

DOI: 10.12401/j.nwg.2022019

吕梁山区马兰黄土抗剪强度参数的区域 变化规律及其影响因素试验研究

洪勃¹, 唐亚明^{1,2,3,*}, 冯卫^{1,3}, 陈新建³, 冯凡³, 周永恒², 尹春旺²

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 3. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为探索吕梁山区原状马兰黄土抗剪强度参数区域上的变化规律, 以该地区 29 个区县 94 个取样点的马兰黄土为研究对象, 通过直剪试验及其影响因素试验, 分析区内马兰黄土抗剪强度参数的空间变化规律, 及其抗剪强度参数 c 、 φ 与天然含水率、天然干密度、增湿含水率、含盐率等影响因素的变化规律。结果表明: 在水平地域上, 抗剪强度参数 c 、 φ 表现为东高西低、南高北低; 在垂直空间上, 表现为从表层向下黏聚力逐渐增大、内摩擦角逐渐降低的趋势; 吕梁山东、西两侧原状马兰黄土抗剪强度参数 c 、 φ 受天然含水率、天然干密度的影响较小, 离散程度较大; 在天然状态条件下, 随着含水率的增加, 黏聚力 c 与增湿含水率具有良好的负指数函数关系, 内摩擦角 φ 与增湿含水率呈负线性关系; 在同一含水率条件下, 含盐率与抗剪强度参数 c 、 φ 具有正相关关系; 与含盐率相比, 增湿含水率对 c 、 φ 的影响作用更为显著。该研究可为该地区马兰黄土地层的工程建设及防灾减灾工作提供基础和必备条件。

关键词: 马兰黄土; 黏聚力; 内摩擦角; 增湿含水率; 含盐率; 吕梁山区

中图分类号: P642.3; P642.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0272-11

Regional Variation and Influencing Factors of Shear Strength Parameters of Malan Loess in Lüliang Area

HONG Bo¹, TANG Yaming^{1,2,3,*}, FENG Wei^{1,3}, CHEN Xinjian³, FENG Fan³, ZHOU Yongheng², YIN Chunwang²

(1. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Taking the undisturbed Malan loess from 94 sampling points in 29 counties in Lüliang Area as the research object, the undisturbed Malan loess was subjected to direct shear tests and undisturbed loess wetting

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-09-23; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 陕西省重点产业创新链(群)项目“基于大数据的地质灾害机理及风险评估关键技术研究与应用”(2019ZDLSF07-07-02), 中国地质调查局地质调查项目“吕梁山区城镇地质灾害调查”(DD20160276)和“晋陕黄土高原河曲-韩城段灾害地质调查”(DD20190642)联合资助。

作者简介: 洪勃(1987-), 男, 工程师, 博士, 主要从事黄土工程地质、灾害地质调查、地质安全评价以及防灾减灾方面的研究工作。E-mail: 382492004@qq.com。

* 通讯作者: 唐亚明(1973-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事地质灾害风险评估、监测预警及其信息化方面的研究工作。E-mail: tangyaming73@suhu.com。

water content and salt content shear tests to reveal the loess in the area. The regional distribution of loess shear strength parameters in the area is revealed, and the influencing factors of undisturbed Malan Loess shear strength parameters are analyzed. The results show that in the horizontal area, the shear strength parameters c and φ of the undisturbed Malan loess in the Lüliang area are higher on the east side than on the west side; in the vertical space, the correlation between c and φ and the sampling depth is low. The experiment of influencing factors also reveals that c , φ have discrete distribution with natural water content and natural dry density. Under the condition of wetting water content, undisturbed Malan loess c has a good exponential function relationship with wetting water content, φ has a linear negative correlation with wetting water content, and salinity has a positive correlation with c and φ . The effect of salt content on increasing internal friction angle is more obvious than that of cohesion. Compared with salt content, moisture content has a more significant effect on c and φ . This research provides the foundation and necessary conditions for solving the geological disasters in the Loess Plateau of western Shanxi Province.

Keywords: Malan loess; cohesion; internal friction angle; wetting water content; salt content; Lüliang area

吕梁山区位于黄土高原东部,区内高原、盆地边缘、山麓和沟谷地带均广泛分布着黄土及黄土状土,厚度几米至百米以上(Tang et al., 2021)。因其地质背景复杂、地形破碎,地质灾害活动强烈,属于地质灾害高易发区,也一直被山西省列为地质灾害防治的重点区域(郭义龙, 2020; Tang et al., 2020)。据统计,晋西地区75%以上的地质灾害与雨水入渗是密切相关的(巨玉文等, 2016)。雨水入渗引起土体结构软化,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 不同程度的下降,致使土体抗剪强度降低(Cui et al., 2019)。而抗剪强度指标 c 、 φ 作为岩土领域最为关键的力学参数之一,反映土体抵抗外力作用发生剪切破坏的难易程度(范兴科等, 1997)。当外部载荷达到或超过土体的抗剪强度时,土体结构遭到破坏,从而导致土体失稳,进而发生地质灾害(巨玉文等, 2016; 吕萌, 2016; Wang et al., 2019; 董鸾花等, 2020)。

黄土地质灾害的发生:一方面黄土自身性质所致;另一方面则是外部诱因(如降水、冻融、河流侵蚀以及人类工程活动等)引发的(吕萌, 2016; 孙萍萍等, 2019; 洪勃等, 2019; 刘畅等, 2020; Tang et al., 2020)。由于黄土是在干旱-半干旱气候条件下由风力搬运堆积于陆地环境的以粉粒为主的第四纪土状沉积物,造就了其质地疏松多孔,具有湿陷性、崩解性、强水敏感性和垂直节理发育等独特的土性(Juang et al., 2019; Li et al., 2019; 刘畅等, 2020; 郭倩怡等, 2021),加之黄土区独特的地形地貌和气候条件,种种不利因素使得黄土地质灾害严重地影响着黄土地区的社会经济发展,

威胁着人民群众的生命财产安全,已然成为黄土地区各类工程建设的严重障碍。

目前,诸多学者对吕梁山区黄土的抗剪强度及其影响因素等问题开展了大量研究,并取得了一些重要的认识和科研成果。诸如强度与地质灾害的机理研究(落合博贵等, 1994; Tang et al., 2011),强度与含水率、密度、压实度、含盐率、冻融循环等影响因素研究(王林浩等, 2010; 王硕等, 2010; 曹晓毅等, 2014; 巨玉文等, 2016; 吕萌, 2016; 赵杰等, 2016; 郭晓娟, 2020; 张玲玲等, 2021),边坡工程实例分析(谢庆勇, 2012; 于慧丽等, 2014; Wang et al., 2018)等方面。然而,大多数研究都囿于吕梁山区单一场地或数个场地间的重塑黄土抗剪强度问题,原状黄土的抗剪强度问题少有涉及,从区域范围上研究吕梁山区原状黄土抗剪强度问题更是少之又少。由于吕梁山区黄土受其成因及地形条件的影响,各区县黄土不仅具有差异性,即使同一地区,黄土的沉积方式、成土环境不同,其抗剪性能在垂直向和水平地域上往往也大不相同。“十三五”时期,为了减缓地质灾害风险,自然资源部要求全面完成山地丘陵区地质灾害详细调查评价、监测预警、综合治理。晋西黄土高原作为山地丘陵区斜坡地质灾害高易发区,该研究将为解决晋西黄土高原地质灾害提供基础和必备条件。

笔者依托中国地质调查局项目“吕梁山区城镇地质灾害调查”(DD20160276)和“晋陕黄土高原河曲-韩城段灾害地质调查”(DD20190642)中涉及的吕梁山区29个区县的岩土测试数据,以吕梁山区马兰黄

土为研究对象,分析马兰黄土抗剪强度参数 c 和 ϕ 的区域性变化规律,研究天然含水率、天然干密度、取样深度、增湿含水率以及含盐率对原状马兰黄土抗剪强度参数的影响规律,探讨吕梁山两侧抗剪强度参数差异性的成因。该成果不论是指导区内的工程建设,支撑晋西黄土高原地区防灾减灾工作,还是准确评价区域生态地质环境等均具有重要的理论与现实意义。

1 试验材料、方法及试验方案

1.1 试验材料及基本物理性质

研究区位于山西省西部,黄河以东、汾河以西的

黄土高原地区(图1)。以晋西地区的自然地理分界,将研究区分为吕梁山东、西两侧。第四纪以来,吕梁山前堆积了黄土-古土壤序列,自下而上依次分为早更新世午城组、中更新世离石组、晚更新世马兰组和全新统。其中以第四系中更新世风尘堆积的马兰组分布最广,以冲、洪-坡积分布于吕梁山东、西两侧较大水系及支流的II、III级阶地上(图1b),岩性为浅黄色、灰黄色的亚砂土、亚黏土。吕梁山脉西侧为黄土连续分布的典型黄土高原地貌,黄土堆积较厚,谷大沟深,地貌类型复杂多样,以黄土残塬、梁峁状丘陵为主(图1b、图2a);吕梁山脉东侧为汾河谷地,地貌以山地、丘陵、河谷平原为主,黄土断续分布(图1b、图2a)。

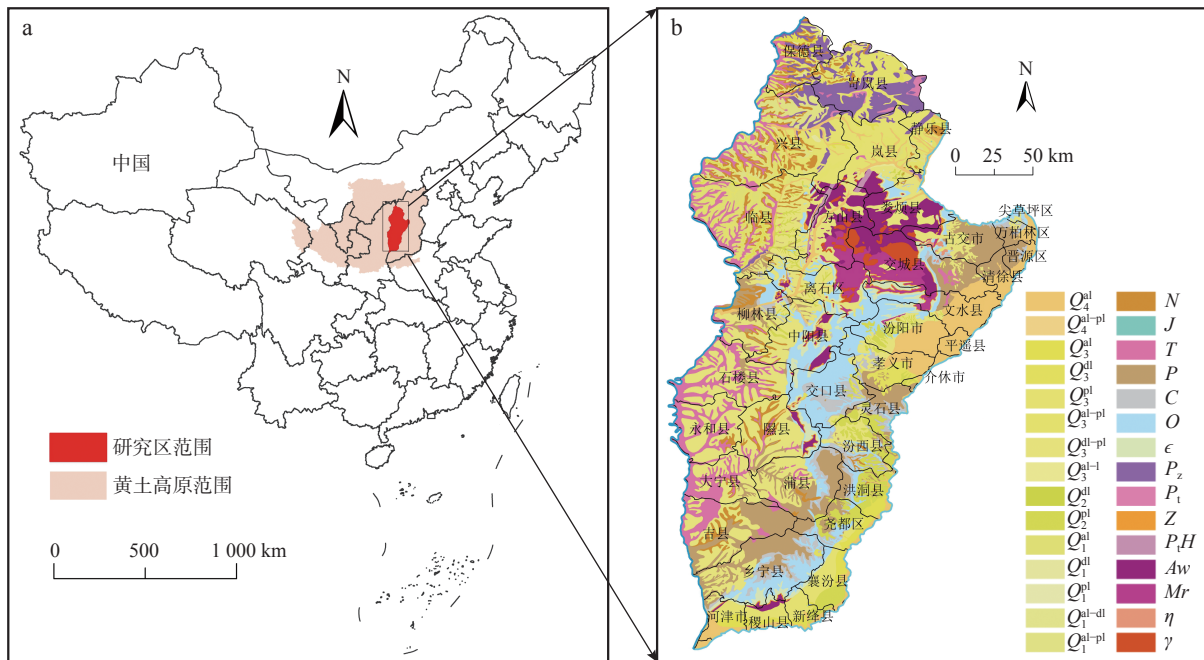


图1 黄土高原及研究区范围图(a)与研究区地质图(b)

Fig. 1 (a) Loess Plateau and study area, and (b) geological map of the study area

试验用土分别取自该地区29个区县,共计94个取样点,取样376组(图2a)。根据地形地貌,结合地质图,在野外选取地层出露较好的工程剖面或滑坡剖面(图2b),采用人工开挖的方式(图2c),挖取L₁黄土原状大土块试样,再将大土块切削成尺寸约为30 cm×30 cm×40 cm的长方体试样(图2d),切削后刻记方位,先采用塑料膜密封,再用气泡膜外包防护(图2e),贴上标签后,运回实验室待测。

根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)测试吕梁山区各取样点原状L₁黄土的基本物理指标(表1),测得研究区内天然含水量 w 值为2.75%~19.15%,

干密度 ρ_d 值为1.26 g/cm³~1.88 g/cm³,孔隙比 e 值为0.49~1.23,相对密度 G_s 值为2.35~2.85,液限 w_L 值为3.66%~28.10%,塑限 w_p 值为25.61%~46.39%,塑性指数 I_p 为6.87~34.10,为坚硬-硬塑状态。采用Bettersize 2000激光粒度仪进行颗粒级配分析,并根据砂粒、粉粒和黏粒含量绘制出吕梁山区马兰黄土质地分类三角图,吕梁山区东、西两侧马兰黄土基本都属于粉砂壤土(图2f)。

1.2 试验方案和试验过程

原状黄土抗剪试验:采用应变控制式四联直剪仪进行快剪测试,将94个取样点的土样分别切削成尺

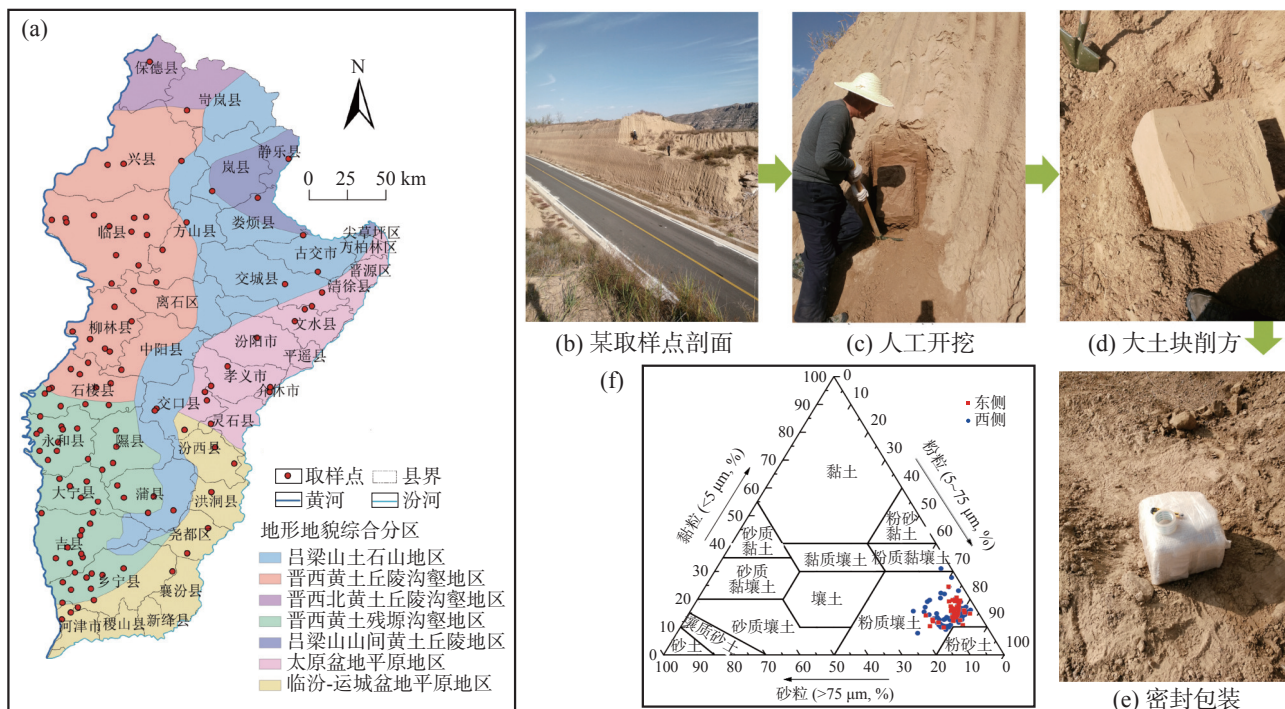


图 2 取样点分布图(a)、取样过程示例图(b~e)与研究区马兰黄土质地分类三角图(f)
 Fig. 2 (a) Distribution diagram of sampling points, (b~e) examples of sampling process, and (f) triangle map of Malan loess texture classification in the study area

表 1 研究区马兰黄土物理力学指标统计结果表

Tab. 1 Statistical results of physical and mechanical indexes of Malan loess in the study area

区域	指标	含水率 w (%)	干密度 ρ_d (g/cm^3)	相对密度 G_s	孔隙比 e	饱和度 S_r (%)	液限 w_L (%)	塑限 w_p (%)	塑性指数 I_p (%)	内摩擦角 φ ($^\circ$)	内聚力 c (kPa)
东侧	最小值	2.75	1.26	2.62	0.71	7.52	11.40	25.72	8.32	21.71	4.88
	最大值	18.14	1.84	2.77	1.50	61.42	20.20	46.39	27.84	39.40	61.52
	平均值	9.63	1.43	2.67	1.05	24.61	17.27	31.87	14.61	30.75	26.64
	标准差	3.96	0.12	0.04	0.19	10.85	1.91	3.89	4.09	4.15	13.36
	变异系数	0.411 4	0.082 0	0.014 1	0.183 9	0.440 7	0.110 3	0.121 9	0.279 9	0.134 9	0.501 6
西侧	最小值	2.95	1.30	2.35	0.49	2.66	3.66	25.61	6.87	2.55	0.85
	最大值	19.15	1.88	2.85	1.23	51.75	28.10	40.75	34.10	44.97	88.62
	平均值	9.11	1.48	2.67	1.01	25.00	17.83	31.43	13.60	27.13	22.44
	标准差	2.88	0.11	0.10	0.25	8.83	4.15	2.46	5.01	9.28	19.42
	变异系数	0.316 1	0.073 9	0.037 4	0.246 9	0.353 1	0.233 0	0.078 1	0.368 4	0.341 9	0.865 7

注: 表中数据由长安大学地质工程与测绘学院实验中心测试完成(2016~2020年)。

寸为 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的环刀试样, 共计 376 个试样, 并严格按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)中的试验步骤进行操作, 根据土样埋深垂向压力选为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa, 剪切速度为 0.8 mm/min, 当试样强度出现陡降或剪切位移为 4 mm

时试验终止。

增湿含水率抗剪试验: 为了研究土体增湿含水率与其抗剪强度参数 c 、 φ 的变化关系, 以临县、柳林县、永和县和吉县的原状马兰黄土为研究对象, 将原状土样切削成 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的环刀试样后, 采用水膜

转移法进行增湿,分别制作出含水率10%、15%、20%、25%以及饱和含水率的试样22组,进行快剪试验。

含盐率抗剪试验:该试验是为了研究可溶盐含量与抗剪强度参数 c 、 φ 之间的变化规律,共计64组。以柳林县马兰黄土为研究对象,采用与上述增湿含水率抗剪试验相同的方法制备试样,以NaCl溶液进行增湿。在室温下,分别配置1%、2%、3%浓度的NaCl溶液,采用水膜转移法使试样的含水率分别达到15%、20%、25%,并保湿72h以确保水、盐充分运移均匀。将柳林黄土天然含水率的土样作为对照组,进行快剪试验。

2 原状马兰黄土抗剪强度区域变化规律

黄土的抗剪强度主要是由黏聚力 c 和内摩擦角 φ 来反映的,通过对吕梁山区94个取样点进行的376组直剪试验,得到了该地区原状马兰黄土的抗剪强度指标 c 和 φ 。采用Arcgis反距离加权插值法(IDW, Inverse Distance Weighted)将离散的抗剪强度指标 c 和 φ 数据点进行空间插值,并根据数据的分位数、平均值、标准差等进行分类,以统计分析 L_1 黄土抗剪强度指标在空间上的变化规律。

2.1 c 、 φ 值的水平空间变化规律

吕梁山区原状马兰黄土黏聚力 c 的统计分析及在水平地域上的分布规律图(图3b)显示, L_1 黄土黏聚力 c 的空间分布总体趋势为东高西低,南高北低。区域上 c 值为0.85kPa~88.62kPa(表1),总体平均值为

23.47 kPa,最大值在晋西黄土丘陵沟壑地区的兴县以及吕梁山东麓的汾阳市、南部的河津市(图3a),最小值分布在晋西黄土丘陵沟壑地区的方山县、中阳县以及吕梁山土石山地区的古交市(图3c)。比较分析吕梁山东、西两侧各区县黏聚力 c 的统计图可以看出,东侧黏聚力总体上要大于西侧,且东侧黏聚力除古交市外,从北到南相对来说较为稳定(图3c);而西侧除保德县和兴县部分地区外,从北到南总体呈现增大的趋势(图3a)。

内摩擦角 φ 在水平地域上的变化规律及吕梁山东西两侧统计结果(图4)显示,吕梁地区 L_1 黄土的内摩擦角 φ 为 $2.55^\circ\sim 44.97^\circ$,平均值为 28° ,在空间分布上呈现为吕梁山区东侧略高于西侧。内摩擦角最小值在离石区、石楼县、永和县等黄土丘陵沟壑区,最大值在古交市、尧都区等吕梁山东部山前地区。吕梁山东、西两侧各区县内摩擦角 φ 的统计结果(图4a、图4c)显示,西侧内摩擦角较东侧要小一些,两侧 L_1 黄土的内摩擦角 φ 从北到南的规律性不显著。

2.2 c 、 φ 值的垂直空间变化规律

在天然状态下,分别统计分析吕梁山东、西两侧黏聚力 c 、内摩擦角 φ 与取样深度的关系。从表层向下抗剪强度参数表现为黏聚力逐渐增大和内摩擦角逐渐降低的弱趋势(图5、图6),这种变化的主要原因是土的级配中黏粒的含量以及土体的密实程度(或土的容重)的影响。土体黏粒含量高,黏聚力增大,内摩擦角减小;密实程度大,黏聚力高。

吕梁山东、西两侧黏聚力 c 与取样深度均呈现出

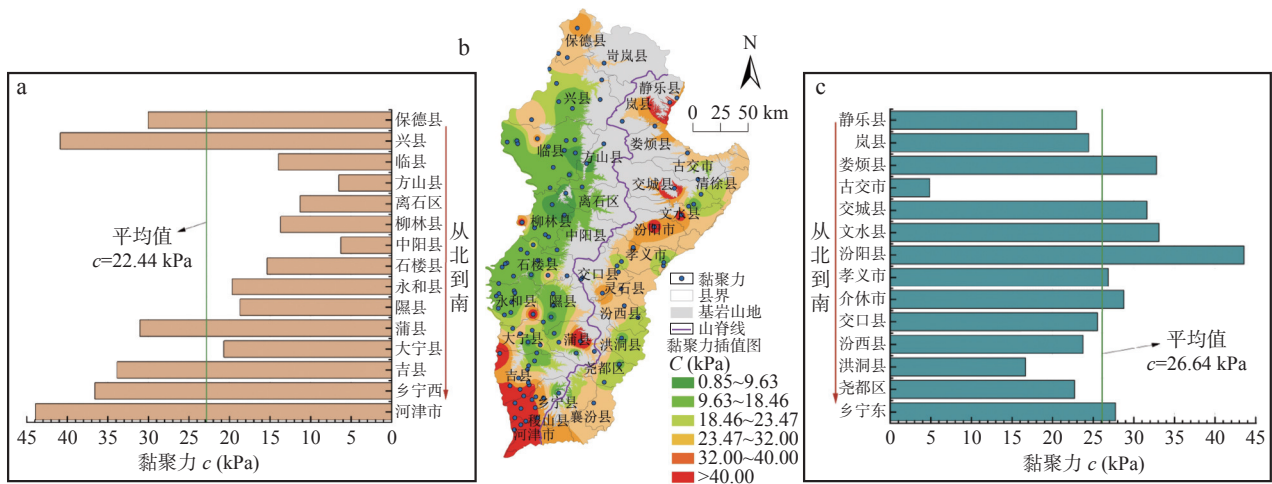


图3 西侧黏聚力统计图(a)、黏聚力IDW插值图(b)与东侧黏聚力统计图(c)

Fig. 3 (a) Statistical diagram of cohesion on the west side, (b) cohesion IDW interpolation diagram, and (c) statistical diagram of cohesion on the east side

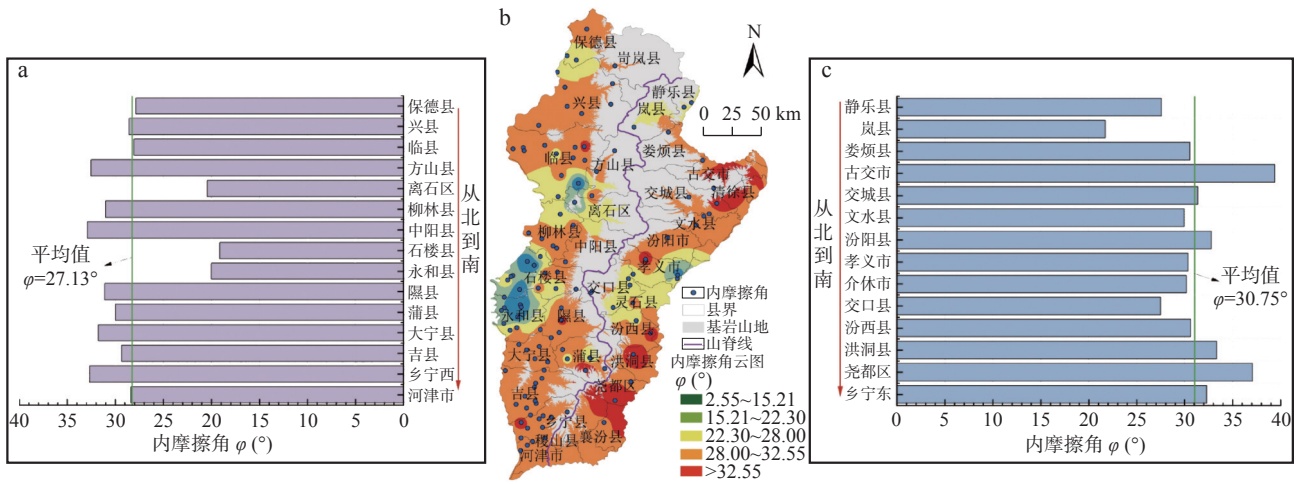


图 4 西侧内摩擦角统计图(a)、内摩擦角 IDW 插值图(b)与东侧内摩擦角统计图(c)

Fig. 4 (a) Statistical diagram of the ϕ on the west side, (b) internal friction angle IDW interpolation diagram, and (c) statistical diagram of the ϕ on the east side

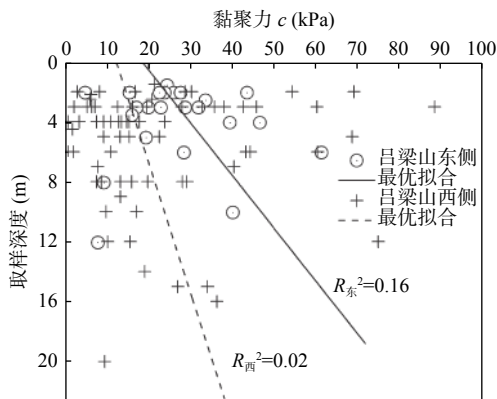


图 5 黏聚力 c 与取样深度的关系图

Fig. 5 Relationship between c and sampling depth

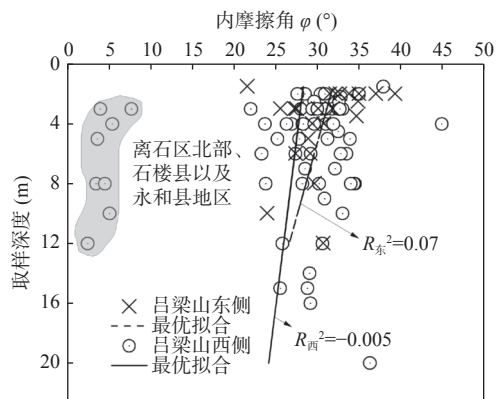


图 6 内摩擦角 ϕ 与取样深度的关系图

Fig. 6 Relationship between ϕ and sampling depth

较大的离散性(图 5), 平均变异系数分别为 0.5016 和 0.8857 (表 1), 东、西两侧相比较而言, 西侧离散程度

更高。通过线性拟合也可以看出, 吕梁山东、西两侧黏聚力 c 与取样深度的相关性较低, 相关系数分别为 0.16 和 0.02。离散性较大主要是与土的级配、矿物成分、结构及其形成环境有关, 而且不同埋深黄土因固结历史和固结程度的不同, 其也存在较大差异(李萍等, 2019)。除离石区西北部、石楼县以及永和县等地区外, 吕梁山东、西两侧内摩擦角与取样深度的变化规律具有一定的相似性(图 6)。东、西两侧内摩擦角 ϕ 主要集中在 $23^{\circ}\sim 34^{\circ}$ 之间, 但内摩擦角 ϕ 随深度的相关性不大, 最优拟合相关性系数较低。

由于黄土的抗剪强度指标 c 和 ϕ 受控于土颗粒大小、形状、级配、孔隙比、固结度以及土壤含水率等因素(王林浩等, 2010; 李萍等, 2019)。对于以风尘沉积为主的吕梁山区黄土也是如此, 但是吕梁山区地处黄土高原东缘, 冬季风携带大量粉尘从西北往东南转移的过程中受到吕梁山的阻挡作用, 使得吕梁山东、西两侧出现差异化沉积, 这一点从吕梁山东、西两侧马兰黄土沉积层厚度不难看出。西侧具有更厚的马兰黄土沉积地层, 这就说明在吕梁山西侧地区接收到了更多的粉尘堆积。吕梁山的阻挡作用不光影响着粉尘的沉积, 同时也改变了该地区的局地气候, 导致吕梁山东、西两侧差异化降水(徐少雄等, 2020), 也使得吕梁山两侧沉积后产生不同的再造作用。特殊的沉积方式、成土环境以及区域气候条件的差异, 形成了吕梁山区 c 、 ϕ 值在水平地域以及垂直空间上产生较为显著的变化规律。

3 抗剪强度参数影响因素的试验分析

3.1 天然含水率、天然干密度对 c 、 φ 的影响

图 7a、图 7b 分别显示出吕梁山区两侧马兰黄土天然含水率与抗剪强度参数 c 、 φ 的关系。从图 7a 可以看出,除临县东南部、离石区西北部、石楼县以及永和县等地区内摩擦角较低外,吕梁山东、西两侧内摩擦角与天然含水率分布较为集中,与内摩擦角-取样深度具有相似的规律;图 7b 反映的是黏聚力与天然含水率的关系,可以看出黏聚力与天然含水率的离散

性较高。天然含水率对吕梁山东、西两侧黏聚力的影响程度较低。

吕梁山区两侧马兰黄土天然干密度与抗剪强度参数 c 、 φ 的关系见图 7c、图 7d。从图 7c 可以看出,除临县东南部、离石区西北部、石楼县以及永和县等地区黏聚力较低外,天然干密度与内摩擦角的关系与内摩擦角-取样深度以及内摩擦角-天然含水率的关系相似,相对来说,吕梁山西侧黄土的干密度要大于东侧的。图 7d 反映的是天然干密度与黏聚力的关系,可以看出研究区内天然干密度与黏聚力相关性较低,吕梁山西侧较东侧离散程度更大。

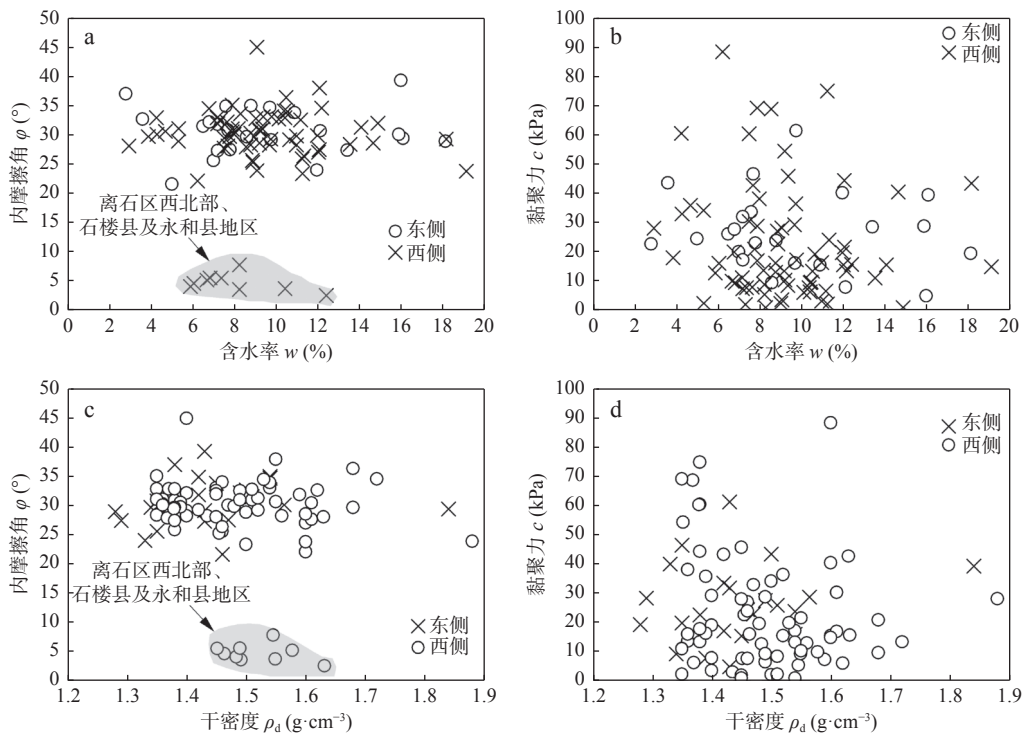


图 7 吕梁山区马兰黄土抗剪强度参数(c 、 φ)与天然含水率、天然干密度的关系图

Fig. 7 The relationship between the shear strength parameters (c , φ) of Malan loess in the Lüliang area and the natural moisture content and natural dry density

3.2 增湿含水率对原状黄土 c 、 φ 的影响

研究显示,在天然干密度条件下,临县、柳林、永和以及吉县 4 个县的原状黄土黏聚力 c 均随增湿含水率的增大呈降低的趋势,黏聚力 c 与增湿含水率 w 之间具有如下指数函数关系:

$$c = ae^{bw} \quad (1)$$

式中, a 、 b 为拟合参数。临县、柳林、永和、吉县四地的原状黄土的增湿含水率与黏聚力具有良好的拟合关系,皮尔逊相关系数分别为 0.98、0.88、0.88 和 0.89,表明增湿含水率与黏聚力具有高度的相关性

(图 8)。临县、永和黄土的黏聚力 c 随增湿含水率的增加而迅速降低,其降低幅度较柳林、吉县的要大。土的黏聚力主要是由静电引力、范德华力、颗粒间胶结作用以及假黏聚力(如毛细力等)引起的。对于疏松多孔、弱胶结且节理裂隙发育的原状黄土,含水率的增加,土体结构软化,同时可溶盐的溶解,降低土颗粒间的胶结作用力,进而导致黏聚力值降低(曹晓毅等, 2014; 刘晓京等, 2018; 郭义龙, 2020; Liu et al., 2020)。

在天然干密度条件下,临县、柳林、永和以及吉

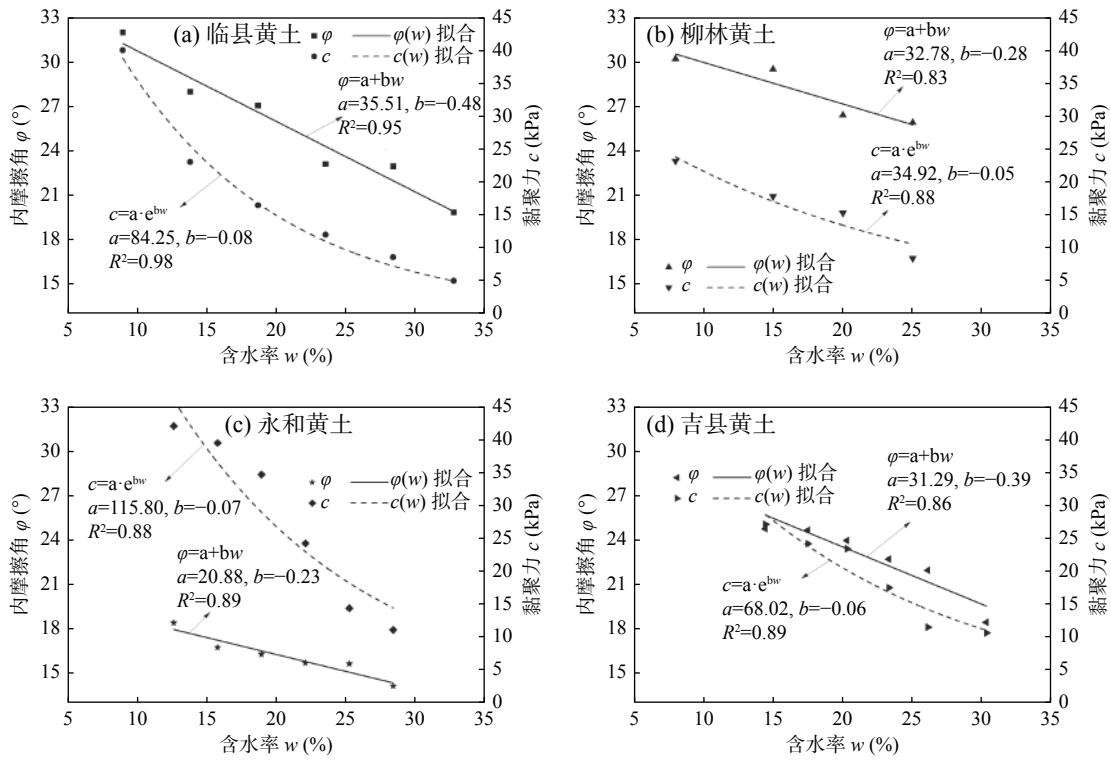


图 8 不同地区马兰黄土增湿含水率对抗剪强度参数 c 、 ϕ 的关系曲线图

Fig. 8 Relationship curve between wetting water content and shear strength parameters (c, ϕ) of Malan loess in different regions

县 4 县的原状黄土的内摩擦角 ϕ 与增湿含水率 w 具有一定的线性相关关系:

$$\phi = A + Bw \quad (2)$$

式中, A, B 为拟合参数。内摩擦角 ϕ 随增湿含水率 w 呈线性负相关关系, 4 个县线性拟合的皮尔逊相关系数分别为 0.95、0.83、0.89 和 0.86, 表明内摩擦角 ϕ 与增湿含水率 w 具有良好的相关性(图 8)。已有的研究表明, 土体的内摩擦角反映的是土颗粒间的滑动摩擦和咬合摩擦, 主要受土的级配、颗粒大小及形

状、矿物成分以及含水率等的影响。土体含水率的增加, 首先会附着于土颗粒表面, 增加结合水膜厚度, 致使土颗粒间相对运动的摩擦系数降低(Liu et al., 2020)。同时, 含水率的增加也促使了可溶盐的溶解, 减弱土颗粒间的胶结作用, 软化结构, 从而降低咬合摩擦。在其抗剪强度上的反映就是内摩擦角 ϕ 减小(曹晓毅等, 2014)。

3.3 含盐率对 c, ϕ 的影响

从图 9 可以看出, 抗剪强度参数 c, ϕ 随着含盐率

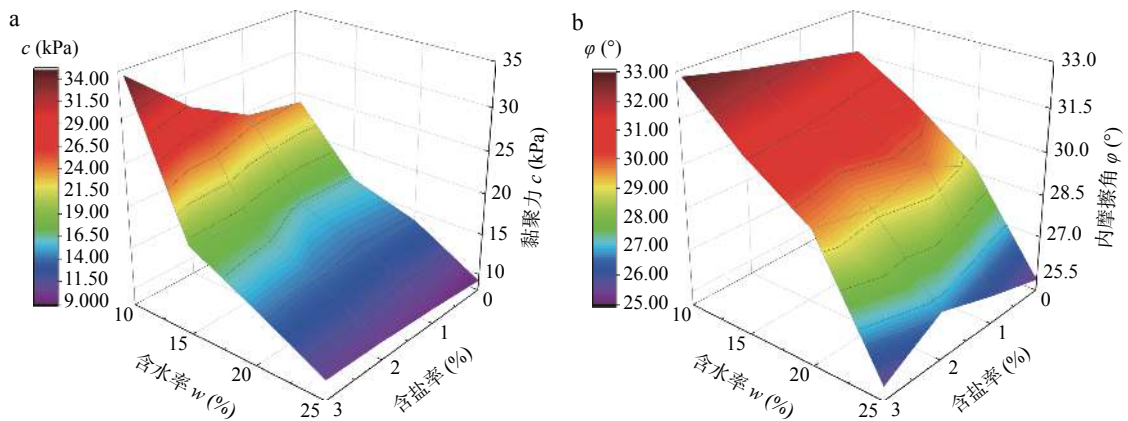


图 9 抗剪强度参数 c, ϕ 与含盐率、增湿含水率的关系图

Fig. 9 Relationship between shear strength parameters (c, ϕ) and salt content, wetting water content

的增加而增大,随着含水率的增大而降低(刘晓京等,2018)。总体来说,随着含盐率增高,含水率越低,抗剪强度参数 c 、 φ 越大;反之,则 c 、 φ 越小。相同含水率条件下,含盐率的提高有助于提升黄土抵抗剪切破坏的能力,且对内摩擦角的增幅作用要比黏聚力显著。当含水率为15%时,随含盐率的增大,黏聚力变化幅度较小;当含水率在20%~25%时,黏聚力随含水率的增大而基本不变(图9a)。当含水率从天然含水率10.44%增至15%时,内摩擦角随含盐率的增大而缓

慢降低;当含水率为15%~25%时,内摩擦角随含盐率迅速降低(图9b)。

图10展示了原状黄土 c 、 φ 与含水率、含盐率变量之间的相关关系。从统计结果上看,原状黄土的抗剪强度参数 c 、 φ 与含水率皮尔逊相关系数分别为-0.91和-0.96,均为负相关;而与含盐率均呈正相关关系,相关系数分别为0.20和0.12。对于原状黄土,土体的含水率对其抗剪强度参数的影响作用要远大于含盐率。

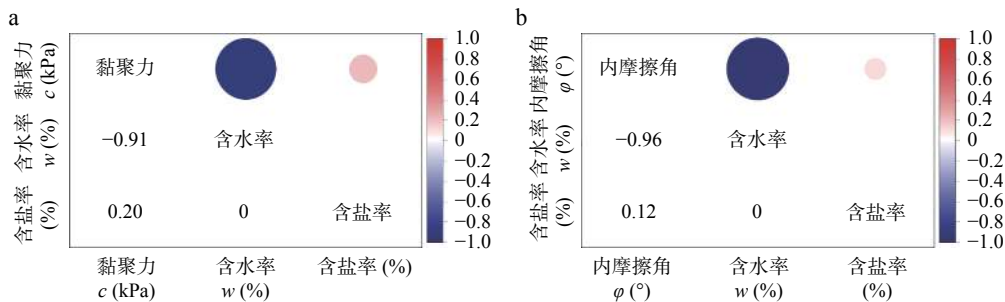


图10 原状黄土 c 、 φ 与含水率、含盐率的相关关系分析图

Fig. 10 Correlation analysis diagram of undisturbed loess c , φ and water content, salt content

4 结论

(1) 吕梁山东、西两侧原状马兰黄土的抗剪强度参数具有差异性:在天然含水率和干密度状态下,其抗剪强度参数 c 、 φ 在水平地域上总体表现为东高西低、南高北低;在垂直空间上,从表层向下抗剪强度参数表现为黏聚力逐渐增大和内摩擦角逐渐降低的趋势,但相关性较低。这种区域变化与其土颗粒组成、沉积方式、成土环境以及区域气候条件的差异性密切相关。

(2) 吕梁山东、西两侧原状马兰黄土天然含水率、天然干密度对其黏聚力和内摩擦角的影响作用较小,区域变化规律相似,但吕梁山西侧黏聚力和内摩擦角区域变异性更大。

(3) 在天然状态条件下,随着含水率的增加,原状马兰黄土的抗剪强度参数逐渐减小:黏聚力 c 与增湿含水率具有良好的负指数函数关系,内摩擦角 φ 与增湿含水率呈负线性关系。

(4) 在同一含水率条件下,含盐率与抗剪强度参数 c 、 φ 具有正相关关系,且含盐率对内摩擦角的增幅作用比黏聚力明显。与含盐率相比,增湿含水率对 c 、 φ 的影响作用更加显著。

(5) 本研究是对吕梁山区马兰黄土抗剪强度参数区域变化规律及影响因素的初步认识,其结果可为该地区马兰黄土地层的工程建设及防灾减灾工作提供基础和必备条件,但对吕梁山东、西两侧土体性质的差异性成因还需要进一步开展更深入的研究工作。

参考文献(References):

- 曹晓毅,李萍.含水量对晋西黄土抗剪强度影响的试验[J].*煤田地质与勘探*,2014,42(05):77-80+99.
- CAO Xiaoyi, LI Ping. Experiment study on relationship between water content and shear strength of loess in west Shanxi Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(05): 77-80+99.
- 董鸾花,李萍,夏增选,等.基于参数相关的Bayes估计及在黄土边坡可靠度分析中的应用[J].*西北地质*,2020,53(4):186-193.
- DONG Luanhua, LI Ping, XIA Zengxuan, et al. Parameters-based Bayes Estimation and Its Application in the Reliability Analysis of Loess Slope[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 186-193.
- 范兴科,蒋定生,赵合理.黄土高原浅层原状土抗剪强度浅

- 析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, (4): 70-76.
- FAN Xingke, JIANG Dingsheng, ZHAO Heli. Analysis on shear strength of shallow undisturbed soil in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, (4): 70-76.
- 郭倩怡, 王友林, 谢婉丽, 等. 黄土湿陷性与土体物性指标的相关性研究[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 212-221.
- GUO Qianyi, WANG Youlin, XIE Wanli, et al. Study on Correlation between Loess Collapsibility and Soil Physical Property Index[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 212-221.
- 郭晓娟. 冻融循环作用下吕梁地区马兰黄土强度参数及边坡稳定性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- GUO Xiaojuan. Study on Slope Stability and Strength Parameters of Malan Loess under Freezing and Thawing Cycle in Lvliang Area[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- 郭义龙. 吕梁地区黄土湿陷性与物理指标及结构性的研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- GUO Yilong. Study On Collapsibility, Physical Index And Structure Of Loess In Luliang Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- 洪勃, 杜少少, 李喜安, 等. 泾河南塬黄土的渗透特征及孕灾机制[J]. 水土保持通报, 2019, 39(03): 75-79.
- HONG Bo, DU Shaoshao, LI Xi'an, et al. Infiltration Characteristics and Disaster-forming Mechanism of Loess in South Jinghe Tableland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(03): 75-79.
- 巨玉文, 齐琼, 董震, 等. 山西西部地区黄土地质灾害与降雨的关联性分析[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(01): 81-87.
- JU Yuwen, QI Qiong, DONG Zhen, et al. Analysis of relevance between loess geological disasters and rainfalls in the western area of Shanxi Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(01): 81-87.
- 李萍, 白健忠, GRIFFITHS D V, 等. 黄土边坡可靠度的随机有限元分析[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(1): 116-126.
- LI Ping, BAI Jianzhong, GRIFFITHS D V, et al. Random Finite Element Analysis for the Reliability of Loess Slopes[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(1): 116-126.
- 刘畅, 张平松, 杨为民, 等. 税湾地震黄土滑坡的岩土动力特性及其稳定性评价[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 176-185.
- LIU Chang, ZHANG Pingsong, YANG Weimin, et al. Geotechnical Dynamic Characteristics and Stability Evaluation of Loess Landslides in Shuiwan Earthquake, Tianshui, Gansu[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(4): 176-185.
- 刘晓京, 陈新建, 冯满, 等. 可溶盐对原状黄土强度影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(S): 652-656.
- LIU Xiaojing, CHEN Xinjian, FENG Man, et al. Study of Influence of Soluble Salts on Original Loess Strength[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(S): 652-656.
- 吕萌. 山西省黄土崩塌地质灾害的现状与水敏感性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- LV Meng. The Present Situation of the Loess Collapse of Geological Disasters in Shanxi Province and the Water Sensitivity Analysis[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- 落合博贵, 陈丽华. 晋西黄土力学强度特性及滑坡发生机理的研究[J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(S4): 93-100.
- OCHIAI Hiroki, CHEN Lihua. Study on mechanical strength characteristics of loess and mechanism of landslide in western Shanxi[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1994, 16(S4): 93-100.
- 孙萍萍, 张茂省, 冯立, 等. 黄土水敏性及其时空分布规律[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 117-124.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Water Sensitivity of Loess and Its Spatial-Temporal Distribution on the Loess Plateau[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 117-124.
- 王林浩, 白晓红, 冯俊琴. 压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 132-135.
- WANG Linhao, BAI Xiaohong, FENG Junqin. Discussion on shear strength influencing factors of compacted loess-like backfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 132-135.
- 王硕, 刘占辉. 非饱和重塑黄土抗剪强度影响因素的试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2010, 23(03): 86-89+93.
- WANG Shuo, LIU Zhanhui. Test Study on Influence Factor of Shear Strength of Unsaturated Remolded Loess[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute(Natural Science), 2010, 23(03): 86-89+93.
- 谢庆勇. 吕梁机场工程黄土边坡的敏感性分析[J]. 路基工程, 2012, (01): 135-137.
- XIE Qingyong. Sensitivity Analysis for Loess Slope of Lvliang Airport[J]. Subgrade Engineering, 2012, (01): 135-137.
- 徐少雄, 赵景波, 杜卓群. 吕梁山地形对气候的影响分析[J]. 现代农业科技, 2020, (05): 176-179+84.
- XU Shaoxiong, ZHAO Jingbo, DU Zhuoqun. Analysis on Influence of Lvliang Mountain Terrain on Climate[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020, (05): 176-179+84.
- 于慧丽, 龙建辉, 刘海松, 等. 吕梁山区黄土边坡工程地质分区及强度参数选取[J]. 工程地质学报, 2014, 22(01): 152-159.

- YU Huili, LONG Jianhui, LIU Haisong, et al. Engineering Geology Division of Loess Slope and Its Strength Parameter Selection in Lvliang Mountainous Area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(01): 152–159.
- 张玲玲, 龙建辉, 邢鲜丽, 等. 冻融循环作用下吕梁地区马兰黄土性质研究[J]. *太原理工大学学报*, 2021, 52(04): 557–563.
- ZHANG Lingling, LONG Jianhui, XING Xianli, et al. Study on the Properties of Malan Loessin Lvliang Area Under Freeze-thaw Cycles[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2021, 52(04): 557–563.
- 赵杰, 巨玉文. 冻融循环对永和原状黄土影响的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(28): 269–272.
- ZHAO Jie, JU Yuwen. Test Research on Influence of Freezing and Thawing Cycle on Undisturbed Loess in Yonghe[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(28): 269–272.
- Cui Y, Xu C, Xu S, et al. Small-scale catastrophic landslides in loess areas of China: an example of the March 15, 2019, Zaoling landslide in Shanxi Province[J]. *Landslides*, 2019, 17(3): 669–676.
- Juang C H, Dijkstra T, Wasowski J, et al. Loess geohazards research in China: Advances and challenges for mega engineering projects[J]. *Engineering Geology*, 2019, 251: 1–10.
- Li X A, Hong B, Wang L, et al. Microanisotropy and preferred orientation of grains and aggregates (POGA) of the Malan loess in Yan'an, China: a profile study[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 79(4): 1893–1907.
- Liu J W, Fan H H, Song X Y, et al. Characteristics of Shear Strength and Deformation of Compacted Q₃ Loess[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, 57(1): 65–72.
- Tang D Q, Peng J B, Wang Q Y, et al. Lvliang Typical Loess Landslide Mechanism and Characteristics[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 90-93: 1313–1317.
- Tang Y, Bi Y, Guo Z, et al. A Novel Method for Obtaining the Loess Structural Index from Computed Tomography Images: A Case Study from the Lvliang Mountains of the Loess Plateau (China)[J]. *Land*, 2021, 10(3): 291.
- Tang Y, Feng F, Guo Z, et al. Integrating Principal Component Analysis with Statistically-Based Models for Analysis of Causal Factors and Landslide Susceptibility Mapping: A Comparative Study from the Loess Plateau Area in Shanxi (China)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020: 277.
- Wang J, Xu Y, Ma Y, et al. Study on the Deformation and Failure Modes of Filling Slope in Loess Filling Engineering: A Case Study at a Loess Mountain Airport[J]. *Landslides*, 2018, 15(12): 2423–2435.
- Wang J, Zhang D, Wang N, et al. Mechanisms of wetting-induced loess slope failures[J]. *Landslides*, 2019, 16(5): 937–953.

《新形势下中国与中亚国家矿产资源合作研究》出版发行

《新形势下中国与中亚国家矿产资源合作研究》是由中国地质调查局西安地质调查中心、中国-上海合作组织地学合作研究中心吕鹏瑞高级工程师编著,由中国地质大学出版社正式出版发行。

该书详细解读了新形势下中亚国家矿产资源在中国能源资源供应体系中的作用及其影响,按矿种分章节剖析了中亚地区油气、铀矿、金矿、铬铁矿、锑矿、铜-钼-铼矿等优势矿产的资源禀赋、产-销-贸变化趋势,总结了中亚国家与中国的合作概况并有针对性的提出相关合作建议,全方位展示了中亚地区优势矿产供需格局及其在中国矿业产能合作的地位。

该书的出版有助于中资企业全面了解中亚国家的资源概况、开发现状、贸易情况以及相关的矿业政策,推动中国与中亚五国开展资源产能合作。

(吕鹏瑞)