

DOI: 10.11779/CJGE2021S1014

# 地层划分对黄土高边坡稳定性分析的影响研究

蔺晓燕<sup>1,2</sup>, 杨 泽<sup>3</sup>, 李 萍<sup>4</sup>, 杨永辉<sup>5</sup>, 李同录<sup>4</sup>

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 陕西铁路工程职业学院, 陕西 渭南 714000; 4. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 5. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以山西临汾—吉县高速公路地区坡度为45°, 坡高为100 m的黄土高边坡为例, 进行不同地层分层方法研究。利用SLOPE/W软件建立了4种分层方法模型, 采用极限平衡法Morgenstern-Price法求解不同模型的稳定系数, 探求不同地层分层方法对黄土高边坡稳定性研究的影响, 以获得最优地层划分方案。分析结果表明, 针对不同地层划分方法计算所得的稳定系数有一定差异, 随着分层数的增加, 稳定系数越大, 边坡稳定性越好。经综合对比分析结果显示, 按照地质时代划分黄土地层的方法能够满足建设工程领域的研究需求, 保证计算结果准确性, 且较少的工作量能够提高效率节约成本, 这对黄土高边坡稳定性的计算和分析更具有工程推广意义。

**关键词:** 黄土; 高边坡; 地层划分; 稳定性分析

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S1-0076-05

**作者简介:** 蔺晓燕(1982—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土工试验仪器的研发、边坡工程及地质灾害的防治研究工作。  
E-mail: xylin@xsysu.edu.cn。

## Effects of stratigraphic division on stability analysis of high loess slopes

LIN Xiao-yan<sup>1,2</sup>, YANG Ze<sup>3</sup>, LI Ping<sup>4</sup>, YANG Yong-hui<sup>5</sup>, LI Tong-lu<sup>4</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 3. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China; 4. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 5. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Taking the high loess slope with a slope of 45° and a slope height of 100 m in Linfen-Jixian Expressway area of Shanxi Province as an example, different stratigraphic stratification methods are studied. The models for four stratification methods are established by using the SLOPE/W software, and the limit equilibrium method (Morgenstern-Price method) is used to solve the stability coefficients of different models. The influences of different stratification methods on the stability of the high loess slope are explored to obtain the optimal stratigraphic stratification methods. The analysis results show that the stability coefficients calculated by different stratigraphic stratification methods are different. With the increase of the number of stratifications, the larger the stability coefficient is, the better the slope stability is. In addition, through comprehensive comparative analysis, the method for dividing the loess strata according to the geological era can meet the research needs of construction engineering field. Moreover, less workload can improve efficiency and save cost, which is more significant for the calculation and analysis of the stability of high loess slopes.

**Key words:** loess; high slope; stratigraphic division; stability analysis

## 0 引言

边坡稳定性分析是工程地质及岩土工程的一个重要研究内容, 涉及到公路交通、矿山工程、水利水电工程等诸多工程领域。边坡稳定性受多种因素的影响, 主要可分内部因素和外部因素<sup>[1-3]</sup>。黄土高边坡由于其垂向跨度较大, 自上而下的土层物理力学性质有时差异很大, 研究其稳定性时应首先对黄土地层进行垂向的划分。已有黄土地层划分的研究主要是地质学家们运用土壤地层学、沉积学、古生物学、古地磁学以及地球化学等传统地质学方法对第四纪黄土进行时代划分<sup>[4-7]</sup>, 对于建设工程领域所关注的黄土物理力学性质涉及较少。

在工程建设领域, 广大工程技术人员对黄土基本物理性质和工程性质进行了深入的研究并成功应用在基础设施建设中<sup>[8-9]</sup>, 然而该系列成果仅依据湿陷系数将黄土粗略分为湿陷性黄土和非湿陷性黄土, 偏重于对湿陷性黄土的地基处理, 对于黄土高边坡问题较少论述。

基于此, 本文选取山西临汾—吉县高速公路地区黄土高边坡, 采用4种不同的地层划分方法: ①不分层, 即全坡高100 m为一层; ②全坡高平均分为3层;

③根据地质时代划分 3 层, 由上到下为  $Q_3$  黄土层(厚 20 m)、 $Q_2$  黄土层(厚 50 m)和  $Q_1$  黄土层(厚 30 m)<sup>[10-11]</sup>; ④每 10 m 为一层, 共 10 层。应用 SLOPE/W 软件分别建立模型, 用 Morgenstern-Price 法求解出不同模型的稳定系数, 通过对计算结果进行对比分析, 论证黄土地层按照地质时代划分应用于黄土高边坡工程研究的可行性, 探求不同分层方法对黄土高边坡稳定性研究的影响。

## 1 黄土物理力学性质及参数选取

以山西中部临汾—吉县高速公路地区黄土为对象开展系统研究, 选取坡度为 45°, 坡高为 100 m 的黄土高边坡现场钻孔取样, 测得 3 处钻孔连续土层的物理力学性质参数(见表 1~3)。

表 1 钻孔 1 黄土物理力学性质参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of loess samples from borehole No. 1

取土 深度 /m	物理性质			力学性质	
	含水率 w/%	湿密度 $\rho_w$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	干密度 $\rho_d$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
10	17.2	1.48	1.26	26.8	17.3
20	19.6	1.67	1.40	25.6	22.4
30	17.9	1.97	1.67	17.9	26.6
39	19.1	1.93	1.62	14.3	27.5
50	18.4	1.95	1.65	10.4	26.6
60	23.5	1.90	1.54	26.4	18.1
66	22.2	1.97	1.61	70.5	18.7
72	20.5	1.97	1.63	78.9	80.8
78	19.4	1.99	1.67	88.4	10.6
87	19.3	1.99	1.67	25.3	21.3
92	22.2	1.98	1.62	21.3	25.9
97	22.6	2.00	1.63	42.3	28.5
103	17.3	2.04	1.74	79.4	26.9

表 2 钻孔 2 黄土物理力学性质参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of loess samples from borehole No. 2

取土 深度 /m	物理性质			力学性质	
	含水率 w/%	湿密度 $\rho_w$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	干密度 $\rho_d$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
20	13.2	1.69	1.49	54.7	22.9
30	14.5	1.85	1.62	7.2	29.0
40	11.6	1.72	1.54	18.3	17.6
50	18.7	1.98	1.67	94.6	18.9
60	20.6	2.00	1.66	72.4	19.6
66	15.8	1.96	1.69	78.6	20.2
72	19.7	2.00	1.67	87.9	14.7
77	19.9	2.08	1.73	92.5	23.1
82	21.1	2.04	1.68	83.5	14.2
87	20.4	1.98	1.64	55.4	21.6
92	21.6	2.03	1.67	91.8	8.5
97	17.8	2.10	1.78	77.2	28.4
102	18.4	2.07	1.75	110.6	16.1

表 3 钻孔 3 黄土物理力学性质参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of loess samples from borehole No. 3

取土 深度 /m	物理性质			力学性质	
	含水率 w/%	湿密度 $\rho_w$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	干密度 $\rho_d$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	凝聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
10	19.4	2.02	1.69	39.3	23.3
20	19.4	1.80	1.51	18.8	26.0
30	19.4	1.70	1.42	23.5	17.1
40	16.6	1.77	1.52	66.6	20.4
50	20.9	1.94	1.60	41.3	22.1
60	19.0	1.98	1.66	66.3	16.7
65	23.7	1.96	1.58	49.8	19.8
70	20.4	1.73	1.44	11.8	22.4
75	19.6	1.99	1.66	45.9	17.0
80	21.9	1.99	1.63	28.3	22.3
85	22.4	1.99	1.63	48.5	20.9
90	23.7	1.99	1.61	74.7	14.8
95	21.3	2.02	1.67	46.4	30.1
100	20.8	2.01	1.66	83.4	12.2

由已测试验数据可知, 除了内摩擦角随着深度呈现跳跃式变化, 含水率、湿密度、干密度、黏聚力随深度增加, 总体呈现出增大的趋势, 且黏聚力增幅明显, 湿密度增幅很小。

以钻孔 1 土样湿密度及内摩擦角随深度的变化与其相应加权平均值对比图为例(见图 1, 2)。

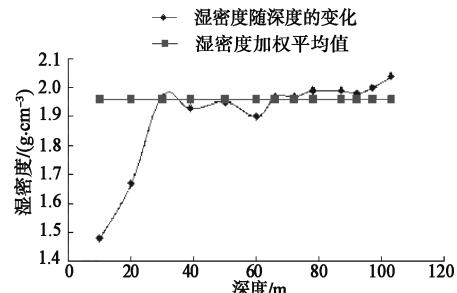


图 1 钻孔 1 土样的湿密度随深度变化和湿密度加权平均值

Fig. 1 Variation of wet density of soil with depth and weighted average values of wet density of borehole No. 1

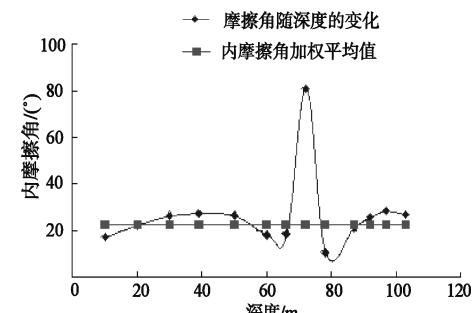


图 2 钻孔 1 土样内摩擦角随深度变化和内摩擦角加权平均值

Fig. 2 Variation of internal friction angle with depth and weighted average values of internal friction angle of borehole No. 1

由图1,2可以明显看出湿密度和内摩擦角随深度的变化范围基本围绕其加权平均值波动,并且波动范围不大。因此,建立稳定性分析模型所需的参数,选取湿密度和内摩擦角的加权平均值,作为设置建立该模型材料性质的数据(见表4)。模型中所需重度由湿密度加权平均值得到:

$$\gamma = \bar{\rho}g \quad , \quad (1)$$

式中,  $\bar{\rho}_0$  为湿密度加权平均值,  $g$  为重力加速度。

表4  $\gamma$  和  $\varphi$  的取值

Table 4 Values of  $\gamma$  and  $\varphi$

钻孔 编号	样本数 /个	湿密度加权平均值 $\bar{\rho}_0$ / (g·cm <sup>-3</sup> )	重度 $\gamma$ / (kN·m <sup>-3</sup> )	摩擦角 $\varphi$ / (°)
1	13	1.96	19.6	22.7
2	13	2.01	20.1	18.9
3	14	1.94	19.4	19.9

黄土高边坡稳定性的主要影响因素为土体的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ , 研究区黏聚力随深度的变化关系如图3所示。从图中可以看出, 黏聚力大致是随深度线性变化波动的, 即黄色曲线围绕着红色曲线上下波动, 其波动幅度较大, 变化趋势线性拟合相关度并不高, 线性增长难以完全概括黄土地层黏聚力随深度的变化。因此, 本文依照设定的4种地层划分方法, 分别选取相应的黏聚力值进行运算(见表5), 分析不同地层划分方法对于黄土高边坡稳定性评价的影响。

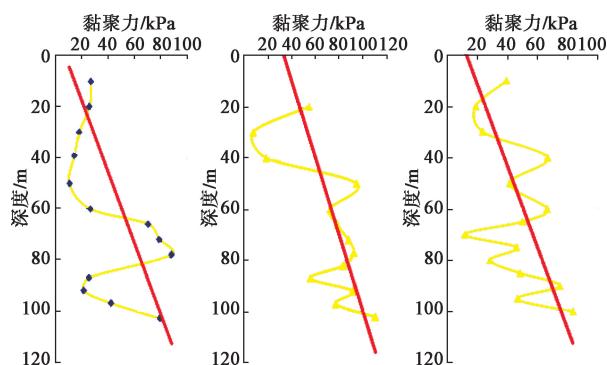


图3 3个钻孔土样的黏聚力  $c$  随深度的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of cohesive force  $c$  of soil samples borehole No. 3 with depth

## 2 模型建立

根据山西临汾—吉县高速公路地区坡度为45°, 坡高为100 m的黄土高边坡特点, 以3个钻孔测试参数为依据, 按表1所示4种地层划分方法, 利用SLOPE/W软件建立相应的初始模型(见图4~7)。

表5 不同分层方法黏聚力  $c$  的取值

Table 5 Values of cohesion  $c$  in different stratigraphic stratification methods

分层方法	钻孔编号		
	钻孔#1	钻孔#2	钻孔#3
不分层	38.9	69.0	45.5
	23.4	30.9	27.2
平均分3层	17.0	61.8	58.1
	67.0	93.5	49.5
	26.2	54.7	29.1
按地质时代分3层	29.8	56.1	41.9
	63.0	95.3	62.1
	26.8	54.6	39.3
	25.6	54.8	18.8
	17.9	7.2	23.5
	14.3	18.3	66.6
平均分10层	10.4	94.6	41.3
	26.4	72.4	66.3
	78.9	87.9	11.8
	88.4	83.5	28.3
	21.3	91.8	74.7
	79.4	110.6	83.4

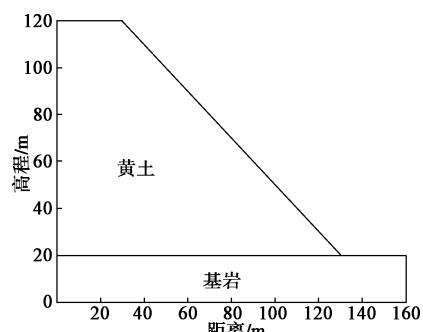


图4 不分层初始建模

Fig. 4 Initial modeling for non-stratification

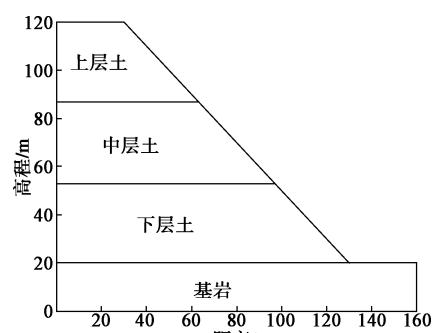


图5 平均分3层初始建模

Fig. 5 Initial modeling for dividing three-stratifications on average

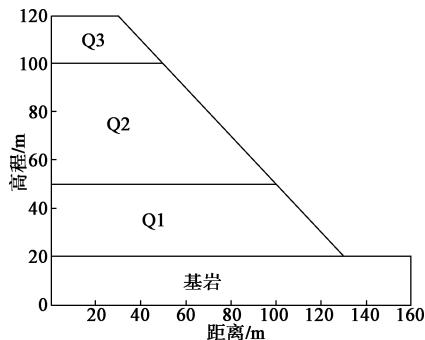


图 6 地质时代分 3 层初始建模

Fig. 6 Initial modeling for dividing three-stratifications in geological era

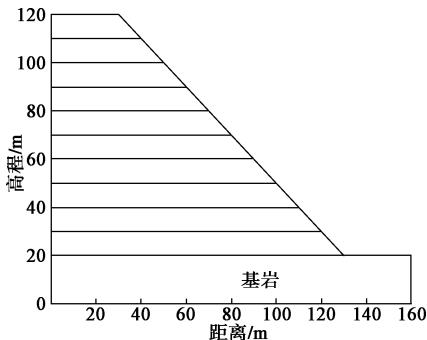


图 7 平均分 10 层初始建模

Fig. 7 Initial modeling for dividing ten-stratifications on average

### 3 模拟分析

#### 3.1 稳定性分析计算

稳定系数  $F_s$  定义为滑面抗剪强度与剪应力之比, 也可以简单的定义为滑面上的全部抗滑力和滑动力之比。通过 SLOPE/W 软件分别对四种模型使用 Morgenstern-Price 法求出稳定系数  $F_s$  (见表 6), 图 8~11 为钻孔 #1 的 4 种求解模型示例。

#### 3.2 不同地层划分对高边坡稳定性分析的影响

通常地层划分越细, 计算所得结果越接近真实值。因此, 将平均分 10 层方法计算得出的稳定系数作为该黄土高边坡稳定系数的参考值, 将不分层、平均分 3 层和按地质时代分 3 层的划分方法得到的稳定系数与之进行对比分析, 所得差值和相对误差如表 7 所示。

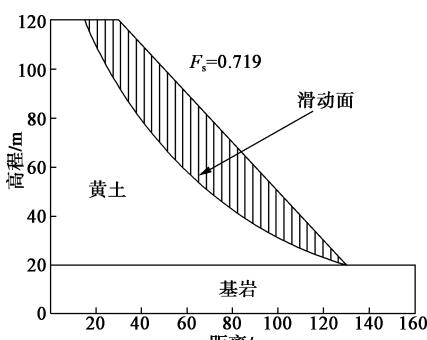


图 8 钻孔 #1 不分层求解模型

Fig. 8 Solution model for non-stratification of borehole No. 1

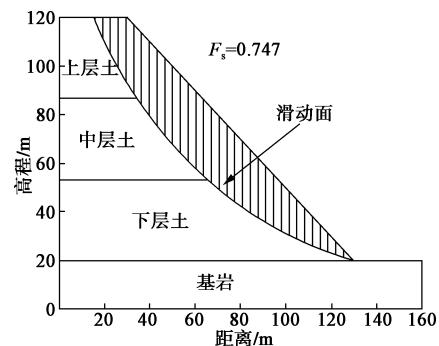


图 9 钻孔 #1 平均分 3 层求解模型

Fig. 9 Solution model for dividing three-stratifications on average of borehole No. 1

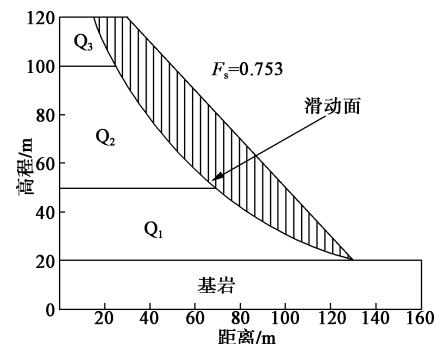


图 10 钻孔 #1 地质时代分 3 层求解模型

Fig. 10 Solution model for dividing three-stratifications in geological era of borehole No. 1

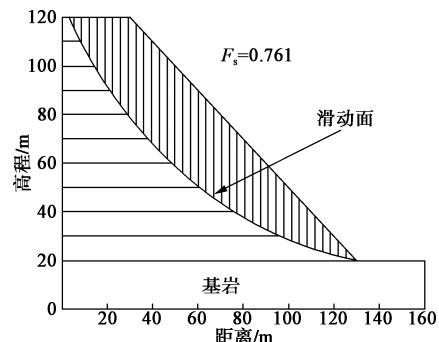


图 11 钻孔 #1 平均分 10 层求解模型

Fig. 11 Solution model for dividing ten-stratifications on average of borehole No. 1

表 6 不同地层划分方法的稳定性系数  $F_s$ Table 6 Values of Stability coefficient  $F_s$  of different stratigraphic stratification methods

安全系数	钻孔 #1	钻孔 #2	钻孔 #3
$F_{s1}$	0.719	0.753	0.682
$F_{s2}$	0.747	0.768	0.692
$F_{s3}$	0.753	0.781	0.706
$F_{s4}$	0.761	0.795	0.717

注:  $F_{s1}$  为不分层建立模型计算分析得到的稳定系数,  $F_{s2}$  为平均分 3 层得到的稳定系数;  $F_{s3}$  为地质时代分 3 层得到的稳定系数;  $F_{s4}$  为平均分 10 层得到的稳定系数。

表7 稳定系数 $F_s$ 差值与相对误差Table 7 Differences of stability coefficient  $F_s$  and relative errors

对比项目	钻孔#1	钻孔#2	钻孔#3
$F_{s4} - F_{s1}$	0.042	0.042	0.035
$(F_{s4} - F_{s1}) \div F_{s4} \times 100\%$	5.5%	5.3%	4.9%
$F_{s4} - F_{s2}$	0.014	0.027	0.025
$(F_{s4} - F_{s2}) \div F_{s4} \times 100\%$	1.8%	3.4%	3.5%
$F_{s4} - F_{s3}$	0.008	0.014	0.011
$(F_{s4} - F_{s3}) \div F_{s4} \times 100\%$	1.1%	1.8%	1.5%

表7中数据显示,不分层与平均分10层所得稳定系数值差值较大,其范围在0.035~0.042,相对误差范围为4.9%~5.5%;平均分3层与平均分10层所得稳定系数值差值在0.014~0.027,相对误差范围为1.8%~3.5%;按地质时代划分地层与平均分十层所得稳定系数值相差较小,其范围在0.008~0.014,相对误差范围为1.1%~1.8%。由计算结果可知,对黄土高边坡不分层直接进行稳定性计算和分析,前期工作量较小,但计算结果误差较大,易引起边坡防护工程量和经济成本的增加;将黄土高边坡平均分为十层的方法计算结果准确,得出边坡工程的安全性也较高,但是项目前期的工作量较大;平均分层法和按地质时代分层法的工作量同样适中,但按地质时代分层比平均分层法计算结果更接近参考值。

## 4 结 论

(1) 研究区黄土高边坡不同土层的含水率、湿密度、干密度、黏聚力随深度的增加总体呈现出增大的趋势,摩擦角随着深度的增加呈现跳跃式变化,但变化范围不大。

(2) 随着分层数的增加,稳定系数越大,边坡稳定性越强,并且对比分析表明,按地质时代划分地层的方法工作量相对较少,计算所得稳定系数与参考值相差最小,误差范围为1.1%~1.8%。

(3) 按照地质时代划分黄土地层的方法能满足建设工程领域对黄土物理力学性质的研究需求,对黄土高边坡稳定性的计算和分析具有工程指导意义。

## 参考文献:

[1] 廖珊珊,张玉成,胡海英.边坡稳定性影响因素的探讨[J].广东水利水电,2011(7):31~34. (LIAO Shan-shan, ZHANG Yu-cheng, HU Hai-ying. Discussion on the influence factors of slope stability [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2011(7): 31~34. (in Chinese))

- [2] 刘洋,刘润,程辉,等.黄土高陡边坡稳定性研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):92~95,122. (LIU Yang, LIU Run, CHENG Hui, et al. Stability evaluation of high and steep loess slope [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(3): 92~95,122. (in Chinese))
- [3] 王恭先.滑带土抗剪强度参数的综合分析选取法[C]//滑坡文集(兰州滑坡会议论文选集).北京:中国铁道出版社,1988. (WANG Gong-xian. Comprehensive analysis and selection method of shear strength parameters of sliding zone soil [C] // Landslide Anthology (Selected Papers of Lanzhou Landslide Conference). Beijing: China Railway Press, 1988. (in Chinese))
- [4] 王永焱,滕志宏.中国黄土的地层划分[J].地质论评,1983,29(3):201~208. (WANG Yong-yan, TENG Zhi-hong. Stratigraphical division of the loess in China [J]. Geological Review, 1983,29(3): 201~208. (in Chinese))
- [5] 张宗祜,张之一,王芸生.论中国黄土的基本地质问题[J].地质学报,1987(4):362~374. (ZHANG Zong-hu, ZHANG Zhi-ji, WANG Yun-sheng. Basic geologic problems of loess in China [J]. Acta Geologica Sinica, 1987(4): 362~374. (in Chinese))
- [6] 丁仲礼,杨石岭,孙继敏.2.6 Ma前后大气环流重构的黄土-红黏土沉积证据[J].第四纪研究,1999(3):277~281. (DONG Zhong-li, YANG Shi-ling, SU Ji-min, LIU Dong-sheng. Re-organization of atmospheric circulation at about 2.6 Ma over Northern China [J]. Quaternary Sciences, 1999(3): 277~281. (in Chinese))
- [7] 王念秦.黄土滑坡灾害研究[M].兰州:兰州大学出版社,2005. (WANG Nian-qin. Study on Loess Landslide Disaster [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2005. (in Chinese))
- [8] 丁军友.渭南吴田黄土剖面地层CBR值分布规律研究[D].西安,长安大学,2013. (DING Jun-you. Study on the Distribution Law of CBR Value in Wutian Loess Section of Weinan [D]. Xi'an, Changan University, 2013. (in Chinese))
- [9] 公路土工试验规程:JTGE40—2007[S].北京:中国计划出版社,2007. (JTGE40—2007 Highway Geotechnical Test Code: JTGE40—2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese))
- [10] 刘东生.黄土与环境[M].北京:科学出版社,1985. (LIU Dong-sheng. Loess and Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese))
- [11] 王永焱.中国黄土研究的新进展[M].西安:陕西人民出版社,1985. (WANG Yong-yan. New Progress in Loess Research in China [M]. Xi'an: Shaanxi People's Press, 1985. (in Chinese))

(编校:孙振远)