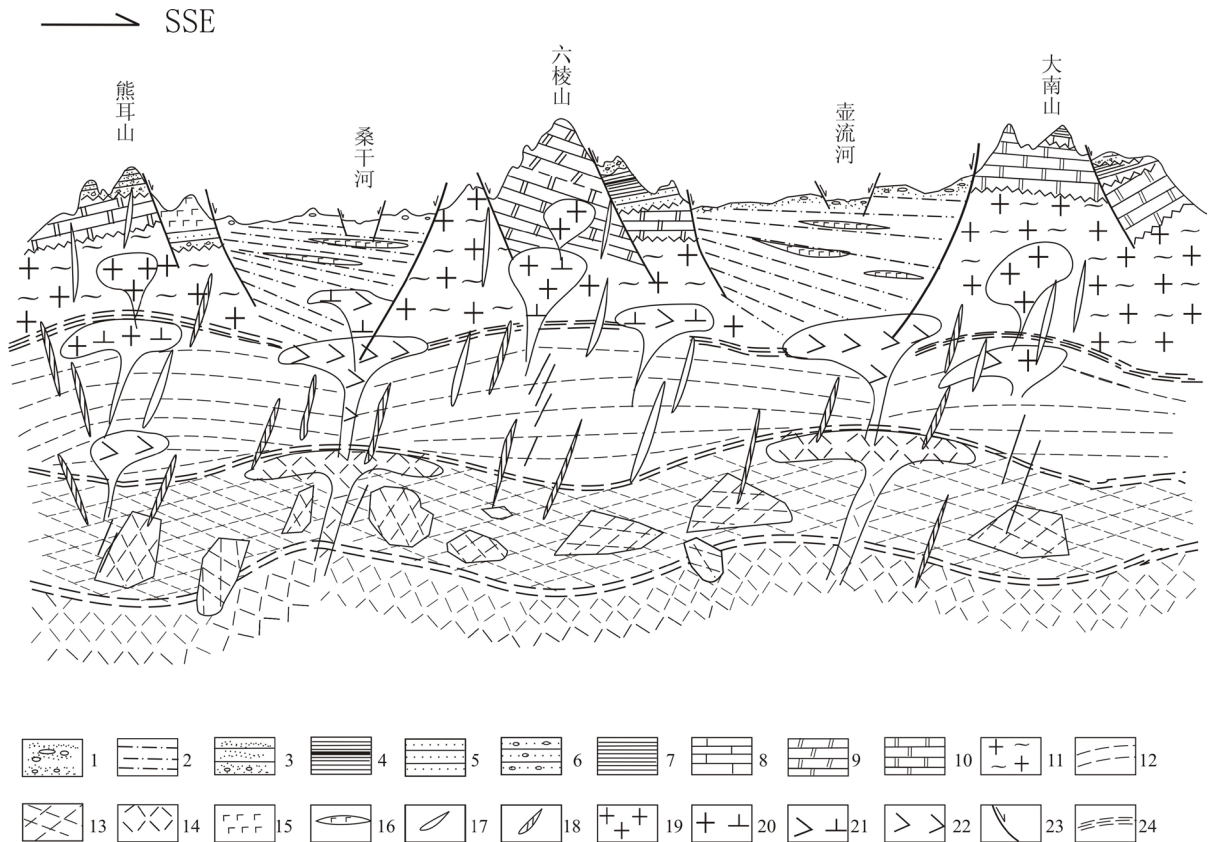
## 6.3. 幔 - 壳运动反映出的深部机制

地壳运动——由地球内营力引起地壳结构改变、地壳内部物质变形、变位的构造活动；而地幔变形一般呈塑性流变态，以缓慢的塑性流变特征表现出来，并会导致其上部地壳发生构造变形。地幔活动是浅部构造变形的的主导动力来源，地幔的构造变形影响并控制着地壳变形，即地壳变形是深部地幔活动在浅部的具体表现形式[21] [22] [26]-[30]。

中新代以来，阳原 - 蔚县地区盆岭构造的变形变位亦是该区深部地幔活动在地壳浅部的表现形式，是深部地幔活动在地壳浅部的表象。该区早期的构造变形主要受控于张宣幔枝构造，属于张宣幔枝构造南西缘上盘盖层拆离带的构造环境，南部阜平幔枝构造亦有向北挤压的远程效应，也即阳原 - 蔚县地区位于张宣幔枝构造和阜平幔枝构造之过渡地带，是一个相当活跃的构造变形区。

进入新生代，由于深部地幔上涌，在山西中部隆起的基础上形成了一系列 NEE 向裂陷盆地，其串联线呈 NNE 向展布；新生代晚期，随着汾 - 渭地区深部地幔的不断上涌，汾 - 渭地区早期形成的裂陷槽进一步发生热减薄裂陷，形成了大同、太原、临汾等规模较大的裂陷盆地；而随着深部地幔的持续上涌，汾渭地区的裂陷作用不断加强，上述裂陷盆地进一步裂陷扩展，断陷深度和宽度进一步扩大，部分裂陷带深达 5000 m 之上，并发生过多次玄武岩溢流或喷发。与此同时，在大型盆地展布带之间发育了若干小的断陷盆地，使早期的大同、太原、临汾等三大裂陷盆地连为一体，并逐渐发展演化成为了规模宏大的汾渭裂谷带。

以大同裂谷东段阳原盆地为例，其北侧熊耳山的南缘断裂下滑，且断距较大；阳原盆地南侧六棱山北缘山前铲状断裂，则断距更大。受南、北缘断裂控制，断陷盆地多形成较大的箕状断陷；而深部地幔下拗的部位，其上部则往往对应山脉的隆起，如阳原盆地南侧的六棱山隆起，该隆起以断块山的形式表现出来，其中部主体以早 - 中元古代高于庄组 - 雾迷山组白云岩、灰质白云岩为主，其上部则多被侏罗系红色砂页岩所不整合覆盖，而在其下(深)部断距较大的正断层下盘，往往可见到老于早元古代的变质岩系，这种特征亦表明了阳原 - 蔚县地区总体构造变形仍以断块掀斜隆升为主要特征(图 5)。



1.第四系；2.新近系；3.白垩系砂砾岩；4.侏罗系含煤地层；5.砂岩；6.砂、砾岩；7.寒武系页岩；8.灰岩；9.中上元界雾迷山组白云岩；10.高于庄组白云岩；11.基底变质岩系；12.中地壳；13.下地壳；14.地幔；15.基性岩类；16.沉玄武岩；17.中酸性脉岩；18.中基性脉岩；19.酸性侵入岩类；20.中酸性侵入岩类；21.中基性侵入岩类；22.基性侵入岩类；23.断层；24.韧性剪切带

**Figure 5.** The model map showing Meso-Cenozoic geological structure formation and evolution of the Yangyuan-Yuxian area in Hebei province

**图 5.** 阳原 - 蔚县地区中 - 新生代地质构造形成与演化模式图

正是由于地幔热柱的上涌与汾渭裂谷的裂解，在独具特色的泥河湾地区上演了区域性地壳规模的分化裂解 - 汾渭地区陆相盆地的形成 - 植物动物的快速繁盛 - 哺乳动物的兴盛与发展 - 泥河湾古亚洲人登台演戏 - 地壳抬升与断裂切割导致河湖干涸 - 新生代生物群演化告一段落。给地质学家留下了不尽的遐想和不断探索的研究课题。

## 7. 几点结论

中 - 新生代以来，阳原 - 蔚县地区不仅经历了强烈的幔壳运动，而且发现了大量古人类活动遗迹和化石，引起了地质学家的广泛关注和重视，成为了古生物、古人类及其古地质构造环境研究的重点地区。

1) 燕山运动以来，由于张宣地区构造的上隆，特别是新生代大同软流圈上涌柱的不均匀上涌，大同 - 阳原地区进入了以伸展构造为主的幔 - 壳运动时期，导致了阳原、蔚县等铲式断陷成盆，熊耳山、六棱山、大南山等山系则伸展上隆成山，形成了典型的裂谷型盆 - 山构造格局。

2) 火山喷发及岩浆侵入活动是裂谷盆地形成的重要特征之一，阳原县以北汉诺坝玄武岩的大规模喷发，标志着区域准平原化已经解体，特别是中更新世以来，大同盆地火山喷发仍相当强烈，裂谷断陷活动继续加强，盆 - 山构造演化加剧，盆地断陷与山脉隆升幅度加大。进入第四纪以来，阳原县以北山麓地带和候家窑一带火山喷发仍相当强烈，表明该区的幔 - 壳运动仍在持续。

3) 古生物繁衍 - 进化的历史多次表明, 生物演化往往在地壳运动相当激烈阶段繁衍兴盛, 而在地壳运动相对稳定的时期则往往消沉, 生物数量大量减少, 甚至进入生物大灭绝阶段。因此, 生物(包括古人类)的繁衍与兴盛, 亦往往与大地构造环境密切相关。

4) 地幔热柱上涌强烈阶段, 不仅孕育和造就了多样的地质构造环境, 还会使裂谷盆地积水成湖, 而湖泊和山地之间发育广阔的湖滨地带, 便更是适合各种植物 - 动物繁衍的生存环境, 同时, 也为古人类活动提供了必要的生存 - 生活环境和发展演化条件。

## 基金项目

本项研究工作得到河北省重点研究项目“东方人类探源工程—泥河湾人类起源、地质及环境背景研究(13277611D, 15276242D)”和“河北省海洋综合图集(2013006)”联合资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 夏正楷. 泥河湾盆地的水下黄土堆积及其古气候意义[J]. 地理学报, 1992, 47(1): 58-65.
- [2] 邢作云, 赵斌, 涂美义, 等. 汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 247-262.
- [3] 谢飞, 李琚, 刘连强. 泥河湾旧石器文化[M]. 石家庄: 花山文艺出版社, 2006: 1-278.
- [4] 朱日祥, 邓成龙, 潘永信. 泥河湾盆地磁性地层定年与早期人类演化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 922-944.
- [5] 袁宝印, 同号文, 温锐林, 等. 泥河湾古湖的形成机制及其与早期古人类生存环境的关系[J]. 地质力学学报, 2009, 15(1): 77-87.
- [6] 庞其清, 翟大有, 赵筑簾, 等. 泥河湾盆地晚新生代微体古生物地层及环境演化的探讨[J]. 地质学报, 2015, 89(5): 935-943.
- [7] 卫奇. 大同湖——雁北历史上的一个湖泊[M]//卫奇, 谢飞. 泥河湾研究论文选. 北京: 文物出版社, 1989: 537-541.
- [8] 闵隆瑞, 迟振卿, 等. 著. 河北阳原盆地西部第四纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [9] 邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 等. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 41-50.
- [10] 牛平山, 杨小荟, 李铎. 泥河湾保护区地貌特征与地质灾害[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(6): 107-111.
- [11] 李 蕾, 黄华芳, 王健, 许清海, 张聪聪. 泥河湾侯家窑遗址古河流及环境考古意义[J]. 沉积学报, 2016, 34(1): 111-119.
- [12] 刘讲锋, 徐义刚. 河北阳原新生代玄武岩中两类辉石岩包体的矿物学和地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(1): 52-62.
- [13] 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 朱日祥. 中国黄土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 193-209.
- [14] 邵济安, 牛树银, 张履桥, 等. 张宣热隆构造及其成因探讨[J]. 自然科学进展, 2005, 15(6): 684-691.
- [15] 牛树银, 孙爱群, 王宝德, 等. 张宣幔枝构造成矿与深部找矿潜力分析[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(4): 548-555.
- [16] 牛树银, 孙爱群, 马宝军, 等. 华北东部地幔热柱的特征与演化[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 931-942.
- [17] 邢集善, 杨巍然, 邢作云, 刘建华, 邵建设. 中国东部中生代软流圈上涌与构造 - 岩浆 - 矿集区[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 225-239.
- [18] 袁宝印, 朱日祥, 田文来, 等. 泥河湾组的时代, 地层划分和对比问题[J]. 中国科学: 地球科学, 1996, 26(1): 67-73.
- [19] 卫奇, 吴秀杰. 许家窑遗址地层时代讨论[J]. 地层学杂志, 2011, 35(2): 193-199.
- [20] 安慧婷, 许立青, 李三忠, 等. 太行山东麓断裂带中, 新生代构造应力场及转换机制[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(04): 571-586.
- [21] Divis, G.A., Wang, C., Zheng, Y.-D., *et al.* (1998) The Enigmatic Yanshan Fold and Thrust Belt of Northern China: New Views on Its Intraplate Contractional Stgels. *Geology*, **26**, 43-46.
- [22] 牛树银, 孙爱群, 王孟科, 等. 渤海的形成及其深部动力学机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(6): 21-29.

- [23] 闵隆瑞, 迟振卿, 朱关祥. 河北阳原盆地南缘第四纪晚期活动断裂的确定及其意义——纪念黄汲清教授诞辰 100 周年[J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 409-412.
- [24] 邢作云, 邢集善, 赵斌, 等. 华北地区两个世代深部构造的识别及其意义——燕山运动及深部过程[J]. 地质论评, 2006, 52(4):433-442.
- [25] 邢集善, 刘建华, 赵晋泉. 华北板内深部构造[J]. 山西地震, 2002(4): 3-12.
- [26] 张文朋, 申旭辉, 曹忠权, 陈立泽. 桑干河阳原——涿鹿段地貌演化[J]. 地震, 2011, 30(4): 208-217.
- [27] Fukao, Y., Maruyama, S. and Inoue, H. (1994) Geologic Implication of the Whole Mantle P-Wave Tomography. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **100**, 4-23. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.4>
- [28] Maruyama, S. (1994) Plume Tectonics. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **100**, 24-49. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.24>
- [29] 滕吉文, 张中杰, 张秉铭, 等. 渤海地球物理场与深部潜在地幔热柱的异常构造背景[J]. 地球物理学报, 1997, 40(4): 468-480.
- [30] Sun, J. (2005) Long-Term Fluvial Archives in the Fen Wei Graben, Central China, and Their Bearing on the Tectonic History of the India-Asia Collision System during the Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, **24**, 1279-1286. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.08.018>

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)