

文章编号:1672-6561(2012)03-0089-10

黄土高原边坡特征与破坏规律的分区研究

李萍, 张波, 李同录

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:为了研究黄土高原自然边坡的特征及破坏规律,按山系与水系或水系的分水岭、地貌单元、地层岩性特征等条件,将黄土高原划分为8个区:临洮—永靖区、天水—通渭区、兰州—会宁、陇东区、靖边—安塞区、隰县—离石区、甘泉—吉县区和汾渭区。根据极限状态边坡的4个野外判别标准,测量了8个区510个自然极限状态黄土边坡断面,分区采用指数模型回归边坡坡高与坡宽的相关关系,计算各区20、50、100 m坡高的边坡稳定系数和失效概率。结果表明:黄土高原的边坡特征与破坏形式具有分区特征,且南北差异性明显。临洮—永靖区边坡坡高与坡宽呈线性关系,表明该区边坡坡度不随坡高变化,边坡稳定性受内摩擦角控制;兰州—会宁区和靖边—安塞区高坡陡,低坡缓,高坡不稳定,易发生错落式滑坡;天水—通渭区、甘泉—吉县区和汾渭区高坡缓,低坡陡,稳定性计算结果显示高坡和低坡都较为稳定,但由于地层结构和地貌的特点,高边坡易发生低速蠕变型滑坡或高速远程滑坡;陇东区边坡整体上较为稳定;隰县—离石区受黏粒含量较高的 Q_1 地层控制,高边坡稳定性较差;50 m左右坡高的黄土边坡稳定性对强度指标内聚力、内摩擦角的敏感度都高,易于失稳。

关键词:边坡;分区;极限状态;指数模型;稳定系数;失效概率;黄土高原

中图分类号:P642.13⁺1;TU413.6⁺2

文献标志码:A

Study on Regionalization for Characteristic and Destruction Rule of Slope in Loess Plateau

LI Ping, ZHANG Bo, LI Tong-lu

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

Abstract: In order to study the characteristics and destruction rules of natural slope in Loess Plateau, according to the mountain and water systems or watershed of water system, geomorphic unit and strata lithological condition, Loess Plateau was divided into eighth regions which were Lintao-Yongjing Area, Tianshui-Tongwei Area, Lanzhou-Huining Area, Longdong Area, Jingbian-Ansai Area, Xixian-Lishi Area, Ganquan-Jixian Area and Fenwei Area. According to the four criteria identifying the critical slope in field, 510 natural critical loess slope sections in the eighth regions were investigated, the relationship between slope height and width was regressed with exponential model in each area, and stabilizing factor and failure probability of slopes with the height of 20, 50, 100 m were calculated. The results showed that the characteristics and destruction rules of slopes in Loess Plateau were different for each area, especially the difference of slopes between southern and northern areas was significant. The relationship between slope height and width in Lintao-Yongjing Area was linear, so that the slope gradient was the same when slope height changed, and slope stability was controlled by internal

收稿日期:2012-05-02

基金项目:国家自然科学基金项目(40772181,40972182)

作者简介:李萍(1971-),女,内蒙古临河人,副教授,工学博士,E-mail:dcdgx07@chd.edu.cn。

frictional angle; the high slopes were steep and unstable, and low slopes were slow, and dislocation landslide easily happened for the high slopes in Lanzhou-Huining Area and Jingbian-Ansai Area; the high slopes were slow, and low slopes were steep in Tianshui-Tongwei Area, Ganquan-Jixian Area and Fenwei Area, and the calculation result of stability showed that the high and low slopes were stable, but the low speed and creep deformation landslide or high speed and long runout landslide easily happened for the high slope because of the characteristics of strata structure and geomorphy; the slopes were stable in Longdong Area on the whole; because the slopes were controlled by Q_1 stratum with high content of cosmid, high slopes were unstable in Xixian-Lishi Area; the stability of loess slope with the height of about 50 m was sensitive to cohesion and internal frictional angle, and was easy to fail.

Key words: slope; regionalization; critical state; exponential model; stabilizing factor; failure probability; Loess Plateau

0 引言

黄河中游黄土高原面积约 $37.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 为中国滑坡灾害最为发育的地区之一。在公路、铁路与工业民用建设中, 合理开挖边坡是必不可少的^[1]。但人工边坡或自然边坡被开挖坡脚造成的滑坡灾害时有发生^[2]。如 2011 年西安灞桥滑坡, 32 人遇难, 主要原因就是砖厂取土导致形成高陡边坡, 并在长期降雨诱发条件下造成边坡失稳。因此对黄土边坡稳定性的研究仍然是当前的重点课题^[3-4]。范围大、工程地质条件较为复杂的黄土高原, 边坡的特点及相应的工程地质条件错综复杂, 为边坡稳定性分析带来较多困难^[5-6]。很多学者基于不同的研究目的对黄土高原进行分区, 如滕志宏对黄土高原地层结构进行分析^[7]; 张青峰等利用聚类分析、主成分分析和 GIS 相结合的方法, 把黄土高原划分为 4 个生态经济带^[8]; 刘怡林等将黄土高原分为 4 个大区, 讨论黄土的地基承载力^[9]; 孙萍等按黄土洞穴发育程度对黄土高原进行分区^[10]; 王费新等基于植被—侵蚀动力学理论将黄土高原分为 4 个大区^[11]。景可按侵蚀强度对黄土高原进行了分区^[12]。可见, 面对一个较大范围的研究区域, 分区是深入研究的基础工作^[13]。但分区研究黄土边坡稳定性的文献报道很少。

为了研究黄土高原的自然边坡发育特征与破坏形式, 笔者按山系与水系或水系的分水岭、地形地貌、地层结构、土质强度特性以及这些条件与黄土高原的构造演化关系, 将黄土高原进行了分区; 对各区自然极限状态边坡坡高与坡宽进行了测量和统计分析, 采用各区典型地层结构建立地质模型, 计算了 20、50、100 m 高度边坡的稳定系数与失效概率, 分析了自然边坡稳定性的区域特征, 以期对黄土高边

坡稳定性评价和设计提供参考。

1 黄土高原边坡分区

1.1 分区依据

(1) 以山系与水系或水系的分水岭为分区界线。黄土高原的地貌格局是在第三系古地貌基础上形成的。如现在的白鹿塬、洛川塬、西峰塬等, 在古地貌上是一个平原, 而且是一个大的湖泊相沉积平原。地壳抬升, 湖相沉积露出水面, 开始接受黄土沉积。古地貌上, 这些湖泊受南北向吕梁山、六盘山、子午岭和东西向秦岭、黄龙山等控制, 目前仍受这些构造山脉的控制。这些山脉以及次一级的山脉成为各大河流的分水岭, 将黄土高原分隔成一些小区域。在气候、水文、地壳抬升与间歇上形成各自的特点, 同时也控制着小区域岩土及边坡发育特征。受区域构造控制, 黄土高原第四纪地壳间歇性上升, 沿河流两岸形成 5~6 级阶地^[14]。根据雷祥义的研究^[15], 黄土高原从 43 Ma 开始抬升, 最早抬升的地方发育有 6 级阶地, 意味着有 6 次间歇性快速上升, 快速上升期河流下切, 形成窄而陡的沟谷, 两侧边坡不稳定, 但以密集且规模小的滑坡、崩塌为主。现在的六盘山以西的兰州地区以及延安、隰县以北地区, 地壳抬升速度较快, 整体上这些区域的高边坡较南部的高边坡陡。间歇期河流侧蚀, 切割边坡坡脚, 早期形成的阶地后退, 易发生大型黄土滑坡, 黄土高原南部区域正处于这一时期。因此, 按山系与水系或水系的分水岭为划分界线是分区的首要原则。

(2) 以不同的黄土地貌单元作为分区依据。黄土高原地貌分为黄土塬、黄土梁和黄土峁 3 种类型: 合道川—延安—隰县一线以北, 为黄土梁、黄土峁地区; 龙门山—黄龙山一线以南, 为黄土塬地区; 中间

区域为黄土塬、黄土梁地区。六盘山以东的南北分区,主要依据黄土地貌特征进行划分。

(3)以地层岩性特征的差异作为划分依据。黄土高原地层岩性在各地有较大差异,如西部和北部的黄土颗粒粗,黏粒含量(质量分数)较小;东南部黏粒含量较高。黄土是风成沉积物,六盘山以西黄土沉积厚,对水敏感性较强,陕西东南部与河南地区黄土则沉积较薄,对水敏感性较弱。地层岩性对边坡

稳定性具有直接控制作用^[16-17],因此地层的差异是分区的主要依据之一。

1.2 分区图及各区特征

根据黄土高原边坡分区的3个依据,将黄土高原划分为8个区:临洮—永靖区、天水—通渭区、兰州—会宁区、陇东区、靖边—安塞区、隰县—离石区、甘泉—吉县区和汾渭区。各区的具体范围及特征见图1和表1。

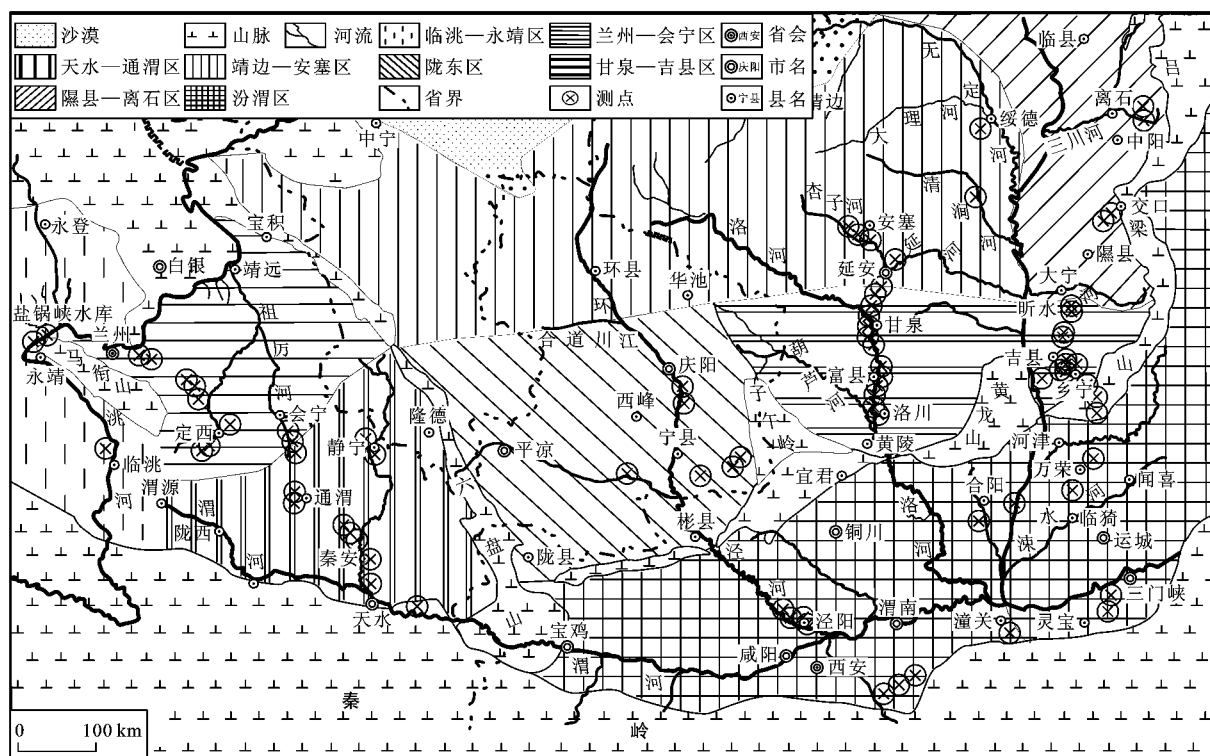


图1 黄土高原分区

Fig.1 Regionalization of Loess Plateau

2 自然边坡野外调查与测量依据

由于地质模型与计算模型的概化及选取参数的不确定性,难以拿实际工程进行试验,所以边坡稳定性评价是一个无法试验验证的命题^[18-20]。但是在野外可以看到大量的滑坡,是已经验证了的破坏边坡,即在滑坡的临界状态,稳定系数从1降为小于1。还有一些可以判断为一定会滑坡的边坡,如坡顶有拉裂缝的边坡,是一种有较大蠕动变形的边坡,其稳定系数虽然大于1,但不可能显著大于1,某些诱发因素(比如长时间降雨)使其滑动^[21-23]。这些临滑坡的边坡,或者恢复滑坡前的边坡,其稳定系数接近于1,失效概率接近50%。基于这一思路,李萍等提出“极限状态边坡”的概念和4个野外鉴别标准:坡顶有拉张裂缝的边坡;坡面破碎、局部滑塌多的边坡;

处于已发生滑坡的两侧,与其工程地质条件相同、坡型相同的边坡;恢复滑坡前的边坡^[24]。将这4个标准作为野外调查依据,测量了黄土高原8个区的510个极限状态边坡断面,将其作为边坡特征分析的样本。各分区测量点见图1。

3 坡高与坡宽的相关性

采用坡高与坡宽进行相关性分析,2个指标在边坡断面上的定义如图2。从图3可以看出,测量边坡坡高与坡宽的散点趋势,采用指数模型或双对数模型进行坡高和坡宽的相关性分析更为恰当。指数模型为

$$L = aH^b \quad (1)$$

对应的双对数线性模型为

$$\ln L = b \ln H + \ln a \quad (2)$$

表 1 黄土高原各边坡分区特征

Tab. 1 Characteristics of Each Regionalization of Loess Plateau

分区名称	区域范围	地形地貌	地层概况	边坡特征
临洮—永靖	马衔山以西的洮河流域及黑方台等黄河高阶地地区	基岩山地、黄土梁峁地貌	上部有 50 m 左右的 Q_3 和 Q_2 黄土,黏粒含量小,土质内聚力小,内摩擦角高;下部为泥砂岩	高边坡和低边坡的坡度较为一致,都接近土的内摩擦角
兰州—会宁	马衔山以东、渭源—界石铺一线以北、六盘山以西地区,主要为祖厉河流域及黄河高阶地	黄土塬、梁地貌	黄土层全且巨厚。 Q_3 和 Q_2 黄土发育较厚,达 200 m 以上。黄土的黏粒含量多在 20% 以内,内摩擦角较高,内聚力对水极敏感	多有 200 m 以上的全黄土极高边坡,且高坡较陡,稳定性较差
天水—通渭	鸟鼠山以东、渭源—通安驿—新站—党家岬—界石铺一线以南、六盘山以西地区,主要为渭河流域及其支流葫芦河流域	黄土梁峁地貌,山梁、沟壑地形	Q_3 黄土厚度一般约 30 m, Q_2 黄土约 60 m,下部为第三系 N_2 泥岩及泥砂岩。土体内聚力在 40 kPa 左右,内摩擦角在 26° 左右	低坡较陡,高坡较缓,坡度随坡高的增高降低幅度大。边坡易沿基岩面剪出
陇东	六盘山以东、合道川以南的甘肃地区。主要有泾河流域和马莲河流域	典型的黄土塬地貌	黄土层厚且层序齐全,黄土与古土壤明显相间。塬区 Q_3 马兰黄土埋深 12 m 左右, Q_2 离石黄土埋深约 65 m, Q_1 午城黄土埋深达 200 m。黏粒含量较陇西高,内聚力在 30 kPa 左右,内摩擦角 25° 左右	不同高度边坡的稳定性较兰州地区高
靖边—安塞	黄河以西,白于山—横山以南,合道川、崂山以北地区	典型黄土梁峁沟壑地貌,冲沟密布	主要发育有 Q_3 黄土、 Q_2 黄土。土体黏粒含量小于 20%,内聚力在 25 kPa 左右,内摩擦角大于 27°	低坡缓,高坡陡,高坡的稳定性较差
隰县—离石	黄河以东,大宁以北的广大地区	梁峁沟壑地貌,冲沟密布	黄土层全, Q_3 和 Q_2 黄土黏粒含量较低,内摩擦角较高, Q_1 黄土黏粒含量高,内摩擦角较低	低坡缓,高坡陡,高坡的稳定性较差
甘泉—吉县	子午岭以东,黄龙山、龙门山以北,崂山、西水河以南地区	塬梁沟壑地貌,冲沟密布	大部分地方 Q_3 、 Q_2 黄土覆盖于基岩之上。黄土黏粒含量在 20% 左右,内聚力较高,内摩擦角一般在 25° 以下	高坡缓,低坡陡,边坡易沿基岩面剪出
汾渭	汾河与渭河盆地	黄土台塬和河流阶地	主要发育有 Q_3 和 Q_2 黄土,黄土黏粒含量较高,多大于 30%,一般内聚力大于 40 kPa,内摩擦角小于 22°	低坡极陡,高坡较缓,坡度随坡高的增高降低幅度较大。泾河、渭河和灞河等侧蚀黄土台塬形成高陡边坡,灌溉导致滑坡灾害严重

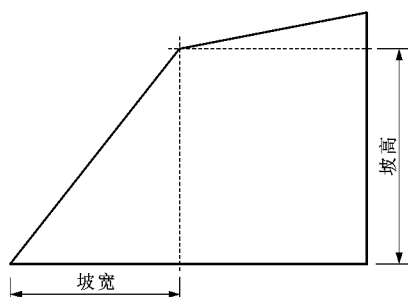


图 2 坡高与坡宽的定义

Fig. 2 Definitions of Slope Height and Width

式中: L 为坡宽; H 为坡高; a 、 b 为需要回归确定的参数。

从表 2 可以看出,采用指数模型进行回归,黄土极限状态坡高与坡宽具有极好的相关性,8 个区的判定系数都大于 0.83,有些达到 0.95。表 2 同时列出了坡高分别为 20、50、100 m 条件下的稳定系数,以及在内聚力变异系数为 0.30、内摩擦角变异系数为 0.15 条件下相应的失效概率^[25-29],计算采用的地层结构和内聚力(c)、内摩擦角(φ)、重度(γ)见

图 4。图 4 中参数来源于黄土高原公路、铁路勘察报告共 4 597 组物理力学指标的统计结果。强度指标 c 、 φ 采用直快剪试验获得。稳定系数采用 Morgenstern-Price 法计算,失效概率采用 Monte-Carlo 法计算, c 、 φ 的概型分布采用正态分布。所有计算借助 GEO-Studio 软件完成。

4 边坡特征与破坏类型

从图 3 可以看出,8 个区的边坡特征主要有 4 种类型。

(1) 临洮—永靖区边坡。坡高与坡宽指数关系中的 b 为 1.001 8,接近 1,可见二者呈线性关系,意味着该区边坡坡度不随坡高变化。陈春利等对该区黑方台地区的边坡进行研究,发现该区黄土在饱和含水量条件下的内摩擦角较高,但内聚力接近于 0^[30]。边坡平均坡度为 32.8° ,与黄土的内摩擦角平均值(29.6°)较接近。表 2 显示该区自然边坡处于极限状态,高边坡稳定系数为 1.0。由于内聚力在水的作用下易丧失,在灌溉、强降雨等水量充足条件

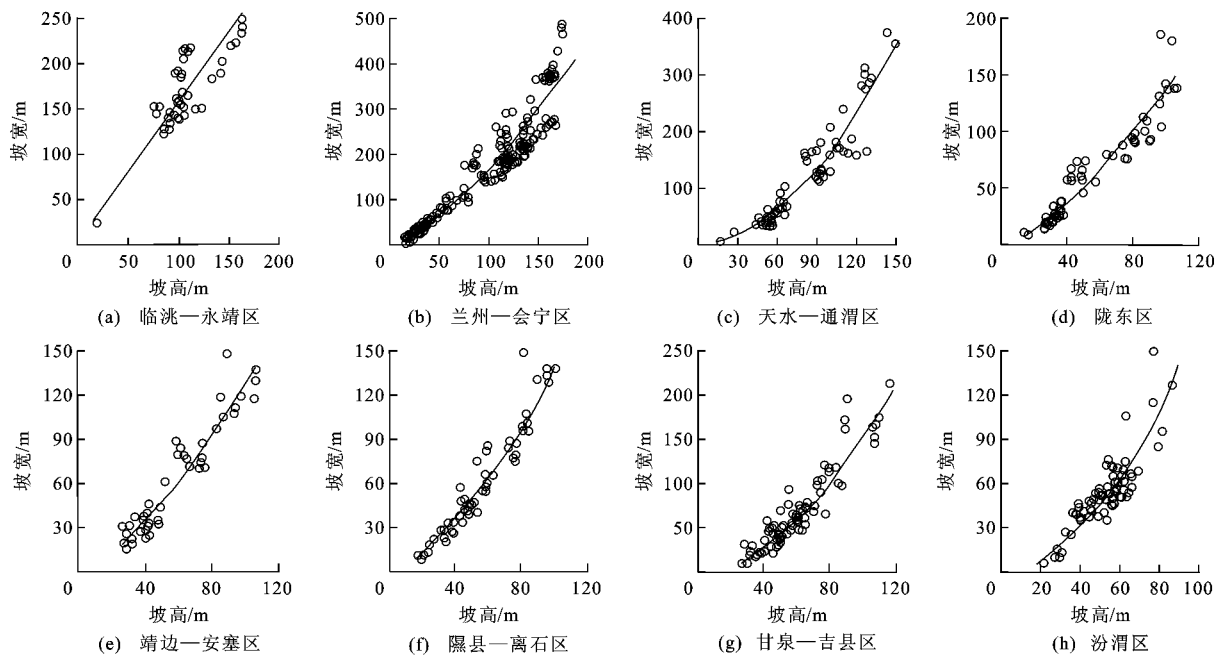


图 3 黄土高原各分区边坡坡高与坡宽的关系

Fig. 3 Relationships Between Slope Height and Width for Each Regionalization of Loess Plateau

表 2 黄土高原各分区边坡回归方程及稳定性计算结果

Tab. 2 Regression Equations and Calculation Results of Stability for Slope in Each Regionalization of Loess Plateau

分区名称	边坡数量	判定系数	极限状态边坡回归方程	不同坡高(m)下的稳定系数			不同坡高(m)下的失效概率/%		
				20	50	100	20	50	100
临洮—永靖	40	0.83	$L=1.545\ 2H^{1.001\ 8}$	1.24	1.04	1.00	11.8	42.4	51.3
兰州—会宁	109	0.95	$L=0.190\ 2H^{1.404\ 3}$	1.13	0.97	0.98	26.6	59.9	56.3
天水—通渭	54	0.93	$L=0.039\ 0H^{1.813\ 6}$	1.01	1.04	1.28	49.0	37.6	1.2
陇东	63	0.93	$L=0.176\ 6H^{1.449\ 0}$	1.14	1.00	1.05	17.2	51.4	32.6
靖边—安塞	44	0.89	$L=0.183\ 3H^{1.420\ 8}$	1.57	1.02	0.96	1.0	45.9	66.8
隰县—离石	54	0.95	$L=0.141\ 2H^{1.497\ 3}$	1.03	0.99	0.95	40.7	53.2	67.7
甘泉—吉县	76	0.87	$L=0.035\ 4H^{1.823\ 5}$	1.38	1.07	1.24	3.8	33.3	4.5
汾渭	70	0.83	$L=0.043\ 2H^{1.784\ 4}$	1.33	1.07	1.29	4.5	33.3	1.7

下,滑坡频繁发生,且在滑坡滑动过程中滑体易崩解,形成滑坡泥流^[31],以黑方台滑坡最为典型。

(2)兰州—会宁区和靖边—安塞区边坡。这2个区坡高与坡宽回归曲线较为一致,指数关系中的*b*分别为1.404 3和1.420 8。与其他区相同高度的边坡相比,100 m以上的高边坡较陡,稳定性较差。表2列出的稳定系数小于1.0,失效概率大于50%;20 m左右的低边坡较缓,稳定系数在靖边—安塞区达1.57,失效概率小于1.0%。这2个区都位于黄土高原北部,土质粒度较粗,内摩擦角较高,在水的作用下内摩擦角降低幅度较小。土中黏粒含量在10%左右,仍具有一定的内聚力,在水的作用下内聚力快速降低,诱发高边坡失稳,但由于内摩擦

角较高、地下水位深、河流阶地狭窄等因素,滑坡会快速稳定下来,多表现为短距离错落式滑坡^[32-33]。

(3)天水—通渭区、甘泉—吉县区和汾渭区边坡。这3个区坡高与坡宽回归曲线较为一致,指数关系中的*b*分别为1.813 6、1.823 5和1.784 4,曲线的曲率较大,地理位置上都位于黄土高原南部。与其他区相同高度的边坡相比,100 m以上的高边坡较缓,20 m左右的低边坡较陡。因此表2所列的这3个区100 m高边坡稳定系数在1.20以上,失效概率在4.5%以下。而事实上,这3个区的滑坡灾害在黄土高原区仍然较为严重,而且多为大型滑坡^[34-35]。图4所示的地层模型中,天水—通渭区和甘泉—吉县区的基岩普遍出露较高,基岩多为泥页

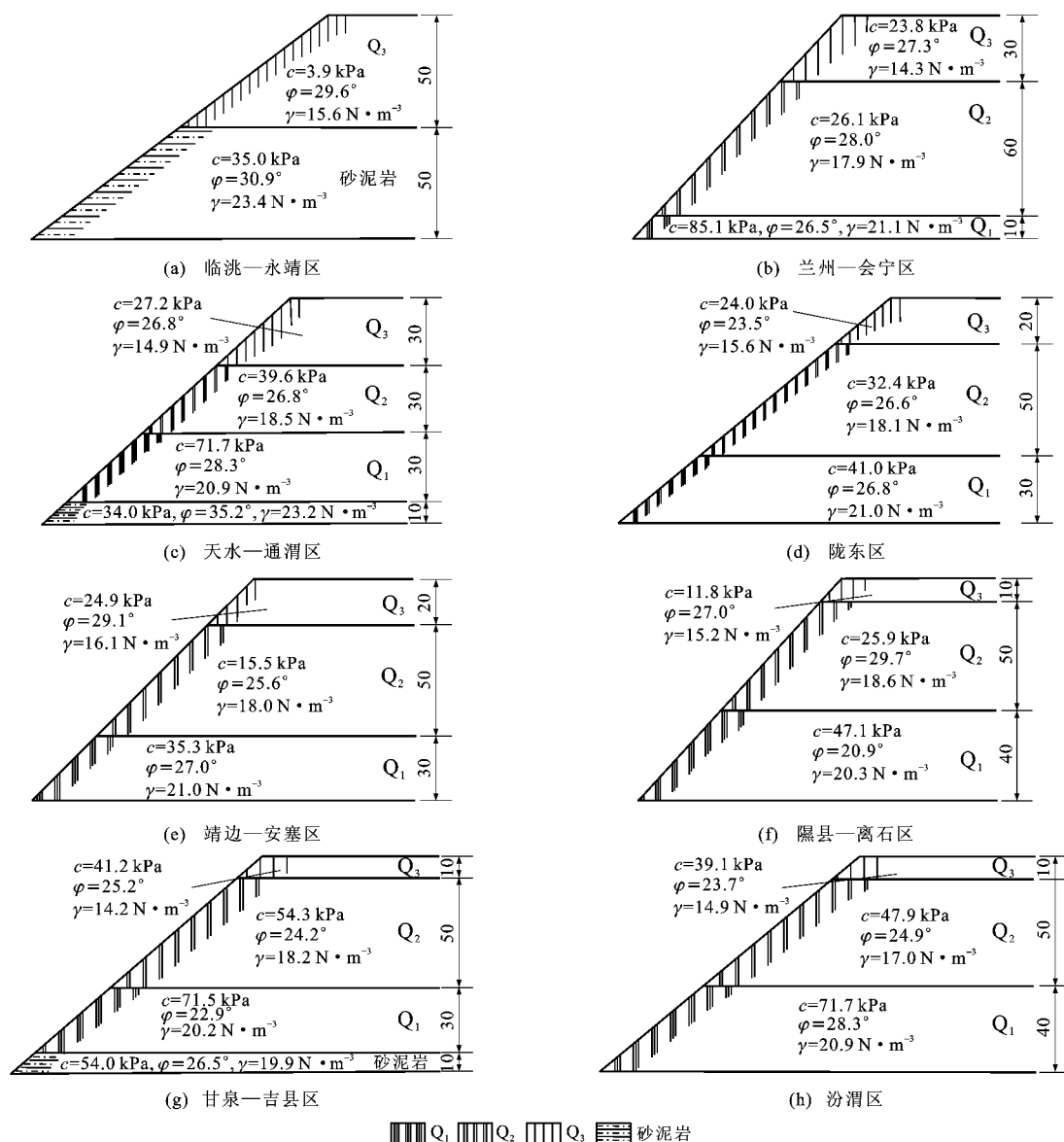


图 4 边坡地层模型及参数(单位:m)

Fig. 4 Slope Stratum Models and Parameters(Unit:m)

岩,地层平缓,成为隔水层,在泥页岩与黄土接触界面上,长期水的作用下易形成软弱带。而且这 2 个区黄土黏粒含量较北部地区高,泥页岩的黏粒含量也较高,导致软弱带的内摩擦角极低,但高边坡坡面与滑面都较为平缓,滑坡难以聚集较大的滑动势能,表现为缓慢蠕变型滑动。滑坡发生时,有足够的逃生时间,对生命的危害小,但平缓的边坡宜于作为工程场地,多造成财产损失,2010 年的延安炼油厂滑坡就属于这种类型。由此可见,目前采用的稳定性评价结果易造成该类滑坡稳定的误判,对于这类滑坡的触发机理和稳定性判别方法,还需要做更深入的研究。

汾渭区涉及的地域宽广,情况较为复杂。关中

渭河区域基岩埋深较大,土质黏粒含量在 20% 左右,在低含水量条件下黄土结构强度较高,黄土高陡边坡较为稳定,在高含水量条件下结构强度会快速丧失,发生滑坡时陡边坡的势能转化为较高的动能。再加上与边坡坡脚接触的地层为渭河、泾河、灞河等河流相 Q_4 松散沉积物,阶地宽阔,地下水位较浅,滑坡启动后易发生液化。因此该区易发生高速远程滑坡^[36-38],2011 年 9 月的西安灞桥滑坡以及泾阳县泾河南岸的系列滑坡都为此种类型。汾河区域受吕梁构造带的影响,基岩出露较高,基岩多为煤系地层,强度较差,易形成黄土基岩复合型滑坡,大同一运城高速公路清徐滑坡就为此种类型。

(4) 陇东区与隰县—离石区边坡。这 2 个区的

坡高与坡宽回归曲线较为一致,高边坡较兰州—会宁区和靖边—安塞区的缓,但较南部地区的陡。这2个区的特点相异。陇东区 Q_1 地层钙质胶结作用强烈,抗剪强度高,在水的作用下强度降低幅度较小。因此,该区滑坡多在 Q_2 、 Q_3 地层中发育小型滑坡,滑坡灾害不严重。隰县—离石区 Q_1 地层中普遍发育有厚层红色古土壤,钙质胶结差,黏粒含量高达30%以上,内摩擦角低。高边坡下部应力高,内摩擦角对边坡稳定性具有关键作用,因此表2显示该区高边坡稳定性较差,易发生大型滑坡。

从表2可以看出,8个区20 m高边坡稳定系数都大于1.0,多处于基本稳定状态,100 m高边坡有些区稳定系数小于1.0,有些区稳定系数达1.2以上,变化较大。50 m高边坡稳定系数多接近1.0,失效概率接近50%,普遍处于极限状态。李萍等通过对陕西黄土边坡可靠度的研究,发现失效概率随坡高的增加都出现峰值,峰值所对应的坡高在50 m左右,而且出现峰值的边坡高度随内聚力、内摩擦角及其变异系数的大小而变化^[39]。李萍等对乡宁—吉县地区7个不同边坡高度的黄土极限状态坡的研究,也发现中等坡高(49.8 m)失效概率最大^[40]。张常亮等通过分析滑面上的应力分布,认为不同坡高边坡的内聚力、内摩擦角对稳定性的贡献不同^[41]。黄土坡高较低的边坡(20 m以下),滑带内正应力较小,内摩擦角发挥的强度较低。而内聚力在极限状态下可以得到充分发挥,加之黄土的内聚力较高,体现出内聚力对低坡稳定性起控制作用。反之,对于较高的边坡(60 m以上)滑带内正应力增高,内摩擦角发挥较大的效用,且远大于内聚力发挥的效用,体现出内摩擦角对高坡稳定性起控制作用,中间有一过渡坡高段,内聚力、内摩擦角对边坡稳定性都起较大的作用,在这一过渡坡高段,边坡失效概率比低坡和高坡都大,过渡坡高多在50 m左右。除临洮—永靖区,黄土高原其他各区在这一坡高段边坡的坡度较为一致,同时这一坡高段也是工程边坡的常见坡高类型,因此工程中遇到该坡高段的边坡,强度指标内聚力、内摩擦角的取值都需要慎重。

5 结 语

(1)按山系与水系或水系的分水岭、地貌单元、地层岩性特征,将黄土高原划分为8个区:临洮—永靖区、天水—通渭区、兰州—会宁区、陇东区、靖边—安塞区、隰县—离石区、甘泉—吉县区和汾渭区。

(2)按极限状态坡的4个野外鉴别标准,测量了

8个区510个极限状态坡,测量所得坡高为17.1~215.7 m。8个区极限状态边坡坡高与坡宽具有显著的指数相关关系,而且土质黏粒含量越低的边坡,其指数函数中的幂值越接近于1,边坡坡高与坡宽呈现线性关系。黏粒含量越高的边坡,其指数函数中的幂值越大,坡高与坡宽的关系曲线曲率也越大。

(3)黄土高原的边坡特征与破坏形式具有分区特征,且南北差异性明显。西、北部黏粒含量低的兰州—会宁区和靖边—安塞区高坡陡,低坡缓,高坡不稳定,易发生错落式滑坡;东、南部的天水—通渭区、甘泉—吉县区和汾渭区高坡缓,低坡陡,稳定性计算结果显示高坡和低坡都较为稳定,但由于地层结构和地貌的特点,高边坡易发生低速蠕变型滑坡或高速远程滑坡,稳定性计算结果易造成边坡稳定的误判,对这些类型黄土滑坡的稳定性评价方法还需要做更深入的研究工作;陇东区边坡整体上较为稳定;隰县—离石区受黏粒含量较高的午城黄土控制,高边坡稳定性较差。研究结果表明,分区研究黄土高原边坡稳定性是现实可行的方案。

(4)强度指标内聚力、内摩擦角对50 m左右坡高的影响都较大,这一坡高段的黄土边坡容易失稳,同时这一坡高段也是工程边坡的常见坡高类型,内聚力、内摩擦角的取值都需要慎重。

参考文献:

References:

- [1] 黄高花,王飞,杨勤科. 陕西北部山丘区公路开挖边坡侵蚀调查与评价[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006,26(2):31-33.
HUANG Gao-hua, WANG Fei, YANG Qin-ke. Evaluation of Cutting-slope Erosion of Highway in North Shaanxi[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006,26(2):31-33.
- [2] 郭利平,叶万军,方鹏,等. 开挖扰动导致黄土边坡产生剥落病害的机理分析[J]. 西安科技大学学报, 2010,30(4):462-465,470.
GUO Li-ping, YE Wan-jun, FANG Peng, et al. Mechanism of Spalling Hazard in Loess Slope Induced by Excavation Disturbance[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010,30(4):462-465,470.
- [3] 李炜,康海贵. 边坡稳定性模糊随机可靠度分析[J]. 交通运输工程学报, 2010,10(1):19-23.
LI Wei, KANG Hai-gui. Fuzzy-random Reliability Analysis of Slope Stability[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010,10(1):19-23.
- [4] 罗丽娟,赵法锁,胡江洋,等. 基于剩余推力法的黄土

- 高边坡稳定性可靠度分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2008, 28(4): 27-31.
- LUO Li-juan, ZHAO Fa-suo, HU Jiang-yang, et al. Reliability of High Loess Slope Stability Based on Residual Thrust Method[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 27-31.
- [5] 叶万军, 杨更社, 郭西山. 黄土边坡剥落病害的类型及其发育特征[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(1): 52-57.
- YE Wan-jun, YANG Geng-she, GUO Xi-shan. Style of Spalling Hazard in Loess Slope and Its Development Characteristic[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(1): 52-57.
- [6] 彭小云, 张 婷, 秦 龙. 高陡边坡稳定性的影响因素分析[J]. 西北建筑工程学院学报: 自然科学版, 2002, 19(3): 14-17.
- PENG Xiao-yun, ZHANG Ting, QIN Long. Analysis of Influencing Factors for the Stability of High and Steep Slope[J]. Journal of Northwest Institute of Architecture and Engineering: Natural Science Edition, 2002, 19(3): 14-17.
- [7] 滕志宏. 黄土高原黄土地层分区及其地层结构[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1990, 20(2): 85-93.
- TENG Zhi-hong. On the Division of Stratigraphical Region of Loess Plateau[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1990, 20(2): 85-93.
- [8] 张青峰, 吴发启. 黄土高原生态经济分区的研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 1023-1028.
- ZHANG Qing-feng, WU Fa-qi. Eco-economic Regionalization of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2009, 17(5): 1023-1028.
- [9] 刘怡林, 石 刚, 支喜兰. 黄土地区地基承载力分区的研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(9): 12-15.
- LIU Yi-lin, SHI Gang, ZHI Xi-lan. Study on Subarea Bearing Capacity of Foundation in Loess District[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(9): 12-15.
- [10] 孙 萍, 彭建兵, 陈立伟. 模糊评判法在公路黄土洞穴发育程度分区中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(4): 393-399.
- SUN Ping, PENG Jian-bing, CHEN Li-wei. Development Density Zoning of Highway Loess Caves by Fuzzy Evaluation Method[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(4): 393-399.
- [11] 王费新, 王兆印. 基于植被—侵蚀动力学的黄土高原分区及治理策略[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(12): 2119-2122.
- WANG Fei-xin, WANG Zhao-yin. Zoning and Management Strategies for the Loess Plateau Based on Vegetation-erosion Dynamics[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(12): 2119-2122.
- [12] 景 可. 黄土高原侵蚀分区探讨[J]. 山地研究, 1985, 3(3): 161-165.
- JING Ke. Approach to the Erosion Zonalization of the Loess Plateau[J]. Mountain Research, 1985, 3(3): 161-165.
- [13] CULSHAW M G, PRICE S J. The Contribution of Urban Geology to the Development, Regeneration and Conservation of Cities[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70(3): 333-376.
- [14] 雷祥义. 黄土高原地质灾害与人类活动[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- LEI Xiang-yi. Geological Disasters and Human Activities in Loess Plateau[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2001.
- [15] 雷祥义. 黄土高原河谷阶地黄土地层结构模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(2): 113-122.
- LEI Xiang-yi. Models of Loess Stratigraphical Structure on the Terraces in the Loess Plateau of China[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(2): 113-122.
- [16] 于德海, 彭建兵, 孙治国. 黑河水库坝肩岩质边坡变形破坏特征及失稳判据[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 64-68.
- YU De-hai, PENG Jian-bing, SUN Zhi-guo. Deformation Failure Characters and Instability Criterion of Abutment Rock Slope in Heihe Reservoir[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 64-68.
- [17] 陈 鹏, 徐博侯. 顺层岩质路堑边坡稳定性数值极限分析[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 38-45.
- CHEN Peng, XU Bo-hou. Numerical Limit Analysis of Stability for Bedding Rock Cutting Slope[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 38-45.
- [18] 高江平, 李 芳. 黄土邓肯张模型有限元计算参数的试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 10-13, 21.
- GAO Jiang-ping, LI Fang. Experiments on Parameters of Duncan-Chang Model for Loess[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 10-13, 21.
- [19] 毛巨省. 模糊综合评判在边坡稳定性评价中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(5): 609-612.

- MAO Ju-sheng. Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation in Slope Stability Evaluation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(5): 609-612.
- [20] 康亚明,杨明成,胡艳香,等. 基于重度增加法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4): 49-53.
- KANG Ya-ming, YANG Ming-cheng, HU Yan-xiang, et al. 3D FEM Analysis of Slope Stability Based on Gravity Increase Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 49-53.
- [21] 王福恒,李家春,田伟平. 黄土边坡降雨入渗规律试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(4): 20-24.
- WANG Fu-heng, LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Test on Rainfall Filtration in Loess Slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 20-24.
- [22] 雷晓锋,肖 曼,张 林,等. 公路黄土边坡强度参数的选取及应用[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(4): 27-33.
- LEI Xiao-feng, XIAO Man, ZHANG Lin, et al. Selection and Application of Strength Parameters of Highway Loess Slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 27-33.
- [23] 雷胜友,李志远,王吉庆,等. 含水量对非饱和黄土强度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 1-5.
- LEI Sheng-you, LI Zhi-yuan, WANG Ji-qing, et al. Effect of Water Content on Strength of Unsaturated Loess[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 1-5.
- [24] 李 萍,王秉纲,李同录. 自然类比法在黄土路堑边坡设计中的应用研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(2): 1-5.
- LI Ping, WANG Bing-gang, LI Tong-lu. Study on Analogy Used in Highway Cutting Loess Slope Design[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(2): 1-5.
- [25] GRIFFITHS D V, HUANG J S, FENTON G A. On the Reliability of Earth Slopes in Three Dimensions[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2009, 465: 3145-3164.
- [26] GRIFFITHS D V, HUANG J S, FENTON G A. Influence of Spatial Variability on Slope Reliability Using 2D Random Fields[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1367-1378.
- [27] 王阿丹,王昌业,李 萍,等. 西安白鹿塬北缘黄土边坡稳定的可靠度分析[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 104-110.
- WANG A-dan, WANG Chang-ye, LI Ping, et al. Reliability Analysis for Stability of Loess Slopes Along the Northern Edge of Bailuyuan, Xi'an[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 104-110.
- [28] CHING J Y, PHOON K K, HU Y G. Efficient Evaluation of Reliability for Slopes with Circular Slip Surfaces Using Importance Sampling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(6): 768-777.
- [29] GOH A T C, KULHAWY F H, WONG K S. Reliability Assessment of Basal-Heave Stability for Braced Excavations in Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(2): 145-153.
- [30] 陈春利,邢鲜丽,李 萍,等. 甘肃黑方台黄土边坡稳定性的可靠度分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 550-554.
- CHEN Chun-li, XING Xian-li, LI Ping, et al. Analysis on Loess Slope Stability of Heifangtai, Gansu Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 550-554.
- [31] 付宏渊,曾 铃,蒋中明,等. 降雨条件下公路边坡暂态饱和区发展规律[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 59-64.
- FU Hong-yuan, ZENG Ling, JIANG Zhong-ming, et al. Developing Law of Transient Saturated Areas of Highway Slope Under Rainfall Conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 59-64.
- [32] 章 健,杜 斌,李小豹. 错落式黄土滑坡运动学模型[J]. 山西建筑, 2010, 36(16): 73-75.
- ZHANG Jian, DU Bin, LI Xiao-bao. Kinematical Model of Scattered-type Loess Landslide[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(16): 73-75.
- [33] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- ZHANG Mao-sheng, LI Tong-lu. Triggering Factors and Forming Mechanism of Loess Landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540.
- [34] 张常亮,王阿丹,邢鲜丽,等. 侵蚀作用诱发黄土滑坡的机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1585-1592.
- ZHANG Chang-liang, WANG A-dan, XING Xian-li, et al. Research on Mechanism of Loess Landslides Caused by Erosion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1585-1592.
- [35] 许 领,戴福初,闵 弘,等. 泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征[J]. 地球科学, 2010, 35(1): 155-160.

- XU Ling, DAI Fu-chu, MIN Hong, et al. Loess Landslide Types and Topographic Features at South Jingyang Plateau, China[J]. Earth Science, 2010, 35(1): 155-160.
- [36] 龙建辉, 郭文斌, 李 萍, 等. 黄土滑坡滑带土的蠕变特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1023-1028.
- LONG Jian-hui, GUO Wen-bin, LI Ping, et al. Creep Property of Soil in Sliding Zone of Loess Landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1023-1028.
- [37] 许 领, 戴福初, 闵 弘. 黄土滑坡研究现状与设想 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(3): 236-242.
- XU Ling, DAI Fu-chu, MIN Hong. Research Progress and Some Thoughts on Loess Landslides [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(3): 236-242.
- [38] 许 领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黄土滑坡典型工程地质问题分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 287-293.
- XU Ling, DAI Fu-chu, KUANG Guo-lin, et al. Analysis of Some Special Engineering-geological Problems of Loess Landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 287-293.
- [39] 李 萍, 王秉纲, 李同录, 等. 陕西地区黄土路堑高边坡可靠度研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 18-25.
- LI Ping, WANG Bing-gang, LI Tong-lu, et al. Study of Reliability for Loess Cutting High Slopes in Shaanxi Province [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 18-25.
- [40] 李 萍, 赵纪飞, 李同录. 山西乡宁—吉县地区黄土高边坡可靠度研究[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(2): 81-89.
- LI Ping, ZHAO Ji-fei, LI Tong-lu. Study on Reliability for Loess High Slopes in Xiangning-Jixian Area of Shanxi Province [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(2): 81-89.
- [41] 张常亮, 李 萍, 陶福平, 等. 黄土强度指标对边坡稳定性的影响研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(3): 20-24.
- ZHANG Chang-liang, LI Ping, TAO Fu-ping, et al. Research of Effect of Strength Index on Loess Slope Stability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(3): 20-24.

《地球科学与环境学报》投稿须知

为了全面扩大《地球科学与环境学报》的学术影响力, 便于审稿和对录用稿件的编辑加工, 本刊向作者提出如下要求, 期望得到广大作者的配合与协助。

1. 来稿必须包括以下项目: 题名(尽量不超过 20 字)、作者姓名、作者单位、摘要(400 字左右)与关键词(5~8 个)必须英汉对照; 引言、正文、结语与参考文献应具全; 请附第一作者简介、详细联系地址和方式; 请在省部级以上基金项目或攻关项目产生的论文首页页脚注明项目名称与编号。

2. 摘要采取第三人称表述, 重点报道论文研究的目的、方法、具有独创性的具体结果和结论。

3. 引言应概述前人在该领域内所做的相关工作, 指出论文研究的工作与他人的异同、重点及期望在哪些方向上取得成果和突破, 并给出相关参考文献, 按引用的顺序, 在引言内标注参考文献序号, 按相应的顺序把参考文献列在文后。

4. 在正文中的图表按出现的先后顺序进行编号, 并给出图名和表名(英汉对照)。

5. 在结论中应指出本论文的独创性结果及存在的局限, 并指出本文所研究问题的进一步研究方向。

6. 文后参考文献的著录项目一定要齐全: 著作应包括著者、书名、版本、出版地、出版者、出版年; 期刊论文应包括著者、论文名、刊名、出版年、卷号与期号; 论文集集中论文应包括论文著者、论文名、论文集编者、论文集名、论文集出版地、论文集出版者与出版年; 学位论文应包括著者、论文名、学位授予单位名、论文保存单位名与答辩年; 技术标准应包括标准代号与标准名称; 所有参考文献必须注明被引用的起止页码; 所有非英文参考文献都要有英文对照。

7. 作者投稿 1 个月后, 可致电、致函本刊编辑部, 查询稿件录用情况; 3 个月之内作者如收到本刊退稿通知, 可自行处理, 在此期间作者如收到修改意见或录用通知, 不得另投他刊。

8. 本刊已与多种媒体签署出版光盘及上网协议, 不愿通过媒体发行者, 请来稿时注明, 本刊支付给作者的稿费已包括作者的著作权使用费用。

联系地址: 陕西省西安市南二环路中段长安大学杂志社

邮政编码: 710064

电话: 029-82334686

E-mail: dkyhxb@chd.edu.cn