

# 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望

张茂省<sup>1,2</sup>, 胡 炜<sup>1,2</sup>, 孙萍萍<sup>1,2</sup>, 王雪莲<sup>1,2,3</sup>

(1. 国土资源部黄土地质灾害重点实验室, 西安 710054;  
2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054; 3. 长安大学, 西安 710064)

**摘要:** 黄土是具有“水敏性”的特殊土, 水是诱发黄土滑坡最积极的因素, 黄土水敏性的力学机制及致滑机理已成为黄土地区生态文明建设中迫切需要解决的重大基础问题。本文在搜集大量文献的基础上, 将黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状按照黄土水敏性、考虑优势通道的黄土斜坡水分运移规律和刻画方法、水致黄土滑坡失稳力学机制、基于水的黄土滑坡防控关键技术共四方面内容加以总结归纳。建议明确黄土水敏性的概念和内容, 以黄土水敏性力学本质为突破口, 研究建立基于吸应力理论的黄土水敏性参数和指标体系, 开展考虑优势入渗的黄土斜坡稳定性有限元分析, 并建立一套基于水的水致黄土滑坡风险防控关键技术体系。

**关键词:** 黄土; 水敏性; 黄土滑坡; 研究现状; 展望

## Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides

ZHANG Maosheng<sup>1,2</sup>, HU Wei<sup>1,2</sup>, SUN Pingping<sup>1,2</sup>, WANG Xuelian<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory for Geo-hazard in Loess Area, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710054, China;  
2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract: Background, aim, and scope** Loess is a typical type of soil with high water sensitivity. In the early age of engineering practices in loess areas, however, water sensitivity was unsuitably replaced by the concept “collapsibility”, which shrinks the special features of deformation and strength of loess after interaction with water. Moreover, water is one of the most active factors in inducing loess landslides. The recent outbursting hazards in Tianshui and Yan'an reveal the severe mitigation problems due to shortage of the knowledge of loess water sensitivity. **Materials and methods** In this study, we reviewed the achievements of studies on water sensitivity of loess and related topics on water-induced loess landslides in four aspects and bring out questions to be solved in future studies. **Results** Firstly, on the aspect of study on water sensitivity of loess, the angles can be summarized in three groups, including physical microstructure of loess, physico-chemical interaction between soil and water, as well as macroscopic mechanical properties. Researchers across the globe have studied the microstructure of loess mostly via SEM means, most of which were conducted towards collapsing behavior of loess, while seldom studied the changes of microstructures under other water sensitive behaviors of loess. In terms of methodology, all of them were done via SEM, which is limited by both the sampling location and human experience. Hence, both the representativeness

收稿日期: 2016-01-14; 录用日期: 2016-03-29

Received Date: 2016-01-14; Accepted Date: 2016-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41530640); 中国地质调查局地质调查子项目(12120114025701)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41530640); Geological Survey Project of China Geological Survey (12120114025701)

通信作者: 胡 炜, E-mail: whwhuhw@hotmail.com

Corresponding Author: HU Wei, E-mail: whwhuhw@hotmail.com

and reliability are greatly reduced. Furthermore, due to low resolution, traditional CT scanning technique is only able to observe macroscopic cracks while incapable of studying particle and pore scale. Some practice proved that Xray CT scanning capable of constructing three-dimensional micro-model of loess is a worthy trend. The major view about physico-chemical interaction between loess and water is that water dissolves soluble salt in loess, triggering compositional and structural changes and consequently, mechanical property changes. Concerning macroscopic mechanical properties of water sensitivity of loess, it is deemed that suction-stress defined unsaturated soil mechanics theory is a powerful theoretical tool. Secondly, on the aspect of water flow laws on the slopes due to advantageous channels, it is demonstrated to be the dominating mode of infiltration in loess region. Since the groundbreaking work by Beven and Germann in 1982, researchers have conducted multi-means of studies on advantageous flow, ranging from theoretical model to numerical analysis, to in-situ monitoring, to laboratory model tests. The theoretical model means has the problem of acquiring accurate model parameters, as well as lacking solid consideration of the random distribution of advantageous channels, leading to inaccurate calculation. Physical model is the major means of study. Compared with laboratory model, the in-situ test is more favorable due to its straightforwardness. Although numerous studies already exist, more effort needs to be paid especially for its fundamental influence on water-induced loess landslides. Thirdly, the water-induced loess landslide is the major type of disaster in recent years due to water sensitivity of loess. Whatever the origin of water, the core of the study focuses on the responses of shear strength parameters and pore water pressure due to water impact, as well as the overall action on slope instability. Moreover, investigations after lots of loess landslides have revealed the fact that sliding bodies and sliding planes were partially saturated, indicating the urge of mechanical mechanism study of loess landslides from the unsaturated soil mechanics angle. Fourthly, the mitigation measures of water-induced loess landslides should be decided based on the type of water. For precipitation-induced landslides, the most widespread way is to forecast potential landslides through establishing the statistical relationship between precipitation and landslide displacement or probability. The problem of uncertain threshold of precipitation for a particular region still remains. To overcome it, some researchers recommended that observation of the intrinsic factors such as changes of seepage and stress fields should replace the conventional method. For irrigation-induced landslides, the key is to effectively control the groundwater table. The problem relies on lacking of monitoring and experimental data. For loess landslides due to impoundment of water, the trend is to carry out landslide risk management based on reservoir water table. **Discussion** To summarize, three fundamental problems remain. The mechanical mechanism of water sensitivity of loess is still vague, leading to lacking theoretical support for the mechanism of water-induced loess landslides. Studies on the mechanism and depicting methodology of water influx, rapid infiltration and diffusion under complex topographical conditions are deficient. Also, the risk mitigation measures of water-induced loess landslides need to be further studied. **Conclusions** Therefore, it is urgent to discuss the definite concept and content of water sensitivity of loess, which is fundamental for discussion of mechanism of water-induced loess landslides and related mitigation measures. **Recommendations and perspectives** It is recommended that suction stress theory be utilized to characterize water sensitivity of loess. Also, quantitative depictions of water influx on the slope surface and rapid infiltration and diffusion in the slope need to be studied. On the basis of the above two aspects, we will carry out loess slope stability analysis based on soil element stability, as well as key mitigation measures of loess landslides according to different origins of water.

**Key words:** loess; water sensitivity; loess landslide; research advances; prospect

岩土体水敏性 (water sensitivity) 是指岩 (土) 体遇水后产生物理结构、化学成分、力学行为等改变的特性, 是工程地质、岩土工程、石油勘探等领域的重要研究课题。譬如, 岩石的水敏性以红层软岩最具代表性, 其浸水软化变形是这类斜坡失稳的重要原因 (冯启言等, 1999; 李保雄和苗天德, 2004; 张永安等, 2008; 周翠英等, 2010)。膨胀土则是典型的水敏性土, 具有吸水膨胀脱水收缩特性, 强烈的水土相互作用对膨胀土边坡稳定影响巨大 (孔令伟等, 2004; 詹良通, 2006)。

黄土体也是具有水敏性的特殊土体, 但其水敏性机制与膨胀土截然不同, 导致遇水后的宏观表现为收缩。水敏性的研究是黄土力学与工程研究的主线之一, 研究内容不仅包含常见的湿陷性, 还有崩解性、溶蚀性、湿剪性 (指的是增湿条件下的剪切特性; 谢定义, 1999) 等方面, 以及同时在动荷载作用下的液化性。然而, 黄土高原城镇化建设初期涉及较多黄土地基处理问题, 关注点在“湿陷性”, 一直就沿用了这种提法, 用“湿陷性”笼统代表了“水敏性”。但基于严格的物理意义, “水敏性”一词比常用的“湿陷性”一词更加体现黄土变形和强度与水关系的特殊本质, 并同时包含包容增湿与浸湿以及湿陷与湿剪的影响, 抓住水敏性来研究黄土的力学特性就抓住了问题的本质, 抓住了黄土力学的灵魂 (谢定义, 2001)。

据中国地质调查局“黄土高原地质灾害详细调查”成果, 水是诱发黄土滑坡的最积极因素之一 (张茂省等, 2008)。2013年7月, 中国西部普降暴雨, 降雨强度和持时屡破历史新高, 黄土高原地区再次爆发了大量的黄土滑坡、崩塌、坡面泥流等地质灾害, 以甘肃天水和陕西延安两地最为严重。极端气候条件下, 由水而导致的突发性黄土地质灾害表现出历时长、范围广、损失重、紧急转移安置群众难度大的特征, 也暴露出对黄土的水敏性研究不够深入、致灾机理不清、风险管控措施不力的问题, 再次敲响了关注水致黄土地质灾害警钟。

几十年来, 我国在黄土湿陷性、非饱和黄土特性等黄土水敏性力学理论与工程实践方面颇有建树, 奠定了我国黄土工程学在国际上的先进水平, 指导了黄土地区的重大工程实践。尽管前人做了大量卓有成效的研究, 但是, 在黄土水

敏性的力学机制及灾变机理方面仍存在很多深层次科学问题有待探究。例如, 尚没有学者将黄土的崩解、湿陷、溶蚀、液化、流变、滑动等现象作为“黄土的水敏性”来统一考虑并付诸实践, 黄土遇水后产生这些现象的力学机制是否具有内在关联? 发生这些不同现象各自的边界条件又是什么? 这些现象能不能用统一的“水敏性”概念来表征? 黄土斜坡地带遇水发生变形、破坏、滑动的机理是什么? 能不能通过“治水”来管控此类滑坡灾害? 等等。探索黄土水敏性的力学机制, 研究水对黄土滑坡的作用机理, 一方面可以直接为黄土地区滑坡灾害防治提供科学依据, 另一方面也将丰富和完善黄土滑坡研究的理论, 解决滑坡研究尤其是黄土滑坡研究中的前沿科学问题, 将具有重要的学术价值。

为了能够引起我国黄土学和防灾减灾学界对黄土水敏性及其灾变机制的关注, 本文在整理大量国内外相关文献的基础上, 以黄土水敏性研究为切入点, 从四个方面系统总结黄土水敏性及水致黄土滑坡研究进展, 归纳关键问题, 并提出研究展望, 希冀能够抛砖引玉, 引起这些问题的深入研究, 解决困扰我国黄土区地质灾害防治方面的科学问题。在概念上, 本文涉及的黄土滑坡泛指黄土崩滑流灾害, 一方面是为了和国际上通用的“Landslide”概念接轨, 另一方面也是由于本文并不涉及具体的成灾模式的讨论。

## 1 研究进展

对黄土水敏性及水致黄土滑坡所做的研究主要概括为以下四个方面。

### 1.1 关于黄土水敏性研究

黄土遇水后崩解、湿陷、溶蚀现象, 在荷载作用下继而产生流变、液化、滑动等变形破坏现象。这些现象都可以归属“黄土水敏性”的宏观外部表现。目前尚未发现将这些宏观现象统一起来, 采用“黄土水敏性”概念来表征方面的研究报道。国内外与黄土水敏性相关的研究成果主要集中在黄土湿陷、崩解、流变、液化等某个单一的现象及其物理、化学、力学机理上, 研究切入点归纳起来主要包括黄土物理微结构、水岩物理化学作用和宏观力学特性三方面。

在黄土水敏性相关的微观结构研究方面, Šajgalik (1990) 和 Šajgalik and Klukanova (1994)

采用扫描电镜研究了斯洛伐克黄土结构特征,并从微观角度对黄土崩解机理进行了解释,认为黄土崩解受各种内外因素决定,而水是最重要的因素之一。Derbyshire et al (1994)研究了不同含水率的黄土高原马兰黄土的强度参数,并指出孔隙大小、孔径、颗粒形态等微结构特征是黄土水敏性发挥效应的内在原因,说明水敏性研究中必须重视黄土微结构的协同作用。我国学者高国瑞(1980)、王永炎和腾志宏(1982)、雷祥义(1987)、胡瑞林等(1999)等先后系统研究了我国各地区黄土的微结构特征,确定了黄土高原地区黄土的微结构模型,并用来解释黄土湿陷性。但上述黄土微结构研究主要针对黄土湿陷行为,较少研究其他黄土水敏性表象下的黄土微结构变化。在微结构研究方法上,这些研究都是采用取样后放到扫描电镜上,获取微结构二维灰度图像,然后经过科研人员设定一定灰度阈值标准,提取微结构指标。这种方法一方面受取样位置限制,另一方面受操作人员经验左右,使得研究结果对实际黄土体微结构的代表性和可信度都有不同程度降低。普通的CT扫描的分辨率低,仅能看到宏观裂纹,看不到颗粒及孔洞尺度。实践表明,Xray CT扫描和建模技术可以透视微结构,构建黄土微结构三维模型,是一个值得探索的方向。

在黄土水敏性相关的水岩物理化学作用研究方面,主要观点认为水淋滤掉黄土中的易溶盐,产生组分和结构改变,导致黄土力学性质变化。譬如,郦慧等(2011)采用去离子水浸泡过滤方法进行洗盐,研究了重塑黄土洗盐前后的物理力学性质变化,表明洗盐后颗粒细化,粘土颗粒增多,液塑限增高,结构发生变化,钙质胶结程度降低,抗剪强度增大。但采用去离子水洗盐的方法与自然界大多数情况有所差别。Zhang et al (2013)基于甘肃黑方台研究区 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 是地下水、泉水和黄土中主要离子的事实,利用不同NaCl浓度的脱气蒸馏水制作饱和黄土样品,开展不排水直剪试验,试验结束后重塑样品,用纯净蒸馏水洗盐后再次进行不排水直剪,从而模拟灌溉水入渗和排泄两个相反过程中,黄土盐分增加和淋滤脱盐作用对黄土不排水剪切强度的影响机制,结果表明,在加盐时,随着盐浓度的持续增加,饱和黄土不排水剪切峰值和稳态强度均呈现先增加后减小的规律,而在脱盐后,饱和黄土强度逐步恢复至原值,

证明盐分对黄土强度影响是个可逆的过程。卢雪清(2012)不仅研究了黄土易溶盐,还采用醋酸处理掉难溶盐,对比研究难溶盐对黄土强度的影响,结果表明碳酸钙等难溶盐溶蚀后黄土强度将显著降低,其影响程度远大于易溶盐。对于富含碳酸钙的黄土,这一研究更具现实意义。

归纳起来,对黄土水岩物理化学作用的研究还有如下三个问题需要取得突破:(1)碳酸钙等难溶盐淋溶对黄土强度的影响规律;(2)模拟现实中降雨、灌溉水等水化学成分开展室内淋滤和溶蚀试验;(3)与黄土斜坡稳定性定量研究紧密结合起来。

在黄土水敏性相关的宏观力学特性研究方面,Feda (1988)、Frankowski (1994)、Rogers et al (1994)等研究了黄土湿陷性的前提、标准、归一化特性;Lutenegger and Hallberg (1988)、Milovic (1988)、Dijkstra et al (1994)系统研究了不同层位黄土强度和稳定性随着含水率的变化规律。中国黄土研究有得天独厚的地域和资源优优势,且工程建设力度空前,遇到众多的黄土水敏性相关的土力学问题。谢定义(2001)对此进行了系统归纳,将黄土水敏性的宏观力学特性研究概括为黄土强度和黄土湿陷性研究两大块,且呈现出了由浸水湿陷量到湿陷敏感性,由狭义的浸水饱和湿陷到广义的浸水增湿湿陷,由单调的增湿变形到增湿减湿、间歇性湿陷变形,由增(减)湿路径到增(减)湿路径与加(卸)荷路径的耦合,由湿陷性到湿剪性以及由宏观特性分析到宏观、微观结合的力学特性分析等诸多方面的发展趋势。

黄土是典型的非饱和土,黄土的水敏性也是其非饱和特性的反映,因此,非饱和土力学理论框架是研究黄土水敏性的重要理论工具。Lu等人(Lu and Likos, 2006; Lu et al, 2010; Lu and Kaya, 2012)在Terzaghi的饱和土有效应力原理和Bishop、Fredlund等的非饱和土力学基础上,提出了吸应力的概念,发展了非饱和土的有效应力原理,认为吸应力是描述非饱和土应力状态和强度本构关系的核心参量,并研发了一种半定量快速测定非饱和土渗流和应力本构关系的装置。

总体来看,以往对黄土水敏性的研究包含了从定性到定量、从宏观到微观、从物理到化学等诸多方面,但主要针对黄土湿陷问题,且现象学研究多于力学机制探讨;对于强度的探讨大多也限于内摩擦角和粘聚力两个强度参数方面。黄土

遇水后发生崩解、湿陷、流变、液化等现象,是黄土水敏性的力学行为和表象,截至目前,这些现象都有各自的评价指标,但从力学机制上的针对性研究还不够,造成部分黄土水敏性行为的力学机制不清。同时将非饱和土渗流和强度理论用于黄土的研究尚处于起步阶段。运用非饱和土前沿理论,开展黄土水敏性的力学机制研究,有望取得突破性进展,破解黄土遇水后发生崩解、湿陷、溶蚀、流变、液化等现象的真正原因。

## 1.2 关于考虑优势通道的黄土斜坡水分运移规律及定量刻画方法研究

地表水入渗激发黄土水敏性效应,导致黄土工程性质弱化,引发黄土发生湿陷、湿剪,是促发水致黄土滑坡的一个原因。同时,地表水入渗也改变了黄土斜坡原生水文地质条件,从而使地质环境条件产生利于滑坡孕灾的方向转变。因此,水分入渗机制研究也是水致黄土滑坡研究的基础。

水文地质理论将地表水入渗概括成活塞流和优势流两大类。活塞流流经土层基质,可采用经典土力学中的均质性假设分析,以往在黄土地区的研究也较为丰富(李喜荣,1991;李云峰,1991;李佩成等,1999)。但黄土中发育了大量优势入渗通道,包括垂直节理裂隙、卸荷裂隙、风化裂隙、动植物孔洞以及在此基础上扩展而来的落水洞,非均质性和各向异性均十分显著。加之地表植被覆盖情况变化,地表水入渗边界条件变化大,导致黄土地区地表水补给地下水是一种活塞流和多种形式优势流组合成的混合流模式,且以优势流为主(薛根良,1995;徐学选和陈天林,2010)。

人类从科学意义上发现优势流问题可追溯至19世纪80年代。但直到20世纪80年代,优势流问题都未引起科学界足够的重视。Beven and Germann(1982)发表了关于土壤优势流的论著,系统介绍了优势流研究历史,采用试验证据和理论分析研究了优势通道对地表水入渗和扩散的影响,成为水文学历史上引用率最高的文献之一,是优势流研究的里程碑。此后,针对优势流入渗模式、优势流影响因素、优势通道展布规律、优势流水分运移规律等方面问题,开展了从理论模型分析到数值分析,从原型监测到室内模型试验等多种技术手段的研究工作。

在优势流理论模型研究方面,可归纳为四大类模型来描述,其中最主流的是二域模型及相关

改进模型(秦耀东等,2000)。二域模型将土体分为基质域和优先域,采用达西-理查兹(Darcy-Richards)定律描述基质域,而对于优先域则有不同的刻画方法,包括运动波理论、粘性流假设条件下的边界层流动理论、滤波理论等。现有四大模型普遍的难点是难以准确获取模型参数,且对于土体优势通道的随机分布性考虑欠深入,导致模型计算与实际入渗情况有出入。

室内试验是研究优势流的重要手段,主要方式包括取土壤原状土、土柱出流试验两种,通常和以CT、扫描电镜、核磁共振影像等为代表的现代影像获取技术联合使用。具体来说,取原状土的方式基于单一时间、低驻留浓度含量的一组图像来构建优势流模式,无法考虑时间效应,且取样密度太大。室内原状土柱出流试验可以很好地控制边界条件,但尺寸效应显著,边界条件常与实际情况有差别(牛健植等,2006)。相较而言,原位试验可以直接获取优势流模式。常用的原位研究技术方法譬如地质雷达、染色示踪、微张力测量等,可直接获取水分运移路径,形成水分运动图,从而对复杂流态下的水分时空变化规律进行辨析。

尽管过去三十年做了大量的研究,然而鉴于优势流的重要地位,理应获得更高的关注度。这些年的研究仍然没有解决判定标准缺失、物理模型杂乱、时空尺度考虑不周、观测方法落后等一系列问题(牛健植等,2006;Beven and Germann,2013)。由于优势流的高度时空随机性,今后优势流研究的重点应放在进行大量的综合性野外试验,应用新的观测技术以便在时间和空间上监测优势流,以获取足够的资料来确切地刻画优势流,建立新的模型来模拟优势流,从而进一步解决与土壤和地下水污染有关的环境问题(徐绍辉和张佳宝,1999)。

据黄土地质灾害详细调查成果,受黄土地表入渗系数小的限制,降水、灌溉等地表水均匀入渗所导致的黄土含水量明显升高的深度有限,超渗产流在非平坦地形条件下汇集到落水洞、垂直裂隙等优势通道,进而灌入地下深处诱发黄土滑坡,是水致黄土滑坡的常见模式(张茂省和李同录,2011)。因此,地表水对黄土斜坡的作用可概括为活塞流的增重作用和优势流的软化滑带作用,斜坡变形、破坏则以后者作用为主。优势流对于地表水补给地下

水进而促发滑坡具有重要控制作用。尽管早就有定性认识,但由于优势流突破了经典力学中的均质性假设,现有通用大型计算软件对优势流刻画存在短板,且实际优势通道的随机分布性太强,缺乏现场监测资料,导致考虑优势通道的黄土斜坡水文学及滑坡定量研究方面进展缓慢。

### 1.3 水敏性黄土滑坡力学机制研究

水致黄土滑坡是水敏性黄土灾变的主要类型,近些年的致灾程度也是较高的。这方面的研究,不论是自然降水,还是人类水事活动产生的水,研究主线都是以经典饱和土力学的摩尔-库伦抗剪强度理论为核心,围绕抗剪强度参数(粘聚力和内摩擦角)和孔隙水压力(或有效应力)对水的响应,以及对斜坡失稳的作用机制展开。抗剪强度参数对水的响应属于水敏性范畴,前已概括,以下回顾孔隙水压力响应及对斜坡失稳作用方面的研究。

黄润秋等(2005)引述了Terzaghi提出的降水诱发滑坡的统一概化机制:“降水期间或降雨之后斜坡岩土体内孔隙水压力的升高使得潜在滑动面上的有效应力及抗剪强度降低,从而诱发滑坡”,表明孔压变化规律是研究降水诱发型滑坡机理的关键。Wang and Sassa(2003)、Okada et al(2004)等的水槽试验、环剪试验结果表明,降雨诱发型滑坡的失稳模式与斜坡物质组成的颗粒大小及级配有很大的关系,提出了颗粒破碎-渗透性降低-超孔压剧升-液化滑动的降雨诱发型土质滑坡发生机理。这些都为水致黄土滑坡机理研究提供了有益参考。

黄土主要由粉粒组成,具有架空结构,水的参与使黄土成为一种极易发生液化的土,黄土滑坡液化机制的研究应立足于黄土自身的特点。王兰民和刘红玫(2000)对饱和黄土液化机理与特性开展了研究,建立了饱和黄土孔隙水压力和应变的增长模型。周永习等(2010)对黄土滑坡流滑机理进行了试验研究,认为大多数情况下饱和黄土表现为稳态特性,只有疏松的黄土表现出准稳态特性。王家鼎(1992)、王家鼎和刘悦(1999)以黑方台黄土滑坡泥石流调查为背景,提出了“饱和黄土蠕(滑)动液化”的概念以及饱和黄土的蠕动液化机理。

应力路径也是影响土力学行为的重要因素。金艳丽和戴福初(2007)基于斜坡土体的原位应

力状态及现场应力路径,对原状黄土开展了等压/偏压固结不排水剪(ICU/ACU)和常剪应力排水剪(CQD)试验,从饱和黄土的应力路径角度探讨了灌溉水诱发黄土滑坡的形成机理。

上述研究的原型都是均质各向同性土斜坡,而现实中的斜坡组成物质与构造非常复杂。Zhang et al(2000)对三峡地区某斜坡进行了原位渗透试验研究后指出,研究斜坡失稳时,只研究水在各向同性介质中的渗透过程是不够的,还要考虑斜坡体组成物质的各向异性及滑坡体中裂缝、断层等不连续结构面的分布情况。黄土斜坡的非均质性和各向异性显著。许领等人(许领等,2008,2009a,2009b;许领,2010)以泾阳南塬的灌溉型滑坡为例,分析了灌溉引起的裂缝形态、发育规律、演化模式,认为灌溉引起的裂缝、落水洞等优势通道增加了地面灌溉诱发滑坡的概率,对于黄土滑坡的演化和群体性分布具有重要的意义。Xu et al(2011a,2011b)通过开展室内三轴实验和现场灌溉试验,系统研究了黑方台地区灌溉引起地下水水位上升条件下饱和黄土破坏与泥石流型高速远程滑坡启动机理,提出灌溉水流入裂缝,在裂缝底部诱发剧增的超黄土孔隙水压力,进而导致土体局部液化并发生显著破坏。

大部分黄土滑坡发生后可以看出,滑体和滑带只有部分饱和,统一按饱和状态分析评价,是不切实际的。从非饱和土力学角度研究水致黄土滑坡力学机制也逐步成为热点。Fredlund and Krahn(1977)提出了考虑基质吸力的边坡稳定性分析普遍极限平衡分析法,是采用非饱和土力学理论研究水致滑坡的代表。总体来说,基于非饱和土力学理论分析水致滑坡有较多实例报道,也从理论和数值法方面对水致滑坡开展了促发机制的分析,但还未从现场或室内试验中获取破坏面上定量化的吸力数据,来支持非饱和土斜坡失稳机制(Lu and Godt,2013)。

与降水、灌溉等相比,工程蓄水在水入渗模式上是有很大区别的,库岸稳定性评价问题也是伴随着水利水电工程的发展历程。世界上研究程度最高的单体工程蓄水型滑坡灾害当属1963年意大利瓦伊昂水库滑坡,对于工程蓄水诱发型滑坡灾害链诱发机制研究具有重要指导作用(孙广忠和孙毅,2011;王涛等,2013)。我国的水利工程建设规模在世界上首屈一指,同时也遇到了前

所未有的工程蓄水型滑坡问题。其中, 长江三峡库区集中了数量巨大、种类繁多、灾害严重的工程蓄水型滑坡, 是全球最著名的工程蓄水型滑坡集中分布区。对三峡工程蓄水引起库区的一些典型滑坡从诱发机理、预测预报、滑坡治理等方面进行了系统研究(例如: 唐辉明等, 2002; 伍法权, 2002; 许强等, 2003; 殷跃平和彭轩明, 2007; Wang et al, 2008; 等), 认为水位升降波动是控制岸坡稳定性的关键, 进一步可按照蓄水的不同阶段, 研究水位上升期、稳定水位期、水位降落、水位波动期四种工况下的斜坡失稳机制, 其中水位变化速率对斜坡稳定性的影响还有所区别。

上述研究工作都针对库岸岩质滑坡。黄土直接浸泡在库水位下的案例很少, 导致对工程蓄水型黄土滑坡的研究相对较少。但在黄土梁峁地区, 库岸山坡的另一侧, 工程蓄水可诱发黄土斜坡失稳或者老滑坡复活(Zhang et al, 2012), 必须引起重视。受黄土的强水敏性及显著非饱和特性的影响, 工程蓄水型黄土滑坡不仅要继续开展饱和和带黄土变形破坏机制的研究, 还要重视各类蓄水条件导致的非饱和黄土变形破坏机制。因此, 工程蓄水型黄土滑坡研究急需适合黄土的非饱和和土力学理论和技术方法的支撑。

#### 1.4 基于水的黄土滑坡防控关键技术研究

在降水诱发型滑坡的防控研究方面, 在气象监测基础上开展的滑坡预测预报是重要的研究内容。目前主要采用概率统计的思想, 即通过对地质条件相同或者相似的某个地区的降水量或降水强度和滑坡位移变形监测资料的分析, 建立该地区降水量或者降水强度和滑坡位移或滑坡发生概率之间的数学统计关系, 根据这种数学统计关系及降雨情况来预报预测滑坡的发生(张明等, 2009)。如今, 很多国家和地区给出了所在区域滑坡发生的降水强度阈值, 例如在日本、巴西等。我国的气象局和国土资源部联合发布气象地质灾害预警, 但具体到某地区引发地质灾害的降水阈值则不明确。

经过数十年的发展, 基于降水的滑坡发生概率研究不断改进, 已成为一种重要的降水诱发型滑坡灾害预测预警方法。但是, 这种预警方法远远没有解决降水诱发型滑坡灾害预警问题, 主要存在对具体地质环境依赖性强、人力物力财力耗费大、预警标准不统一等三大缺陷(张明等,

2009)。

为此, 很多研究者从其他的角度对降水诱发型滑坡预测预报进行了探索, 认为降水诱发型滑坡预测预报不能仅仅停留在对致灾因素和宏观变形量的监测上, 归根结底要基于滑坡机制认识, 监测并分析降水在斜坡体内诱发渗流场变化、以及相应导致的斜坡应力场及土体强度的变化, 这些是导致斜坡失稳的本质因素。例如, 林鸿洲等(2009)研究了主要增湿和减湿路径的土水特征曲线滞后对降雨型滑坡预测的影响, 认为可用主要增湿与减湿路径预测滑坡发生的时间差, 规划与建立合适的滑坡雨量预警基准; Godt et al(2009)在美国西雅图的一个潜在滑坡上进行了吸力和含水量监测, 并基于吸应力进行了滑坡的准确预测, 为从力学机制上研究降水诱发型滑坡的监测预报提供了参考。

尽管前人对降水诱发型滑坡从不同角度做了大量有益的探索和研究, 但是, 此类滑坡的预警预报成功率仍然很低。就黄土地区而言, 一次大的暴雨, 甚至特大暴雨, 由于超渗产流, 造成大量的水土流失, 而降雨入渗到黄土中, 造成黄土饱和或者近饱和的深度往往不大, 理论上几乎不可能产生黄土滑坡。从大量的黄土滑坡调查结果看, 其原因在于以往的研究忽视了四个问题, 或者研究得不够: 一是超渗产流而形成的降雨汇集; 二是黄土中大孔隙、垂直节理、落水洞等发育, 降雨主要沿着这些优势入渗通道快速渗入, 甚至灌入黄土中; 三是渗入或灌入过程中遇到隔水层或相对弱透水层, 在短时间内使黄土饱和或近饱和, 从而诱发黄土滑坡; 四是建立考虑优势入渗的降水诱发型黄土滑坡监测预警模型。

灌溉诱发型黄土滑坡防控和降水诱发型黄土滑坡防控相比, 有相同之处, 其研究成果可以相互借鉴。不同之处在于, 与降水诱发型黄土滑坡相比, 灌溉诱发型黄土滑坡防控研究应突出: 灌溉活动打破了地下水系统的天然平衡状态, 使地下水流场发生了变化, 导致地下水位抬升, 引发斜坡地带应力场的改变, 进而引发滑坡。因此, 灌溉活动引发黄土滑坡灾害防治的关键是有效控制地下水位。尽管前人做了大量的研究工作, 但都是泛泛而谈一些控水策略, 缺乏监测和试验资料, 无力指导治理设计和施工。

在工程蓄水型滑坡防控方面, 既然水位升降

波动是控制岸坡稳定性的关键,相应的防控策略也需紧密结合水位变动情况开展。我国在重大水利水电工程建设运营中贯彻落实了地质灾害防控的联动机制,有效减缓了工程蓄水诱发滑坡灾害。吴树仁等(2013)总结归纳了工程滑坡防治的三个关键问题,即有效预防、快速治理、主动减灾。然而具体运用到工程蓄水型滑坡防控中,仍存在库水位-斜坡稳定性互馈机制复杂多变、滑坡监测预警判据争议不断、快速治理技术落后等瓶颈。进行基于库水位的工程蓄水型滑坡风险管理属于主动减灾范畴,是大势所趋。

## 2 几个关键科学问题

纵观国内外研究现状,针对黄土湿陷、崩解等问题,采用光学和电子显微镜、传统CT扫描等技术研究了黄土遇水后的微观结构变化,探索了其物理学机制;从水岩相互作用角度研究了水岩之间的化学反应对抗剪强度的影响,探索了其化学机制;利用室内外抗剪强度试验,研究了黄土的力学特性,探索了其宏观力学机制;针对优势通道入渗问题,开发了理论模型,进行了数值模拟和试验研究;针对各类水致黄土滑坡,也有卷帙浩繁的机理分析工作,等等。这些研究成果十分丰富,对解决工程实践中遇到的黄土工程问题发挥了积极的作用。但是,针对黄土的水敏性以及各类水致黄土滑坡的研究仍存在以下深层次的科学问题。

### 2.1 黄土水敏性的力学机制不清,以及由此导致的水致黄土滑坡机理研究缺乏理论支撑

无论是采用光学显微镜还是电子显微镜,无论是水岩相互作用研究还是三维CT扫描技术,都是观察和探索了黄土遇水后发生崩解、湿陷、溶蚀、流变,甚至滑动等黄土水敏性的现象。还没有揭示这些宏观和微观现象的力学本质,即缺乏一个有效的参数体系来表征黄土遇水后的各类力学行为,水致黄土滑坡还缺乏有力的理论支撑。

### 2.2 复杂地形地质条件下水的汇集-快速入渗-渗流扩散机理和刻画方法研究不足

在黄土地区,降水和灌溉的增重作用有限,活塞流入渗速率较低,一般不易引发黄土滑坡。而优势流对于地表水补给地下水进而促发黄土滑坡具有重要控制作用。目前缺乏对水的汇集、沿着优势通道入渗的现场监测或原位试验数据,尚未定量揭示水致黄土滑坡的水文条件。

### 2.3 基于水的水致黄土滑坡风险控制研究不够深入

不论是降水,还是灌溉、水库蓄水等人类水事活动,通过复杂的入渗机制,并沿途流经水敏性黄土介质导致黄土发生物理、化学、力学响应,打破了黄土斜坡地下水系统的天然平衡状态,使地下水动力场发生了变化,进而导致斜坡地带应力场的响应,并引发滑坡。尽管前人做了大量的研究工作,但在这方面的研究还远不够,尤其在降水诱发型黄土滑坡危险性评价和监测预警技术、灌溉活动的水动力和斜坡应力响应机制、基于地下水位的黄土滑坡风险控制技术研究方面有待深入。

## 3 展望

解决上述任何一个问题都不是轻而易举的事情,尤其是黄土的水敏性。不少学者用到了黄土“水敏性”的名词,也开展了与黄土水敏性相关的研究,但是,截止目前,尚无明确的黄土水敏性定义,更缺乏从力学机制上对其系统地研究。因此,迫切需要探讨黄土水敏性明确的概念和内涵,探讨黄土遇水后发生的崩解、湿陷、溶蚀、流变等现象的力学本质。以黄土水敏性现象为切入点,以黄土各类水敏性现象的力学本质为突破口,研究建立黄土水敏性参数指标体系,揭示黄土水敏性的力学机制。在此基础上,定量刻画水的汇集-优势入渗-渗流扩散-发生黄土滑坡的过程,探索水体入渗过程中的地下水动力系统 and 斜坡应力系统协同响应机制,加深水致黄土滑坡认知,建立基于斜坡失稳力学机制的降水诱发型黄土滑坡危险性评价技术与预警模型,研发基于地下水位管理的黄土滑坡风险防控关键技术,解决黄土滑坡研究中的前沿科学问题,为我国黄土地区生态文明建设提供科学技术支撑。

具体需要进行下述四方面的系统研究工作。

### 3.1 基于吸应力理论的黄土水敏性参数体系及其力学机制研究

基于吸应力的广义有效应力理论是非饱和土力学的热点,是非饱和土的核心本构之一。采用吸应力有效应力理论来表征黄土遇水后的内应力变化,结合已有的应力-应变本构和已知的边界条件来共同表征黄土水敏性,是值得探索的方向。为此,需在开展非饱和土力学实验与野外监测的基础上,辅以黄土结构和成分测试,获取黄土的土-水特征曲线、渗透系数函数、吸应力函数,旨

在获取黄土水敏性的应力阈值和分区, 破解黄土水敏性的“内因”; 开展黄土崩解、湿陷、增湿强度等传统的水敏性行为室内测试, 解决边界条件问题, 破解黄土水敏性的“外因”; 进一步建立黄土变形破坏行为与吸应力有效应力间的对应关系, 建立归一化的, 以吸应力与若干边界条件共同表征的黄土水敏性参数和指标体系。

### 3.2 考虑优势通道的水分运移规律及定量刻画方法研究

(1) 斜坡地表水汇流的定量刻画。针对黄土台塬和黄土梁茆区不同水文地质结构、不同坡面形态和下垫面, 拉张裂缝或落水洞发育状况, 获取高精度 DEM 数据, 圈定汇水区范围, 计算汇流区面积。开展降雨或灌溉示踪试验, 监测超渗产流过程中的雨量、灌溉量和流失量, 建立斜坡地表水汇流模型。

(2) 快速入渗及渗流扩散的定量刻画。在已建立的汇流模型基础上, 观测拉张裂缝和落水洞底部积水, 观测降雨和灌溉过程中包气带不同位置处含水量和基质吸力的变化, 以及地下水位和泉流量的变化, 查明考虑优势通道的斜坡地质结构和入渗模式, 建立斜坡地带水的汇集-优势入渗-扩散的水分运移模型, 定量刻画黄土优势入渗通道对降雨和灌溉水等入渗过程的控制作用及入渗和扩散规律。

### 3.3 水致黄土滑坡稳定性分析及失稳力学机制研究

以非饱和土测试获取的土-水特征曲线、渗透系数函数、吸应力函数为基本本构模型, 建立考虑优势通道入渗效应的各向异性黄土介质斜坡有限元模型, 定量揭示降水、灌溉、工程蓄水等不同诱发因素条件下的黄土斜坡渗流和应力系统响应, 开展基于单元土体的斜坡稳定性分析, 探索水致黄土滑坡变形破坏机制。

### 3.4 基于水的黄土滑坡防控关键技术研究

(1) 基于降水的黄土滑坡危险性评价与预警技术。地形、地貌、地质构造、岩土体及其工程地质性质、地下水等地质环境条件决定了黄土滑坡的易发性, 降水强度、历时等降水特征则决定着降水诱发黄土滑坡的危险性。针对降水诱发黄土滑坡, 需在野外调查和易发性评价与区划的基础上, 通过典型斜坡含水量和吸力原位监测, 以及斜坡稳定性有限元分析, 确立不同降水特征对应的斜坡危险性阈值, 开展基于降水的黄土滑坡危险性评价与

区划, 建立黄土滑坡气象预警新技术。

(2) 基于地下水位的黄土滑坡风险防控关键技术。对于地下水位抬升而引起的黄土滑坡, 最根本的防控措施就是控制地下水位。针对灌溉诱发黄土滑坡, 鉴于黄土是垂向渗透系数大于水平向渗透系数的各向异性介质, 可设计斜坡微型水平排水板, 并在典型的灌溉诱发黄土滑坡发育斜坡地段开展原位试验, 检验不同类型斜坡微型水平排水板控制地下水位的可行性和有效性, 建立基于节水灌溉-微型水平排水联合控制地下水位的灌溉诱发黄土滑坡风险控制关键技术。针对工程蓄水诱发黄土滑坡, 求解水库蓄水水位与斜坡地带地下水位之间的关系, 研究工程蓄水对黄土斜坡失稳的作用机制, 建立基于蓄水水位控制地下水位的黄土滑坡风险防控关键技术。

### 参考文献

- 冯启言, 韩宝平, 隋旺华. 1999. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J]. *工程地质学报*, 7(3): 1709-1715. [Feng Q Y, Han B P, Sui W H. 1999. Characteristics of water-rock interaction of red-beds and its application to engineering in southwestern Shandong [J]. *Journal of Engineering Geology*, 7(3): 1709-1715.]
- 高国瑞. 1980. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. *中国科学*, 23(12): 1203-1208. [Gao G R. 1980. Classification of microstructure and collapsibility of loess [J]. *Scientia Sinica*, 23(12): 1203-1208.]
- 胡瑞林, 官国琳, 李向全, 等. 1999. 黄土湿陷性的微结构效应[J]. *工程地质学报*, 7(2): 161-167. [Hu R L, Guan G L, Li X Q, et al. 1999. Micro-structure effect of loess collapsibility [J]. *Journal of Engineering Geology*, 7(2): 161-167.]
- 黄润秋, 徐则民, 许模. 2005. 地下水的致灾效应及异常地下水流诱发地质灾害[J]. *地球与环境*, 33(3): 1-9. [Huang R Q, Xu Z M, Xu M. 2005. Hazardous effects of underground water and extraordinary water flow-induced geohazards [J]. *Earth and Environment*, 33(3): 1-9.]
- 金艳丽, 戴福初. 2007. 灌溉水诱发黄土滑坡机理研究[J]. *岩土工程学报*, 29(10): 1493-1499. [Jin Y L, Dai F C. 2007. The mechanism of irrigation-induced landslides of loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29(10): 1493-1499.]
- 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 2004. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. *岩土工程学报*, 26(6): 727-732.

- [Kong L W, Guo A G, Zhao Y W, et al. 2004. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 26(6): 727–732.]
- 雷祥义. 1987. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性 [J]. *中国科学 B 辑*, 17(12): 1309–1318. [Lei X Y. 1987. Pore types Chinese loess and collapsibility [J]. *Scientia Sinica (Series B)*, 17(12): 1309–1318.]
- 李保雄, 苗天德. 2004. 红层软岩滑坡运移机制 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 40(3): 95–98. [Li B X, Miao T D. 2004. The sliding mechanism of red-mudstone layer landslides [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 40(3): 95–98.]
- 李佩成, 刘俊民, 魏晓妹, 等. 1999. 黄土原灌区三水转化机理及调控研究 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社. [Li P C, Liu J M, Wei X M, et al. 1999. Study on the mechanisms of transformation of three types of water in irrigation areas in loess tablelands and regulation [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press.]
- 李喜荣. 1991. 关于黄土包气带水分运移参数计算问题 [J]. *西安地质学院学报*, 13(1): 61–68. [Li X R. 1991. On a calculation of the moisture motion parameters in the loess zone with air [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 13(1): 61–68.]
- 李云峰. 1991. 洛川黄土地层渗透性与孔隙性的关系 [J]. *西安地质学院学报*, 13(2): 60–64. [Li Y F. 1991. Relationship between the permeability and the porosity of Luochuan's loess layer [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 13(2): 60–64.]
- 郇慧, 武俊杰, 邓津. 2011. 黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化 [J]. *冰川冻土*, 33(4): 796–799. [Li H, Wu J J, Deng J. 2011. Variations of physical and mechanical properties of saline loess before and after desalting [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 33(4): 796–799.]
- 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 2009. 土水特征曲线在滑坡预测中的应用性探讨 [J]. *岩石力学与工程学报*, 28(12): 2569–2576. [Lin H Z, Yu Y Z, Li G X, et al. 2009. On application of soil-water characteristic curves to landslide forecast [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(12): 2569–2576.]
- 卢雪清. 2012. 盐分变化对黄土强度特性影响的试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学. [Lu X Q. 2012. Study on the effect of salinity changes on strength character of loess [D]. Yangling: Northwest A & F University.]
- 牛健值, 余新晓, 张志强. 2006. 优先流研究现状及发展趋势 [J]. *生态学报*, 26(1): 231–243. [Niu J Z, Yu X X, Zhang Z Q. 2006. The present and future research on preferential flow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 26(1): 231–243.]
- 秦耀东, 任理, 王济. 2000. 土壤中大孔隙流研究进展与现状 [J]. *水科学进展*, 11(2): 203–207. [Qing Y D, Ren L, Wang J. 2000. Review on the study of macropore flow in soil [J]. *Advances in Water Science*, 11(2): 203–207.]
- 孙广忠, 孙毅. 2011. 岩体力学原理 [M]. 北京: 科学出版社. [Sun G Z, Sun Y. 2011. Principle of rock mass mechanics [M]. Beijing: Science Press.]
- 唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣, 等. 2002. 三峡工程库区巴东县赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 27(5): 621–625. [Tang H M, Ma S Z, Liu Y R, et al. 2002. Stability and control measures of Zhaoshuling Landslide, Badong County, Three Gorges Reservoir [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 621–625.]
- 王家鼎. 1992. 高速黄土滑坡的一种机理: 饱和黄土蠕动液化 [J]. *地质论评*, 38(6): 532–539. [Wang J D. 1992. A mechanism of high-speed loess landslides: saturated loess creeping liquefaction [J]. *Geological Review*, 38(6): 532–539.]
- 王家鼎, 刘悦. 1999. 高速黄土滑坡蠕、滑动液化机理的进一步研究 [J]. *西北大学学报*, 29(1): 79–82. [Wang J D, Liu Y. 1999. A further study on the mechanism of highspeed loess landslide in state of creeping and sliding liquefaction [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 29(1): 79–82.]
- 王兰民, 刘红玫. 2000. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 22(1): 89–94. [Wang L M, Liu H M. 2000. Laboratory study on the mechanism and behavior of saturated loess liquefaction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 22(1): 89–94.]
- 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 2013. 国内外典型工程滑坡灾害比较 [J]. *地质通报*, 32(12): 1881–1899. [Wang T, Wu S R, Shi J S, et al. 2013. A comparative study of typical engineering landslide disasters both in China and abroad [J]. *Geological Bulletin of China*, 32(12): 1881–1899.]
- 王永炎, 腾志宏. 1982. 中国黄土的微结构及其在时代和区域上的变化 [J]. *科学通报*, 27(2): 102–105. [Wang Y Y, Teng Z H. 1982. The microstructure of Chinese loess and the temporal and spatial changes [J]. *Chinese Science*

- Bulletin*, 27(2): 102–105.]
- 吴树仁, 王涛, 石菊松, 等. 2013. 工程滑坡防治关键问题初论[J]. *地质通报*, 32(12): 1872–1880. [Wu S R, Wang T, Shi J S, et al. 2013. A review of engineering landslide prevention and control [J]. *Geological Bulletin of China*, 32(12): 1872–1880.]
- 伍法权. 2002. 三峡工程库区影响 135 m 水位蓄水的滑坡地质灾害治理工程及若干技术问题[J]. *岩土工程界*, 5(6): 15–16. [Wu F Q. 2002. Engineering measures and several technical problems of landslides influencing reservoir impoundment to 135 m of the Three Gorges Project [J]. *Geotechnical Engineering World*, 5(6): 15–16.]
- 谢定义. 1999. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. *地下空间*, 19(4): 273–284. [Xie D Y. 1999. The past, present and future of the research on mechanical characteristics and application of loess [J]. *Underground Space*, 19(4): 273–284.]
- 谢定义. 2001. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. *岩土工程学报*, 23(1): 3–13. [Xie D Y. 2001. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 23(1): 3–13.]
- 徐绍辉, 张佳宝. 1999. 土壤中优势流的几个基本问题研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 5(4): 85–93. [Xu S H, Zhang J B. 1999. Study on foundational problems on preferential flow in soils [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 5(4): 85–93.]
- 徐学选, 陈天林. 2010. 黄土土柱入渗的优先流试验研究[J]. *水土保持学报*, 24(4): 82–85. [Xu X X, Chen T L. 2010. Experimental study on infiltration of loess column through preferential flow [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 24(4): 82–85.]
- 许领. 2010. 灌溉诱发黄土滑坡机理[D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Xu L. 2010. Mechanisms of irrigation-induced loess landslides [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences.]
- 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 2009a. 黄土滑坡典型工程地质问题分析[J]. *岩土工程学报*, 31(2): 287–293. [Xu L, Dai F C, Kwong A K L, et al. 2009a. Analysis of some special engineering-geological problems of loess landslide [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(2): 287–293.]
- 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 2009b. 台塬裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J]. *地质论评*, 55(1): 85–90. [Xu L, Dai F C, Kwong A K L, et al. 2009b. Characterostocs and forming mechanisms of the plateau-edge cracks and their significance to loess landslides [J]. *Geological Review*, 55(1): 85–90.]
- 许领, 李宏杰, 吴多贤. 2008. 黄土台缘滑坡地表水入渗问题分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 19(2): 32–35. [Xu L, Li H J, Wu D X. 2008. Analysis of surface water infiltration for loess landslide at terrain edge [J]. *China Journal of Geology Hazards and Control*, 19(2): 32–35.]
- 许强, 黄润秋, 程谦恭, 等. 2003. 三峡库区泄滩滑坡滑带土特征研究[J]. *工程地质学报*, 11(4): 354–359. [Xu Q, Huang R Q, Cheng Q G, et al. 2003. Study on soil properties in sliding zone of Xietan landslide on the Three-Gorges Reservoir [J]. *Journal of Engineering Geology*, 11(4): 354–359.]
- 薛根良. 1995. 黄土地下水的补给与赋存形式探讨[J]. *水文地质工程地质*, 22(1): 38–39, 56. [Xue G L. 1995. Discussion on the recharge and occurrence of groundwater in loess [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 22(1): 38–39, 56.]
- 殷跃平, 彭轩明. 2007. 三峡库区千将坪滑坡失稳探讨[J]. *水文地质工程地质*, 34(3): 51–54. [Yin Y P, Peng X M. 2007. Failure mechanism on Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 34(3): 51–54.]
- 詹良通. 2006. 非饱和膨胀土边坡中土水相互作用机理[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 40(3): 494–500. [Zhan L T. 2006. Study on soil-water interaction in unsaturated expansive soil slopes [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 40(3): 494–500.]
- 张茂省. 2008. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M]. 北京: 地质出版社. [Zhang M S. 2008. Landslide geo-hazard in Baota District, Yan'an [M]. Beijing: Geological Publishing House.]
- 张茂省, 李同录. 2011. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. *工程地质学报*, 19(4): 530–540. [Zhang M S, Li T L. 2011. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 19(4): 530–540.]
- 张明, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 2009. 降雨型滑坡研究的发展现状与展望[J]. *工程勘察*, 37(3): 11–17. [Zhang M, Hu R L, Tan R J, et al. 2009. State-of-the-art study on landslides due to rainfall and the prospect [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 37(3): 11–17.]
- 张永安, 李峰, 陈军. 2008. 红层泥岩水岩作用特征研究[J]. *工程地质学报*, 16(1): 22–26. [Zhang Y A, Li F, Chen J. 2008. Analysis of the interaction between

- mudstone and water [J]. *Journal of Engineering Geology*, 16(1): 22–26.]
- 周翠英, 朱凤贤, 张 磊. 2010. 软岩饱水试验与软化临界现象研究 [J]. *岩土力学*, 31(6): 266–271. [Zhou C Y, Zhu F X, Zhang L. 2010. Research on saturation test and softening critical phenomena of soft rocks [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 31(6): 266–271.]
- 周永习, 张得焯, 周喜德. 2010. 黄土滑坡流滑机理的试验研究 [J]. *工程地质学报*, 18(1): 72–77. [Zhou Y X, Zhang D X, Zhou X D. 2010. Undrained consolidation triaxial test for flow sliding mechanism of loess landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 18(1): 72–77.]
- Beven K, Germann P. 1982. Macropores and water flow in soils [J]. *Water Resources Research*, 18(5): 1311–1325.
- Beven K, Germann P. 2013. Macropores and water flow in soils revisited [J]. *Water Resources Research*, 49(6): 3071–3092.
- Derbyshire E, Dijkstra T A, Smalley I J, et al. 1994. Failure mechanisms in loess and the effects of moisture content changes on remoulded strength [J]. *Quaternary International*, 24: 5–15.
- Dijkstra T A, Rogers C D F, Smalley I J, et al. 1994. The loess of north-central China: Geotechnical properties and their relation to slope stability [J]. *Engineering Geology*, 36: 153–171.
- Feda J. 1988. Collapse of loess upon wetting [J]. *Engineering Geology*, 25: 263–269.
- Frankowski Z. 1994. Physico-mechanical properties of loess in Poland (Studied in situ) [J]. *Quaternary International*, 24: 17–23.
- Fredlund D G, Krahn J. 1977. Comparisons of slope stability methods of analysis [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(3): 429–439.
- Godt J W, Baum R, Lu N. 2009. Landsliding in partially saturated materials [J]. *Geophysical Research Letters*, 36, L02403, doi: 10.1029/2008GL035996.
- Lu N, Godt J W. 2013. Hillslope hydrology and stability [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lu N, Godt J W, Wu D T. 2010. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil [J]. *Water Resources Research*, 46, W05515, doi: 10.1029/2009WR008646.
- Lu N, Kaya M. 2012. A drying cake method for measuring suction-stress characteristic curve, soil-water-retention curve, and hydraulic conductivity function [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 36(1), doi: 10.1520/GT J0097.
- Lu N, Likos W J. 2006. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil [J]. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2): 131–142.
- Lutenegger A, Hallberg G. 1988. Stability of loess [J]. *Engineering Geology*, 25: 247–261.
- Milovic D. 1988. Stress deformation properties of macroporous loess soils [J]. *Engineering Geology*, 25: 283–302.
- Okada Y, Sassa K, Fukuoka H. 2004. Excess pore pressure and grain crushing of sands by means of undrained and naturally drained ring-shear tests [J]. *Engineering Geology*, 75: 325–343.
- Rogers C D F, Dijkstra T A, Smalley I J. 1994. Hydroconsolidation and subsidence of loess: Studies from China, Russia, North America and Europe [J]. *Engineering Geology*, 37: 83–113.
- Šajgalik J. 1990. Sagging of loesses and its problems [J]. *Quaternary International*, 7/8: 63–70.
- Šajgalik J, Klukanova A. 1994. Formation of loess fabric [J]. *Quaternary International*, 24: 41–46.
- Wang F, Yan E, Cheng J T, et al. 2008. Movement of Shuping landslide in the first four years after the initial impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China [J]. *Landslides*, 5(3): 321–329.
- Wang G H, Sassa K. 2003. Porepressure generation and movement of rainfall induced landslides: effects of grain size and fine particle content [J]. *Engineering Geology*, 69: 109–125.
- Xu L, Dai F C, Gong Q M, et al. 2011a. Field testing of irrigation effects on the stability of a cliff edge in loess, North-west China [J]. *Engineering Geology*, 120: 10–17.
- Xu L, Dai F C, Gong Q M, et al. 2011b. Irrigation-induced loess flow failure in Heifangtai Platform, North-west China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 66(6): 1707–1713.
- Zhang F Y, Wang G H, Toshitaka K, et al. 2013. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodiumchloride solution [J]. *Engineering Geology*, 155: 69–79.
- Zhang J, Jiao J J, Yang J. 2000. In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China [J]. *Engineering Geology*, 57: 31–38.
- Zhang M S, Dong Y, Sun P P. 2012. Impact of reservoir impoundment-caused groundwater level changes on regional slope stability: a case study in the Loess Plateau of Western China [J]. *Environmental Earth Sciences*, doi: 10.1007/s12665-012-1728-6.