

我国黄土的微结构类型与震陷区域划分^①

邓 津^{1,2,3}, 王兰民², 张振中², 孙军杰^{1,2,3}, 钟秀梅^{1,2}

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要:对比我国中西部成土年代相近的浅层风成黄土(不考虑地形地貌), 针对不同成土环境下微观结构及其震陷性大小, 初步将中西部黄土的微结构类型划分为五类: I, 近砂源快速降砂微结构; II, 强降尘弱成壤微结构; III, 冷干慢速降尘弱成壤微结构; IV, 中湿成壤微结构; V, 温湿成壤微结构。微结构类型对于震陷性等工程性质分析有借鉴作用, 具体体现在颗粒大小、粒径分布、排列方式, 颗粒之间的胶结程度、接触方式等。通过分析黄土地区气候变化引起的地域性微观结构类型差异, 区域性微观结构的气候形成机制来研究黄土的致灾特征, 进一步获得黄土地区土层微结构的地域性差别导致的震陷变形强弱信息。这对于黄土建筑工程场地的设计以及提出针对性的防护措施有重要意义。

关键词: 黄土; 微观结构类型; 气候环境; 震陷区域划分

中图分类号: P642.13+1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0664-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0664

The China Loess Microstructure Types and Its Seismic Subsidence Zones Divided

DENG Jin^{1,2,3}, WANG Lan-min², ZHANG Zhen-zhong², SUN Jun-jie^{1,2,3}, ZHONG Xiu-mei^{1,2}

(1. Earthquake Administration of Gansu Province (Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA),

Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Loess forms from dust being deposited over the millennia under varied climatic conditions in the Loess Plateau of China through climate evolution. Influenced by monsoon, rainfall, temperature, dust characteristics, and so on. By forming under different regional climatic conditions, loess exhibits a wide range of microstructural morphologies. From its microscopic structure, we can obtain datum on particle size distribution, pore size distribution, and cementing quality, which can more fully elucidate the formation of regional loess. Because the microstructural characteristics of loess are directly related to dynamic deformation, strength, and arrangement mode, the features of loess microstructural formation types and regional deposition by particle size can be studied by an intuitive method in seismic hazard analysis. In contrast, in similar Midwestern shallow eolian loess soils (not considering landform), analysis of the microstructure under different soil environments is by sediment size. Western loess-forming microstructures are divided into five categories: (1) near a sand source, formed by fast sand dropping; (2) weakly

^① 收稿日期: 2013-02-18; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013030

基金项目: 中国地震局兰州地震研究所科技发展基金(2011M02); 国家自然科学基金项目(No. 51209186, 41371090, 50978239)

作者简介: 邓 津(1970-), 女(汉族), 四川隆昌人, 博士, 副研究员, 主要从事黄土微结构及地震学研究。E-mail: dengjin@gssb.gov.cn

通讯作者: 王兰民, 男, 研究员, E-mail: wanglm@gssb.gov.cn

formed by strong sand dropping; (3) formed in cold weather by slow sand dropping; (4) weakly formed in warm, damp weather; and (5) strongly formed in warm, damp weather. Differences in particle size, particle size distribution, particles between, degree of consolidation, contact, and so on, determine the microstructure types in the sediments, which have important effects on engineering properties. By analyzing the formation mechanism of loess by study of the microstructure in regional climates, and then further by analyzing the loess area, the regional differences in soil microstructure can determine the sediment deformation (either strong or weak). Such information is useful in building engineering site design and in determining corresponding protective measures.

Key words: Loess; microstructure types; Climatic environment; Seismic subsidence

0 引言

青藏高原对黄土地区形成气候的影响有很多深入的研究成果^[1-4]。由于黄土高原地形和降雨分布的不同,黄土的形成体现出季风作用的区域性特征。黄土的气候形成机制和成因的研究见文献^[5-8]。黄土地层中砂粒含量的变化可以反映该剖面与沙漠源区距离的变化,可作为气候变化引起沙漠边界变动的替代性指标^[9-10]。以往黄土的区域性分布差异较多关注的主要是黄土粒度分布及粒度组成。马兰黄土自北向南可简单分为砂黄土、黄土及粘黄土三个带^[11]。王永炎^[12]对黄土粒度组成进行了细致的区域性划分。

黄土是经过黄土高原多次气候演变和降尘沉积形成的,气候条件多种多样。受到季风回旋、降雨量、温度和尘暴等不同地区气候条件的影响,所形成的微观结构形态也有很大差别^[13-14]。由于颗粒粒径仅仅是黄土微观结构所有指标中的一项指标,而微观结构因为能获取颗粒尺寸大小、孔隙分布数据、胶结状况等丰富的信息,更能全面反映黄土形成区域性。关于黄土的结构特点和气候的关系研究,如陇西黄土的地质调查报告^①;西北形成气候与黄土微观结构特征和力学性质有关^[15]。

土力学方法是进行土结构性量化研究的最为现实和有效的方法,但是传统的本构模型主要是采用宏观指标来建立土本构模型和屈服方程,而考虑实际土微观结构差异的研究较少。由于土的这些微观结构特点还与动变形强弱直接相关,根据微观结构性指标可反映土层的动强度大小,如土的微结构类型与震陷性的研究^[16]。本文结合黄土微结构形成特征类型对震陷性大小的进行区域划分,可作为地震灾害分析的一种直观方法。

1 震陷系数的测试方法

采集中西部相关区域的风成沉积黄土样品,取土地点为典型黄土坪或塬,取样深度为 5~6 m。由于考虑风成黄土沉积年代近似,没有加入地形地貌的影响。对取土样品进行高倍电子显微镜(kyky-2800)扫描测试,方法见文献^[14]。同时用动三轴测试土样震陷系数。

震陷系数(即残余应变)采用电磁式振动三轴仪测试。这一试验系统可将任意波形的轴向荷载通过加荷活塞的上下运动直接施加到试样上。挖取深度 4~6 m 的原状土样,在原有上覆压力下在电磁式振动三轴仪上固结,进行试验。固结比由下式确定:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad K_C = \frac{\sigma_{1C}}{\sigma_{3C}} = \frac{1}{K_0}$$

对西北黄土一般 φ 在 24° 左右,通常取 $K_C = 1.69$ 。

当黄土试样在非均等固结状态($K_C > 1$)时,动应变振幅随着动应力的循环作用而向压缩方向偏移,动应力不能全部恢复原位,而保留不可恢复的残余应变。震陷系数定义为动应力作用停止后,土体残留的应变值。在循环荷载下的动三轴震陷试验,震陷系数取为动应力作用前后(H')试样的高度差与动应力作用前试样高度(H)之比。即

$$\epsilon_p(N) = \frac{H - H'(N)}{H}$$

式中, $\epsilon_p(N)$ 表示动应力往返作用 N 次所产生的残余应变。 N 一般取为 10 次。

2 不同区域黄土的微结构类型

根据主要风沉积成土黄土区域的微观结构,将

① 甘肃省地质矿产局. 甘肃省兰州市城市环境地质综合研究报告[R]. 甘肃省地质矿产局,1989:71-89.

震陷系数指标作为划分依据,将黄土微观结构类型划分为5类。

2.1 近砂源快速降砂微结构(I)

近砂源快速降砂微结构(I), I类结构的主要成土区为靠近内蒙边界的西海固地区,为砂黄土地区。靠近腾格里沙漠的民勤县为130~180 km,如西吉、海原、固原、环县等地黄土为标志的显微结构。



(a) 西吉县任家庄滑坡黄土, H=4 m, 放大倍数500倍



(b) 海原蒿子川黄土, H=4 m, 放大倍数500倍

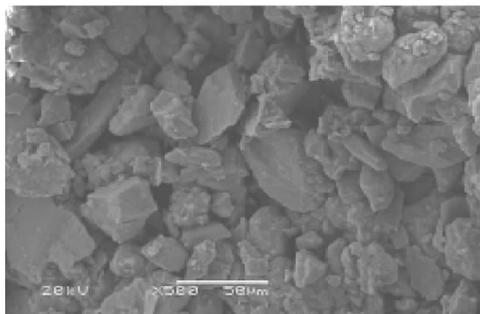
图1 I类结构典型 SEM 图像

Fig.1 Typical SEM images of I microstructure in loess

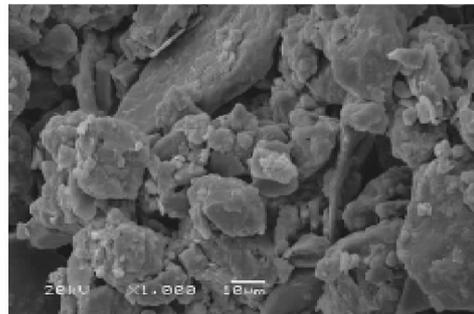
图中测量的西吉和海原的最大粒径为245~276 μm,这些地区离砂源较近,沉积的砂粒大而清晰。因为土颗粒粒径较大,土粒间的分子吸引力相对较小,颗粒间几乎没有联结,因此砂粒之间容易产生滑动变形。这个地区的黄土灾害特点为具有中强震陷性(动荷载下的沉降变形能力),为潜在的具有滑坡特性,以及有发生震陷、液化危险的土层。

2.2 强降尘弱成壤微结构(II类)

图2分别为兰州青白石和榆中两个地区黄土的



(a) 青白石黄土, H=5 m, 放大倍数500倍



(b) 榆中黄土, H=4 m, 放大倍数1 000倍

图2 II类结构典型 SEM 图像

Fig.2 Typical SEM images of II microstructure in loess

II类黄土有架空孔隙,但孔隙较为紧密,属中等震陷性黄土,黄土的震陷系数为1.5~5.5%^[17]。如图2(a)的兰州青白石黄土由于表现为单粒堆积,并形成于干旱的气候条件,容易发生振动变形,以及粉土液化。此外,山坡上的土层也会由于土粒微结构之间胶结弱,接触面小,有产生震动变形、液化、滑

特点为冷湿快速降砂的弱成壤结构。颗粒堆积紧密,胶结弱。由于靠近砂源,且为西北风向沉积,砂砾颗粒很大。图1(a)的西吉4 m深度土样,取样于西吉县任家庄的一处滑坡。土样的电镜图像显示胶结极为不充分,大颗粒之间几乎没有胶结力,震陷系数为4~6.1%^[17]。图1(b)为海原蒿子川4 m深度土样,同样有很多大粒径的砂粒成分。

微观结构。部分兰州黄土,如青白石、皋兰、榆中、靖远的黄土原的风积黄土为这一类型。与I类黄土相比,离西北风向主要砂源远。特点为粉砂颗粒堆积速度较快,堆积较紧密,成土厚度较大,这一带的黄土厚度最大的地区如靖远黄土厚度达到505 m,其中靖远离西北方向风源近,粉砂颗粒粒径范围在70~100 μm。II类结构形成于干冷和强降砂的气候条件。

坡、湿陷、泥流等危险。

2.3 冷干慢速降尘弱成壤微结构(III类)

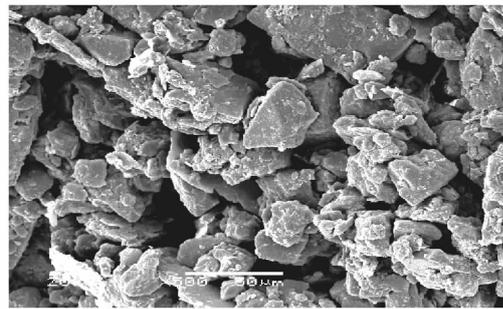
永登、定西、部分兰州等地区的风积黄土表现为粉砂颗粒松散堆积弱胶结的成壤结构(III类),距砂源距离比II类黄土远。胶结作用不充分,孔隙大。如图3(a)的定西黄土粉砂粒径为42~60 μm;如图

3(b)的永登黄土砂粒粒径为 58~70 μm。由于距沙源较第 II 类远,风砂降落颗粒比第 I 种结构的砂粒直径小,比重小,加上气候干旱,无法紧密堆积。降

水少及温度低使得风化成壤作用弱,颗粒之间形成架空的蜂窝状,孔隙比大,干密度低,这种结构是形成巨厚型黄土状堆积物的重要特征。



(a) 定西黄土, H=4 m, 放大倍数500倍



(b) 永登黄土, H=4 m, 放大倍数500倍

图 3 III类结构的典型 SEM 图像

Fig. 3 Typical SEM images of III microstructure in loess

III类型的黄土有大量的架空孔隙,因此有很强的震陷性^[18],属强震陷性黄土。如 1995 年永登 5.8 级地震时永登黄土的震陷系数达到 7.99%^[17],是受地震影响破坏比较严重的地区,产生了强烈的黄土地表变形和多处山体滑坡。

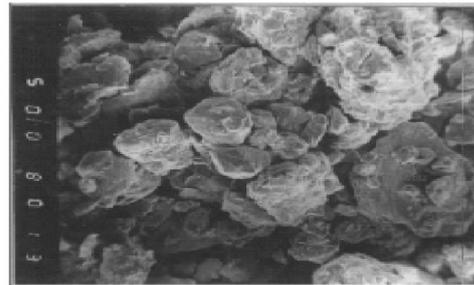
结构。这种结构形成于风砂降落缓慢、较为潮湿的成壤环境。颗粒之间的胶结强度比III类结构强。如图 4(a) 的东乡黄土聚合颗粒粒径为 70~90 μm 左右;图 4(b)的静宁黄土砂粒粒径 35~106 μm。在粉砂颗粒上或周围吸附有很多胶结状的粘粒,或团块状的粘粒集合。当时的冬季风作用强度中等,降尘速度慢,但夏季雨量较为充沛,尤其涇源的粘粒化较其它地区的高。

2.4 中湿成壤微结构(IV)

六盘山以西以及华家岭以东的静宁、会宁、通渭、庄浪、陇西、靖远、东乡等地的风积黄土,如图 4。形成气候较温湿,为弱风成沉积的中强成壤的IV类



(a) 东乡黄土, H=5 m, 放大倍数500倍



(b) 静宁黄土, H=5 m, 放大倍数500倍

图 4 IV类结构的典型 SEM 图像

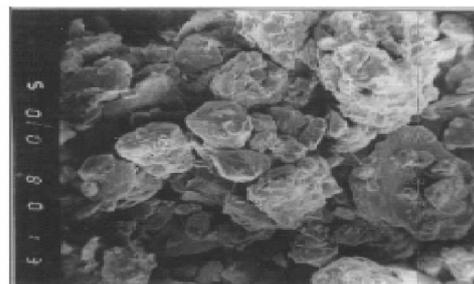
Fig. 4 Typical SEM images of IV microstructure in loess

由于仅有少量架空孔隙存在使得这一地区的黄

土为低震陷性黄土。震陷系数在 1.5%~3.68%^[17]



(a) 华亭黄土, H=5 m, 放大倍数1 000倍



(b) 西峰黄土, H=5 m, 放大倍数500倍

图 5 V类结构的典型 SEM 图像

Fig. 5 Typical SEM images of V microstructure in loess

之间,具有震动滑坡和塌陷的潜在危险。

2.5 温湿强成壤微结构(V类)

华亭与西峰地区的降雨量比六盘山以西丰沛,这一区域的黄土位于靠近六盘山以东附近的西峰塬区,气候比甘肃其它地区温湿。如图5(a)和(b)分别为甘肃华亭、西峰地区的黄土微结构照片。

颗粒粒径最大为40 μm 左右,上面覆盖了大量的粘粒,与部分西安黄土的镶嵌胶结结构相比,属于中强胶结的架空结构。这一区域的黄土由于胶结较为充分,属于弱震陷性黄土,其中西峰黄土的震陷系数仅为0.9%^[17],因此这些地区的相关土层,仅会产生轻微的震动变形。

3 微观结构类别的区域划分及数据依据

黄土高原黄土的粒度组分^[12],总的情况是自西北向东南逐渐变细,晚更新世黄土粒度区域变化如下:陕西榆林—靖边一线以北为毛乌素沙漠分布区,从这一线向东南至陕西子长—甘肃环县一带之间,黄土颗粒粗,0.25~0.05 mm的颗粒占5%~25%,0.05~0.01 mm颗粒占50%以上,0.005~0.01 mm粒级颗粒含量在20%以上,<0.005 mm的粘粒矿物含量在6%~16%之间;这一带东南到洛川—平凉一线西北,黄土颗粒变细,0.25~0.05 mm粒级颗粒占5%左右,0.05~0.01 mm粒级颗粒占50%以上,0.01~0.005 mm粒级颗粒占20%左右,<0.005 mm的粘粒级占21%左右。在我国自西北向东南,呈带状分布的沙漠(0区)—砂黄土(I区)—典型黄土(II区)—粘黄土(III区)—细粘黄土(IV区,秦岭黄土),为第四纪以来季风气流地质作用形成的一个统一的特殊地质体。

表1 土的微结构类型与划分指标

Table 1 The microstructure of loessl types and dividing index

微结构类型	粉砂颗粒粒径/ μm	干密度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	震陷系数	距砂源距离/km	形成气候条件及微结构特点
I	245~276	12.56~14.22	4~6.1%	40~180	干旱少雨,近砂源;弱胶结,砂粒为主
II	70~100	12.45~13.34	1.5~5.5%	40~320	干冷和强降砂;粉粒为主,中强胶结
III	42~80	11.85~12.25	5~8%	210~290	干冷,弱降尘;大孔隙,弱胶结
IV	40~60	11.26~12.64	1.5~3.68%	180~280	冷湿,降雨丰沛;团状胶结,粉粒为主
V	30~40	12.16~12.43	0.9~2%	280~350	温暖潮湿,砂源远;中强胶结,粘粒为主

将我国中西部风成黄土的几类主要微观结构类型分布区域标于图6,如I类微观区域包括景泰,海原,固原等以往的沙黄土地区;II类微观区域包括靖远,榆中等地;III类微观区域包括定西,兰州,皋兰,永登等地,多为低粘性粉土区;IV类微观区域包括华家岭以东的天水,通渭,临洮,静宁等地区;V类微观

王永炎对黄土粒度组成的区域分布概括如下^[12]:北部梁峁区包括榆林、靖边等地,这一带紧邻毛乌素沙漠,黄土颗粒粗。大于0.05 mm的细砂颗粒含量高达44%;黄土塬区包括洛川、长武及西峰等地,细砂含量低,多数样品含量为12~15%;南部台塬包括武功、西安等地细砂含量很低,一般不超过10%,粘粒含量很高,达25~29%,甚至超过30%;西部地区包括西宁、兰州及靖远等地细砂含量普遍较低,一般小于20%,粉粒含量高,粘粒含量低,平均粒径较大;东部地区包括太原、吉县、陕县,洛阳及祁岭等地细砂含量不超过20%,绝大部分样品的含量为8~12%,粘粒含量一般小于20%,多数样品的含量为15%左右,平均粒径比西部小。

以上的分析概括了土的区域性差异,但具体到特定地区,无论从深度的不同,还是从成土区域气候环境的不同,土的微结构还是有很大差异的。例如榆中和永登黄土,相隔仅几十公里,微结构类型不同,前者震陷性比后者低。以陇西黄土为例,以往均作为 Q_3 黄土,但不同地区的 Q_3 黄土微结构类型差别导致工程力学性质差异很大^[19]。因此,黄土工程场地均需要更加细化的区域分类,应采取针对性的防护措施。

根据取土测试后获得的微结构照片,量取照片中粉砂颗粒粒径,搜集当地气候条件,结合不同气候区域下的微结构类型,综合分析后,如表1所示。表1中分别列举了反映区域差异的五类微观结构类型(I),(II),(III),(IV),(V)的粉砂颗粒粒径范围,土样密度,震陷系数大小,距离砂源距离,形成区域气候条件及胶结结构特点。

区域主要包括平凉,西峰等地区;西安,宝鸡黄土微观结构为特殊的秦岭黄土类型。

4 结果与讨论

(1) 本文分析了甘肃主要风成黄土沉积区域微观结构,取样地点为黄土坪或黄土塬的典型风成黄

土,取土深度为 5~6 m。根据土样的微观结构分析:划分了五类微结构类型:近砂源快速降砂微结构(I),强降尘弱成壤微结构(II);冷干慢速降尘弱成壤微结构(III);中湿成壤微结构(IV);温湿强成壤微结构(V)。

(2) 本文提出将黄土沉积环境、所具有的微观结构特征与震害区域划分相结合的研究思路。通过

分析区域性微观结构的气候形成机制来研究黄土的致灾特征,可以获得黄土地区土层微结构的地域性差别导致的震陷变形强弱信息,这对于黄土建筑工程场地的设计以及提出针对性的防护措施有重要的参考价值。但还需要进一步的工作,比如增加区域,针对不同地形和高程细化微结构区域的划分等。

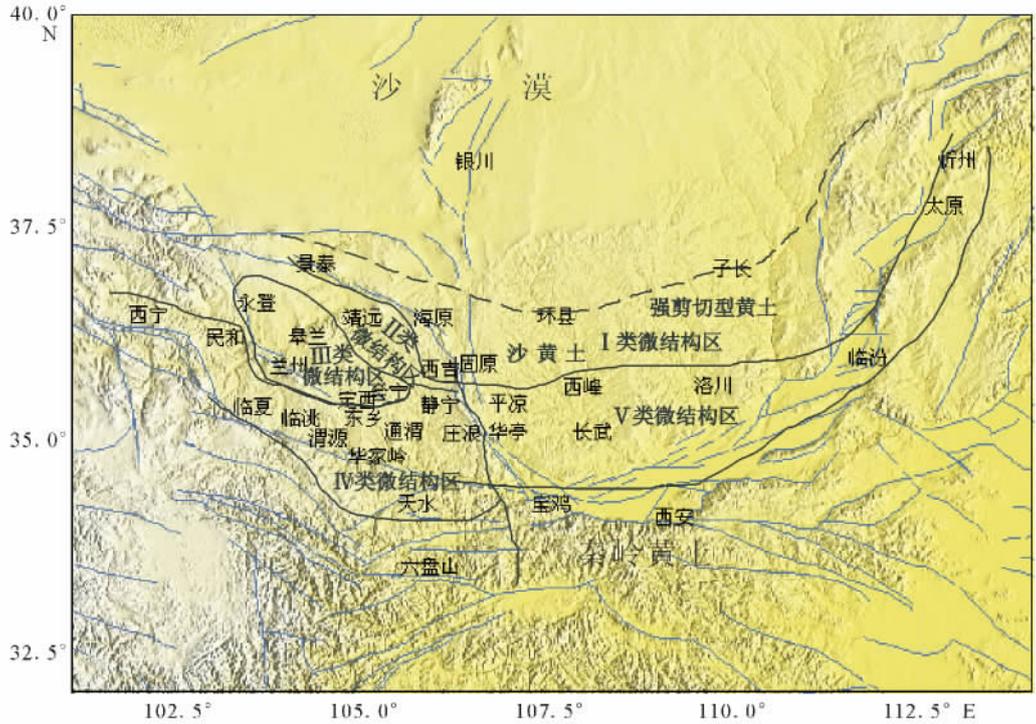


图 6 微观结构类型区域划分图(图中标注为近砂源快速降砂微结构(I),强降尘弱成壤微结构(II);冷干慢速降尘弱成壤微结构(III);中湿成壤微结构(IV);温湿强成壤微结构(V)及秦岭黄土微观结构分布区域)

Fig. 6 The division map of microstructure types of loess

参考文献 (References)

[1] Lu H Y, X WANG. The Plateau Monsoon Variation during the Past 130 kyr Revealed by Loess Deposit at Northeast, Qinghai-Tibet (China)[J]. *Global and Planetary Change*, 2004,41:207-214.

[2] Ruddima W E, J E Kutzbach. Forcing of Late Cenozoic Northern Hemisphere Climate by Plateau Uplift in Southern Asian and American West[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989,94:18409-18427.

[3] Thomas S, A J Imon, Hua-yu LU. Sedimentation and Diagenesis of Chinese Loess Implications for the Preservation of Continuous, High Resolution Climate Records[J]. *Geology*, 2006, 34(10):849-852.

[4] 李吉均,文世宣,张青,等.青藏高原隆起的时代、幅度与形式的探讨[J]. *中国科学: B 辑*, 1979, (6): 608-616. LI Ji-jun, WEN Shi-xuan, ZHANG Qing, et al. Investigation on the Uplift Times, Amplitude and Styles of Tibet Plateau[J]. *Science in China: Series B*, 1979, 6: 608-616. (in Chinese)

[5] Tsoar H, K Pye. Dust Transport and the Question of Desert Loess Formation[J]. *Sedimentology*, 1987, 34:139-153.

[6] Young R A, Wiersma J L. The Role of Rainfall Impact in Soil Detachment and Transport[J]. *Water Resources*, 1973, 9:1629-1635.

[7] H Wang, E Randall. Hughes Correlation of Climate Cycles in Middle Mississippi Valley Loess and Greenland ice[J]. *Geology*, 2003, 2:179-182.

[8] 刘东生,安芷生,朱炳泉. 中国黄土的堆积与演化[C]// 第三届中国第四纪地质会议论文集. 北京:中国科学院地球化学研究所, 1979: 1-31. LIU Dong-sheng, AN Zhi-sheng, ZHU Bing-quan. Accumulation and Evolution of Loess in China[C]// Preceding of the Third Quaternary Geology Conference. Beijing: Geochemistry Institute, Chinese Academy of Sciences, 1979: 1-31. (in Chinese)

- [9] Rea D K, S Hovan. Grain Size Distribution and Depositional Processes of the Mineral Component of Abyssal Sediments Lessons from the North Pacific[J]. *Paleoceanograph*, 1995, 10:251-258.
- [10] Sun D H, J Bloemendal, D K Rea. Grain-size Distribution Function of Polymodal Sediments in Hydraulic and Aeolian Environments and Numerical Partitioning of the Sedimentary Components[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4): 263-277.
- [11] 朱慕仁. 中国黄土地基工程分类体系及其定名商讨[C]//中国黄土分类定名及其应用研讨会. 西安:陕西人民教育出版社, 1989.
ZHU Mu-ren. China loess Foundation Engineering Classification system and name to discuss[C]//China Loess Classification Name and Application Workshop. Xi'an, Shaanxi People's Education Press, 1989. (in Chinese)
- [12] 王永炎, 林在贵. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京:科学出版社, 1990.
WANG Yong-yan, LIN Zai-guan. The China loess structure features and its physical and mechanical properties [M]. Beijing, Science Press, 1990. (in Chinese)
- [13] 赵景波. 沉积理论与黄土高原环境演变[M]. 北京:科学出版社, 2002:56-70.
ZHAO Jing-bo. Sedimentary Theory and the Loess Plateau Environment Evolution[M]. Beijing, Science Press, 2002: 56-70. (in Chinese)
- [14] DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong, et al. Microstructure Characteristics and Forming Environment of Late Quaternary Period Loess in the Loess Plateau of China [J]. *Environmental Earth Sciences*, Springer Berlin / Heidelberg, ISSN: 1866-6280 (Print), 1866-6299 (Online): 2009. 04, 21.
- [15] 雷祥义. 黄土高原南部晚更新世黄土地层划分、显微结构及力学性质特征[J]. *第四纪研究*, 1992, 12(2):128-135.
LEI Xiang-yi. Stratigraphic Division, Microfabric and Mechanical Characteristics of the Late Pleistocene Loess in the Southern Loess Plateau of China[J]. *Quaternary Research*, 1992, 12(2):128-135. (in Chinese)
- [16] 邓津, 王兰民, 张振中. 黄土显微结构特征与震陷性[J]. *岩土工程学报*, 2007, 27(4):542-548.
DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong. Microstructure Characteristics and Seismic Subsidence of Loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, (4):542-548. (in Chinese)
- [17] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社, 2003:12-82.
WANG Lan-min. Loess Dynamics[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003:12-82. (in Chinese)
- [18] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京:地震出版社, 1999: 100-102.
ZHANG Zhen-zhong. Loess Seismic Hazard Prediction[M]. Beijing: Beijing Earthquake Press, 1999:100-102. (in Chinese)
- [19] 樊成意, 梁收运. 甘肃省30年来崩滑灾害特征[J]. *西北地震学报*, 2011, 33(B08):438-442.
FAN Cheng-yi, LIANG Shou-yun. Characteristics of Collapse and Landslide Disasters in Gansu Province within 30 Years [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33, B08:438-442. (in Chinese)