

# 青藏高原隆升的黄土高原构造侵蚀效应

马润勇, 彭建兵, 袁志东, 邸海燕

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 研究了青藏高原隆升与亚洲大陆强季风气候的耦合效应、黄土高原的阶段性抬升、构造变形及其构造侵蚀效应。结果表明, 青藏高原的隆升引起多种黄土地质灾害。黄土高原的构造抬升导致侵蚀基准面下降, 为重力侵蚀、沟谷溯源侵蚀和流水侵蚀提供了有利条件; 构造变形使黄土产生构造裂隙、节理, 增大了黄土的侵蚀速率, 促进了黄土的坍塌和滑坡等侵蚀性地质灾害的发生; 地形突变带、活动断裂带及地震活动带等稳定性条件差的黄土分布区, 是黄土侵蚀性地质灾害最剧烈的地区。

**关键词:** 青藏高原; 隆升; 黄土高原; 地质灾害; 构造侵蚀

**中图分类号:** P542; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 6561(2007)03 0289 05

## Geological Hazard Effect in Loess Plateau due to Qinghai Tibet Plateau Uplift

MA Run yong, PENG Jian bing, YUAN Zhi dong, DI Hai yan

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The coupling among the Qinghai Tibet plateau uplift and strong monsoon effect in East Asia, structure deformation and staggered uplift of the loess plateau and its tectonic erosion is studied. The results indicate that Qinghai Tibet plateau uplift have arose multi geological hazards, and the uplift of loess plateau have induced gravitative, trace to the source and water flow erosion. The structural deformation has resulted in structural crevices and joints in loess, increased the erosional rate of the loess, and accelerated the collapse and landslide of the loess. Soil erosion is the most intense in large tectonic deformation zones, active fault zones and seismic zones.

**Key words:** Qinghai Tibet plateau; uplift; loess plateau; geological hazard; tectonic erosion

## 0 引言

青藏高原的隆升强烈影响到亚洲大陆乃至全球的气候环境<sup>[1,2]</sup>, 其中, 22 Ma BP 改变了东亚地行行星风系并出现季风效应; 8.5 Ma BP 东亚季风效应增强, 干旱化程度加剧, 黄土高原风尘堆积开始; 3.6 Ma BP 起对全球气候变化的驱动与放大作用增强; 1.2 Ma BP 以来, 亚洲现代冬夏季风气候效应逐级增强。青藏高原的强烈隆升使高原内部及其周缘区的活动构造发育、地震活动强烈, 滑坡

以及泥石流等地质灾害频发<sup>[3,4]</sup>; 隆升还导致其北部区域干冷的冬季风气候盛行与亚洲内陆的干旱化及戈壁沙漠扩展<sup>[5]</sup>; 鄂尔多斯地块因其与青藏高原间特殊的地理位置关系、块体间构造变形格局关系, 在亚洲大陆强季风气候效应的耦合下, 导致了黄土高原的形成、后期的构造变形与各类灾害效应的产生。笔者以构造侵蚀为例, 对青藏高原隆升引起的黄土高原地质灾害问题作简要探讨, 以利于加深对现代黄土高原地质环境的认识和地质灾害的防治。

收稿日期: 2006 10 08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40534021); 国家西部交通建设重点科技项目(200431881212)

作者简介: 马润勇(1961), 男, 陕西子洲人, 副教授, 博士, 从事地质灾害、工程地质教学与研究, E-mail: dedgx31@31@chd.edu.cn

## 1 青藏高原隆升基本过程

研究表明, 青藏高原隆升具有持续性和阶段性加速的特征, 并具有自南而北的递进式隆升特点<sup>[6]</sup>。笔者从研究青藏高原构造变形特征与应用角度出发, 在总结前人研究成果基础上将高原隆升划分为 4 大构造运动阶段<sup>[4, 7]</sup>。

### 1.1 喜马拉雅运动阶段

受印度板块碰撞, 青藏高原开始自南而北的递进式挤压隆升, 到上新世初, 隆升效应波及到北部祁连山地区。45 Ma BP 前后青藏高原开始缩短和其第 1 次抬升, 碰撞边缘喜马拉雅山脉开始形成; 35 Ma BP 前后冈底斯山脉开始形成; 21 Ma BP 左右念青唐古拉山脉开始隆升; 13 Ma BP 前后唐古拉山和昆仑山脉先后形成; 8.5 Ma BP 前后, 隆升效应继续向北扩展, 形成包括祁连山地区在内的青藏高原新构造板块, 并使鄂尔多斯盆地抬升。

### 1.2 青藏运动阶段

3.5 Ma BP 前后, 使鄂尔多斯地块发生构造形变与抬升; 2.5 Ma BP 前后, 青藏高原内湖泊在隆升中相继萎缩和消亡; 1.6 Ma BP 前后, 青藏高原进入周缘造山造貌主阶段, 且伴随临夏东山古湖被切穿和消失, 黄河随之诞生<sup>[8]</sup>。

### 1.3 昆黄运动阶段

1.2~1.1 Ma BP 左右, 随着山体的大幅度隆升, 高原古湖泊逐步消亡或向北移位; 0.8 Ma BP 前后, 黄土高原又进入新一轮抬升期; 0.6 Ma BP 前后, 高原面抬升至 3.0~3.5 km, 高原现代地貌格局基本形成。

### 1.4 共和运动阶段

共和运动使青藏高原隆升到平均海拔约 4000 m 的现代高度。0.15 Ma BP 前后, 高原急剧隆升并接近或达到现代高度, 黄河现代水系格局形成; 0.05 Ma BP 前后, 高原以小幅度隆升; 0.01 Ma BP 以来高原隆升再次加速。

## 2 气候响应

青藏高原的隆升使高原自身及其亚洲地区乃至全球范围的气候特征发生巨大变化, 隆升对气候环境的影响主要表现在 4 个方面。

### 2.1 对东亚地面行星风系的影响与季风效应启动

27 Ma BP 前后, 因喜马拉雅山脉和冈底斯山脉的形成, 以夏季风为主的亚洲季风初现, 并在 22

Ma BP 左右改变了东亚地面原先的行星风系<sup>[9]</sup>。受高原南部隆起山脉的影响, 中国西部内陆区域干旱化出现, 并启动亚洲季风效应。13 Ma BP 前后, 亚洲内陆源区风尘和冬季风搬运物质量增大<sup>[10]</sup>。

### 2.2 对东亚季风效应的增强及干旱化程度的加剧

8.5 Ma BP 起, 印度季风和东亚季风效应增强, 亚洲干旱化程度加剧、干旱区域扩大, 中国风尘堆积开始<sup>[11]</sup>。受高原隆升的远程效应, 秦岭造山带升幅加速, 并构成南北方气候环境的屏障, 进一步加强了青藏高原对鄂尔多斯盆地的气候环境效应, 并在青藏运动开始时形成黄土高原风尘堆积雏形。

### 2.3 对全球气候变化的放大与驱动作用

3.6 Ma BP 起, 青藏高原对其周边乃至全球的气候环境效应更为强烈, 甚至具有驱动力与放大器的效用<sup>[2]</sup>。3.6 Ma BP 前后亚洲内部冬夏季风效应增强, 亚洲内陆荒漠、戈壁化范围扩展加速, 黄土高原风尘沉积速率加快; 2.6 Ma BP 起, 青藏高原自身干旱化增强, 并成为全球气候变冷、北半球大冰期发生和东亚季风发展的驱动源; 1.7 Ma BP 起, 高原隆升的远程效应促进了秦岭山脉的强烈隆升, 使其对南北方气候环境的差异屏障作用更为显著。

### 2.4 对亚洲现代季风效应的增强

1.2 Ma BP 以来, 西北地区干旱化及主要沙漠的进一步扩张, 使青藏高原周边地区新的黄土体系形成; 0.8 Ma BP 以来, 气候变化主导周期进一步缩短, 且青藏高原的更高海拔与冬季风大面积积雪使蒙古高压、青藏冷高压获得大发展, 东亚冬夏季风强度迅速增强。黄土-古土壤序列古气候记录出现周期性的转型事件, 是对高原阶段性加速抬升的直接响应。

末次冰期以来, 由于青藏高原的屏障作用, 加剧了中国西北地区的冬季风与干旱效应。夏季(或温暖的间冰期), 青藏高原热源效用, 强化了中国东南部区域的夏季风环流, 另一方面因其巨大的屏障作用, 阻挡了西南季风的北上, 使青藏高原及其北部广大地区常年干旱少雨。受青藏高原现代地貌格局影响, 全新世以来中国西部气候的干湿交替呈逐级波动增强趋势<sup>[12]</sup>。

## 3 黄土高原地质环境演化过程

青藏高原的隆升对黄土高原的形成与地质环境演化过程具有重要控制作用, 尤其是第四纪以来对鄂尔多斯地块的推挤作用, 使黄土高原发生了明

显的构造变形效应。如黄土高原新构造应力场的主压应力方向为北北东向,为青藏高原板块推挤所引起<sup>[13]</sup>;与六盘山构造带近于平行的子午岭断隆带、洛河活动断裂<sup>[14]</sup>,黄土高原中部的定边—绥德东西向活动断裂带<sup>[15]</sup>,均反映了青藏高原隆升过程中的推挤应力场向黄土高原内部的辐射与扩展效应;黄河、渭河、洛河等河流阶地的发育反映了青藏高原隆升导致的黄土高原面的抬升与基准侵蚀面的下降<sup>[16-18]</sup>。

以六盘山为界,可将黄土高原分为东西两部分。六盘山以西属青藏高原板块的祁连山褶皱带,以东部分是鄂尔多斯台向斜。早期的陕北、陇东、鄂尔多斯台向斜在中生代发展成为一个大型的内陆盆地,向西一直延伸到现今的六盘山脉以西的祁连山脉东南段。古鄂尔多斯盆地晚三叠—中侏罗世相对稳定,并曾接受大范围沉积。晚侏罗世,盆地西部发生较大规模的逆冲,东部抬升持续扩大,导致盆地沉积发生较大范围的收缩,并出现鄂尔多斯盆地的西倾单斜结构。其后的早白垩纪地壳活动相对稳定期内,再次接受沉积。古新世初发生的燕山运动,使盆地西部再次被冲断并出现六盘山、贺兰山脉雏形,东部出现吕梁山隆起。燕山运动使鄂尔多斯台向斜抬升的同时,边缘发生断陷和山脉的差异隆升,形成汾渭谷地、银川谷地等一系列地堑谷地和边缘的六盘山、贺兰山、吕梁山、阴山、渭河北岸山地及秦岭山脉,到中新世末,鄂尔多斯台地向斜成为准平原。中新世晚期起,伴随青藏高原的阶段性隆升过程与气候环境效应,黄土高原区形成了巨厚的风尘红土、黄土—古土壤堆积;第四纪以来,受青藏高原对鄂尔多斯盆地的北东向推挤作用,黄土高原内不同区域发生了不同程度的抬升与构造变形。

8.5 Ma BP 前后,伴随青藏高原的隆升、亚洲大陆干旱化、沙漠化与季风气候效应的出现,鄂尔多斯高原长城以南的准平原面区域以及六盘山以西的断陷盆地内开始广泛堆积红土风尘。上新世晚期起,受青藏高原东北缘的推挤和华北地块运动的联合作用,出现鄂尔多斯高原边缘地堑谷地的进一步扩展与高原块体的掀斜运动,伴随亚洲干旱化与季风效应的持续增强、沙漠化的扩展,黄土高原风尘堆积物转为黄土—古土壤交互沉积序列。

## 4 黄土高原后期构造侵蚀灾害效应

黄土高原后期的持续构造变形与抬升过程中,

伴随气候耦合作用,引发了强烈的构造侵蚀、滑坡、崩塌、黄土洞穴、泥石流、地面沉(陷)降与地裂缝等多种地质灾害,尤其是 1.6 Ma BP 以来,受青藏高原东北缘推挤作用的不断加强,在黄土高原整体隆升速度加快的同时,其内部也发生了不同程度的构造变形与断裂活动。伴随的各种直接和间接的构造侵蚀作用,不仅分割、破坏了黄土塬的完整性,还导致了黄土塬内出现纵深达数百米的沟壑和两侧高达几十米乃至数百米的陡崖,由此进一步引发了众多的黄土滑坡、崩塌。在地质、地貌与气候因素耦合作用下,构造侵蚀作用主要表现在 3 个方面。

(1) 黄土高原抬升导致其侵蚀基准面下降,由此为沟谷溯源侵蚀和流水侵蚀提供了前提条件,并进而为滑坡、崩塌和泻溜等重力侵蚀创造了有利条件。如渭河地堑的持续发育,六盘山、子午岭、白于山、桥山、渭河北山等的持续隆起,渭河、无定河、洛河等两岸发育的阶地以及众多的次级水系,不仅反映了黄土高原的抬升,与其对应的负地形的组合,同时反映了强烈的沟谷溯源侵蚀、流水侵蚀和重力侵蚀作用。流水地貌的地势增加主要由上升的地块体通过河流的下蚀作用所造成,局部和区域隆起速度是度量构造变动引起下蚀作用程度的主要因素。

(2) 黄土高原受到周边块体或地壳内动力作用时产生的构造变形,会造成地表土体变形,产生构造裂隙、节理,甚至发生破坏。构造裂隙、节理的存在,增大了黄土的侵蚀速率,促进了黄土的坍塌和滑坡等侵蚀灾害的发生。黄土高原在受到周边块体掀斜、推挤、扭拉或地壳深部内动力作用时,必然会造成地表土体的变形,乃至破坏、破碎,使土体的物理力学性能减弱,抗风化、抗侵蚀能力大大降低;土体变形造成的构造裂隙、节理,还会成为良好的渗水、导水通道,使黄土更易被冲刷侵蚀。特别是水流沿黄土垂直裂隙下渗时,减少了摩擦系数,增大了黄土的侵蚀速率,促进了黄土的坍塌和滑坡,增大了土壤侵蚀量。黄土高原地区发育的大量各类暗穴与直线状侵蚀沟系无不与此有关,图 1 是黄土高原地区常见的一类顺构造节理裂隙侵蚀的地质灾害现象,由于构造的导水作用,造成土体冲蚀,进而出现洞穴,给运输、管道、拦蓄水工程、厂房、民居等各类工业与民用建筑等人类工程构成不同程度的危害<sup>[19]</sup>。

(3) 新构造运动差异升降交汇处的地形突变带、活动断裂带,地震活动带等稳定性条件差的黄



图 1 顺构造裂隙侵蚀产生的黄土洞穴

Fig. 1 Loess Cavity Caused by  
Erosion Along Structure Crevice

土分布区,是水土流失最剧烈的地区。新构造运动上升与沉降交汇处的地形突变带,往往是山地、高原和平原接触部位。接触部位两侧新构造运动方向不同,一侧是上升,另一侧下降,明显的地貌差异为黄土侵蚀提供了良好的边界条件,不仅有利于下蚀,往往是黄土滑坡(塌)的易发带。例如渭河盆地北缘断裂、吕梁山和六盘山两侧、靖边的白于山前东西向断裂以及河谷阶地边缘地带等黄土滑坡发育。由断裂活动引发的地震对水土流失具有特殊的意义,如频繁而强烈的地震活动,不仅会导致地表产生明显的形变破坏(土岩体位移、破碎、大面积沉陷、地裂缝等),还为黄土的重力和流水侵蚀提供了良好的边界条件。此外,地震发生时,巨大的能

量随地震波向四周传播,直接导致黄土塬、梁、峁的山地两侧边坡产生滑坡、崩塌、滑塌及黄土泥沙等,同时也往往使古滑坡复活,从而加速地表的侵蚀。如海原活动断裂上 1920 年发生的海原 8.5 级大地震,导致断裂沿线黄土高原大范围的滑坡群产生,加上气候降水等因素,使其成为黄土高原水土流失最严重的地区之一。

笔者最近对汾渭盆地的地面沉降与地裂缝调查结果表明,新构造运动中,深部基底断裂的长期蠕滑同样会引起地表黄土的侵蚀。例如,三原县陵前乡双槐村出现的地裂缝带,就是由于礼泉—蒲城—合阳断裂带长期活动的结果。所引发的主要侵蚀机理过程可概括为:在断裂带不断的张扭运动中,深部裂缝逐步向表层扩展,表层土体因此受到拉张而疏松和强度下降,并首先在地表产生一个逐步变宽的地面沉降带和局部次级裂缝带(图 2);沉降带上的局部地段由于疏松、次级裂缝或黄土湿陷性的影响,一旦发生地表降水就会产生渗漏、冲蚀,使裂缝顺其走向和下延方向不断扩展并与深部主裂缝贯通。此时的裂缝带不仅成为易受水体侵蚀的部位,同时还将大量的地表泥沙带入裂缝带乃至断裂深部,或通过地下裂缝通道搬运至异地海拔相对较低的地表再行沉积,甚至被导入河流被搬运至下游区。强烈的侵蚀作用由此而发生,并在裂缝带两端逐步向裂缝带中心区域侵蚀(溯源侵蚀)并形成侵蚀性沟谷。图 3 是该地裂缝带东端受到地表水长期侵蚀作用下,黄土台塬边部出现的近直线状的、数千米长的侵蚀沟系——长坳沟。

5 结语

(1)青藏高原的强烈隆升,使其自身及其亚洲地区乃至全球范围的气候特征发生了巨大变化,并

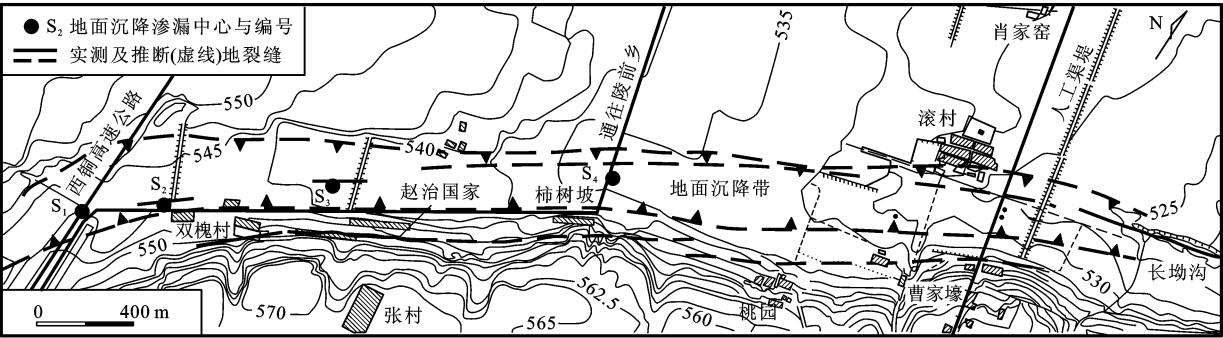


图 2 三原县双槐村地面沉降与地裂缝带分布

Fig. 2 Ddistribution Map of the Surface Subsidence and Ground Fissur Zone in the Shuanghuai Village, Sanyuan County  
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>



图3 地裂缝带东端的侵蚀沟谷

Fig.3 Erosion Gully at Eastern  
End of the Ground Fissure Zone

导致了黄土高原的形成。青藏高原隆升晚期,尤其是第四纪以来的新构造运动期间,构造变形效应以及高原东北缘对鄂尔多斯盆地的推挤作用,使黄土高原发生了阶段性隆升与构造变形,并引起多种黄土地质灾害。新构造运动对黄土高原的抬升,导致其侵蚀基准面下降,为重力侵蚀、沟谷溯源侵蚀和流水侵蚀提供了前提条件,并成为控制地貌演化的重要因素。

(2)黄土高原受到青藏块体作用,造成地表土体变形,产生构造裂隙、节理,甚至发生破坏。构造裂隙、节理的存在,增大了黄土的侵蚀速率,促进了黄土坍塌、滑坡、沉陷、洞穴等侵蚀性地质灾害的发生。

(3)新构造运动差异升降交汇处的地形突变带、活动断裂带,地震活动带等稳定性条件差的黄土分布区域,是构造侵蚀最剧烈的地区。

#### 参考文献:

- [1] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381-391.
- [2] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器(III)[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1995, 32(1): 108-115.

- [3] 马润勇, 彭建兵, 门玉明, 等. 逆冲断层发育的力学机制研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2003, 33(2): 196-200.
- [4] 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 457-466.
- [5] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L P. Late Cenozoic Eolian Deposition in the North Pacific: Asian Drying, Tibetan Uplift, and Cooling of the Northern Hemisphere[J]. Paleogeography, 1998, 15(3): 215-224.
- [6] 马润勇, 席先武, 彭建兵, 等. 青藏高原递进式隆升的力学模式[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(4): 451-458.
- [7] 马润勇, 彭建兵, 刘利年, 等. 青藏高原隆升的气候环境效应与黄土高原构造侵蚀[J]. 水土保持通报, 2005, 25(5): 5-11.
- [8] 李吉均, 方小敏, 马海州, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(4): 316-322.
- [9] 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. 地理学报, 1999, 54(1): 10-20.
- [10] Guo Z T, William F R, Hao Q Z, et al. Onset of Asian Desertification by 22 Myr ago inferred from Loess Deposits in China[J]. Nature, 2002, 416: 159-163.
- [11] An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau Since Late Miocene times[J]. Nature, 2001, 411: 62-66.
- [12] 陈发虎, 吴薇, 朱艳, 等. 阿拉善高原中全新世干旱事件的湖泊记录研究[J]. 科学通报, 2004, 49(1): 1-9.
- [13] 雷慧珠, 武春龙. 新构造应力场与滑坡侵蚀[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(5): 35-43.
- [14] 朱照宇. 黄土高原及邻区新构造与新构造运动[J]. 第四纪研究, 1992, 12(3): 252-264.
- [15] 潘爱芳, 赫英, 徐宝亮, 等. 鄂尔多斯盆地基底断裂地球化学特征研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(4): 440-444.
- [16] 赵景波. 西北黄土区第四纪土壤与环境[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.
- [17] 岳乐平, 雷祥义, 屈红军. 黄河中游水系的阶地发育时代[J]. 地质论评, 1997, 43(2): 186-192.
- [18] 程绍平, 邓起东, 闵伟, 等. 黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动[J]. 第四纪研究, 1998, 18(3): 238-248.
- [19] 彭建兵, 李喜安, 孙萍, 等. 黄土洞穴的环境灾害效应[J]. 地球与环境, 2005, 33(4): 1-7.