



引文格式: 于国强, 朱立峰, 张霞, 等. 灌溉诱发湿陷型侧压力对黄土滑坡的影响机制[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 111-120. DOI: 10.12401/j.nwg.2024111

Citation: YU Guoqiang, ZHU Lifeng, ZHANG Xia, et al. Effect of Collapse-type Lateral Pressure Induced by Irrigation on Loess Landslide[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 111-120. DOI: 10.12401/j.nwg.2024111

灌溉诱发湿陷型侧压力对黄土滑坡的影响机制

于国强^{1,2}, 朱立峰^{1,*}, 张霞³, 刘港¹

(1. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心 陕西 西安 710119; 3. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 黄土斜坡因湿陷所致侧压力促进坡体失稳滑动, 是研究灌溉诱发黄土滑坡的基础科学问题。本研究通过黑方台黄土湿陷试验和坡体稳定性模拟, 阐明了灌溉湿陷侧压力在坡体内部空间变异性及其促滑机理。结果表明, 该区黄土为自重湿陷性黄土, 灌区 0~15 m 深度黄土为轻度湿陷, 20~25 m 深度黄土为中度湿陷, 非灌区黄土均为强烈湿陷。当坡体含水率由 4% 增加到 20% 时, 总位移以水平方向为主, 水平方向总位移由 12 mm 增加至 140 mm, 侧压力系数逐渐增大。饱和状态下, 发生湿陷变形时的最大侧压力达 123 kPa, 湿陷型侧压力系数增加达 1.4 倍。湿陷导致坡体上部产生拉应力, 在滑坡后缘深度在 5 m 以下的土体产生湿陷裂缝, 形成优势通道; 坡体内部因压应力集中而产生指向临空面的侧向压力, 循着坡肩湿陷裂缝向坡体内部扩张, 并沿弧形软弱带发生剪切破坏直至失稳。考虑侧压力对滑坡的促进作用与实际情况更为吻合, 完善了灌溉型黄土滑坡的影响因素的特征, 有助于完善黄土滑坡诱发灾害理论, 为黄土滑坡的精确预警提供参考。

关键词: 黄土滑坡; 湿陷性; 侧压力系数; 含水率

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0111-10

Effect of Collapse-type Lateral Pressure Induced by Irrigation on Loess Landslide

YU Guoqiang^{1,2}, ZHU Lifeng^{1,*}, ZHANG Xia³, LIU Gang¹

(1. Key Laboratory for Geo-Hazard in Loess Area, Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Province Engineering Research Centre of Water Resources and Environment, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Loess collapse-type lateral pressure have a landslide-promoting effect in loess slope areas, which is a basic scientific problem in the study of loess landslides induced by irrigation. A study on collapse tests and slope stability simulations of loess were conducted. The variability of loess collapse-type lateral pressure in the Heifangtai area and its sliding mechanism has been analyzed. The results indicate that Heifangtai loess is self-

收稿日期: 2024-06-03; 修回日期: 2024-11-22; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵植被与淤地坝调控重力侵蚀的协同作用机制”(42177346), “黄土高原粗沙区水沙产输机理与模拟模型”(U2243240)联合资助。

作者简介: 于国强(1979-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事土壤侵蚀与水土保持及地质灾害等方面的研究。E-mail: yuguoqiang23@163.com。

* 通讯作者: 朱立峰(1973-), 男, 正高级工程师, 从事地质灾害等方面的研究。E-mail: sx-zhulf@163.com。

weighted collapsible loess; soil of the irrigated area at depths of 0-15 m are slightly collapsible; soil at depths of 20-25 m are moderately collapsible loess, and the loess in the unirrigated area is highly collapsible. As the water content of the slope increases from 4% to 20%, the total slope displacement is predominantly horizontal, increasing from 12 mm to 140 mm, the lateral pressure coefficient also gradually increases. In saturated state, the maximum lateral pressure reaches 123 kPa when collapsible deformation occurs, the collapse-type lateral pressure coefficient increases of up to 1.4 times, and horizontal deformation is also correspondingly large. Collapse action leads to tensile stresses in the upper part of the slope, making it prone to collapse-type crack formation in the soil below the back edge of the landslide at depths of up to 5 m, resulting in dominant channels of surface water infiltration and forming landslide scarps. What's more, lateral pressure pointing to the critical surface is generated inside of the slope due to the stress concentration, which expands to the interior of the slope along the collapse-type crack of the slope shoulder, and shear damage occurs along the curved weak zone until instability occurs. Considering that the promotion of landslides by lateral pressure is more consistent with the actual situation and can better characterize the influencing factors of irrigated loess landslides. The results of this research help to improve loess landslide-induced disaster theory, and provide reference for the precise early warning of loess landslide disasters.

Keywords: collapsibility; lateral pressure coefficient; water content; loess landslide

历经 50 余年的农业引水灌溉, 中国甘肃黑方台地区发生了高频率滑坡(3~5 次/a)和大规模地表湿陷沉降事件(最大湿陷沉降 5.96 m)(Peng et al., 2018; 李同录等, 2022; Zhang et al., 2022)。黑方台地区湿陷呈多维变形过程, 垂向变形固然明显, 但水平变形也不容忽视。一定深度土体的侧压力大小与自重压力和含水率有关, 能够改变土体应力状态的因素都会使侧压力发生变化, 从而引起相应的变形甚至灾害(吴玮江等, 2018; Gu et al., 2019; Zhang et al., 2022)。山西晋中的现场浸水试验证明了湿陷变形不仅局限于竖向变形, 在一定程度上还包括水平变形, 由于水平变形的作用, 土体被推向变形临空面, 验证了湿陷型侧压力对土体内部应力场的重要影响(赵宽耀等, 2018; Xu et al., 2021)。

目前, 对黑方台地区黄土湿陷变形机理、灌区水文响应、滑坡启动机理等方面的研究已相当深入。对黑方台黄土的湿陷性评价、湿陷微结构、湿陷过程、水-土相互作用机理等进行了大量的尝试(吴玮江等, 2018; Peng et al., 2018; Gu et al., 2019; Juang et al., 2019; 田中英等, 2019; 周飞等, 2020)。主要研究了区域地下水补给、径流、排泄和湿陷的生理生化机制(Xu et al., 2019; 孙彬等, 2020), 以及优势入渗和黄土水敏性诱发黄土滑坡(Peng et al., 2018; Xu et al., 2019; 赵志强等, 2021); 这些研究有助于了解黑方台地区灌溉促滑机理。然而, 在灌溉诱发滑坡的研究中, 与黄土湿陷型侧压力相关的研究较少, 忽视了侧压力对黄土滑坡的促进作用(Xu et al., 2011; 吴玮江等, 2018; Zhang et

al., 2022)。本研究开展湿陷引起坡体内部侧压力变化及其对黄土斜坡的促滑机制研究, 不仅可以深入理解黄土滑坡群发机理, 还可为黄土滑坡的早期预警提供理论支撑和实践指导。

1 岩土试验

黑方台位于甘肃省永靖县, 原为无人居住的旱台, 为安置刘家峡库区移民引水灌溉形成旱作农田(图 1), 灌溉农田面积 13.7 km²。台塬农田灌溉始于 1969 年, 灌溉面积约 7.53 km²(Xu et al., 2011; Zhang et al., 2022)。年灌溉水量在 6.0×10⁶ m³ 至 8.0×10⁶ m³ 之间, 相当于总水深 438~584 mm。根据作物种植结构的用水需求, 每年通常进行五次灌溉。从 1971~2000 年, 多年平均降水量约 300 mm。其中, 71% 降水集中于 6~9 月, 而多年平均蒸发量约 1 700 mm(Wang et al., 2020)。显然, 灌溉水对台地地下水的补给和变化做出了重要贡献。

黑方台台塬由以下地层单元组成: 上部地层(厚约 25~50 m)由第四系中上更新统马兰黄土和离石黄土组成; 黄土层之下是厚 4~17 m 的第四系中更新统冲积粉质黏土和厚 2~5 m 的砂砾石; 斜坡中下部由白垩系砂泥岩互层组成, 还有少量砾岩(朱立峰, 2019; Gu et al., 2021; Xu et al., 2021; Zhang et al., 2022)。

滑坡主要集中于黑方台台塬周边, 尤其是沿着黄河的左岸发育(图 1)。这些滑坡包括黄土滑坡和黄土-基岩滑坡。黄土滑坡基本分布于野狐沟到湟水河口

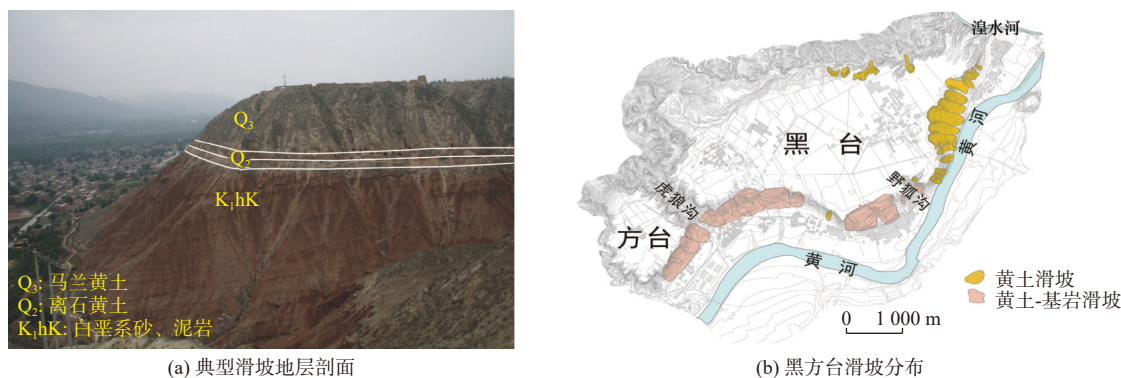


图1 研究区典型滑坡及分布

Fig. 1 Typical landslides and the distribution of study site

之间,通常以中大型、长距离滑坡为主;黄土-基岩滑坡主要分布在野狐沟和虎狼沟之间,多以中小型滑坡为主,具有低速、滑动距离短等特征。

土壤物理特性:研究区内的黄土厚度较大,土壤性质均匀。自1969年开始灌溉以来,大面积湿陷主要发生在晚更新世马兰黄土层中。目前,灌区黄土剩余湿陷量逐渐减少,表观湿陷沉降不明显,选择黑台灌区黄土进行湿陷型侧压力研究价值不大。因此,本研究选择黑台东部非灌区折达公路建设揭露新鲜剖面的晚更新世黄土作为研究对象,分别在图2中A、B、C、D等4处进行采样,自上而下每隔5 m垂直取样(最大深度25 m),严格按照I类试样取样要求采集。



图2 取样位置

Fig. 2 Sampling locations

密度、含水率和比重等所有的物理性质测试均在实验室完成。粒度分布采用激光粒度分析仪测定,强度参数采用直接剪切仪测定。具体操作和试验仪器符合国家标准《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)。

侧压力系数 K_0 测试:采用 GJY K_0 固结仪(南京

土壤仪器厂有限公司)。每个试样的尺寸控制在 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times H40 \text{ mm}$ 。调整不同的初始含水率(天然、10%、20%和饱和)和不同的深度(5 m、10 m、15 m、20 m、25 m)来调控水力边界,从而确定固结和湿陷过程中的侧压力变化。试验包括固结压缩和浸水湿陷变形两个阶段。首先,根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019),在重力作用下进行土样固结压缩,直至稳定;然后对固结压缩土样进行浸水,记录土样变形和侧压力的变化特征,直至变形稳定,试验结束(Lu et al., 2012; Hinds et al., 2019)。

当土样受到轴向力时,除了轴向压缩变形外,还会产生侧向变形。本研究假设橡胶膜和压力室内的水是不可压缩的,橡胶膜和水作为压力传递介质,一旦试验土样发生侧向变形时的侧向压力被实时传递到压力传感器上,测量试验土样在不同轴向压力下湿陷时的侧向压力变化(Shahrokhbadi et al., 2019; Yang et al., 2021)。

通过 FLAC3D 建立三维坡体模型(图3):模型上

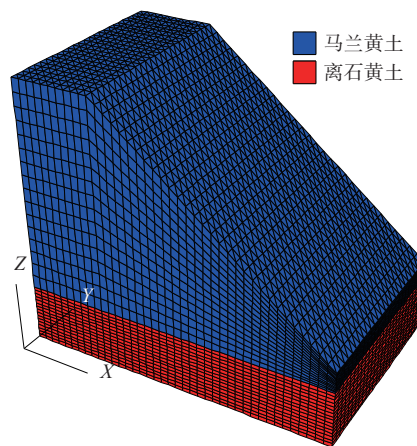


图3 坡体有限元计算模型

Fig. 3 Finite element model for slope computation

部是晚更新世黄土(Q_p³),其厚度设为 50 m。由于下层黄土已经饱和,可以忽略湿陷作用的影响,因此将其简单地概化成离石黄土,厚度设为 20 m。坡高设定为 55 m,坡度为 40°,坡长为 78.4 m,坡顶宽度 50 m。

将坡面作为自由边界,将模型地层(Z=0)作为固定边界,其余均作为单向边界。X 轴方向、Y 轴方向的长度分别为 80 m 和 50 m,Z 轴方向的高度是 70 m。根据原位实验、土力学测试,确定土体物理力学参数(表 1)。

表 1 土体材料强度及物理参数

Tab. 1 Material strength and physical parameter

土层类型	体积模量K(MPa)	剪切模量G(MPa)	粘聚力C(kPa)	内摩擦角φ(°)	密度ρ(kg/m ³)	液限(%)	塑限(%)
马兰黄土	417	149	23	21.9	1 470	22.90~28.21	11.17~19.94
离石黄土	588	226	41	27.5	1 780	——	——

2 数值模拟

2.1 黄土湿陷对侧压力的影响

2.1.1 黄土湿陷特性

对比分析表明,灌溉区和非灌溉区的黄土湿陷系数δ_{zs}均大于 0.015,灌溉区的黄土湿陷系数低于非灌溉区(图 4)。灌溉区近地表的 4 m 深度以浅,黄土自重湿陷系数随深度增加而增大,4 m 以深自重湿陷系数基本保持在 0.043 4,仅有微小变化。非灌溉区黄土自重湿陷系数沿深度方向的变化更加明显,表现为 3 个不同的区间特征:1~5 m 为波动区,此区域表现出“Z”形的变化趋势;5~10 m 为稳定区,基本在 0.086 9~0.10 区间内变化;11~15 m 为陡降区,下部

已经接近于灌区自重湿陷系数。

依据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025-2004),土体在饱和自重压力下所测试的自重湿陷系数δ_{zs}≥0.015,以及实测自重湿陷量大于 7 cm 进行判定,黑方台地区黄土均为自重湿陷性黄土。灌区 5、10、15 m 深度黄土均为轻度自重湿陷性黄土,灌区 20、25 m 深度为中等自重湿陷性黄土;非灌溉区的黄土不论深度均为强烈自重湿陷性黄土,这与前人的研究结果一致(Thomas et al., 2018; Shahrokhbadi et al., 2019)。

2.1.2 湿陷侧压力特征

湿陷过程中侧压力的变化见图 5、图 6。可以看出,不同含水率和深度的固结压缩和浸水湿陷变形过程中,湿陷型侧压力的变化趋势相似,可分为 4 个阶段(OA-AB-BC-CD)(图 5a):①固结起始阶段(OA),此时侧压力在自重应力恢复过程中产生响应,侧压力在快速加压后达到第一个峰值。②固结稳定阶段(AB),此时土体结构重组回升,侧压力减小,趋于固结稳定变形。③湿陷变形阶段(BC),浸水土体塑性应变快速发展,侧压力迅速提高,达到第二个峰值。④湿陷稳定阶段(CD),随着湿陷进程的完成,土体变形趋于稳定,侧向变形减弱,土体侧向压力趋于稳定(吴玮江等, 2018; Yang et al., 2022)。

图 5 为不同初始含水率土体在同一深度的侧压力变化情况。当所施加压力保持不变时,在固结稳定阶段,随着含水率的增加,侧压力会呈现出 31 kPa、36 kPa、38 kPa 和 50 kPa 的递增趋势,从而导致变形也会变得更大;在固结稳定之后,不同含水率下侧压力变化显著。湿陷后侧压力上升至临界值,在不同状态下差异不明显,这种变化是由于不同的应力路径引起的。

图 6 表明在相同含水率下不同深度土体侧压力的变化情况。随着深度的增加,伴随压缩固结过程侧

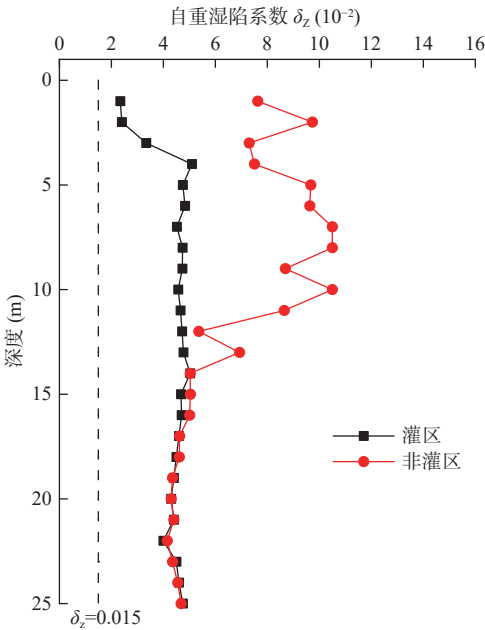


图4 灌区和非灌区黄土湿陷性差异

Fig. 4 Differences in loess collapsibility between the irrigated area and the unirrigated area

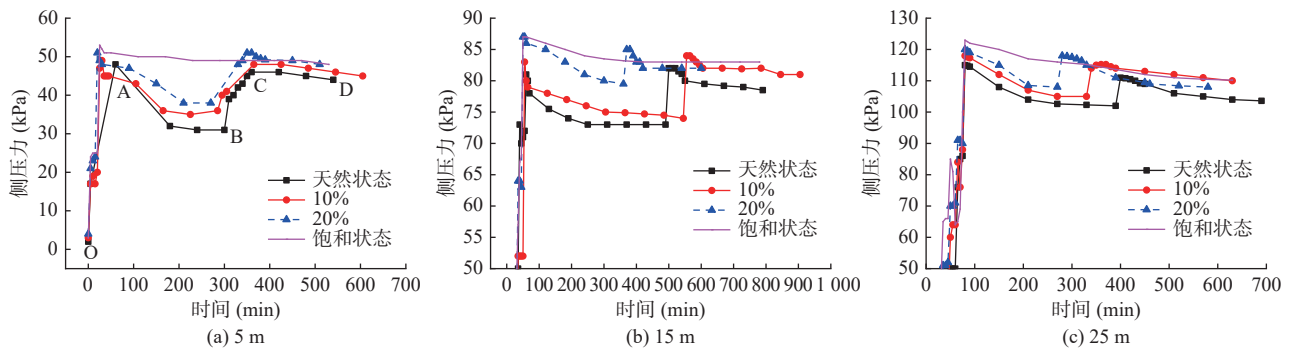


图5 同一深度处不同含水率下侧压力变化

Fig. 5 Variability of lateral pressure at the same soil depth with water content

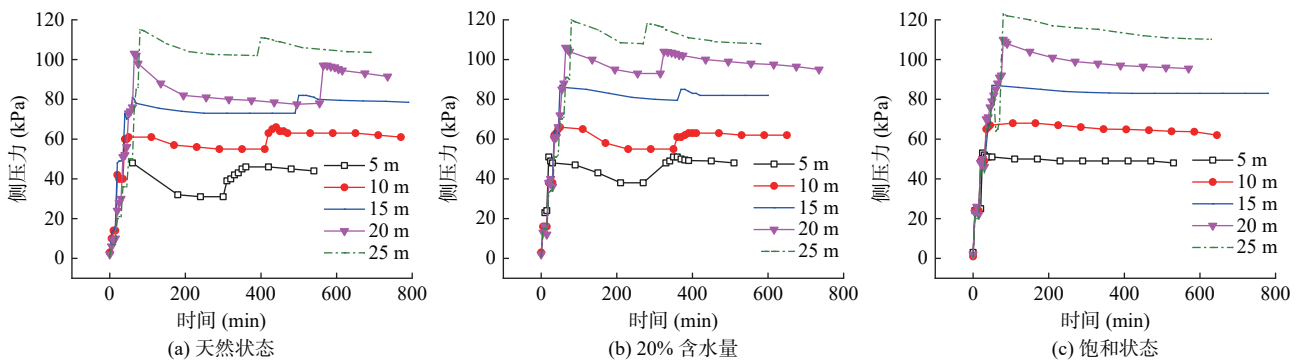


图6 同一初始含水率不同深度处的侧压力变化

Fig. 6 Variability of lateral pressure at the same water content with soil depth

压力逐渐增大,变形也相应增大。在饱和状态下,侧压力随深度变化很大,当发生湿陷变形时(饱和状态下深度为 25 m),最大侧压力达到 123 kPa。表明黄土湿陷时侧压力变化较大,在一定程度上影响了土体的结构稳定性,进而可能会影响斜坡稳定,这与前人的研究结果一致(Shao et al., 2018)。

2.1.3 侧压力系数变化特征

侧压力系数(K_0)反映了侧压力(σ_3)随垂直压力(σ_1)的变化($K_0=\sigma_3/\sigma_1$)。结合非饱和黄土的性质以及文献记载中关于侧压力与含水率成单值函数关系的研究。在天然和饱和状态下,水平应力和垂直应力的变化并非单一的(张炜, 1995)。由图 7 可知,饱和状态下, σ_1 - σ_3 曲线呈线性关系,仅在最初阶段会稍微曲折,而在非饱和状态下, σ_1 - σ_3 曲线受垂直压力 σ_{1p} 的影响,其左侧曲线趋于稳定,右侧曲线会因梯度的不断增加而急剧增加。此外,其分界值还与土壤的结构强度有关:当 $\sigma_1 < \sigma_{1p}$ 时,弹性应变占主导地位,土体结构基本完好,结构强度发挥作用;当 $\sigma_1 > \sigma_{1p}$ 时,土体结构发生塑性变形,结构强度随压力的增加逐渐降低至零,并导致破坏。

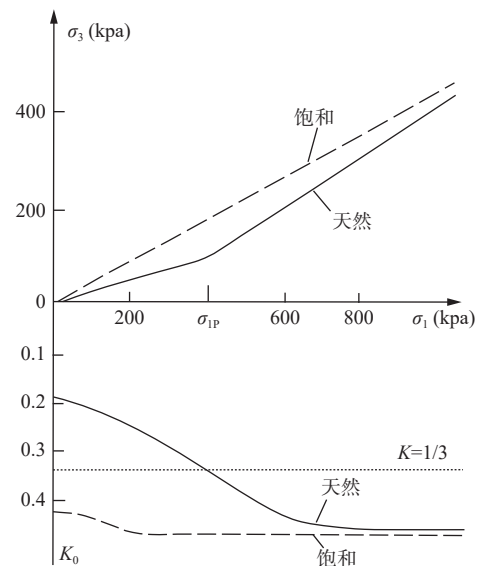


图7 土压力系数随主应力的变化规律

Fig. 7 Variability of soil pressure coefficient versus principal stress

在非饱和状态下,当 $\sigma_1 < \sigma_{1p}$ 时, σ_1 - K_0 曲线上的 K_0 值基本在 0.2~0.3 范围内,当 $\sigma_1 > \sigma_{1p}$ 时, K_0 值迅速增加到 0.4~0.5。在饱和状态下, K_0 值在初始段略

低,然后在 0.45~0.5 范围内,表明含水率对侧压力系数有重要的影响(张炜, 1995; Wayllace et al., 2019)。

2.2 湿陷侧压力与斜坡稳定性

2.2.1 斜坡位移场变化特征

本研究模拟了不同工况下坡体位移的分布特征。坡体水平位移(图 8)随着含水率的增加而逐渐增大。其中,斜坡底部 1/3 处的水平位移变化最大,从 12 mm 增加到 140 mm,从而增加斜坡失稳风险。

当含水率升高时,坡体总位移也会相应增大(图 9)。在含水率为 10% 的情况下,坡体总位移达到了天然状态的 9 倍;含水率增大至 20% 时,坡体总位移达到了 140 mm,达天然状态下的 12.6 倍,几乎覆盖了整个坡面。以坡顶附近位移变化尤为显著,距离坡面越近,位移也会更大。弧形位移等值线从坡面向坡心逐渐减小,表明坡体内部滑带从形成-贯通直至破坏的过程中,出现了局部变形。总的来看,最大水平位移和最大总位移出现在同一位置,即位于斜坡底部 1/3 处,且数值相近,说明坡体位移以水平位移为主,竖向位移为辅,坡体失稳时主要破坏模式为水平剪切为主。

2.2.2 斜坡应力场变化特征

图 10 和图 11 为不同条件下斜坡第一和第三主应力的模拟结果。可以看出,第一和第三主应力都是由压应力为主,而第一主应力的变化平缓,没有明显突变。相比之下,第三主应力等值线在 0.05~0.4 MPa 范围内在坡脚位置有一个尖锐的区域,表明第三主应力的变化比第一主应力的变化对坡体变形的影响更大,这意味着一定深度范围内侧压力的变化对坡体稳定性会产生较大影响。

应力等值线都相对于坡底向上移动,特别是在坡肩处,这种移动最为明显,表明随着湿度的增加,第一主应力也随之增加,坡肩容易发生剪切破坏。从坡面到坡心,应力不断增加。因此,受压屈服在斜坡后部占主导地位,第一主应力和第三主应力的最大值分别为 1 MPa 和 0.55 MPa,均出现在斜坡后缘底部。第一和第三主应力的最小值集中于坡面上,这表明含水率的增加对表土的主应力影响很小。

随着水分下渗,含水率逐渐增加,第一主应力受到的影响不大。渗水对土壤重量的影响不大,但第三

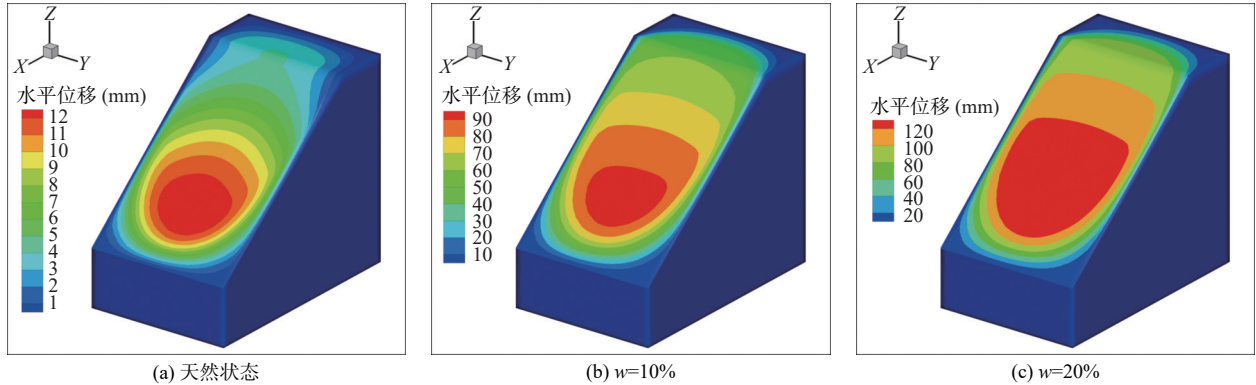


图8 不同含水率下斜坡水平方向位移

Fig. 8 Horizontal slope displacement under different water content conditions

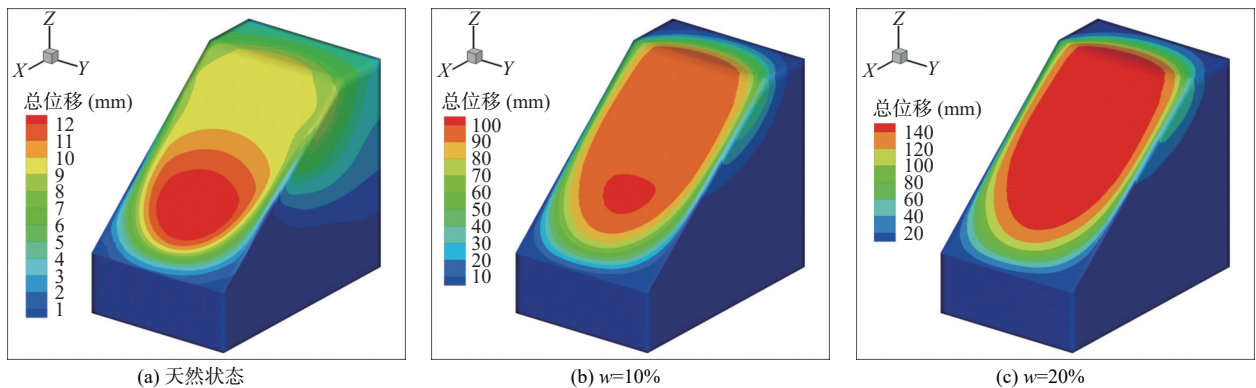


图9 不同含水率下斜坡总位移

Fig. 9 Total slope displacement under different water content conditions

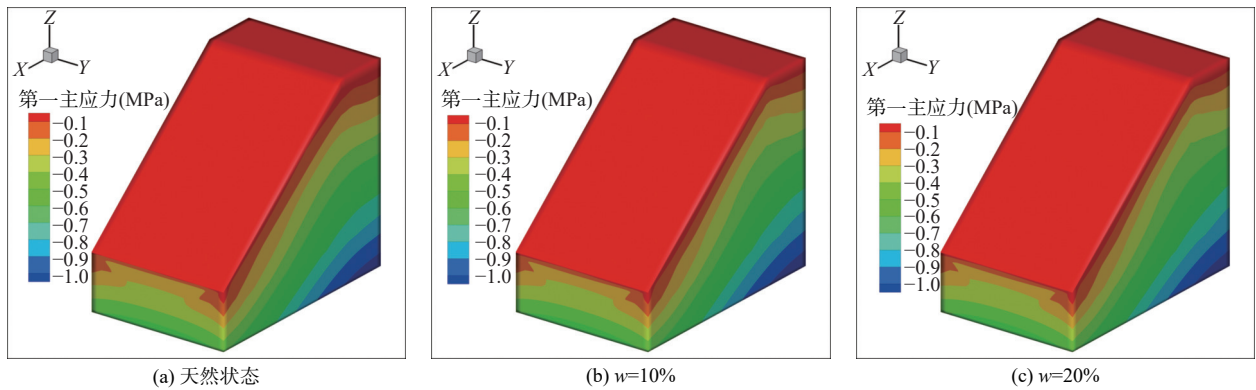


图10 不同含水率下斜坡第一主应力分布

Fig. 10 First principal stress of the slope at under different water content conditions

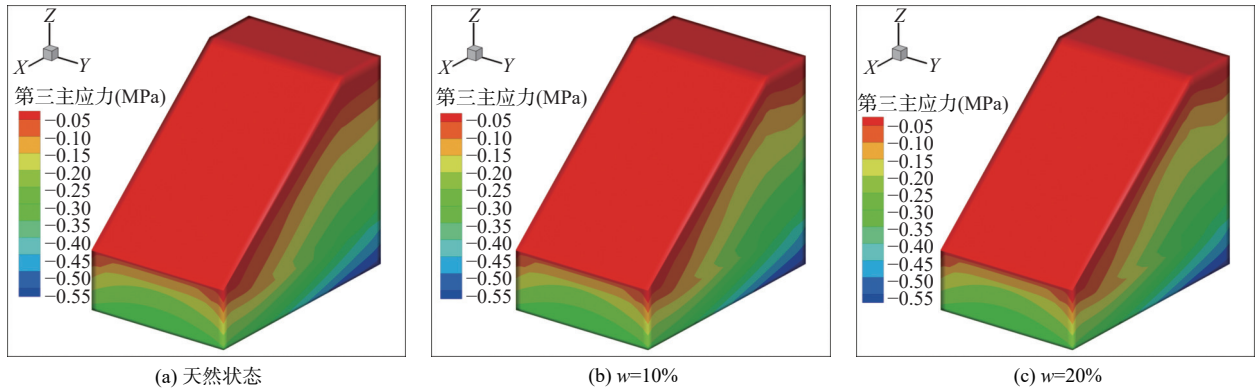


图11 不同含水率下斜坡第三主应力分布

Fig. 11 Third principal stress of the slope at under different water content conditions

主应力(或侧压力)却受到含水率的显著影响,这一点在实验室测试中得到了证实,即随着含水率的增加,土体中下部的侧压力也会相应增加(Shao et al., 2018; Shahrokhbadi et al., 2019; Yang et al., 2021)。

2.2.3 斜坡侧压力系数变化规律

侧压力系数是指在半无限条件下土壤压缩过程中有效侧压力(σ_3)与有效垂直压力(σ_1)之比(Gu et al.,

2021; Xu et al., 2021)。通过数值模拟计算了不同工况下坡体侧压力系数(图12)。最大坡体侧压力系数为0.65,出现在天然状态下的坡肩处(图12a)和任何工况下的坡脚处。侧压力系数随土壤湿度的增加而逐渐增大。

大多数情况下,侧压力系数呈正值,但也存在负值,如U型蓝色区域,其中侧压力系数最小值为-0.1

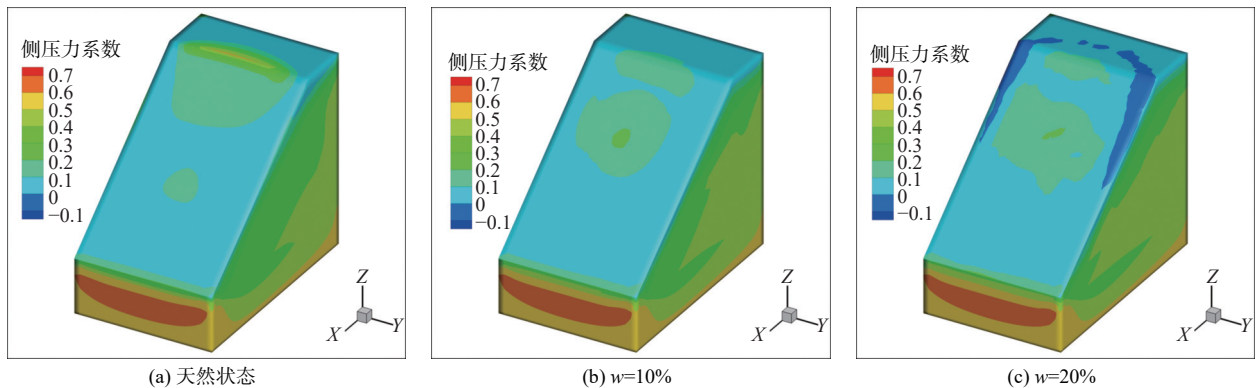


图12 不同含水率下斜坡侧压力系数分布

Fig. 12 Slope lateral pressure coefficients at under different water content conditions

(图 12), 这意味着拉应力的存在。这将导致坡面和坡顶出现局部破坏, 导致后缘开裂和局部沉降。地表水会沿着裂缝迅速渗入, 增加裂缝水的劈裂效应, 进一步加深并拓展裂缝。另外, 由于渗入的地表水, 地下水位可能会急剧上升, 并且浮托力也会随之增强, 最终导致坡体的不稳定。因此, 侧压力系数可以很好地显示坡体在不同工况下的变形特征(Gu et al., 2021; Xu et al., 2021)。

3 讨论

3.1 考虑侧压力影响的斜坡稳定性

基于斜坡单元体、局部安全系数的定义和极限平衡的概念, 当斜坡单元体的局部安全系数超过 1 时, 该单元体的应力水平满足极限平衡条件, 而当斜坡单元体的局部安全系数低于 1 时, 表明该单元体应力水平处于失衡状态, 甚至可能会出现破坏。因此, 通过分析斜坡的局部安全系数, 可以判断出该区域是否处于破坏或是稳定的状态。

图 13 显示, 坡体安全系数随含水率的增加而降低。当含水率从天然状态增加到 10% 时, 斜坡后缘逐渐出现裂缝, 剪切带贯穿不稳定单元体导致失稳滑动。随着土壤含水率进一步增加至 20%, 坡体稳定状态发生变化, 首先在坡肩处出现拉伸破坏, 然后破坏区域逐渐扩大, 直至贯通坡脚, 滑移面由线形演变为弧形, 坡体呈现“拉裂-滑移”式破坏。剪切破坏一般发生在塑性拉伸裂缝破坏区下部与坡面的接触部位, 随着土壤含水率增加, 剪切裂缝逐渐向坡脚方向移动。

随着土壤含水率的增加, 上覆应力也随之增大, 特别是在坡肩处, 应力集中程度极高, 超出了黄土固

有稳定强度, 从而导致土体结构的破坏, 并伴随着塑性变形, 最终形成了斜坡内部的塑性破坏区。由于局部塑性破坏区的出现, 土体承载能力会大幅度降低, 斜坡的应力场结构产生重新分配, 从而引发了一次性的结构破坏和新的塑性破坏的产生。随着这种相互作用的加强, 塑性破坏带不断扩大, 最终形成贯通的破坏面将塑性区连接起来。在灌溉条件下, 土壤中的水分会不断增加, 这些水分会渗透到有裂缝或垂直节理发育的坡体内部, 这将导致滑动力矩增大, 而法向力也会相应地增大, 从而提高抗滑力矩。当滑动力矩的增加超过阻滑力矩的增加时, 斜坡的稳定性将急剧下降。故坡顶拉裂可通过侧压力系数和局部安全系数的分布反映出来, 间接说明侧压力可影响坡体安全系数(Lu et al., 2012; 赵志强等, 2021; Gu et al., 2021; Xu et al., 2021)。

3.2 侧压力的促滑机制

从非饱和土的角度探讨黑方台地区黄土滑坡机理是一个方向, 黄土湿陷性是黄土非饱和性的一种表现形式。在文献讨论的滑坡机制中, 只考虑了地下水位或土体强度灌溉效应的作用, 而在灌溉或降水条件下, 由于含水率增加而导致黄土湿陷的侧向压力对斜坡稳定性的影响尚未涉及, 也是一个值得探讨的话题。

侧压力对斜坡的变形和破坏起着至关重要的作用, 其影响机制主要表现在两个方面: 一是黄土上部湿陷导致拉应力会朝着台塬方向发展, 沿湿陷不均匀区形成湿陷裂缝, 从而使得渗透性增强, 最终导致滑坡后壁的形成, 主要发生在滑坡后壁深度在 5 m 以下的土体。此外, 在坡体内部, 湿陷作用增大斜坡自重, 增加坡体压应力, 黄土底部沿土-岩接触面因承载应力能力的差异, 压应力集中而产生指向临空面的侧向

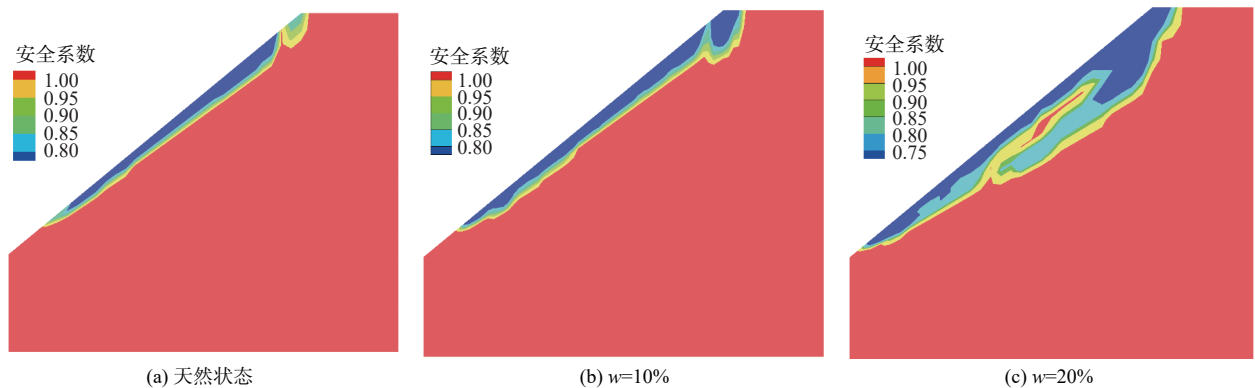


图 13 不同工况下斜坡安全系数云图

Fig. 13 Slope local safety coefficient under variable operating conditions

压力,从而增加滑动力,导致横向变形加剧;并循着坡肩湿陷裂缝向坡体内部扩张,沿着坡体中部土-岩接触面剪出口之间的弧形软弱带发生剪切破坏直至失稳(图14),这与之前的研究结果一致(Lu et al., 2012; 吴玮江等, 2018; Gu et al., 2019; Xu et al., 2019)。

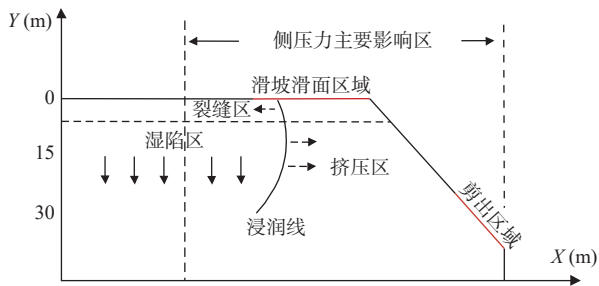


图14 侧压力促滑效应模式图

Fig. 14 Landslide-promoting mode of lateral pressure

由于黄土大孔结构和垂直节理发育的固有特点,其在同一深度的含水率会因水的入渗而变化,特定深度的部分土壤已经饱和,但部分水分尚未渗入该深度。黄土湿陷单元体上的应力变化非常明显,导致局部土体单元有效应力增大,坡体变形加剧(吴玮江等, 2018; Shao et al., 2018; Gu et al., 2021; Xu et al., 2021; Yao et al., 2021; 李同录等, 2022)。由于坡体上部自重压力小而未完全固结,加之黄土孔隙度大,湿陷时土体内部结构产生不均匀变化,为湿陷裂缝的形成与扩展提供了空间和途径。

裂缝的存在会加速水分渗透和强度劣化,促进坡体顶部的滑塌和滑坡后壁的形成。黄土下部基本上是由相对较高自重压力导致基本固结,浸水湿陷后土体强度下降,使得湿陷过程中挤压和侧向力增加,导致横向变形增强和滑动力增大,从而导致滑坡的发生(吴玮江等, 2018; 李同录等, 2022)。

4 结论

(1)黑方台黄土为自重湿陷性黄土,灌区0~15 m深为轻度湿陷性黄土,20~25 m深为中度湿陷性黄土,非灌区黄土均为高度湿陷性黄土。湿陷型侧压力在固结压缩和湿陷变形过程中,先是迅速增大,然后回落稳定,然后迅速增大并趋于稳定。在饱和状态下,发生湿陷变形时的最大侧压力达到123 kPa,湿陷型侧压力系数增加可达1.4倍,在一定程度上影响了土体的结构稳定性。

(2)当坡体含水率从4%增加到20%时,坡体总

位移从12 mm增加到140 mm,并覆盖了坡体的大部分。在湿陷变形过程中,最大位移发生在坡面底部1/3处,主要破坏模式以水平剪切破坏形式为主,沉降破坏形式为辅。含水率会显著地影响深层土体的主要应力;当含水率增加时,侧压力系数也随之增大,而且增长趋势会越来越明显。坡体安全系数随含水率的增加而减小,破坏区域逐渐扩大,直至穿透坡脚。在“剪切破坏”变形模式下,滑移面由线形变为弧形,剪切裂缝逐渐向坡脚移动。

(3)湿陷型侧压力诱发黄土滑坡的机理可以归结为:对于坡体上部因灌溉过程中黄土湿陷作用产生拉应力,易引发湿陷裂缝,形成地表水渗入的优势通道,最终形成滑坡后壁,主要发生在滑坡后缘下深度在5 m以下的土体;对于坡体内部,湿陷作用增大斜坡自重,增加坡体压应力,压应力集中而产生指向临空面的侧向压力,导致横向变形增强,并循着坡肩湿陷裂缝向坡体内部扩张,沿着坡体中部土-岩接触面剪出口之间的弧形软弱带发生剪切破坏直至失稳。

同时需要注意的是,笔者旨在讨论以往研究所忽略的湿陷侧压力因素对黄土斜坡灾变的作用机制,但文中数值模拟是借鉴了以往关于强度和渗透压力等问题的研究成果,未对这点进行针对性研究;因此湿陷侧压力对黄土滑坡的影响还有待进一步深入研究。

参考文献(References):

- 李同录, 李颖喆, 赵丹旗, 等. 对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 25-32.
- LI Tonglu, LI Yingzhe, ZHAO Danqi, et al. Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 25-32.
- 孙彬, 谷天峰, 孔嘉旭, 等. 非饱和黄土电阻率和含水率间关系试验研究[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 216-222.
- SUN Bin, GU Tianfeng, KONG Jiaxu, et al. Experimental research on relationship between resistivity and moisture content of unsaturated loess[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(4): 216-222.
- 田中英, 张茂省, 冯立, 等. 基于综合物探的黄土滑坡优势通道探测[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 172-180.
- TIAN Zhongying, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Preferential Passage Detection of Loess Landslide Based on Integrated Geo-

- physical Exploration[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 172–180.
- 吴玮江, 宿星, 叶伟林, 等. 饱和黄土滑坡形成中的侧压力作用——以甘肃黑方台为例[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(S1): 135–140.
- WU Weijiang, SU Xing, YE Weilin, et al. Lateral pressure in formation of saturated loess landslide—Case study of Heifangtai Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(S1): 135–140.
- 赵宽耀, 许强, 张先林, 等. 黑方台浅层黄土渗透特性对比试验研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(2): 459–466.
- ZHAO Kuanyao, XU Qiang, ZHANG Xianlin, et al. Infiltration characteristics of topsoil at Heifangtai in Gansu province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(2): 459–466.
- 赵志强, 戴福初, 闵弘, 等. 原状黄土-古土壤中水分入渗过程研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(9): 2611–2621.
- ZHAO Zhiqiang, DAI Fuchu, MIN Hong, et al. Research on infiltration process in undisturbed loess-paleosol sequence[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(9): 2611–2621.
- 张炜. 黄土力学性质试验中的若干问题[J]. *工程勘察*, 1995, 3: 6–12.
- ZHANG Wei. Some problems in the mechanical properties test of loess[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 1995, 3: 6–12.
- 周飞, 许强, 亓星, 等. 灌溉诱发突发性黄土滑坡机理研究[J]. *山地学报*, 2020, 38(1): 73–82.
- ZHOU Fei, XU Qiang, QI Xing, et al. The mechanism study of the irrigation-induced sudden loess landslides[J]. *Mountain Research*, 2020, 38(1): 73–82.
- 朱立峰. 黑方台滑坡群控制因素与外动力条件分析[J]. *西北地质*, 2019, 52(3): 217–222.
- ZHU Lifeng. Analysis of control factors and external force for the landslides in heifangtai area[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 217–222.
- Gu T, Wang J, Lin H, et al. The Spatiotemporal Relationship between Landslides and Mechanisms at the Heifangtai Terrace, Northwest China[J]. *Water*, 2021, 13(22): 3275.
- Gu T, Zhang M, Wang J, et al. The effect of irrigation on slope stability in the Heifangtai Platform, Gansu Province, China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 248: 346–356.
- Hinds E, Lu N, Mirus B, et al. Effects of infiltration characteristics on spatial-temporal evolution of stability of an interstate highway embankment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(9): 05019008.
- 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.
- Lu N, Sener K B, Wayllace A, et al. Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(9): W09524.
- Peng D, Xu Q, Liu F, et al. Distribution and failure modes of the landslides in Heitai terrace, China[J]. *Engineering Geology*, 2018, 236: 97–110.
- Shahrokhbadi S, Vahedifard F, Ghazanfari E, et al. Earth pressure profiles in unsaturated soils under transient flow[J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105218.
- Shao W, Yang Z, Ni J, et al. Comparison of single-and dual-permeability models in simulating the unsaturated hydro-mechanical behavior in a rainfall-triggered landslide[J]. *Landslides*, 2018, 15(12): 2449–2464.
- Thomas M A, Mirus B B, Collins B D, et al. Variability in soil-water retention properties and implications for physics-based simulation of landslide early warning criteria[J]. *Landslides*, 2018, 15(7): 1265–1277.
- Wang L Q, Shao S J, She F T. A new method for evaluating loess collapsibility and its application[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105376.
- Wayllace A, Lu N, Thunder B. Hydrological Behavior of an Infiltration Induced Landslide in Colorado, USA[C]//Geo-Congress 2019: Embankments, Dams, and Slopes. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019, 213–222.
- Xu L, Dai F, Gong Q, et al. Irrigation-induced loess flow failure in Heifangtai Platform, North-West China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 66: 1707–1713.
- Xu L, Yan D. The groundwater responses to loess flowslides in the Heifangtai platform[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 4931–4944.
- Xu Q, Zhao K, Liu F, et al. Effects of land use on groundwater recharge of a loess terrace under long-term irrigation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 142340.
- Yang H, Xie W L, Liu Q Q, et al. Three-stage collapsibility evolution of Malan loess in the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2022, 217: 106482.
- Yang K H, Nguyen T S, Rahardjo H, et al. Deformation characteristics of unstable shallow slopes triggered by rainfall infiltration [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80: 317–344.
- Yao Y G, Zhang Y C, Gao X L, et al. Study on permeability and collapsibility characteristics of sandy loess in northern Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126883.
- Zhang F Y, Wang G H, Peng J B. Initiation and mobility of recurring loess flowslides on the Heifangtai irrigated terrace in China: Insights from hydrogeological conditions and liquefaction criteria[J]. *Engineering Geology*, 2022, 302: 106619.