

# 中国北方半干旱区第四纪晚期构造活动性

朱 照 宇

(中国科学院广州地球化学研究所)

**摘 要** 近 20 万年以来,中国北方半干旱区的构造活动性是非常明显的。在这一地区发现了许多第四纪晚期的活动构造,例如,正断层、逆断层、走滑断层、褶皱、拗陷、隆起、古地震构造、火山构造、构造地貌等。在构造地块中部,垂直运动的最大幅度大约是 88—132m,其平均运动速率约 0.44—0.66mm/a;而在地块周边的活动构造带,则最大垂直运动幅度为 210—343m,平均运动速率为 1.05—1.77mm/a。构造运动的强度和速率是不断增大的。主压应力表现为 NE-SW 和近 EW 方向。自 200kaBP 以来,构造活动可以划分为 6 个阶段,其年龄分别为 200—100—70—50—30—10—7—0.7 和 0.3kaBP。其中 100—70kaBP 和 50—30kaBP 的两次运动是第四纪晚期最强烈的两次运动。中国北方半干旱区的构造演化是与青藏高原的阶段性隆升密切相关的。构造活化是中国北方干旱—半干旱区形成演化的重要控制因素之一。

**关键词** 第四纪晚期 构造活动 半干旱区

内动力地质作用和外动力地质作用在每一个地区(尤其是那些具有重要气候意义的地区)的环境演化过程中都起着十分重要的作用。当人们讨论有关东亚大陆气候变化的问题时,一般都不可避免地要考虑到青藏高原的隆起问题,而这一问题恰恰就是一个构造运动问题,也就是一个内地质动力作用的问题。因此,在讨论中国北方干旱—半干旱区的形成发展和环境演化问题时,我们不仅要考虑古气候变化问题,而且要考虑构造活动性问题。最近的 20 万年在地质历史上虽然是短暂的一瞬间,但事实上,仍有大量的活动构造形迹出现在这一地区,例如在青海、宁夏、内蒙古、甘肃、陕西和山西等地。考察资料说明,新构造和古气候之间有着密切的联系,同样,青藏高原与干旱—半干旱区的环境事件之间也存在着密切的联系。

## 1 构造活动性的记录

### 1.1 构造地貌和水系异常

经历了第四纪时期多阶段构造活动(分别发生于 2500—2400, 1670—1450, 900—700 和 500—400kaBP)的塑造,中国北方发育了多级层状构造地貌,包括上新世夷平面、早更新世剥蚀面、第六级和第五级阶地( $T_6$  和  $T_5$ )等。近 20 万年以来,强烈的河流下切发生在 100—70kaBP,导致了第四级阶地( $T_4$ )的形成。此后,第三级阶地(年龄为 70—7kaBP)、第二级阶地

注:国家自然科学基金和中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室基金资助项目

(年龄为 7-0.7kaBP)和第一级阶地(年龄为 0.7-0.3kaBP)相继形成了。中国北方河流的阶地具有相同的古土壤和发育阶段特征,而不论其是主流还是支流,不论是在河口还是在河源,也不论这些河流流经什么样的地貌区<sup>[1,2]</sup>。大多数河流的纵剖面呈上凸型,而且从河口到河源并不呈收敛状;同时,阶地的相对高度随构造带的变化而变化。因此,构造运动是控制本区河流阶地形成的主导因素

在第四纪晚期发生了一系列水系变迁事件。洛河、渭河以及泾河的深切曲流在此时形成了,其弯度指数从小于 1.5 到大于 2.5;而第四级阶地则演变为曲流颈。这意味着这一事件发生在大约 100-70kaBP,也就是第四级阶地的被下切阶段。白于山周边及其北部地区在大约 170kaBP 发生首次沉降并形成湖盆。此后,湖盆逐渐收缩继而河流形成,即无定河向西南突然拐弯而且袭夺了红柳河。这一事件发生在 100-10kaBP 前,即第三级阶地发育期间,并一直延续到 2kaBP。白于山分水岭向西北迁移 10km 的事件发生于 58.6kaBP,而在此地的原第四级阶地面演变成风口地形。相同的河流袭夺事件被记录在太原市以北的汾河和滹沱河交界之处。在彬县到壶口镇的 NEE 方向的地带,发育了一系列河床和阶地的裂点,其中包括 T<sub>4</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>1</sub>, 年龄约为 470-100、100-77-0.7 和 0.7-0.3kaBP,其表现为一系列的线状分布的河流坡降异常带,这是由渭河北山构造带的多阶段活动所控制的

## 1.2 活动地质构造

在不同的地貌单元和不同时期形成的地层中发现了许多活动构造形迹,其主要特征见表 1。活动构造的类型主要包括正断层、逆断层、走滑断层、张断层、褶皱、隆起和拗陷等。活动构造的总体特征如下:

表 1 中国北方半干旱区若干活动构造特征表

Table 1 Characteristics of some active structures in semi-arid area of north China since the last 0.2Ma

构造剖面位置	构造类型	运动学与动力学性质	产状(倾向/倾角)	影响层位	活动年代(kaBP)
青海龙羊峡	断层	张剪性	NW-SW 走向	T <sub>4</sub>	200-70
山西大同	断层	正平移	130/60	T <sub>4</sub> , 玄武岩	200-100
陕西吴忠	单斜	隆升, 倾斜	50/35	T <sub>4</sub>	200-70
内蒙萨拉乌苏	拗陷	沉降, 深 100m	NEE 走向	Q <sub>2</sub> -Q <sub>4</sub>	170-2
陕西洛川	共轭断层	走向滑动	70/75, 275/70	N <sub>2</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>1</sub>	100-70
陕西蒲城	断层	张剪性	160/70	T <sub>4</sub>	100-70
甘肃天水	断层	正	360/48	T <sub>4</sub>	100-70
陕西蔡家坡	褶皱	宽缓	325 轴向	T <sub>4</sub>	100-70
山东蓬莱	断层	正走向滑动	290/60	T <sub>4</sub> , S <sub>1</sub>	100-70
陕西白于山中轴	褶皱, 节理	宽缓, 剪性	45 轴向	S <sub>1</sub> -L <sub>5</sub>	100-70
陕西白于山北侧	隆起	压性, 分水岭迁移	EW 走向	T <sub>3</sub>	50-30
青海倒淌河	隆起	压性, 水系变迁	NW 走向	T <sub>3</sub>	50-30
甘肃子午岭中部	断层, 古地震	张剪性	320 走向	T <sub>3</sub> , L <sub>1</sub>	40
青海青海湖	断层	正	120/70	T <sub>3</sub> , L <sub>1</sub>	20-15
青海青海湖	断层	张性	120/70	T <sub>3</sub> , T <sub>2</sub>	7-1
陕西延安	断层	正	250/68	T <sub>3</sub> , S <sub>0</sub>	7
陕西甘泉	断层	逆	350/50	T <sub>3</sub>	7
甘肃兰州	断层	左旋剪切	210/65	T <sub>3</sub> , L <sub>1</sub>	7
甘肃兰州	断层	张性	100 走向	T <sub>3</sub> , L <sub>1</sub>	7
甘肃兰州	断层	剪切	NW, NE 走向	T <sub>2</sub>	0.7
内蒙阿拉善北部	断层	左旋剪切	65 走向	Q <sub>4</sub>	0.7
宁夏贺兰山东部	断层	右旋张剪性	105/55	Q <sub>3</sub>	0.7-0.3
陕西洛川	共轭断层	压剪性	75/50, 285/70	T <sub>2</sub>	0.7-0.3

1. 时间分布: 在过去的 20 万年以来存在着几个构造活动阶段, 其年代分别为约 200 100- 70 50- 30 7 0. 7 和 0. 3kaBP

2. 空间分布: 在青海的东部和甘肃的西部发育了一系列 NW-NNW 方向的左旋走滑逆- 平移 (或正- 平移) 断层, 以及短轴褶皱和拗陷。在阿拉善和鄂尔多斯地区发育了 NWW 方向的左旋和右旋走滑断层。在黄土高原中部发现了 NW-NNW 方向的左旋压剪性断层以及近 E-W 向的隆起和拗陷。在山西高原和华北平原, 主要的构造线是 NNE 向, 由右旋的张剪性断层和断陷盆地组成。沿银川、河套和汾渭盆地边缘的构造活动表现为强烈的张剪性断层、断陷及少量压剪性断层的发育。

### 1.3 火山与地震构造

已有资料表明, 中国北方半干旱区的火山活动主要发生于 210kaBP (在大同)、98kaBP (在大同) 和 10kaBP (在沧州) 等时期<sup>[3-5]</sup>。在大同地区, 可见保存较完整的火山地貌, 地层中的火山岩夹层和后期的断裂错动<sup>[6]</sup>, 等等

在子午岭中部的间水坡岭, 可见一些古地震构造。沿着若干走向 320° 的小断层断续分布着由古地震造成的喷砂沙丘, 其高度约 0. 5- 2. 5m, 并又被马兰黄土 (TL 年龄为 41. 9kaBP) 所覆盖。与唐山地震的喷砂沙丘相对, 我们认为, 当时的古地震震级大约为 6- 7 级。在洛川县石泉地区, 一组共轭型的压剪性断层切错了第一级阶地, 该阶地含有南宋时期 (公元 1127- 1279 年) 的古陶瓷器。因此, 该断层应形成于 0. 7- 0. 3kaBP, 而且这些古地震断层很可能是历史地震, 即公元 1599 年黄陵地震或公元 1681 年洛川地震所造成的。根据李博 (1982) 资料, 中国北方强震活动表现为 750 年和 300 年的周期性<sup>[7]</sup>, 这恰恰与第二级和第一级阶地形成初期的年代相对应。在这一时期, 产生了大量的滑坡和剪切断层

## 2 构造运动特征

### 2.1 构造活动的阶段性

根据沉积旋回、构造地貌、水系演化、火山和地质构造活动性, 我们将中国北方半干旱区自 200kaBP 以来的构造活动划分为如下几个阶段:

- 第一阶段, 发生于 210- 170kaBP, 与古土壤 S<sub>1</sub> 晚期和黄土 L<sub>2</sub> 早期相对应;
- 第二阶段, 发生于 100- 70kaBP, 与第三阶段阶地初期和黄土 L<sub>1</sub> 早期相对应;
- 第三阶段, 发生于 50- 30kaBP, 与黄土 L<sub>1</sub> 下段/古土壤 S<sub>0</sub> 底部界限相对应;
- 第四阶段, 发生于 10- 7kaBP, 与古土壤 S<sub>0</sub> 发育期和第二级阶地初期相对应;
- 第五阶段, 发生于 0. 7kaBP, 与第一级阶地初期相对应;
- 第六阶段, 发生于 0. 3kaBP, 与第一级阶地切割期相对应

上述第二和第三阶段的活动曾被作者称为“白于山运动”或“新构造运动第三幕 (C 幕)”<sup>[8]</sup>, 它们是中国大陆第四纪时期最重要的构造运动之一。

### 2.2 构造运动的幅度与速率

本文构造活动幅度计算的基本原则是: 相对垂直变形幅度的确定是使用了阶地顶面和不同时期的相同的与阶地相关的沉积物顶面作为基准面。据我们实地考察, 现代洪水位平均高度大约为 3- 5m。据此, 垂直构造运动幅度 (A) 即等于各阶地下切幅度 (B) 减去洪水位平均高 (C) 与该阶地二元结构数目 (D) 的乘积, 即

$$A = B - C * D$$

表 2和图 1表示了不同地块和活动带在不同构造活动阶段的垂直运动的幅度和速率  
 由表 2数据可见,在地块中部最大的运动幅度为 88- 132m,平均运动幅度为 0. 44-

表 2 中国北方半干旱区新构造垂直运动幅度 ( $A, m$ )和速率 ( $R, mm/a$ )

Table 2 Vertical amplitudes ( $A, m$ ) and rates ( $R, mm/a$ ) of the neotectonic movements in semi-arid area of north China since the last 0. 2Ma

阶段( $\times 10^3 a$ )	200- 100		100- 10		10- 0. 7		0. 7- 0		现代
区域 \幅度 $A$ 与速率 $R$	$A$	$R$	$A$	$R$	$A$	$R$	$A$	$R$	$R$
阿拉善地块边缘	21	0. 21	77	0. 86	27	2. 90	2	2. 86	--
陇西地块内部	30	0. 30	66	0. 73	32	3. 44	4	5. 71	15. 0
鄂尔多斯地块边缘	24	0. 24	50	0. 56	22	2. 37	2	2. 86	5. 0
黄土高原北部	19	0. 19	41	0. 46	22	2. 37	6	8. 54	7. 5
黄土高原中部	19	0. 19	42	0. 47	27	2. 90	9	12. 9	8. 0
山西地块内部	24	0. 24	60	0. 67	20	2. 15	11	15. 7	6. 0
华北平原	28	0. 28	77	0. 86	32	3. 44	19	27. 1	23. 0
银川- 贺兰山之间	97	0. 97	160	1. 76	74	7. 96	10	14. 3	15. 0
河套- 大青山之间	50	0. 50	86	0. 96	42	4. 52	32	45. 7	--
渭河- 秦岭之间	53	0. 53	107	1. 91	64	6. 88	45	64. 3	8. 0
汾河- 吕梁山之间	69	0. 69	126	1. 40	70	7. 53	35	50. 6	16. 0
华北平原- 太行山之间	72	0. 72	183	2. 03	58	6. 13	30	42. 9	38. 5

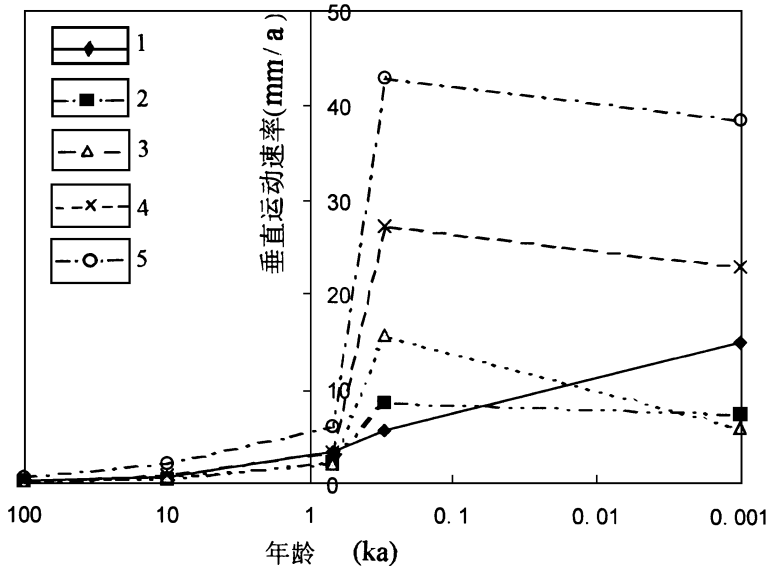


图 1 中国北方半干旱区若干地段自 200kaBP 以来新构造垂直运动速率 ( $mm/a$ )

Fig. 1 Vertical rates ( $mm/a$ ) of the neotectonic movements in semi-arid area of north China since the last 200ka

1. 陇西地块内部; 2. 黄土高原北部; 3. 山西地块内部; 4. 华北平原; 5. 华北平原- 太行山之间

0.66mm/a;而在山脉与盆地之间的活动带,其最大运动幅度则为210-343m,平均运动速率为1.05-1.72mm/a;即活动带是地块的2.39-2.60倍。

从图1可见,从200kaBP到0.3kaBP之间,构造活动的强度和运动速率是逐渐加大的,而在0.3kaBP之后则有所减弱。

根据剪切断层的运动方向,我们确定了地块的水平运动方向及位移幅度和速率。自上新世以来,阿拉善地块在NE方向上左旋错动30km,在SE方向上右旋错动21km,平均位移速率为8.75-12.5mm/a;陇西地块在NW方向上左旋错动5-13km,速率为2.08-5.42mm/a;甘陕地块中部在SN方向上错动14km,速率为5.83mm/a;山西地堑系南移18km,速率为7.5mm/a。自1450kaBP以来,鄂尔多斯地块和华北平原地块向东南或南移2.5km和4.0km,速率为1.72mm/a和2.76mm/a。据李祥根等(1983)资料,渭河谷地自上新世以来左旋速率约4.5mm/a<sup>[9]</sup>。

在第四纪时期的黄河中游地区,在汾河和银川断陷这一EW方向上的总伸展量为2917m,其伸展率为2.6%,伸展速率为1.21mm/a。在SN方向上,河套和渭河盆地总伸展量为5720m,伸展率为3.2%,伸展速率为2.38mm/a。在EW方向上的平均压缩率为6‰(太行山-子午岭-六盘山和若干隆起带一线);而SN方向上仅为3‰(秦岭-白于山-阴山)。

上述数据说明,中国北方半干旱区的地壳水平运动大于垂直运动数倍;在SN方向上的伸展率大于EW方向上的伸展率,而压缩率则正好相反。

### 2.3 构造应力场

根据笔者调查的数据(其中包括在第一至第四阶地沉积物和L<sub>2</sub>-L<sub>1</sub>黄土中的共轭剪切节理、在晚第四纪的未固结构造岩中的线理和面理以及断层、褶皱、隆起和拗陷的动力学和运动学特征等),确定了在中国北方的构造应力场中的主压应力总体为NE-SW至近E-W向,其中,在华北平原、山西高原、陇西高原和汾渭盆地为50°-85°,而在黄土高原中部则为5°-30°和110°。

## 3 中国北方半干旱区环境演化中的构造因素的初步讨论

在讨论中国北方半干旱区环境演化的控制因素的问题时,上述资料给我们很大的启发。

我们过去曾提出,在中国北方干旱-半干旱气候区的形成演化过程中的最重要的动力作用之一就是:被新构造运动所控制的青藏高原-黄土高原-秦岭山脉的阶段性隆起,尤其是在2500-2400、1670-1450、900-700和100-10kaBP等几个时期的隆起活动<sup>[6]</sup>。新的资料进一步证实了早些时提出的观点。例如,近年来,我们在青藏高原边缘发现了与黄土高原相似的六级阶地和五级湖积阶地,这五级湖积阶地的年龄大约是80、40、15、10和7kaBP。更有意思的是,青藏高原西北部的甜水海湖盆边缘发育了距今15ka以来的数十道湖滨砂砾堤,反映了一种大约0.3ka的周期性,这与青藏高原周边地区——例如黄土高原和云贵高原等<sup>[6]</sup>,具有极大的相似性。

新构造活动的阶段性与河流、湖泊及黄土-古土壤演化阶段的对比表现出它们之间具有年代和发育阶段的相似性。但这并不意味着气候变化仅仅是由于构造运动所引起的,而是说它们经常共同受控于地球的一种统一的星体运动,正如我们过去所阐述的那样<sup>[10]</sup>。事实上,在过去的200ka以来,尽管这是一个很短暂的地质历史时期,但青藏高原、黄土高原及其周边山脉仍然发生了强烈的阶段性隆升和位移,改变了地球表面的形态、高度和高差。这种下垫面的变化

就是气候变化的四大控制因素之一。由于这一变化,使得大气环流的格局发生了较大变化,进一步影响了中国北方半干旱区的气候和沉积作用,使之产生新的变化。因此,构造活化是这一地区形成、演化和环境恶化的主导驱动因子之一。水系变迁、河流袭夺、湖泊咸化和消亡、沙漠扩展、植被减少、侵蚀加剧和土壤退化等,均与构造活动有关。

综上所述,青藏高原与中国北方干旱、半干旱区之间以及气候变化与构造运动之间存在着紧密关联,我们曾将其称为“气候-构造耦合系统”<sup>[11]</sup>。诚然,对于在环境演化中构造运动的作用问题仍然有许多方面是值得思考的。尽管如此,我们相信,进一步的深入研究将有助于这一环境演化动力学理论的发展。

在野外工作和论文撰写过程中得到刘东生、丁国瑜、袁宝印、安芷生、丁仲礼和汉景泰等先生的指教和帮助,在此一并致谢!

## 参 考 文 献

- 1 朱照宇,黄河中游河流阶地的形成与水系演化. 地理学报, 1989, 44(4): 441- 452
- 2 Zhu Z Y, The sequence of hydrogenic sediments-paleosols in the Loess Plateau and its adjacent regions of China. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(19): 1629- 1633.
- 3 李虎候,黄土的热释光年代. 地球化学, 1982, (1), 82- 84
- 4 刘椿. 大同火山岩中布莱克事件的讨论. 中国科学院地质研究所地质科研成果选集(一),北京:文物出版社, 1982, 179- 181
- 5 国家地震局地质研究所,河北平原及其周围地区新构造图及其说明书(1: 400万). 北京:地图出版社, 1985, 1- 20
- 6 朱照宇、丁仲礼,中国黄土高原第四纪古气候与新构造演化. 北京:地质出版社, 1994, 1- 226
- 7 李博,渭河盆地地震活动的一些特点. 西北地震学报, 1982, 4(4), 51- 56
- 8 Zhu Z Y, The neotectonic evolution of the Loess Plateau and its adjacent regions of China. in Liu T S(ed.), Loess, Environment and Global Change. Beijing: Science Press, 1991, 260- 278.
- 9 李祥银、冉永康,华山东坡渭南塬前活动断裂. 华北地震科学, 1983, 1(1), 10- 18
- 10 朱照宇,水系沉积物-古土壤系列与气候-构造旋回. 刘东生主编,黄土·第四纪地质·全球变化(一),北京:科学出版社, 1990, 62- 70
- 11 Zhu Z Y, A coupled climatic-tectonic system-the Tibetan Plateau and the East Asian Continent. in Nina G J(ed.), The Changing Face of East Asia During the Tertiary and Quaternary. Hong Kong: University of Hong Kong, 1997, 303- 312.

# TECTONIC ACTIVITY IN SEMI-ARID AREA OF NORTH CHINA DURING LATE QUATERNARY

Zhu Zhaoyu

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences)

**Abstract** The last 0.2 Ma has witnessed very obvious tectonic activity in the semi-arid area of North China. There are many active structures dated as of late Quaternary age in the area, such as normal fault, reverse fault, strike-slip fault, fold, sag, uplift, tectonic landform, tectonic terrace, fossil earthquakes and volcanic structures. The maximum amplitude of the vertical movement is about 88–132m with an average rate of 0.44–0.66 mm/a in the centre of tectonic blocks, and in the active tectonic zone around these blocks the maximum amplitude is about 210–343m with an average rate of 1.05–1.72mm/a, the intensity and rate of the movement continually increasing. The principal compressive stress trends NE–SW and E–W. The tectonic activity in the last 0.2 Ma may be divided into 6 stages with ages of about 200, 100–70, 50–30, 10–7, 0.7 and 0.3 kaBP, respectively. The most intensive tectonic movement in the late Quaternary fell in the periods of 100–70 and 50–30kaBP. The tectonic reactivation in the semi-arid area of North China is correlative with the uplift of the Tibetan Plateau, serving as one of the controlling factors in the formation and evolution of the arid and semi-arid areas of North China.

**Key words** Late Quaternary, tectonic activity, semi-arid areas

## 作者简介

朱照宇,男,1950年生,研究员。1983年毕业于武汉地质学院北京研究生部,获硕士学位,1988年毕业于中国科学院地质研究所,获博士学位,主要从事第四纪地质与地球化学、资源环境与可持续发展研究。通讯地址:广州市五山 1131信箱,中国科学院广州地球化学研究所。邮政编码:510640