



河流阶地研究进展评述

刘小丰^{1,2}, 高红山², 刘洪春¹, 李保雄¹, 范兵¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:河流阶地是地貌学中最重要研究课题之一, 主要集中在阶地的形成年代及阶地形成模式上。本文结合国内外河流阶地的研究现状, 对河流阶地的研究历史进行了简单的回顾, 总结其发展的四个阶段和特征。

关键词:河流阶地; 阶地发育模式; 构造; 气候

中图分类号: P931

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)02-0195-05

Review on Research Progress of River Terrace

LIU Xiao-feng^{1,2}, GAO Hong-shan², LIU Hong-chun¹, LI Bao-xiong¹, FAN Bing¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The research on river terrace, one of the most important topic in Geomorphology, is mainly focused on terrace age and genesis model. Considering both the status of research on river terrace at home and abroad, the research history of the terrace is reviewed, and four stages and features of the reaearch are summarized.

Key words: River terrace; The model of terrace genesis; Tectonics; Climate

0 引言

河流阶地是河谷地貌中最突出的地貌特征之一, 也是它所属的河流范围内古气候变迁、古水文和新构造运动以及河流侵蚀基准面升降的最丰富的史册。河流阶地是通过河流下切侵蚀, 原来的河谷底部(河漫滩或河床)超过一般洪水位以上, 不再受到洪水的作用, 而在河谷中沿河分布的阶梯状地形。阶地按照地形单元可划分为阶地面、阶地陡坎、阶地前缘和阶地后缘^[1]。

河流阶地是自然界河流演化的一种地貌形态, 早在19世纪中叶就被人们所认识^[2-6]。但是河流阶地的研究在上个世纪初才得到了广泛的关注, 并开始探讨其形成原因。例如, Penck^[7]在研究德国南

部的河流中发现了四级阶地, 并将当时盛行的四次冰期与河流阶地相对应, 并把其成因归咎于气候因素, 认为冰期时河流加积, 间冰期河流下切。然而, 关于阶地的形成原因也存在不同的观点, 对 Sofia 与 Skopje 盆地中阶地的研究认为, 此区域中的阶地反映了四次构造抬升事件, 并计算出了抬升速率^[8-9]。随着科学技术的发展, 以及方法与手段的不断更新, 阶地研究也取得了长足的进展, 本文对河流阶地研究现状及发展历程进行简要评述。

1 从定性描述到年代的准确测定

上世纪70年代以来, 受当时科学发展水平的限

收稿日期: 2010-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(40401007); 国家科技支撑项目“汶川地震断裂带科学钻探”项目; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2011028

作者简介: 刘小丰(1976-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事第四纪地质及地震地质问题研究。

制,阶地研究主要以定性的描述为主,通过阶地冲积物及其上覆物质的表面特征来阐述阶地的性质。徐叔鹰^[10]早期主要基于对冲积物的特征、阶地横纵剖面及上覆物质对兰州黄河进行了研究,认为它们是早更新世的产物,这一方法在其它地区阶地研究中也广泛采用^[11-12]。

阶地研究最大的难点就是其形成时代问题。随着测年仪器的发明与发展,使准确测定阶地年代成为可能。主要采用的测年方法为¹⁴C、OSL、ESR、古地磁及宇生成因核素测年等,其中后者是近年来发展起来的一项新的技术,解决了阶地上无覆盖物质或少量物质时阶地的测年问题^[13-15]。准确年代的测定是进行流域阶地对比及深入研究的基础,潘保田^[16]通过研究把黄河阶地序列与深海氧同位素严格对应起来,Maddy^[17]甚至根据测定的年代把阶地形成与地轴倾斜度周期对应起来(图 1)。当然,河流阶地年代的确定不但可以用来推断阶地的成因,也可以计算出河流的侵蚀、加积和下切速率,进而可以大体计算山地的抬升速率^[18]。

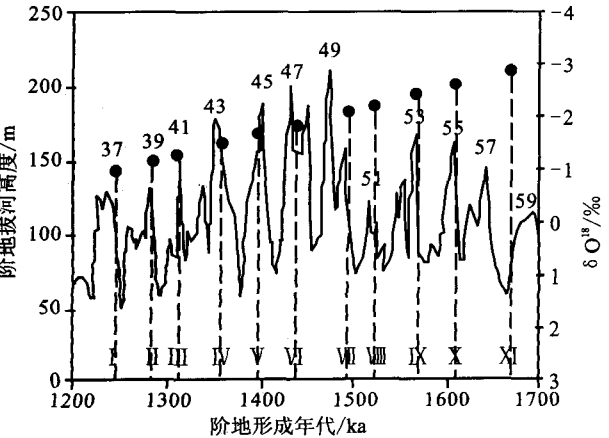


图 1 土耳其 Gediz 河早更新世河流阶地序列与氧同位素曲线对比(据文献[17])

Fig.1 Comparison of terrace sequence with the curve of Oxygen isotope along Gediz river in Turkey.

2 从简单模式到复杂模式

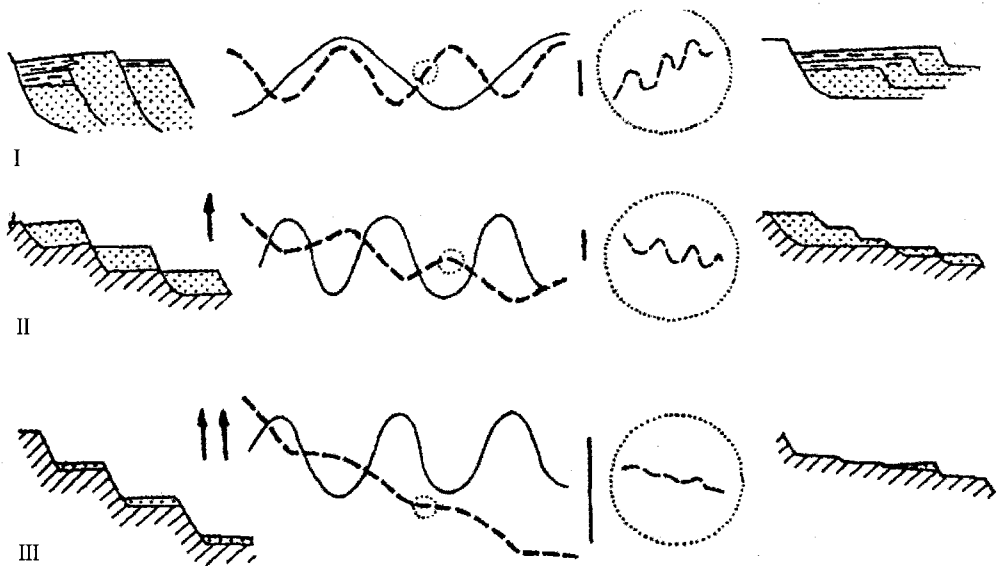
阶地的简单模式可以理解为单一因素形成阶地,主要包括构造阶地、气候阶地和基准面变化阶地。欧洲阶地早期研究把成因与气候对应起来,认为气候变化形成了阶地^[7],主要理论为冷期发生加积,暖期发生下切形成阶地。另外,间冰期时海平面升高导致河流下游甚至中游河道发生加积,冰期时

由于海平面的下降,下游至中游河道也可下切形成阶地^[19]。随着阶地研究的深入发展,单纯用气候变化很难解释大型基座阶地的形成,进而产生了另一种观点,认为阶地的形成代表了构造抬升,如兰州黄河阶地代表了青藏高原多次抬升过程^[20-22];西宁一互助地区湟水发育的 11 级阶地指示了青藏高原东北缘的多次阶段性抬升^[23];在中国西部地区多处阶地研究中也指示了地面抬升^[24-25]。地面抬升是否具有阶段性,还是存在周期性仍没有明确的定论^[26-27],因此把阶地的成因归咎于任何单一因素明显存在着一定的局限性。

中国中西部地区堆积的巨厚黄土,可以作为阶地年代测定的媒介,因此比欧洲地区阶地研究具有更好的测年条件。对河西地区沙沟河阶地的研究发现,在每级阶地风成黄土的最底部都发育了一层古土壤,从而开创性的把阶地成因归因于与构造和气候联系共同作用的结果^[28],认为构造抬升是阶地形成背景,而气候变化控制着阶地的形成。黄河阶地的研究能够把阶地的形成与氧同位素偶数阶段很好的对应起来^[16](表 1)。不同的构造抬升速率下,河流对不同尺度的气候变化具有不同的反映^[29],这在欧洲地区也有记录^[30-31](图 2)。抬升速率为零时,河流沉积物能够记录气候变化信息,但是河流没有空间下切形成阶地,只能形成内叠阶地(图 2-I);抬升速率加大后,气候变化能够形成大量的阶地,河流沉积物同时能够反映出气候变化信息(图 2-II);抬升速率继续加大,河流也能够形成多级阶地,但是河流沉积物明显变薄,并且河流沉积物很难记录到次一级的气候变化信息(图 2-III)。由此可以看出,气候变化控制着阶地的形成,而构造运动强烈程度是决定阶地能否形成并保存下来的关键^[32-33],阶地形成是构造抬升和气候变化耦合作用的产物,构造抬升为阶地的形成提供了垂直空间,气候变化驱动阶地的形成。

表 1 黄河兰州段河流阶地的形成年代及与氧同位素阶段对比(据文献[16,29,34])

阶地	阶地类型	最底部黄土地层	形成年代/Ma BP	MIS 阶段
T1	堆积阶地	S0	0.01	1
T2	基座阶地	Sm	0.05	3
T3	基座阶地	S1	0.14	5
T4	基座阶地	S8	0.86	21
T5	基座阶地	S9	0.96	27
T6	基座阶地	S10	1.0	29
T7	基座阶地	S14	1.2	37
T8	基座阶地	S18	1.4	45
T9	基座阶地	S22-26?	1.6	55



I. 构造稳定的地区; II. 轻微构造抬升区; III. 强烈构造抬升区 (图中中间部分的实线为冰期间冰期气候旋回, 虚线为河流下切曲线)

图 2 构造抬升区域内河流系统对第四纪气候旋回的响应模式^[30]

Fig. 2 Response model of fluvial systems to Quaternary climatic cycles in tectonic uplifting regions.

3 物理模拟—计算机物理模拟结合—模型产生

物理模拟主要是实验室水道模拟,通过改变水道的基准面、流沙量、来水量以及水道高度来观察阶地的形成及河流的加积和侵蚀过程,应用此方法 Schumm^[35]得到了复杂响应阶地的形成原因。而当前的模拟主要是通过计算机重建现实系统以建立理想状态下阶地的发育模式^[36]。自然系统非常复杂,其发展需要经历很长时间,实验室模拟只能够揭示这些复杂系统的一个短期的函数关系^[37],而计算机模拟则可以恢复长尺度的河流过程,迅速地成为研究者们理解地貌系统演化的重要途径。

河流阶地主要是由于气候、构造及基准面的变化打破了河流平衡状态而下切形成的^[38],通过改变流量和沉积物量及地面抬升速率(分别反映气候和构造因素)的模拟结果显示形成的阶地可能很快就被侧向侵蚀掉,在地面抬升速率为 0.1 m/ka 时,一些阶地能够很好的保存下来^[39]。Veldkamp^[32]设置了不同的抬升速率背景,输入 10 次冰期—间冰期旋回的气候记录,当地面抬升速率为 0.02 m/ka 时,不能形成阶地;当抬升速率为 0.18 m/ka 时,模拟显示只能形成少量的阶地;当抬升速率为 0.11 m/ka 时,河流能够对气候变化做出全面的响应,形成多达 10 级阶地,即每次气候变动导致一级阶地的形成(图 3)。

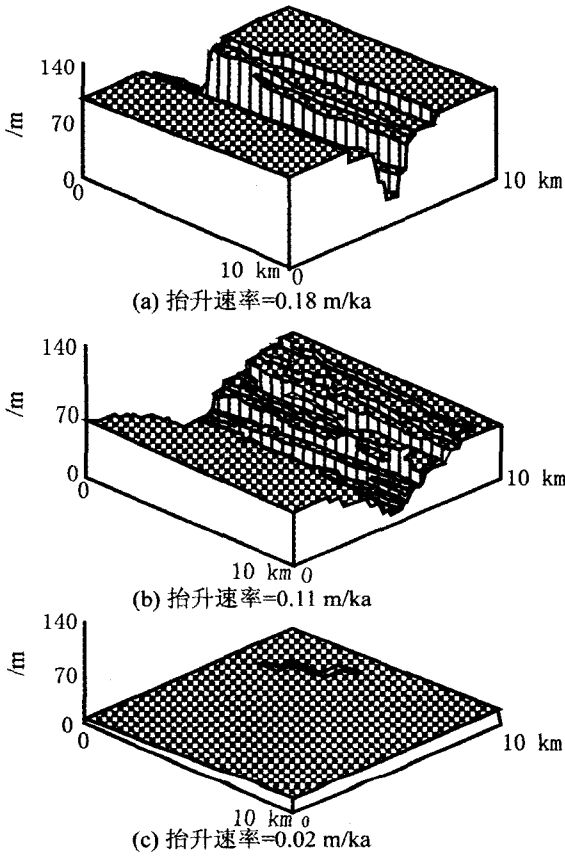


图 3 在不同抬升速率下河流对气候旋回的响应^[32]

Fig. 3 Response of the river with different uplifting rates to climatic cycles.

通过模拟可以看出,阶地的形成是在构造和气候共同作用下形成的,只有当构造抬升和气候变化达到一个合适的数值时,河流对外界的响应才最为敏感,形成多级的阶地。这个理论在现实自然界中得到了很好的应用,例如邢成起^[40]在对黄河中游河流阶地的研究中,也发现导致河流下切的大范围构造抬升与强冷干气候紧密相关,两者共同组成了构造—气候旋回。同时基于年代学与形态学,潘保田^[16,29]进一步把兰州段黄河阶地的形成解释为地面抬升与气候变化耦合作用的结果。

4 从河流阶地到河流冲积物高分辨率分析

河流阶地冲积物的研究是伴随着阶地研究的深入和测年技术的发展而兴起的。河流沉积物主要反映了第四纪周期性的气候变化,并能够反映古洪水事件^[41-43]。在构造下沉区,巨厚的河流沉积物能够较完整的记录气候变化的信息。Nádor^[44]对匈牙利 Pannonian 盆地的河流沉积物进行了研究,发现它记录了 2.6 Ma BP 以来的气候变化信息,并对其进行了粒度、磁化率及孢粉分析,认为河流沉积物能够很好的与深海氧同位素曲线进行对比,高磁化率主要对应于粗砂层,并且这些粗砂层中孢粉组合反映的是暖期气候,反之亦然。同时认为是米兰科维奇周期控制着河流的沉积,这无疑是对记录气候变化“三个秘籍”(冰芯、黄土和深海沉积物)的有力补充。河流阶地冲积物主要是指河漫滩相物质,河漫滩沉积主要是由间歇性洪水导致的,并能够与气候变化进行较好的对比。一般认为,沉积物粒度的大小直接反映了沉积水动力状况,细粒和粗粒物质分别代表了河流能量降低和增强的阶段^[45]。较大的洪水淹没河漫滩的深度较大,河流动力较强,能够沉积粗颗粒的物质,较小的洪水则相反。河流水动力强弱受到流域气候和环境的控制,例如降水与植被等^[46-47]。同时洪水规模的强弱能导致河流在两种模式之间发生相互转换(曲流和辫流相互转化)。

Lewis^[48]通过河流沉积物的特征及其包含的替代性指标指示了气候快速变化的信息,(1)沉积相的变化;粒径的变化反映了能量状态及沉积物状况,相变反映了流量特征及沉积物供应状况;(2)沉积物中不整合面的存在反映了沉积环境的重大变化及河流系统对外界的调节;(3)沉积物平面的几何形态以及加积和下切的趋势能判断沉积学特征,河型变化指示了沉积物供应与流量变化,上述特征可能是由于

河流内部调整导致的,不需要外部气候变化的调节;(4)沉积物中的孢粉、植物化石、甲虫及软体动物;(5)年代的确定(对具有明显侵蚀面的地方进行测年),使冲积物与其它沉积记录进行对比成为可能。通过上述研究,能够利用已知气候信息较好的解释河流沉积序列对气候变化的响应。

5 结语

河流阶地的研究是随着科学技术的发展而不断完善的,从早期的定性描述到现代的精确年代的测定,使人们对阶地发育历史和阶地形成模式有了更加深入的认识,并衍生出了许多新的研究方向,能够利用阶地的物理参数和年代学特征来演化区域构造发展史和气候信息。但是,河流阶地的研究远没有达到完美的地步,一是某些地区缺乏足够的测年材料,使阶地的年代存在着较大的不确定性;二是河流阶地的研究的深入程度不够,在某些地区甚至是空白,这导致对河流演化历史缺乏足够的认识;三是不同地貌条件下阶地的特征存在明显的差异,而这种差异并没有得到圆满的解释。这些不足无疑都阻碍我们完善阶地发育模式。

[参考文献]

- [1] 杨景春,李有利. 地貌学原理[M]. 北京:北京大学出版社, 2001.
- [2] Diana. Geological observationson in South America[M]. London: Simith, & Elder Co, 1846.
- [3] Lyell C. Student's elements of geology[M]. London: John Murray, 1871.
- [4] Chambers R. Ancient sea margins an Memorials of changes in the relative level of sea and land[M]. London: W S Orrltd, 1848.
- [5] Home D M. Notice of some high-water marks on the banks of the river Tweed some of its tributaries, and also of drift deposits in the valley of the Tweed, Trans[M]. Edinburgh: Roy. Soc., 1875, XXVII:513-562.
- [6] Prestwich J. On the loess of the valley of the south of English of the Somme and the Seine[M]. Phil Trans Roy Soc Cliv, 1964:247-309.
- [7] Penck A. Versuch einer Klimaklassifikationauf physiographische Grundlage, Preussische Akademie der Akademie der Wissenschaften[J]. Sitz der Phys. Math., 1910, Kl. 12: 236-246.
- [8] Lilienberg D A. Osoveriemennikh dvizeniakh zie mnoy kory vmakedonii (Sum. On recent tectonic movements in Macedonia)[J]. Doklady AN SSSR, 1965, 165(1): 159-162.
- [9] Kaniev D. Kurilovskiat prag prez kvaternera (Res. Le seuil de Luorilo Durant le Quaternaire)[J]. Godishnik na Sofijski Uni-

- versitet, 1967, 58(2): 1-9.
- [10] 徐叔鹰. 陇中西部黄土区黄河及其支流阶地反映的若干问题[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1965, 17(1): 116-143.
- [11] Barbour G B. Pleistocene history of the Huangho[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1932, 44: 1143-1160.
- [12] 丁骝. 黄河流域之地形变迁及水系演进[A]//黄河研究资料汇编(第三种)[G]. 南京水利实验处, 1949.
- [13] Hetzel R, Niedermann S, Ivy-Ochs S, et al.. ^{21}Ne versus ^{10}Be and ^{26}Al exposure ages of fluvial terraces: the influence of crustal Ne in quartz[J]. Earth and Planetary Science Letter, 2002, 201: 575-591.
- [14] Repka J, Anderson R S, Finkel R C. Cosmogenic dating of fluvial terraces, Fremont River, Utah[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 152: 59-73.
- [15] Schildgen T, Dethier D P, Bierman P, et al.. ^{26}Al and ^{10}Be dating of late Pleistocene and Holocene fill terraces: a record of fluvial deposition and incision, Colorado front range[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27: 773-787.
- [16] 潘保田, 李吉均, 朱俊杰, 等. 兰州地区黄河阶地发育与地貌演化[A]//中国西部第四纪冰川与环境学术讨论会编. 中国西部第四纪冰川与环境[C]. 北京: 科学出版社, 1991: 271-277.
- [17] Maddy D, Tuncer D, Bridgland. An obliquity-controlled Early Pleistocene river terrace record from western Turkey? [J]. Quaternary Research, 2005, 63: 339-346.
- [18] Burbank D W, John Leland, Eric Fielding, et al.. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas[J]. Nature, 1996, 8: 505-510.
- [19] Clayton K M. River terrace[A]//Shotton F W, Ed. British Quaternary Studies. Recent Advances[G]: Oxford, Oxford University Press, 1977: 153-168.
- [20] 李吉均, 方小敏, 马海洲, 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.
- [21] 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): 281-391.
- [22] 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. 科学通报, 1998, 43(15): 1569-1574.
- [23] 鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 等. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(9): 855-864.
- [24] 刘小丰, 刘洪春, 高红山, 等. 渭河陇西段第七级阶地年代的确定及其构造意义[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 144-149.
- [25] 刘兴旺, 袁道阳, 葛伟鹏. 兰州黄河阶地高精度 GPS 测量与构造变形研究[J]. 西北地震学报, 2007, 29(4): 341-351.
- [26] Hus K J. Time and place in Alpine orogenesis[J]. Geol. Soc. London Spec. Pub., 1989, 45: 421-443.
- [27] Peter Molnar, Erik Yehorson Brown, B Clak Burchiel, et al.. Quaternary climate change and the formation of terraces across growing anticlines on the North Flank of Tien Shan, China[J]. The Journal of Geology, 1994, 102: 583-602.
- [28] Pan Baotian, Burbank B, Wang Y X, et al.. A 900Ky record of strath terrace formation during glacial interglacial transition in northwest China[J]. Geology, 2003, 31: 957-960.
- [29] 潘保田, 苏怀, 刘小丰, 等. 兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与形成原因[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 172-180.
- [30] Starkel L. Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas[J]. Quaternary Science Review, 2003, 22: 2189-2198.
- [31] Starkel L. Reflection of the glacial-interglacial cycle in the evolution of the Vistula river basin[J]. Terra Nova, 1994, 6: 486-494.
- [32] Veldkamp A. Simulating internal and external controls on fluvial terrace stratigraphy: a qualitative comparison with the Maas record[J]. Geomorphology, 2000, 33: 225-236.
- [33] Hattingh J. Fluvial response to allocyclic influences during the development of the lower Sundays river, Eastern Cape, South Africa[J]. Quaternary International, 1996, 33: 3-10.
- [34] Ding Z L, E Derbyshire, S L Yang, et al.. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta_{18}\text{O}$ record[J]. Paleoceanography, 2002, 17(3): 1-21.
- [35] Schumm S A. The fluvial system[M]. New York: Wiley, 1977.
- [36] Elzas M S. Systemen modellen[M]. Landbouwkundig tijdschrift, 1978: 90-8A.
- [37] Schumm S A, Mosley M P, Weaver W E. Experimental fluvial geomorphology[M]. New York: Wiley and Sons, 1987.
- [38] Dury G H. Rivers and river terraces[M]. London: Macmillan, 1970.
- [39] Veldkamp A, Vermeulen S E J W. River terrace formation, modeling, and 3-D graphical simulation[J]. Earth Surface and Landform, 1989, 14: 641-654.
- [40] 邢成起, 丁国瑜, 卢滨传, 等. 黄河中游河流阶地的对比及阶地系列形成中构造作用的多层次性分析[J]. 中国地震, 2001, 17(2): 187-201.
- [41] Blum M D. Genesis and architecture of incised valley fill sequences: a Late Quaternary example from the Colorado river, Gulf Coastal Plain of Texas[A]//Weimer P. Posamentier H (Eds). Siliciclastic Sequence Stratigraphy-Recent Developments and Applications[G]. Memoirs: American Association of Petroleum Geologists, 1994, 58: 259-283.
- [42] Mol J. Weichselian and Holocene river dynamics in relation to climate in the Halle-Leipziger Tieflandsbucht (Germany)[J]. Eiszeitalter und Gegenwart, 1995, 45: 32-41.
- [43] 刘小丰, 潘保田, 高红山, 等. 渭河 L9 时期(0.87-0.94 Ma)古洪水事件的特征研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 247-250.

- tions, Vol. 1[C], Paris; Dunod, 1968;341-345.
- [39] Castro G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands [J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1975, 101(6): 551-569.
- [40] Gaskin P N, Raymond G P, Addo-Abedi F Y. Repeated compressive loading fo a sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(2): 798-802.
- [41] Kazuya Y, Toyotoshi Y, Kazutoshi H. Cyclic strength and deformation of normally consolidation clay [J]. *Soils and Foundations*, 1982, 22(3):77-91.
- [42] 熊建国, 许贻燕. 分层土自振特性分析[J]. *地震工程与工程振动*, 1986, 6(4): 21-35.
- [43] 黄锋, 楼志刚. 排水条件对海洋粉质土动力特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 1997, 19(1): 22-29.
- [44] 唐益群, 黄雨, 叶为民, 等. 地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1566-1570.
- [45] 曾长女, 刘汉龙, 丰土根, 等. 饱和粉土孔隙水压力性状试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1963-1966.
- [46] 关彦斌, 肖军华, 陈建国. 循环荷载下压实粉土的动力特性[J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(2): 28-31.
- [47] 肖军华, 刘建坤. 循环荷载下粉土路基土的变形性状研究[J]. *中国铁道科学*, 2010, 31(1): 1-8.
- [48] 陈春霞. 软土中已运营地铁隧道的现场动力试验与分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [49] 林永国, 廖少明, 刘国彬. 地铁隧道纵向变形影响因素的探讨[J]. *地下空间*, 2000, 20(4): 264-267.
- [50] 陈基炜, 詹龙喜. 上海市地铁一号线变形测量及规律分析[J]. *上海地质*, 2000, 74(2): 51-56.
- [51] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 284-288.
- [52] 郑永来, 潘杰, 韩文星. 软土地铁隧道沉降分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(1): 67-73.
- [53] Fan ZY, Zhang DM, Huang HW. Safety analysis on longitudinal settlement and crack width of shield tunnel segments in operation period [A]//*International Symposium on Safety Science and Technology* [C]. Beijing: Peoples R. China Press, 2008;2249-2252.

(上接 199 页)

- [44] Nádor A, Lantos M, Tóth-Makk Á. Milankovitch — scale multi—proxy records from fluvial sediments of the last 2.6 Ma, Pannonian Basin, Hungary[J]. *Quaternary Science Review*, 2003, 22: 2157-2175.
- [45] 赵景波, 周晓红. 咸阳市近代渭河洪水演化研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(2): 103-110.
- [46] Vandenberghe J. Timescales, Climate and river development [J]. *Quaternary Science Review*, 1995, 14: 631-638.
- [47] Vandenberghe J. The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary [J]. *Quaternary International*, 2002, 91: 17-23.
- [48] Lewis S G, Maddy D, Scaife R G. The fluvial system response to abrupt climate change during the last stage: the Upper Pleistocene River Thames fluvial succession at Ashton Keynes, UK[J]. *Global and Planetary Change*, 2001, 28: 341-359.