



地貌沉积学方法在活断层研究中的应用^①

卢海龙, 胡小猛, 吴洁利, 吴冰

(上海师范大学旅游学院地理系, 上海 200234)

摘要:地貌沉积学方法是研究活动断层运动规律的有效方法之一。综合大量已有研究成果, 本文从活断层垂直运动、水平运动及垂直—水平组合性运动特征等方面对地貌沉积学原理在目前活断层研究工作中的应用及进展进行了综述; 并探讨了今后地貌沉积学方法在活断层研究中需关注的一些关键技术。

关键词:地貌沉积学方法; 活断层; 综述

中图分类号: P315.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2012)02-0192-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2012.02.0192

Summary on the Sedimentary-geomorphologic Method Used in the Study of Active Faults

LU Hai-long, HU Xiao-meng, WU Jie-li, WU Bing

(Geography Department, Tourism college, Shanghai Normal University, Shanghai 200234)

Abstract: Sedimentary-geomorphologic method is an effective way to study the kinematic laws of active fault. From the great amount of existing researchs, the main contents and progress in the research are summarized in three aspects as kinematic characteristics of active fault with vertical movement, horizontal movement and the vertical-horizontal compositing movement. Some key techniques could be used in the sedimentary-geomorphologic method in active fault research in future are discussed also.

Key words: Sedimentary-geomorphologic method; Active fault; Summary

0 前言

活动断层是指距今10万年以来活动过, 现今正在活动, 并在未来一定时期内仍有可能活动的断层^[1]。活断层研究对大型工程建设、城市规划设计、认识地震规律、防治地质灾害等国民经济建设有重大意义。由于科技发展和经济建设的需要, 对活断层活动规律的研究一直为研究者所关注^[2-6]。活断层研究中重点要搞清楚活断层的分布、活动方式、活动幅度和活动周期等。对于活断层的运动特征和规

律, 目前学术界从不同的侧面对其展开了研究, 所采用的研究方法有: 历史文献法、野外实测法、遥感地质法、年代学法、探槽方法、古地磁法、考古学法、地球物理法、地貌沉积学法等^[7-8], 其中地貌沉积学方法的应用效果非常显著^[9]。

活断层的运动有垂直方向的运动、水平方向的运动和垂直—水平向的组合性运动, 它们在地貌沉积上所留下的遗迹各不相同。本文在查阅分析大量文献的基础上, 对地貌沉积学方法在活断层研究中

① 收稿日期: 2011-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071004); 上海市教委“地理学与城市环境”重点学科(CZL702)

作者简介: 卢海龙(1981—), 男(汉族), 安徽庐江人, 硕士研究生, 主要从事地貌第四纪研究。

通讯作者: 胡小猛; E-mail: hxm@shnu.edu.cn

的应用进行综述,以期未来的研究工作提供一个研究思路的启发。

1 地貌沉积学方法在活断层垂直运动特征研究中的应用

1.1 断层崖

断层崖的地貌法研究是活断层研究的有效方法之一。20世纪60年代初 Culling 提出了侵蚀作用

的解析模式^[10]。70年代末 Wallace 将坡面演化理论与模型引入到断层崖的研究中来,并指出断层崖的年龄与坡面形态有关,可用断层崖坡面的变化来确定其相对年龄^[11]。Bucknam 提出了断层崖坡角与年龄的公式: $\theta = -8.51gT + 52.5$ (θ 为断层崖坡角, T 为断层崖年龄)^[12]。后来 Nash 用扩散方程法得到了断层崖的绝对年龄^[13]。

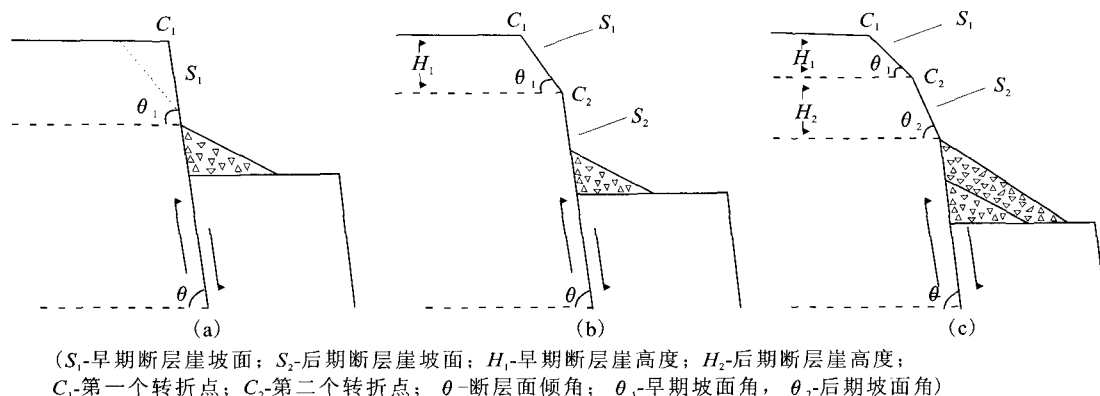


图1 断层崖剖面演化示意图

Fig. 1 Schematic evolution of fault scarp profile.

根据断层崖的形态演化我们可以推断断层活动形成断层崖的年代。图1(a)显示,断层垂直活动形成断层崖,产生崖面 S_1 及斜坡转折点 C_1 , 其中崖面倾角为断层面倾角 θ ; 之后由于风化及水流片状侵蚀,崖面和转折点后退,崖面倾角变小为 θ_1 , 同时在坡脚处可能堆积一期松散碎屑物。如断层再次发生活动就又会产生新的断层崖 S_2 及斜坡转折点 C_2 (图1(b))。在风化及片状水流不断作用下新断层崖 S_2 及斜坡转折点 C_2 也会后退,坡角逐渐降低变成 θ_2 (图1(c)), 并可能在坡脚处堆积一期新的碎屑层。与此同时坡面 S_1 及转折点 C_1 仍在后退,坡角 θ_1 仍在变缓(图1(c))。这时在斜坡上就可出现两段倾角不同的坡段和两个坡角转折点,其中 $\theta_1 < \theta_2 < \theta$ 。如果断层再发生第三次活动,新产生的断层崖 S_3 及斜坡转折点 C_3 也将按上述规律发生变化。根据断层上升盘上的断层崖坡度的分段变化,我们可以确定该断层的活动次数。如果能确定断层崖的暴露时间或坡脚处的松散碎屑层的堆积年代,我们便可推断该断层的每次错动事件的年龄或重复间隔^[14]。

断层崖地貌法在实践中有过很多非常成功的应用案例。在祁连山北部昌马—西水峡盆地南缘的昌马断裂带活动规律研究中,康来迅根据红沟西断层

崖面上的坡度转折点把崖面分为三个部分,反映该断裂多期活动的特征^[15]。在昌马—祁连断裂带中的大野马沟及长干峡等地的研究中,郭敬信根据该区断层崖坡角的平均值为 $19^\circ \sim 24^\circ$, 结合 Bucknam 的经验公式计算出其相应的发育年代为 4437 a ^[16]。在华山北麓断裂研究中,程谦恭依据断层崖的坡度转折点、冲沟裂点、阶地及断层崖上的残留碎屑,确定了该断层活动的重复周期,该结果与渭河盆地历史记录强震周期非常吻合^[17]。

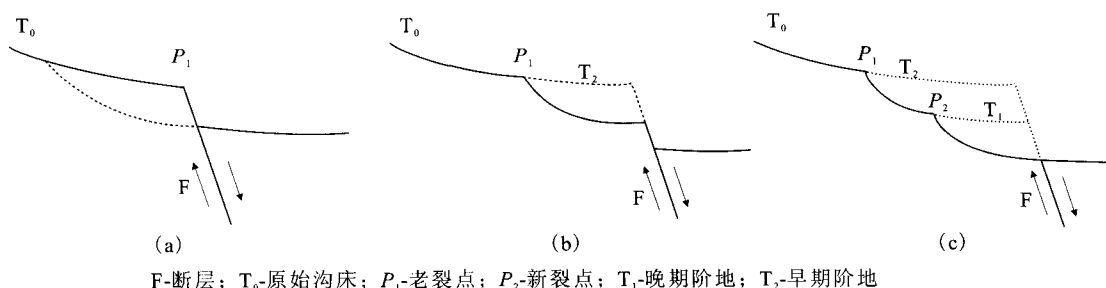
1.2 冲沟裂点与阶地

如一断层横穿一冲沟,由于断层的垂直错动,在冲沟的沟床纵剖面上会出现一坡折,此称为裂点。冲沟的溯源侵蚀会使得裂点不断向上游后退,并在断层线至裂点段形成一级阶地。通过分析冲沟中的裂点及阶地资料,我们可以推断出该断层的活动特征。

图2(a)显示,断层F发生错动后,产生一裂点 P_1 。由于沟谷的下切及溯源侵蚀,裂点 P_1 会不断向上游后退。图2(b)显示由于沟谷下切、沟床高度降低、裂点 P_1 后退,在断层线与 P_1 裂点间形成一级阶地。如果断层再次发生错动,就又会形成新的裂点 P_2 。图3(c)显示随着 P_2 的不断溯源后退,在 P_2 与断层线之间又会形成一级新的阶地,这样在该

段上就产生了两级因断层错动而形成的阶地。与 P_2 后退的同时,裂点 P_1 也在继续后退,在裂点 P_1 与 P_2 间仍发育着一级阶地。根据 T_1 、 T_2 间高差可

求该断层活动的幅度;根据 P_1 、 P_2 之间的距离和裂点溯源侵蚀平均速度,可求出断层活动的周期。



F-断层; T_0 -原始沟床; P_1 -老裂点; P_2 -新裂点; T_1 -晚期阶地; T_2 -早期阶地

图2 断层活动与冲沟裂点和阶地发育图

Fig. 2 Development of gully crack point and tectonic terraces with the fault activity.

在实践中利用冲沟裂点与阶地的特征来开展断层活动规律的研究非常有效。如:杨景春曾根据穿过断层的45条冲沟裂点和阶地测量资料,结合冲沟裂点间距离和裂点溯源侵蚀平均速度探讨了贺兰山山前断层的活动方式、次数、活动年代、活动周期等^[18];胡连英结合地形图和航片判读,运用冲沟测量和冲沟比降指标计算,获取了茅山东断裂带现代运动学和断裂构造地貌分段特征^[19];李有利结合甘肃张掖黑河口黑河阶地变形分析,根据黑河阶地的测年数据和垂直断距推断出黑河口断层的活动速率和复发周期^[20]。

1.3 崩积楔

崩积楔最早由 Schwartz 将其定义为与断层崖演化相关的堆积体^[21]。研究发现正断层断层崖与逆推断层崖情况下,崩积楔的形成模式截然不

同^[22]。图3(a)~(c)表示正断层崩积楔形成模式;图3(d)~(f)表示逆断层崩积楔形成模式。

断层崩积楔是断层活动的直接产物,是古地震事件的重要证据^[23]。一次正断层活动后在断层崖的坡脚处会形成一期崩塌堆积物。若断层再次活动,在坡脚处将会形成一期新的堆积物,且新的堆积物覆盖在老的堆积物之上。每一期堆积物代表一次断层活动(图3(a)、(b)、(c))。根据崩积楔的个数可以确定断层活动事件的次数;根据崩积楔的年龄可估算断层断错的年代,并进一步推断出其活动速率和周期。逆断层的活动使断层上盘上升呈悬空状态,上盘碎屑物质会脱落堆积在断层崖下形成一期崩塌堆积物;断层崖坡向与断层倾向相反(图3(d)、(e)、(f))。如断层再次发生活动,则后期崩塌堆积物会覆盖在早期堆积物之上。

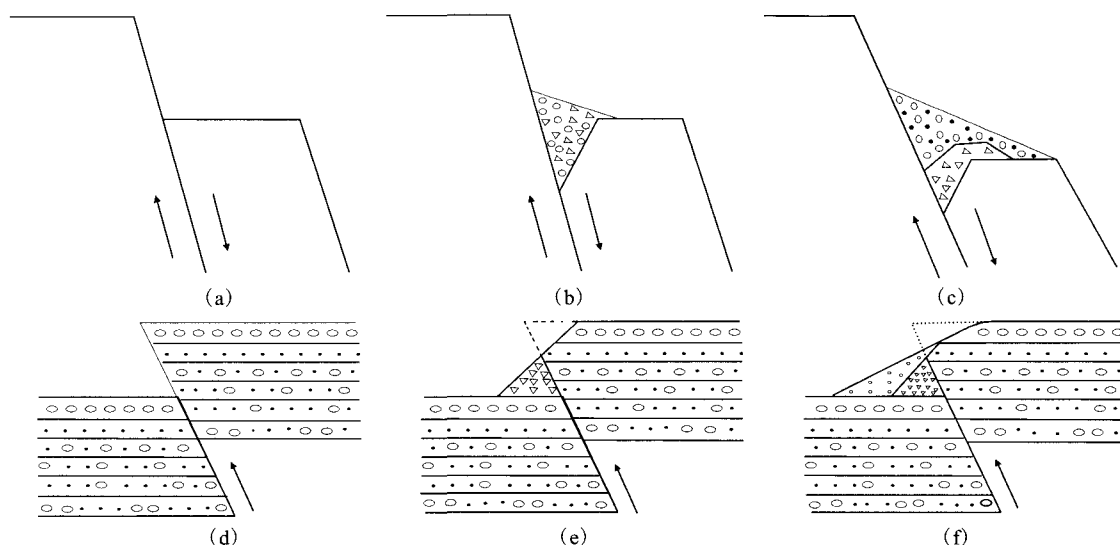


图3 正、逆断层崩积楔演化模式(据邓起东,1984;2000)

Fig. 3 Positive and reverse fault colluvial wedge formation mode (According to Deng Qi-dong, 1984; 2000).

赵俊香通过对山西忻定盆地五台山北麓断裂南峪口探槽中崩积楔的研究,揭示出该断层活动所对应的两个古地震事件时间在 $42.77 \pm 2.46 \sim 61.72 \pm 2.82$ ka 和 $32.80 \pm 2.87 \sim 47.92 \pm 0.94$ ka^[24]。邓起东依据天山山前活动逆断裂—背斜带的崩积楔个数,得出该断裂自 15 ka 以来曾发生过 4 次 7 级以上的地震^[25]。

1.4 洪积扇

洪积扇是山区沟谷水流搬运大量砾石、泥沙在山口附近堆积所形成的扇形地貌体。如果山前发育有一正断层,且在山口附近的平原区分布有老洪积扇,由于断层的活动使平原区相对下降,出山的沟谷比降加大,沟谷水流的搬运能力更强,所形成的新洪积扇超覆在老洪积扇之上;再次发生断层活动后新洪积扇超覆前期洪积扇并在水平向上继续向山前低处迁移。根据山前洪积扇的叠覆现象和分布范围的扩张现象,可以反推山前断层的活动历史。

侯建军根据被断层切割的洪积扇体结构和堆积体产状特征,研究得出秦岭北麓断裂为一铲形断裂^[26]。边庆凯在对榆木山北缘断裂的活动的特征研究中发现:洪积扇纵轴坡度与山前断层的活动有明显的相关性,断层活动强纵轴坡度大,断层活动弱纵轴坡度小^[27]。

1.5 沉积物垂直错断

断层的垂直活动会错断沉积物,利用沉积物被错断这一现象来研究断层的活动规律也是野外常用

方法之一。如果新的上覆沉积层被不断活动的断层所切穿,就会在不同地层中形成不同的断距,只要测出每一地层的年代,地层间的断距,便可推断出该断层历史时期的活动次数、每次的幅度、活动平均速率及活动周期。

利用该方法原理,杨景春研究得出临汾盆地大阳断层在晚更新世以来至少有过 3 次活动^[28]。申屠炳明通过对韩城断裂两侧多种层状地貌被错断现象的研究,推断韩城断裂自晚更新世末期以来至少发生过一次 6~7 级以上的破坏性地震^[29]。

2 地貌沉积学方法在活断层水平错动特征研究中的应用

2.1 沟谷水平错动

自从 Wallace 研究圣安德烈斯断层断错水系以来,根据断错地貌现象研究断裂的地震活动性开始被人们关注起来^[30-31]。图 4(a)示意一左旋断层活动错断了系列沟谷的情景。沟谷被错断后,其上下游段之间的水平距离代表着断层水平错动幅度。沟谷年代越久,其经历断错事件的次数就越多,累计水平错距会越大。根据多组不同年代沟谷的水平错动距离,我们可以分析推断该断层自某个时间以来的水平活动次数、每次的幅度及错动发生的年代和周期等。

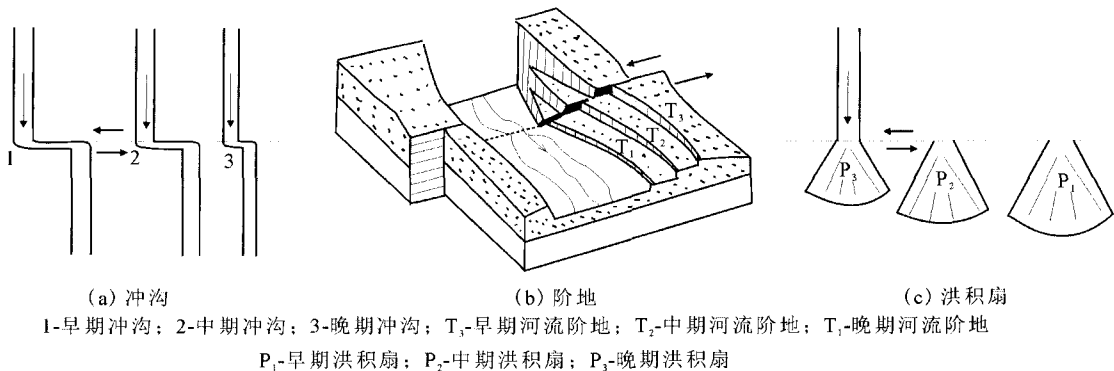


图 4 沟谷、阶地、沉积物水平错动示意

Fig. 4 Sketch for horizontal offsets of valleys, terraces and fans caused by fault movements.

山西临汾盆地东北缘霍山断层是一个走滑断层,断层的水平运动错断了很多穿过断层的沟谷。徐锡伟根据不同年代沟谷的不同错断幅度,揭示了霍山山前断裂带晚更新世晚期以来的平均滑动速率在 6.4 ± 0.22 mm/a ~ 7.5 ± 0.3 mm/a 之间^[32]。

2.2 阶地水平错移

当断层横穿一河谷时,断层的水平活动会错断该河谷的阶地。图 4(b)示意一左旋断层错动一河谷系列阶地的情景:年龄最老的阶地(T₃)被断层错断后的上下游错距最大,最年轻的阶地(T₁)被错断的距离最小。如果有数级不同年代的阶地被错断,每级阶地被错断的幅度又不一样,据此,我们可以分

析出该断层的一些活动规律。

阿尔金断裂带阿克塞段的活动以水平分量为王,王峰利用卫星资料对穿过该断层的众多河流进行了阶地错断研究,发现规模相近的河流在断层线附近具有相近似的水平错位^[33]。在东昆仑活动断裂带的东大滩段,断层左旋活动切割了多级沟谷阶地,年龄越老的阶地左旋位移值越大^[34]。黑沟大断裂穿过汉江支流——老灌河河流,断层的倾斜走滑活动使得阶地既发生了垂直错断,也发生了水平错断。根据阶地的水平错断情况,周厚云的研究揭示了该断层自晚更新世中期以来构造运动主要表现为水平方向上的走滑活动^[35]。

2.3 沉积物水平错动

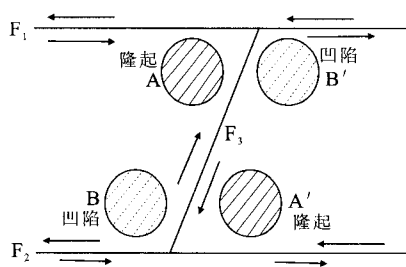
断层的水平错动会使得原先连续分布的沉积物分为两段并发生一定的相对位移。根据某些具有标志性特征的沉积物在断层两盘上的错断距离,我们可以量算出断层的错动幅度;根据标志性沉积层的形成年代,我们可以推断出断层的活动周期和速率。图4(c)示意在山前断层水平运动情况下的山麓洪积扇错位。早期洪积扇 P_1 经历的错断次数多,扇体与沟口间的错距大,中期洪积扇 P_2 的错距稍小;晚期洪积扇 P_3 最小。根据 P_1 、 P_2 、 P_3 之间的距离并结合各洪积扇沉积物的堆积年代,就可以算出该断层过去曾活动的次数、幅度及速率。野外考察中能作

为标志地层追踪的可以是分选磨圆很好的河流冲积层、含有特殊岩性的洪积物或历史时期的人工堆积物等。胡小猛等利用山西霍山山前洪积扇堆积物作为标志层,确定了霍山断层自上新世以来的累积右旋错动幅度达12.5 km^[36]。

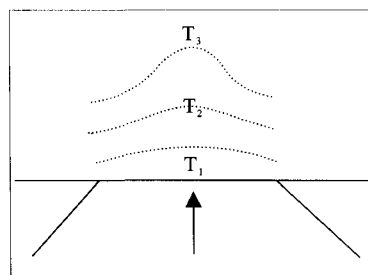
3 地貌沉积学方法在活断层垂直—水平组合性运动特征研究中的应用

3.1 “双隆起—双凹陷”模型

自然界中的断层的活动既具有水平运动分量又具有垂直运动分量,呈倾滑状态。杨景春认为,一组“X形”断层发生水平运动时,断块运动的前方常受挤压而隆起,形成丘陵或台地;断块运动后方会受拉张而沉陷,形成洼地或平原,产生“双隆起—双凹陷”地貌现象^[9]。图5(a)示意一组“X形”断裂水平运动所产生的派生垂直运动和双隆起—凹陷地貌特征:断层 F_1 、 F_2 为左旋错动, F_3 为右旋错动; A 、 A' 分别为挤压作用下形成的隆起, B 、 B' 分别为拉张作用下形成的凹陷。 B 、 A' 之间的正断层倾向向左, A 、 B' 之间的正断层倾向向右,使得 F_3 断层成为一枢纽断层。北京南口—孙河断层的运动规律就是依据“双隆起—双凹陷”模型得以揭示的^[9]。



(a) “双隆起—双凹陷”模型



(b) 阶地拱曲变形

图5 活断层水平加垂直组合性运动图示

Fig. 5 The vertical-horizontal combination movement of active fault.

3.2 阶地拱曲变形

在构造挤压作用下,地壳会发生隆起褶皱并往往伴有逆断层的产生,由此地表的河流阶地也会随之发生拱曲变形。如果区域地壳曾间断性地多次发生挤压隆起,区域地表也发育了多级不同年代的河流阶地,则越老的阶地经历的隆起拱曲次数越多,变形越强烈;越年轻的阶地经历的隆起拱曲次数越少,变形越缓和^[9]。图5(b)显示在间歇性地持续隆起背景下不同年龄的阶地的变形情况。阶地 T_3 拱曲变形幅度大于 T_2 , T_2 变形幅度大于 T_1 。根据不同

年代阶地拱曲变形的程度和幅度也可以来分析区域地壳的隆升或逆断层的活动次数、幅度及周期等。在山西临汾盆地的柴庄隆起段,汾河的不同时代阶地就表现出上述这种变形特征。

4 未来地貌沉积学方法在活断层研究中应关注的问题

4.1 测年精度的提高

(1) 断层崖出露时间的确定

断层崖形成年龄的界定,目前主要采用断层崖

演化模型经验公式法、 ^{14}C 法和宇宙成因核素法。一次断层活动后产生断层崖,在崖的下方往往会形成倒石堆。如果在倒石堆堆积过程中有有机质被埋藏而没有被分解掉,则可以用 ^{14}C 法对该有机质进行测年,以框定断层这次活动的年代。断层崖形成后,崖面出露在大气下;受宇宙射线的作用,在崖面上会积累一定的宇宙核素。崖面上宇宙核素的浓度是与崖面暴露在大气下的时间长短具有线性相关性。据此,通过测定崖面上某些核素的积累量以及该核素的年生成速率,就可以得到该断层崖的形成年龄^[37-39]。宇宙成因核素年代方法可测定的地貌崖面年代范围在 $10^3\text{ a}\sim 10^6\text{ a}$ 。未来在活断层的年代研究中,宇宙成因核素法具有极大的潜力。

(2) 裂点形成年代的测定

运用冲沟裂点来分析活断层的运动规律首先要解决裂点的形成年代问题。可以参考所在地区的历史地震研究成果,野外确定与其对应的沟谷裂点。通过测量该裂点已溯源后退的距离,计算裂点的后退速度,建立该沟谷裂点溯源迁移模型。精确测量沟谷中其它裂点已发生的后退距离,利用该迁移模型估算出它们的形成年代,进而推断导致各裂点形成的断层活动时间。在更大区域范围内利用该法进行裂点后退年代分析时,一定要注意裂点所在沟谷的规模、沟床的物质组成以及降水量等要与建立迁移模型的沟谷近似,否则就需要调整模型。该法在干旱半干旱区的测年范围以 10^4 a 以内为宜^[40]。

(3) 水平断错洪积扇、阶地和沟谷的时代问题

首先,要直接对断错的洪积扇、阶地和沟谷沉积物进行测年。测年方法可用 ^{14}C ,样品主要是木炭、泥炭、贝壳、淤泥、骨骼等,测定范围一般小于5万年;释光法(热释光或光释光),样品一般为土状沉积物,粘土和砂砾石层不适合此方法,样品采集要避免光处理。古地磁法主要用于河流、湖泊、海洋沉积物、黄土等。其次,再根据不同时代地貌体或沉积物的错断幅度来推断断层每次活动发生的时间范围。

4.2 遥感技术的应用

目前遥感卫片的分辨率、光谱分辨率越来越高,断层的影像信息也越来越清晰,利用遥感手段分析活断层的运动规律是一个高效便捷的方法。应用的第一步是要在解译遥感卫片的基础上,探寻活动断裂遥感影像标志;第二步借助高分辨的DEM数据建立区域坡度分布图;第三步根据前面两个步骤所提取的一些研究信息,有针对性地在实地进行调查测量。今后,活断层运动研究中的遥感技术应

用需进一步加强。

【参考文献】

- [1] 徐锡伟. 活动断层、地震灾害与减灾对策问题[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(1): 7-13.
- [2] 杨景春. 活动构造地貌研究与国民经济建设[J]. 世界科学, 1985, (5): 61.
- [3] 丁国瑜. 中国活断层研究近况(综述)[J]. 国际地震动态, 1982, (10): 1-2.
- [4] 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社, 1988: 258-277.
- [5] 杨博, 周伟, 陈卓越, 等. 断裂带带变形分析方法及应用[J]. 西北地震学报, 2010, 32(3): 215-219.
- [6] 刘静, 申旭辉, 孟恺, 等. 西藏谷露盆地西缘断裂新活动特征研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(3): 272-284.
- [7] 卢海峰. 浅谈活断层及其研究方法[J]. 江苏地质, 2006, 30(2): 89-93.
- [8] 李玉森. 活动断层的基本理论与常用研究方法[J]. 安徽地质, 2006, 16(1): 20-25.
- [9] 杨景春, 李有利. 地貌学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 3-180.
- [10] 钱洪. 断层崖地貌年龄确定—古地震研究的新动向简介[J]. 四川地震, 1986, (3): 43-48.
- [11] Wallace R E. Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada[J]. Bull. Geol. Soc. Am., 1977, 88: 1267-1278.
- [12] Bucknam R G, Anderson R E. Ages of fault scarp from a scarp height-slope-angle relationship[J]. Geology, 1979, 7(1): 11-14.
- [13] Nash D B. Forms of bluffs degraded for different lengths of time in Emmet County, Michigan, U. S. A. [J]. Earth Surface Processes, 1980, 5: 331-345.
- [14] 邓起东, 尤惠川. 断层崖研究与地震危险性估计——以贺兰山东麓断层崖为例[J]. 西北地震学报, 1985, 7(1): 29-37.
- [15] 康来迅. 昌马断裂带活动构造地貌之研究[J]. 地理研究, 1989, (2): 35-42.
- [16] 郭敬信, 侯珍清, 侯康明. 昌马—祁连断裂带中段全新世活动特征与古地震[J]. 西北地震学报, 1990, 12(3): 38-42.
- [17] 程谦恭. 华山东麓断层崖与大地展重复周期分析[J]. 西安地质学院学报, 1988, 10(4): 53-63.
- [18] 杨景春, 郭正堂, 曹家栋. 用地貌学方法研究贺兰山山前断裂全新世活动状况[J]. 地震地质, 1985, 7(4): 23-31.
- [19] 胡连英, 徐学思. 茅山东侧断裂现代运动的地貌学特征[J]. 江苏地质, 1994, 18(1): 3-9.
- [20] 李有利, 李保俊, 杨景春. 甘肃张掖黑河河口断层晚更新世晚期以来的活动[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1995, 31(3): 351-356.
- [21] 刘旭东, 张世民. 正断层崩积楔粒度特征及沉积环境[J]. 地震地质, 2007, 29(4): 813-825.
- [22] 冯先岳. 地震断错地貌[J]. 内陆地震, 1991, 5(1): 17-25.
- [23] 邓起东, 汪一鹏, 廖玉华, 等. 断层崖崩积楔及贺兰山山前断裂全新世活动历史[J]. 科学通报, 1984, (9): 557-560.

- [24] 赵俊香,任俊杰,于慎谔,等. 山西忻定盆地断层崩积楔 OSL 年龄及其对古地震事件的指示意义[J]. 现代地质,2009,23(6): 1022-1028.
- [25] 邓起东,张培震. 史前古地震的逆断层崩积楔[J]. 科学通报,2000,45(6): 650-655.
- [26] 侯建军,韩慕康,张保增,等. 秦岭北麓断裂带晚第四纪活动的地貌表现[J]. 地理学报,1995,50(2):138-145.
- [27] 边庆凯,张培震,苏向洲. 榆木山北缘断裂的构造地貌特征与断层活动性[J]. 华北地震科学,2001,19(3):41-48.
- [28] 杨景春,李有利,苏宗正,等. 临汾盆地第四纪断层活动的几种表现[J]. 山西地震,1995,3(82):54-58.
- [29] 申屠炳明,徐煌坚,汪一鹏. 韩城断裂的活动特征及断裂带古地震遗迹的初步研究[J]. 华北地震科学,1990,8(1):1-9.
- [30] 丁国瑜. 活动走滑断裂带的断错水系与地震[J]. 地震,1982,(1):3-8.
- [31] 钱洪. 鲜水河断裂带的断错地貌及其地震学意义[J]. 地震地质,1989,11(4):43-48.
- [32] 徐锡伟,邓起东. 山西霍山山前断裂晚第四纪活动特征和1303年洪洞8级地震[J]. 地震地质,1990,12(1):21-30.
- [33] 王峰,徐锡伟,Tapponnier P. 利用卫星资料对阿尔金断裂带阿克塞以西进行阶地面对比和位错量分析[J]. 华北地震科学,2001,19(4): 21-25.
- [34] 赵国光,苏刚. 走滑断错地貌的特征及研究方法[A]//中国地震局地壳应力研究所. 地壳构造与地壳应力文集[G]. 北京:地震出版社,2001:23-24.
- [35] 周厚云. 从老灌河阶地看黑沟大断裂的新近活动[J]. 河南地质,2000,18(2): 113-116.
- [36] Hu Xiaomeng, Wang lili, Zhe jiao, et al. Morpho-sedimentary Evidences of Late Cenozoic Right-lateral Movement and Accumulative Displacement of Huoshan Fault in Linfen Graben, Shanxi Graben System, North China[J]. Frontiers of Earth Science in China, 2010. 4(3): 311-319.
- [37] 张会平,张培震,郑文俊,等. 活动构造研究中相关速率的原地宇宙成因核素年代学约束[J]. 地震地质,2007,29(2): 418-427.
- [38] 许刘兵,周尚哲. 宇宙成因核素测年方法及其在地球科学中的应用[J]. 冰川冻土,2006,28(4): 577-584.
- [39] 黄福明. 地震断层活动年代测定方法的进展[J]. 国际地震动态,1990,(2): 1-4.
- [40] 李传友,张培震,张剑玺,等. 西秦岭北缘断裂带黄香沟段晚第四纪活动表现与滑动速率[J]. 第四纪研究,2007,27(1): 54-62.