泾河南塬黄土的渗透特征及孕灾机制

洪 勃[1,2], 杜少少[3], 李喜安[2], 王 力[1,2], 王少林[3], 张航泊[3]

(1.矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054;
2.长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3.陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘 要:[目的] 分析泾河南塬黄土的渗透各向异性特征,并探讨该地区滑坡的孕灾机制,以期为黄土分布区雨水入渗型滑坡的灾害防治提供指导。[方法] 通过野外调查和渗透试验,分析该地区裂隙土以及不同土层的渗透特征。[结果] 裂隙土的渗透系数远大于均质土,裂隙的存在为水的入渗提供优势渗流通道。不同土层渗透系数对比表明,马兰黄土因大、中孔隙多以及节理裂隙发育,其渗透系数最大,而古土壤的渗透系数最小。[结论] 泾河南塬黄土具有明显的渗透各向异性,水与裂隙共同作用已成为该地区的一种恶性灾害链模式。

关键词:黄土;黄土裂隙;渗透系数;优势渗流通道;孕灾机制

文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2019)03-0075-05 **中图分类号**:P642.22, X43

文献参数: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(3):75-79.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.013; 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(3):75-79.

Infiltration Characteristics and Disaster-forming Mechanism of Loess in South Jinghe Tableland

Hong Bo[1,2], Du Shaoshao[3], Li Xi'an[2], Wang Li[1,2], Wang Shaolin[3], Zhang Hangbo[3]

(1. *Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 3. *Shaanxi Geological Survey Center, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

Abstract: [Objective] The characteristics of the permeability anisotropy of the South Jinghe tableland were analyzed, and the disaster-pregnant mechanism of landslides was discussed in order to provide guidance for disaster prevention and control of rainwater infiltration landslides in the loess distribution area. [Methods] Through field investigation and infiltration test, the infiltration characteristics of fractured soil and different soil layers in this area were analyzed. [Results] The permeability coefficient of fractured soil was much higher than that of homogeneous soil. Comparison of permeability coefficients of different soil layers showed that the permeability coefficient of Malan loess was the largest due to large and medium porosity and joint fracture development, while the permeability coefficient of the paleosol was the smallest. [Conclusion] The soil in South Jinghe tableland has significant permeability anisotropy. The mechanism of water-fissure disaster-forming has become a malignant disastrous chain model in this area.

Keywords: loess; loessial fracture; permeability coefficient; preponderance flow path; disaster-forming mechanism

中国是世界上滑坡灾害最为严重的地区之一,特别是 20 世纪 80 年代以来,随着经济的飞速发展以及自然因素的影响,滑坡灾害发生的频率越来越高,所造成的经济损失和人员伤亡也不断加大[1]。尤其是中国中西部地区滑坡灾害极为发育,这些滑坡规模大、损失惨重、机理复杂等特点而成为诸多研究学者重点关注对象。

据统计 90% 以上的滑坡都与水的作密切相

收稿日期:2018-09-07 **修回日期**:2018-11-19

资助项目:国家自然科学基金面上项目"基于三维微观结构的黄土湿陷性成因及潜蚀黄土场地湿陷机理研究"(41572264),"基于结构单元堆积理论的黄土湿陷性预测模型研究"(41877225);中央高校基本科研业务费专项资金"长安大学优秀博士学位论文培育"资助项目(300102268717);矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室开放课题资助课题(KF2017-16)(KF2017-17)。

第一作者:洪勃(1987—),男(汉族),陕西省山阳县人,博士研究生,主要从事黄土工程地质及其灾害防治研究。E-mail:382492004@qq.com。

通讯作者:李喜安(1968—),男(汉族),陕西省丹凤县人,博士,教授,博导,主要从事黄土工程地质方面的科研与教学工作。E-mail:dclixa@chd.edu.cn。

关[2]。因此,降雨入渗、大面积灌溉均是非饱和土边坡产生滑坡的重要因素。自 1976 年以来,大面积引水灌溉致使泾河南塬约 30 km 的塬边成了黄土滑坡的频发带[3]。据不完全统计,1980 年至 2016 年泾河南塬已发生的有记录的滑坡 43 起,太平镇 23 起,蒋刘乡 16 起,高庄镇 3 起,小滑坡(滑坡体积小于 0.5×10^4 m^3)不计其数[3-10]。其中以 1984 年 12 月 2 日发生于蒋刘乡河滩村的滑坡损失最为惨重,滑坡体积约 1.13×10^6 m^3 造成整个村庄被掩埋,20 人死亡,20 人重伤,摧毁民房 159 间[11]。截至目前,泾河南塬滑坡已造成 31 死 25 伤,摧毁农田达数千亩和无法估量的经济损失[8,12]。泾河南塬黄土滑坡已成为关中地区最具代表性的地质灾害问题之一[12]。

目前,很多研究学者就泾河南塬滑坡成因机制以及滑坡特征进行了大量研究。雷祥义[3]、金艳丽等[13]、许领等[14-16]、段钊等[8,9]等研究表明,大面积灌溉导致地下水位大幅抬升是泾河南塬滑坡的重要原因。许领等[15-17]还指出灌溉也是塬边裂缝形成的重要成因,同时裂缝的发育又是滑坡发展和发生的重要内在动力机制。唐东旗等[18]的研究表明,在有裂隙状态下边坡安全系数较无裂隙条件下要降低23.3%。显然,裂隙不但降低边坡的稳定性,而且也成为雨水入渗的优势渗流通道[14,16,19-20]。而泾河南塬塬边由于长期受泾河侧蚀、滑塌以及灌溉作用的影响,已经遍布裂缝。许领等[17]2005—2007 年对太平—蒋刘段的调查发现,塬边裂缝发育 28 条,总延展长度达1 424 m。2015 年,杨华[20]再对经河南塬裂缝进行调查统计时,裂缝发育达 90 条,累积长达 6.5 km。长度超过 150 m 的巨型裂缝一共发育有 7 条,最长裂缝可达330 m,分布于太平镇寨头—西庙店塬边[19]。同时,裂缝常常在渗流作用下,形成导水孔、落水洞,从而陷入缝生洞、洞生缝的恶性循环,加剧边坡的破坏。

可见,雨水入渗依然是该地区黄土滑坡的重要因素,同时黄土本身的性质也使得其研究内容更加复杂,如渗透各向异性、节理裂隙发育以及湿陷性。因此,本文拟以泾河南塬黄土(裂隙土、不同土层土)的渗透特征为研究对象,在总结前人成果的基础上,结合室内试验,对泾河南塬黄土的渗透各向异性特征进行分析,同时对其孕灾机理进行探讨,以期为黄土分布地区雨水入渗型滑坡的灾害防治提供重要的理论指导意义。

1 研究区概况与试验方法

泾河南塬位于陕西省泾阳县境内,受新构造运动及不同形式的侵蚀活动作用,呈现出西北高、东南低,且高低起伏较大的地形地貌特征,海拔最高 1 614 m,最低 361 m[7]。境内地貌主要分为基岩山地、黄土台塬和冲洪积阶地3 类。而泾河南塬地势平坦开阔,黄土覆盖厚度较大,塬面高程约在 420 m～490 m 左右。上部为厚度约 10～15 m 的上更新世马兰黄土,下覆地层为厚度约 45～70 m 左右的中更新世离石黄土,底部为早更新世午城黄土(高庄镇钻孔已揭露午城黄土厚度49.4 m,未见底),各层之内均夹杂着厚度不等的古土壤层。

2 结果与分析

双环法、试坑法和抽水试验都可以测得土的原位饱和渗透系数。由于野外双环试验操作简单,较试坑法和抽水试验代价低,因此被广泛使用。

2.1 均质土与裂隙土试验

根据大量野外观测资料显示,黄土地区降雨入渗深度一般不超过 1.5 m。当黄土中裂隙发育时,雨水可以通过优势渗流通道至土体深部,引起土的体积和抗剪强度变化,从而诱发滑坡、崩塌和泥流等地质灾害。因此,以蒋刘乡大堡子村塬边附近含有裂隙的农田为裂隙土试验场地(裂隙宽度 2 cm,走向平行于塬边),以无裂隙的场地为对照组(称均质土),进行双环渗透试验,对裂隙处采用相同含水率的细砂土填充[20]。试验土层为 Q_3 马兰黄土,天然含水率 12%,液限 27.1%,塑限 19.5%,天然干密度为 1.56 g/cm^3。

由图 1 可以看出,均质土和裂隙土的渗透系数大致可以分为快渗阶段、缓渗阶段和稳渗阶段。由于裂隙的存在,裂隙土的渗透系数一直较均质土要高,进入稳渗阶段均质土的稳定渗透系数为 4.05×10^{-4} cm/s,而裂隙土的稳定渗透系数约为均质土的 3 倍,为 1.27×10^{-3} cm/s。同时,二者的渗透系数与入渗时间具有较好的幂函数关系,且相关系数很好。由于土体不均匀性的存在,使得入渗速率上下波动是容易理解的[20]。

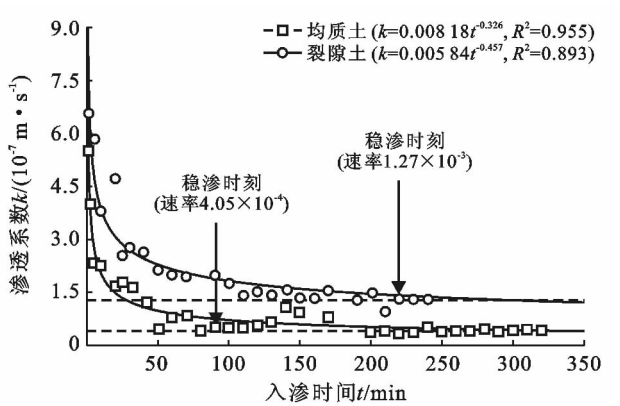


图 1 裂隙土和均质土渗透系数(k)与入渗时间(t)关系[20]

2.2　不同土层渗透试验

以泾阳高庄镇王家村滑坡台阶为试验场地,分别对表层黑垆土(L_0)、马兰黄土(L_1)、第一层古土壤(S_1)以及 S_1 下伏的离石黄土(L_2)进行野外双环试验[21]。不同土层土壤的基本物理性质具体如表 1 所示。

表 1　不同土层土壤的基本物理性质

土层	天然密度/(g·cm^{-3})	天然含水率/%	干密度/(g·cm^{-3})	比重 G_s	液限/%	塑限/%	孔隙比 e
L_0	1.58	11.0	1.42	2.73	25.7	17.1	0.91
L_1	1.48	14.3	1.30	2.72	30.8	21.7	1.11
S_1	1.78	14.6	1.63	2.73	31.2	20.7	0.78
L_2	1.57	8.8	1.44	2.71	26.2	21.6	0.89

由图 2 可以看出,黑垆土、马兰黄土和离石黄土入渗速率与入渗时间也具有较好的幂函数关系,都随着入渗时间的持续而逐渐趋于平稳。然而古土壤由于干密度大,土颗粒排列地更加密实,其渗透系数最小。与上述几种土比较,其渗透系数随入渗时间更具线性关系,且渗透系数基本保持不变。稳渗阶段,以马兰黄土的渗透系数最大,其原因应该是马兰黄土由于大、中孔隙以及垂直节理裂隙发育有关[21]。而黑垆土由于腐殖质的存在,在高温与多雨季节有利于原生矿物的分解和次生黏土矿物的形成,并使黑垆土因残积黏化而具有隐黏化特征;另外土壤中水溶性盐类的溶解并随下渗水流迁移,又使明显下移的钙、镁等盐类在剖面下部形成淀积层。因此,这也是黑垆土渗透系数较马兰黄土较小的原因。而离石黄土渗透系数<黑垆土<马兰黄土,则是因其埋深厚,固结应力大,结构更加紧密所致。

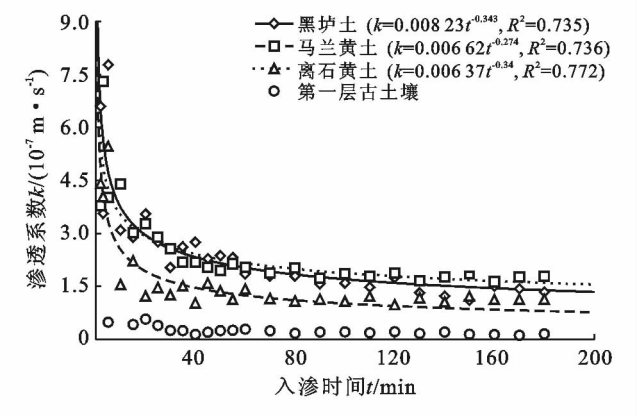


图 2　不同土层渗透系数(k)与入渗时间(t)关系[21]

2.3　三轴渗透试验

考虑到三轴渗透试验能够较真实的反映土体在地层中所处的应力环境,因此三轴渗透试验测得的渗透系数较其他渗透试验结果更加真实可靠。谢超[21]将泾阳高庄镇王家村滑坡台阶场地的原状试样进行室内三轴常水头渗透试验,测量其垂直向和水平向渗透系数。

由图 3 可以看出,随着围压的增大,不论垂直向还是水平向,3 种土的渗透系数呈现逐渐减小并趋于稳定。

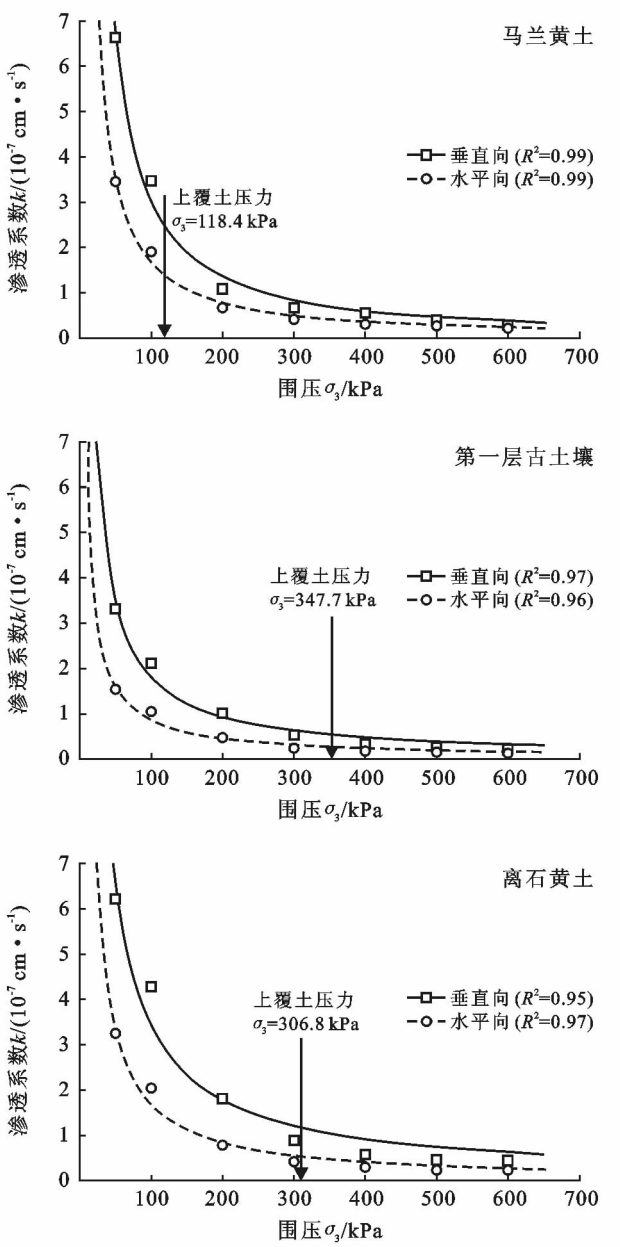


图 3　垂直向和水平向三轴渗透试验[21]

同一围压下,3 种土都具有明显的渗透各向异性性质,垂直向渗透系数均大于水平向。这显然是土颗粒的微观各向异性决定的,风成黄土在沉降、沉积以及成土过程受风力诱导或重力诱导作用而具有优选方向,即土颗粒排列具有定向性从而导致土体产生各向异性行为[22]。

对比图 2 和图 3 的 3 种土的垂直向渗透系数值可以发现,双环法的测量值与三轴试验测量值存在数量级上的差异,最大约 10^2 量级。这种差异是由于双环试验必须要铲除上覆土层至试验土层,这势必会改变试验土层原始应力状态而产生卸荷裂隙,从而增大了试验误差。而室内三轴试验则能较好地复原试验土层的真实应力环境。

3 讨 论

泾河南塬地区,水对边坡的不利作用主要包括地表水(灌溉、降雨、融雪)入渗、地下水位抬升、河流侵蚀等。自 1976 年大面积灌溉以来,地下水位不断抬升泾阳南塬大量的滑坡、崩塌已使其塬边拉裂隙大量发育,以致该地区滑坡灾害连年不断,塬面不断后退,土地资源损失严重[19]。

然而,泾河南塬地下水位不再是受大气降雨单一补给,引水灌溉已然成为主控因素[3]。1976—2016 年太平镇和蒋刘乡 6 个村的地下水位变化情况为:自 1976 年以来地下水位持续抬升,其中 1992 年蒋刘村的地下水位较 1976 年上涨达 37 m[6],地下水位年均上升速度达 2.313 m/a,其他各村地下水位也均有不同程度的抬升。2010—2014 年的年灌溉量有增多的趋势,5 年灌溉量均值为 2.71×10^6 m^3。庙店村的钻孔资料也证实了这种趋势,其 2016 年的地下水位较 1992 年上涨 37.4 m,地下水位年均上升速度达 1.558 m/a。

地下水位的不断抬升也致使该地区滑坡灾害不断,1976—1980 年灌溉初期,地下水位主要受大气降雨补给,灌溉并未造成地下水位大幅抬升。随着灌溉强度的不断增大,到 1980—1992 年灌溉区塬边滑坡灾害已经不断发生,同时也促使了更多滑坡的孕育。1996 年太平镇和蒋刘乡年累计滑坡达 5 次之多,累积滑坡体积 2.03×10^6 m^3。自 2000 年后,虽然政府部门采取了控制措施,但 2000—2016 年累计发生中大型滑坡 16 次,平均 1 次/a。

诸多研究表明,地下水位的抬升已是泾河南塬滑坡灾害的主导因素[3,8,9,13-16],而地表水入渗则是滑坡发生的诱发因素[3],塬边裂隙、裂缝是滑坡发展和发生的重要内在动力机制[15-17]。泾阳县雨季主要集中在 7—9 这 3 个月,对应 1976—2016 年滑坡月统计这 3 个月滑坡达 13 起。但这 3 个月却不是滑坡最频繁的月份,春夏之交的 3,4,5 月滑坡达 17 起。这则是与南塬农业活动密切相关,3—5 月份果树现蕾开花,冬小麦返青拔节、灌浆乳熟[6],均需要长时间大面积灌溉。而大面积灌溉必然导致地下水位快速升高,地下水位的抬升不仅降低了坡体的抗剪强度,同时也增加了坡体的下滑力[3],进而促使滑坡灾害的发生。

综上所述,泾河南塬北侧由于长期受泾河强烈的侧蚀作用,塬边形成了高度约 50～90 m 的黄土陡崖、陡坎,为黄土滑坡、崩塌提供了有利的场地条件。由节理、裂隙发育的黄土－古土壤序列构成的陡峭边坡为滑坡灾害的发展和发生提供了有利的地层地貌及地质构造条件[3],而灌溉和降雨又为滑坡提供了气候水文条件。因此,泾河南塬滑坡依然形成了一种恶性循环的灾害链模式:雨、水入渗→裂隙扩大、地下水位抬升→产生静水、动水压力,增大下滑力;软弱带软化,抗剪强度降低;浮托力增大,抗滑力降低→滑动面贯穿→滑坡→致使滑坡后缘产生拉张裂隙→雨、水入渗→…。

显然,水与裂隙诱发地质灾害并进一步恶化地质环境,而地质环境的恶化又导致更为严重的地质灾害的发生。可见,水与裂隙共同作用模式已成为泾河南塬滑坡的一种机制。

4 结 论

泾河南塬黄土节理裂隙发育,节理裂隙为雨水入渗的优势渗流通道,这也是裂隙土渗透系数大于均质土渗透系数的原因所在。

因土的性质(如,孔隙比)以及地质环境(如,应力状态)不同,各土层的双环法渗透系数差异较大。马兰黄土因大、中孔隙多(孔隙比大)以及节理裂隙发育,所以马兰黄土渗透系数最大。黑垆土次之,离石黄土再次之,古土壤渗透系数最小。

由于双环试验卸去了上覆土压力,与三轴渗透试验结果比较存在数量级上的差异。通过分析水与裂隙致灾过程,水与裂隙共同作用模式已成为泾河南塬滑坡的一种恶性灾害链机制。

[参 考 文 献]

[1] 黄润秋,许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京:科学出版社,2008.

[2] 刘青泉. 水体渗流对滑坡体稳定性的影响研究[R]. 中国力学大会-2011 暨钱学森诞辰 100 周年纪念大会:环境力学分会场邀请报告,20110822—20110824,中国,哈尔滨.

[3] 雷祥义. 陕西泾阳南塬黄土滑坡灾害与引水灌溉的关系[J]. 工程地质学报,1995,3(1):56-64.

[4] 段钊. 黄土滑坡触发机理研究:以泾河下游南岸黄土塬区滑坡为例[D]. 西安:长安大学,2013.
[5] 赵秋鹏. 灌溉作用下陕西省泾阳县张村湾黄土滑坡形成机理及稳定性分析研究[D]. 西安:西北大学,2014.
[6] 韩波. 泾阳南塬斜坡地下水位与稳定度的关系研究[D]. 西安:西安科技大学,2015.
[7] 葛瑞华. 泾阳南塬灌溉诱发型黄土滑坡形成机理试验研究[D]. 西安:西北大学,2016.
[8] 段钊,彭建兵,王启耀. 泾阳南塬多序次黄土滑坡特征参数与成因[J]. 山地学报,2016,34(1):71-76.
[9] 段钊,彭建兵,王启耀. 泾阳南塬黄土滑坡的运动规律与液化效应[J]. 水土保持通报,2016,36(3):46-49.
[10] 许强,魏勇,彭大雷,等. 泾阳南塬蒋刘 4# 滑坡特征及成因机制[J]. 水文地质工程地质,2018,45(1):123-130+143.
[11] 杨炳强. 泾阳南塬河滩村黄土滑坡的特征及致灾机理研究[D]. 西安:长安大学,2015.
[12] 段钊,李文可,王启耀. 泾河下游台塬区黄土滑坡类型与时空分布规律[J]. 西安科技大学学报,2015,35(3):369-375.
[13] 金艳丽,戴福初. 地下水位上升下黄土斜坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2007,15(5):599-606.
[14] 许领,李宏杰,吴多贤. 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,2008,19(2):32-35.
[15] 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.
[16] 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:中国地质大学学报,2010,35(1):155-160.
[17] 许领,戴福初,邝国麟,等. 台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J]. 地质论评,2009,55(1):85-90.
[18] 唐东旗,姚秀芳,彭建兵,等. 黄土坡体节理发育特征和空间分区与边坡稳定性[J]. 煤田地质与勘探,2015,43(3):86-90.
[19] 杨阳. 黄土滑坡裂缝发育特征及其对滑坡孕灾模式的影响:以泾阳南塬黄土滑坡为例[D]. 西安:长安大学,2015.
[20] 杨华. 裂隙性黄土渗透特性试验研究[D]. 西安:长安大学,2016.
[21] 谢超. 泾阳南塬黄土渗透特性及黄土滑坡研究[D]. 西安:长安大学,2016.
[22] Nouguier-Lehon C, Cambou B, Vincens E. Influence of particle shape and angularity on the behaviour of granular materials: A numerical analysis[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010,27(14):1207-1226.

(上接第 74 页)

[5] 刘亚宾,许云海,张海涛,等. 湘西花垣县主要地表河流水重金属污染特征及健康风险评价[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(3):602-608.
[6] 杨海君,许云海,刘亚宾,等. 湘江流域衡阳水口山段水环境健康风险评估[J]. 环境化学,2018,37(9):2060-2070.
[7] Zhang Zhaoyong, Abuduwaili Jilili, Jiang Fengqing. Determination of occurrence characteristics of heavy metals in soil and water environments in Tianshan Mountains, Central Asia [J]. Analyt Lett, 2013, 46(13): 2122-2131.
[8] Bing Haijian, Wu Yanhong, Zhou Jun. Mobility and eco-risk of trace metals in soils at the Hailuogou Glacier foreland in eastern Tibetan Plateau[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(6):5721-5732.
[9] Ni Fuquan, Liu Guodong, Ren Huazhun. Health risk assessment on rural drinking water safety: A case study in Rain City district of Ya'an City of Sichuan Province [J]. Journal of water Resource and Protection, 2009 (2):128-135.
[10] 沈园,谭立波,单鹏,等. 松花江流域沿江重点监控企业水环境潜在污染风险分析[J]. 生态学报,2016,36(9):2732-2739.
[11] Zhu Bingqi, Yu Jingjie, Qin Xiaoguang. The significance of mid-latitude rivers for weathering rates and chemical fluxes: Evidence from northern Xinjiang Rivers [J]. Journal of Hydrology, 2013,486:151-174.
[12] 叶壮凌,杨海君. 花垣河重污染河段水环境健康风险评价及监测因子分析[J]. 湖南农业科学,2017(2):57-61.
[13] 朱程,马陶武,周科,等. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险[J]. 生态学报,2010,30(15):3982-3993.
[14] 朱佳文. 湘西花垣铅锌矿区重金属污染土壤生态修复研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2012.
[15] 陈妮. 2006—2015 年南四湖水质综合评价及改善效果分析[D]. 山东 青岛:青岛理工大学,2018.
[16] 关伯仁,司志中. 水质系统规划研究:以伊洛河洛阳段为例[J]. 地理研究,1986(1):106-107.
[17] 符刚,曾强,赵亮,等. 基于 GIS 的天津市饮用水水质健康风险评价[J]. 环境科学,2015,36(12):4553-4560.
[18] 刘钢,谌建宇,叶万生,等. 矿区地表水锰超标应急处置工程案例分析[J]. 给水排水,2018,54(4):63-65.
[19] 马先杰,陆凤,陈兰兰,等. 贵州锰矿区地表水体重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学与技术,2018,41(11):191-197.