

贵州省鸡场滑坡地下水化学特征反映的水-岩(土)作用

刘建强, 许强, 郑光, 陈达, 王卓, 蒋金晶

Water-rock /soil interaction reflected by the chemical characteristics of groundwater of Jichang landslide in Guizhou Province

LIU Jianqiang, XU Qiang, ZHENG Guang, CHEN Da, WANG Zhuo, and JIANG Jinjing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究

Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes

杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 李志明, 刘文波, 康伟 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 154-162

基于主成分分析法的Q2黄土湿陷特性研究

A study of the collapsibility of Q2 loess based on principal component analysis

王玉涛, 刘小平, 曹晓毅 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 141-148

地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qingbaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 44-53

苗尾水电站赵子坪岸坡变形失稳的地下水动力作用分析

Dynamic analyses of groundwater on the deformation and instability of the Zhaoziping bank slope near the Miaowei Hydropower Station

白洁, 巨能攀, 张成强, 卢向涛 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 159-166

同位素技术解析安阳河与地下水相互作用

Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater

张敏, 平建华, 禹言, 黄先贵, 朱亚强, 程玉刚 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 31-39

海原盆地地下水咸化特征和控制因素

Groundwater salinization characteristics and controlling factors in the Haiyuan Basin

王雨山, 李戌, 李海学, 程旭学, 刘伟坡, 张梦南 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 10-17



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103009

刘建强, 许强, 郑光, 等. 贵州省鸡场滑坡地下水化学特征反映的水-岩(土)作用[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 132-140.
LIU Jianqiang, XU Qiang, ZHENG Guang, *et al.* Water-rock /soil interaction reflected by the chemical characteristics of groundwater of Jichang landslide in Guizhou Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 132-140.

贵州省鸡场滑坡地下水化学特征 反映的水-岩(土)作用

刘建强, 许强, 郑光, 陈达, 王卓, 蒋金晶

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 滑坡体水-岩(土)作用是一种复杂的物理化学综合作用, 影响坡体的稳定性, 但关于目前水-岩(土)相互作用对地质灾害发生方面的影响研究仍较为薄弱。以贵州省鸡场滑坡为研究对象, 分析滑坡区岩土体矿物组成和化学成分特征, 结合区域内基岩裂隙水、大气降水的成分变化, 利用主成分分析方法, 研究鸡场滑坡水-岩(土)作用过程, 并分析水岩演化作用对滑坡稳定性的影响。结果表明: (1) 滑体内玄武岩的风化过程是一种机械破碎-矿物蚀变耦合的水-岩相互作用, 发生在“微观-细观-宏观”3种尺度上; (2) 选取前3个因子 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 (分别占总方差的 49.365%、27.135%、15.092%) 分析地下水的化学特征, 主因子 Z_1 反映了玄武岩原生矿物的溶蚀作用对地下水化学成分的控制作用, 主因子 Z_2 反映了地下水的蒸发作用与 SiO_2 溶解度随 pH 变化的矿物沉淀作用, 主因子 Z_3 反映了地下水与岩(土)体间存在离子交换作用且主参与离子为 Mg^{2+} 和 K^+ ; (3) 水岩作用产物主要为伊利石、蒙皂石、绿泥石等黏土矿物, 使得岩体结构面内黏土矿物含量增加, 岩体劣化损伤, 对滑带的形成及滑坡的解体产生重要影响。由此研究说明滑坡地下水与岩土体相互作用的主要过程能被主成分分析结果充分反映。

关键词: 鸡场滑坡; 水-岩(土)相互作用; 地下水; 化学性质; 主成分分析; 矿物成分

中图分类号: P642.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0132-09

Water-rock /soil interaction reflected by the chemical characteristics of groundwater of Jichang landslide in Guizhou Province

LIU Jianqiang, XU Qiang, ZHENG Guang, CHEN Da, WANG Zhuo, JIANG Jinjing

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The water-rock/soil interaction of a landslide is a complex physical and chemical synthesis, which seriously affects the stability of the slope. Research on the water-rock/soil interaction of a landslide on the occurrence of geological disasters is relatively weak. This article takes the Jichang landslide as the research object, analyzes the characteristics of the mineral composition and chemical composition of the rock and soil in the landslide area, combines the compositional changes of bedrock fissure water and atmospheric precipitation in the

收稿日期: 2021-03-02; 修订日期: 2021-07-18

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630640)

第一作者: 刘建强(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害机理及防治方面研究。E-mail: qiangcdut@qq.com

通讯作者: 许强(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害预测评价及防治处理方面的教学与研究工作。

E-mail: xq@cdut.edu.cn

area, and uses the principal component analysis method to study the water-rock of the Jichang landslide. The process of action and the influence of water and rock evolution on the stability of landslides are analyzed. The results show that: (1) The weathering process of basalt in the sliding body is a water-rock interaction coupled by mechanical crushing-mineral alteration, occurring on “micro-micro-macro” three scales. (2) The first three factors, accounting for 49.365%, 27.135%, and 15.092% of the total variance, respectively, are selected to analyze the chemical characteristics of groundwater. The main factor Z_1 reflects the control effect of the dissolution of basalt primary minerals on the chemical composition of the groundwater, the main factor Z_2 reflects the evaporation of groundwater and the precipitation of minerals in which the solubility of SiO_2 changes with pH, and the main factor Z_3 reflects the ion exchange between groundwater and rock (soil) with the main participating ions being Mg^{2+} and K^+ . (3) The products of water-rock interaction are mainly clay minerals such as illite, smectite and chlorite, which increase the content of clay minerals in the structural plane of the rock mass, deteriorate and damage the rock mass, significantly influencing the formation of slip zones and the disintegration of landslides. The results of principal component analysis of groundwater can reflect the main process of interaction between landslide groundwater and rock/soil.

Keywords: Jichang landslide; water-rock/soil interaction; groundwater; chemical characteristics; principal components analysis method (PCA); mineral composition

岩体风化一般是指在水(溶解有氧气、二氧化碳, 甚至有机酸等物质的水溶液^[1])、空气、温度等生物应力与岩土体发生相互作用的过程中, 岩土体内部结构、矿物成分以及岩体力学性质发生变化, 地下水继续在岩体中流动带走地下水与岩土体作用后的产物, 从而继续加速其进程的现象^[2]。岩石风化包含于岩体风化中, 是指岩石在太阳辐射、大气、水和生物作用下出现破碎、疏松及矿物成分次生变化的现象。而水-岩(土)相互作用是在化学与力学的耦合作用下, 水岩系统发生的地下水溶质迁移和地层地质结构变化, 即水-岩(土)相互作用是岩石风化中的重要一环。与滑坡体内水-岩(土)相互作用密切相关的不仅仅是地下水的化学成分, 还有地下水流经的岩土体的结构信息及组成成分, 通过研究地下水与周围岩土体相互作用的机理, 可以揭示岩体的结构、组成成分、力学性质的变化。

国内外已有许多学者对这一课题进行了不同程度不同方向的研究。一些学者在岩土体的矿物成分上进行水-岩(土)相互作用的分析, 如, Shuzui^[3]认为流经滑带的地下水的化学性质与位于滑带土中蒙脱石矿物的形成密切相关; Wen 等^[4]对滑带土与周围岩土体成分的差异及变化进行对比分析, 认为富含黏土矿物的滑带及软弱泥化带在水的作用下极易发生失稳; 易连兴^[5]以关岭县大寨滑坡为例, 建立了基岩裂隙水和岩溶管道水复合水动力场对滑坡的影响模式; 严春杰等^[6]研究发现当滑带土中水敏感性较强的蒙脱石及

蛭石含量较高时, 容易对滑坡产生不良影响; 江洵清等^[7]以三峡黄土坡滑坡为研究对象, 发现地下水中含钙质岩体会产生强烈的溶蚀作用, 从而引起岩(土)体的物理力学性能大幅降低。也有部分学者在实验室内通过研究水溶液的化学性质, 来研究水-岩(土)相互作用。如, 周翠英等^[8]通过分析红层在不同饱水状态时水溶液中阴阳离子浓度的变化规律, 研究软岩的遇水软化过程。孙德安等^[9]通过红黏土浸水变形试验, 研究了红黏土在浸水作用下变形过程; 刘立才等^[10]通过开展动态含水层模拟试验, 研究了南水北调水源进入含水层过程中发生的硝化反应和阳离子交换吸附作用。

由于目前水-岩(土)相互作用对于地质灾害的发生方面的影响研究仍较为薄弱, 通过该技术路线研究滑坡体水-岩(土)相互作用的文献更少, 因此, 本文以贵州省六盘水市鸡场镇滑坡为例, 选取滑坡体不同高度、不同部位处基岩裂隙水进行主成分分析, 深入探讨滑坡中水-岩(土)相互作用机理及其如何影响滑坡稳定性, 以对该类滑坡体及玄武岩区相似灾害的防治提供参考。

1 鸡场滑坡概况及岩体特征

1.1 滑坡概况

2019 年 7 月 23 日, 贵州省水城县鸡场镇坪地村岔沟组山体发生了一起特大型滑坡地质灾害, 1 600 人受灾, 43 人遇难, 9 人失联, 经济损失超 1 亿元。滑坡区域地质图如图 1 所示, 鸡场滑坡主滑方向为 26° , 滑坡

后缘陡壁高程 1 665 m, 坡脚高程 1 200 m, 滑坡的相对高差 465 m, 滑坡滑源区位于斜坡中上部, 剪出口位于 X244 县道处, 高程在 1 510 ~ 1 520 m 之间, 滑源区宽 150 ~ 180 m。

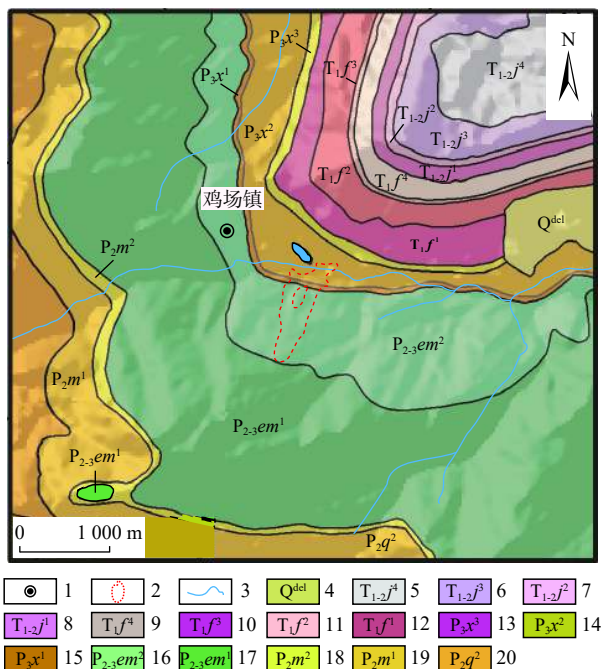


图1 鸡场滑坡区附近地质图

Fig. 1 Geological map of the investigated area showing the outline of Jichang landslide

1—乡镇; 2—鸡场滑坡; 3—河流; 4—滑坡堆积物; 5~8—三叠系中~下统嘉陵江组第4、3、2、1段; 9~12—三叠系下统飞仙关组第4、3、2、1段; 13~15—二叠系上统宣威组第3、2、1段; 16~17—二叠系上~中统峨眉山玄武岩组第2、1段; 18~19—二叠系中统茅口组第2、1段; 20—二叠系中统栖霞组第2段

1.2 滑坡岩体特征

滑坡区岩性为风化严重的玄武岩, 结构破碎, 性质软弱, 不利的岩性条件是鸡场滑坡失稳的重要因素之一, 且鸡场滑坡地下水富集, 多为基岩裂隙水, 水-岩(土)化学作用强烈。相关地质资料显示, 在滑坡区中主要的喷发旋回有2个, 第二喷发旋回始于第一喷发旋回顶部的火山碎屑岩消失处, 从而在2个喷发旋回中形成了一层厚0.5~2.5 m的凝灰岩夹层, 在凝灰岩两侧分别为上部松散的深灰色块状玄武岩及含杏仁状气孔状玄武岩, 下部致密的深灰色厚层块状玄武岩^[11]。根据整个滑坡的运动破坏特征, 将滑坡区分为滑源区、铲刮-堆积区、堆积区3个区, 绘制滑坡平剖面图(图2), 分为左缘、右缘2条纵向剖面。由图2(a)可以看出, 滑坡后壁基岩出露, 地势陡峭; 滑坡左缘侧壁基岩出露较少, 主要是碎石土覆盖层, 且黏土质较

多, 碎块石较少; 滑坡右壁出露较多强风化玄武岩基岩, 由于风化程度较高, 加上玄武岩的特殊风化形式, 发育成明显的“石夹土”特征^[12], 如图3(a)所示。

滑源区上部玄武岩呈黄色块裂状, 玄武岩表层可以用手指轻易刻出划痕。切开玄武岩块, 可以看到明显的核心石与外层风化腐岩壳的层状结构, 给人一种“石夹土”的视觉效应, 如图3(c)所示。取滑源区玄武岩样本进行薄片鉴定可以看到玄武岩中杏仁体的内部基本上全由隐晶状的鳞绿泥石充填, 而占比70%的斜长石微晶基本都有强蒙皂石化或者强泥化, 这就形成了微观上的“石夹土”结构, 如图3(d)所示。根据薄片鉴定结果, 可以判断滑源区玄武岩处于风化的中级阶段。

2 试样采集与分析方法

通过前文的调查结果可以看出, 滑源区玄武岩这种微观-细观-宏观上都有的“石夹土”结构反映出该区域内玄武岩的风化作用可以在多尺度上同时进行, 而这种多尺度的水-岩(土)相互作用又为裂隙水及孔隙水的流动提供了条件。风化溶解液流入这些孔隙、裂隙发生水-岩(土)相互作用后, 能够携带其产物经由空隙继续向外迁移, 从而促进岩体内部源源不断地产生水-岩(土)相互作用。因而取滑坡体上不同部位基岩裂隙水进行水化学分析, 能够反应区域内玄武岩岩体中发生的水-岩(土)相互作用。鸡场滑坡区内的地下水主要是基岩裂隙水及松散层孔隙水, 在滑坡区内有多个基岩裂隙水露头出露, 本文主要研究滑坡区内不同部位出露的基岩裂隙水。2020年8月4日在滑坡区不同高程、不同部位的基岩裂隙水出露处取地下水样及岩土体样本, 共计9组水样和15组岩样, 采样点如图4所示, 并于2020年8月3日采集了2个本区雨水样本, 对上述水样进行水化学分析。为从元素成分上更好地分析滑坡中发生的水-岩相互作用, 对上述岩土体样本进行矿物成分分析, 结果见表1、表2, 其中 R_1 代表滑坡后壁基岩裂隙水出露处结构面夹层土, R_2 代表裂隙水出露处较致密的杏仁状玄武岩, R_3 代表滑坡后壁出露的肉眼可见较松散的灰绿色蚀变杏仁状磁化玄武岩, R_4 代表堆积体玄武岩中有“石夹土”现象的外圈强风化部分, R_5 代表内部弱风化部分。

地下水化学成分是多变量的复杂函数, 常常与水-岩作用的规模、时间、地质历史等因素有关, 使得水-岩系统演化研究变得困难^[13]。正是由于这种多变量的情况, 本文采用主成分分析法, 对地下水的化学成分进行降维处理, 利用较少的指标来反映地下水中多个

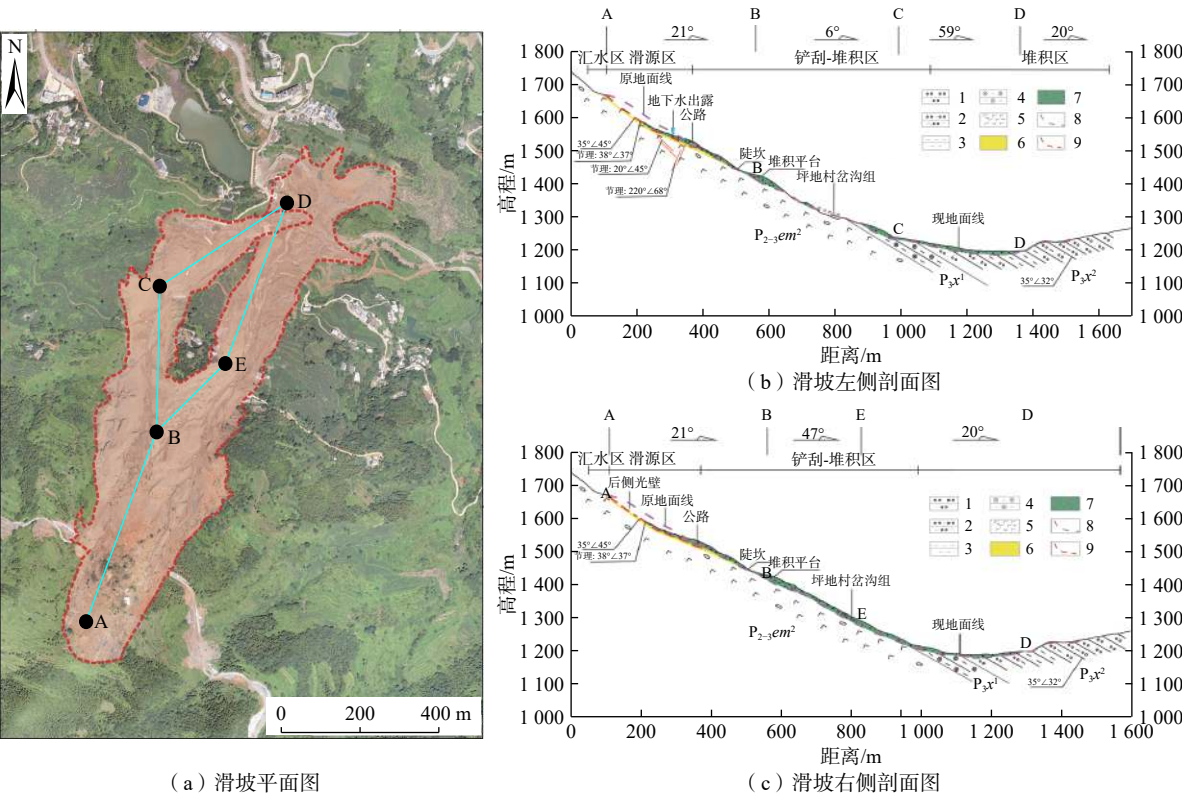


图 2 鸡场滑坡平剖面示意图

Fig. 2 Plan and section diagram of Jichang landslide

1—粉砂岩;2—泥质粉砂岩;3—黏土岩;4—豆粒含铁质黏土岩;5—杏仁状玄武岩;6—残留的强风化玄武岩层;7—碎块石堆积体;8—原地面线;9—滑面

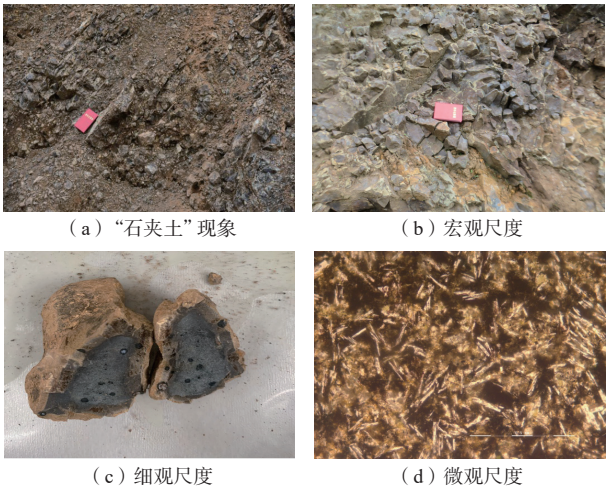


图 3 宏观-细观-微观尺度下的鸡场滑坡区玄武岩结构特征
Fig. 3 Structural characteristics of basalt in Jichang landslide area under macroscopic, microscopic and microscopical scales

指标提供的信息,用于揭示控制这些原始信息间的内在因素。

3 结果

3.1 滑坡岩土体矿物成分

对所采岩土体试样进行矿物成分及全元素分析

(表 1)。可以看出岩土体试样矿物成分中辉石与斜长石总体占比较高,主要次生黏土矿物为伊利石、蒙皂石和绿泥石,且区域内各类岩土体中黏土矿物的含量都极高,达到了 30% 左右,从 R_4 、 R_5 可以看出,风化作用主要在矿物成分中的辉石、斜长石上进行,大量的辉石、斜长石被蒙皂石化、绿泥石化,这与薄片鉴定结果一致。

岩土体试样的元素分析结果如表 2 所示,可以看出岩土体试样中 SiO_2 含量极高,且各类氧化物中, MgO 及 CaO 也在不同岩土体中占有较高比例,而 FeO 及 Fe_2O_3 的含量占比都达到 20% 左右,这也与区域内的玄武岩在薄片鉴定中都含有 20% 左右的磁铁矿相吻合。

3.2 滑坡区地下水化学特征

滑坡区内玄武岩的“石夹土”结构为降雨后基岩裂隙水的补给与排泄提供了通道^[14-15]。滑坡体水样分析结果见表 3,水样中的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 质量浓度较高,其中 HCO_3^- 的质量浓度均大于 10 mg/L, Ca^{2+} 的质量浓度均大于 2.5 mg/L,从化学特征上看滑坡区内地下水类型为 HCO_3-Ca 型水。对比雨水样及基岩裂隙水样的 pH 值可以看出,基岩裂隙水的 pH 值明显高于雨水样的 pH 值,滑坡区内地下水呈弱酸性,其中,基岩裂

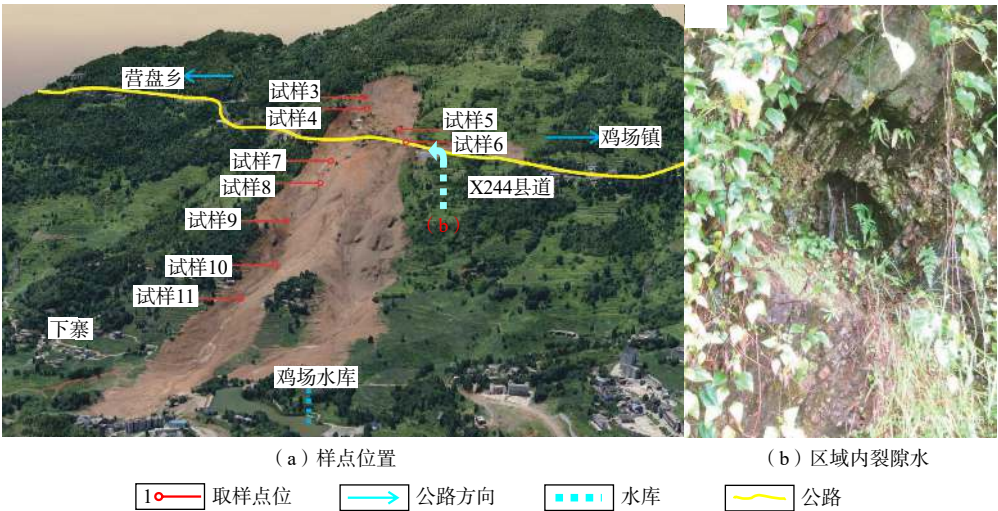


图 4 鸡场滑坡 3D 全貌影像及样点位置

表 1 鸡场滑坡内岩土体 X-矿物衍射分析结果
Table 1 Analysis results of X-mineral diffraction of rock and soil mass in Jichang landslide

样品	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
辉石/%	9.6	20.3	10.4	—	31.2
石英/%	9.3	2.6	3.2	16.7	3.4
钾长石/%	2.7	2.6	3.4	1.8	2.5
斜长石/%	16.2	47.2	41.0	8.8	31.8
磷灰石/%	1.8	2.4	2.2	3.0	2.0
钛铁矿/%	3.6	3.3	4.1	5.0	3.2
磁铁矿/%	5.7	1.1	6.2	1.3	—
褐铁矿/%	3.5	2.5	1.3	10.7	9.1
伊利石/%	9.5	0.9	12.7	3.2	0.8
蒙皂石/%	32.3	2.7	13.5	33.7	4.2
绿泥石/%	5.7	14.3	2.0	15.8	11.8

注:结果均为质量占比;“—”表示无此成分。R₁代表滑坡后壁基岩裂隙水出露处结构面夹层土,R₂代表裂隙水出露处较致密的杏仁状玄武岩,R₃代表滑坡后壁出露的肉眼可见较松散的灰绿色蚀变杏仁状磁化玄武岩,R₄代表堆积体玄武岩中有“石夹土”现象的外圈强风化部分,R₅代表内部弱风化部分。

隙水样的 pH 值均大于 6,且滑坡区内雨水较流经滑坡体排出后的雨水酸性明显增大。除此之外,滑坡区域内雨水 Cl⁻含量偏高,雨水样的 TDS 值明显低于基岩裂隙水样的 TDS 值,且随取样高程变低,地下水内的 TDS 呈明显上升趋势,说明地下水在流经岩土体后,携带岩土体中的易溶物质进入地下水,导致地下水的化学成分较雨水发生了明显的变化。

4 分析与讨论

4.1 地下水化学主成分分析

利用 SPASS 软件进行主成分分析,得到地下水化学成分间的相关系数矩阵(表 4),可知,HCO₃⁻与 Ca²⁺、

表 2 鸡场滑坡内岩土体元素分析结果
Table 2 Analysis results of rock and soil elements in Jichang landslide

样品	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
Na ₂ O/%	0.16	2.77	0.89	—	1.17
MgO/%	3.23	4.47	3.25	1.90	3.67
Al ₂ O ₃ /%	14.71	13.58	15.19	17.79	13.68
SiO ₂ /%	43.79	44.46	47.87	36.89	44.96
P ₂ O ₅ /%	0.75	1.00	0.92	1.22	0.82
SO ₃ /%	1.63	1.45	1.17	0.37	1.66
K ₂ O/%	3.66	0.73	4.85	2.08	2.07
CaO/%	3.37	5.92	3.1	0.54	8.03
TiO ₂ /%	2.15	2.11	2.44	3.62	2.51
V ₂ O ₅ /%	0.09	0.09	0.06	0.13	0.09
Cr ₂ O ₃ /%	0.01	0.02	—	0.01	0.04
MnO/%	0.26	0.24	0.08	0.24	0.30
FeO/%	5.55	10.99	4.51	3.71	12.41
Fe ₂ O ₃ /%	13.88	8.49	10.83	22.00	5.88
LOI/%	6.74	3.69	4.86	9.49	2.71

注:结果均为质量占比;“—”表示无此成分。

Na⁺相关系数最高,其相关系数均大于 0.9。这是因为玄武岩中的辉石与斜长石等矿物与地下水发生了活跃的水-岩相互作用,而 HCO₃⁻是重要的水-岩相互作用产物;区域内岩样元素分析报告显示,区域内岩体含有丰富的易与水发生反应的 Na₂O 及 CaO 等化学成分,在地下水流经岩体后,岩体中的 Na₂O 与 CaO 与地下水发生反应使得地下水中 Ca²⁺、Na⁺浓度变高。而 Na₂O 与 CaO 与水发生反应后生成 Ca²⁺、Na⁺及 OH⁻,这就是为什么 pH 较雨水会不断增大,且随着地下水中 OH⁻浓度的增大,空气中的 CO₂更易与其反应生成 HCO₃⁻。主成分分析选择特征值大于 1、累积方差贡献

表 3 贵州省鸡场滑坡地下水及雨水化学成分分析结果
Table 3 Major ions of groundwater in the Jichang landslide

样品编号	质量浓度/(mg·L ⁻¹)									pH
	SiO ₂	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	
雨水1	1.01	0.78	2.86	0.10	0.16	1.34	—	10.08	10.31	6.0
雨水2	1.28	—	2.70	0.10	1.11	0.68	—	10.08	10.44	4.9
试样3	33.53	0.96	2.70	1.06	1.23	0.23	0.85	16.37	15.21	6.9
试样4	22.53	1.59	6.61	1.28	0.24	0.4	1.12	27.71	25.73	6.8
试样5	17.53	1.27	5.16	1.69	0.15	0.23	5.11	21.41	26.04	6.6
试样6	18.53	1.36	6.35	1.44	—	0.13	3.57	25.19	27.77	7.1
试样7	19.87	1.24	5.87	0.58	0.50	0.38	4.87	25.19	22.51	6.4
试样8	21.20	1.18	6.35	0.96	0.18	0.36	5.56	25.19	29.08	6.8
试样9	18.87	1.26	6.03	0.96	0.27	0.42	6.35	25.19	28.39	6.6
试样10	3.28	—	7.94	1.64	0.14	0.24	6.79	31.49	31.92	6.9
试样11	10.88	1.55	15.87	3.85	0.38	0.83	8.21	62.97	63.91	7.1

注: (1)雨水1与雨水2均为8月3日在滑坡附近所接雨水, 其余试样为滑坡体上基岩裂隙水; (2)滑坡体中基岩裂隙水取样时间均为8月4日, 取样点如图3中所示。

表 4 鸡场滑坡地下水化学成分间的相关系数矩阵
Table 4 Correlation matrices of the major ions of groundwater in the Jichang landslide

因子	SiO ₂	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
SiO ₂	1	0.624	-0.083	0.086	0.181	-0.613	0.019	0.024
Mg ²⁺		1	0.390	0.419	-0.356	-0.126	0.255	0.429
Ca ²⁺			1	0.915	-0.347	0.037	0.759	0.992
Na ⁺				1	-0.244	-0.116	0.683	0.933
K ⁺					1	0.017	-0.465	-0.282
Cl ⁻						1	-0.288	-0.027
SO ₄ ²⁻							1	0.756
HCO ₃ ⁻								1

率大于 70% 的因子作为主成分, 选择前 3 个变量因子 Z₁、Z₂、Z₃ 作为主成分就可以反应出 92% 的信息。贵州省鸡场滑坡地下水的化学成分主成分分析结果如表 5 所示。对所选的 3 个主成分, 分别分析其对应的水-岩(土)相互作用规律。

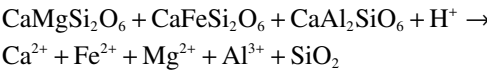
4.1.1 主因子 Z₁

在主因子 Z₁ 中 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻及 SO₄²⁻为主导因子, 在总方差贡献率中占 49.365%。薄片鉴定结果(图 5)显示区域内岩体的风化作用明显, 在送检的 14 个样本中都发现了明显的原生矿物溶蚀痕迹, 期间微晶斜长石、辉石都有不同程度的蒙皂石化, 且在所有样本中斜长石微晶(约 80%)皆有强蒙皂石化或者强绿泥化; 在表 1 中也可看出 R₄、R₅中内部风化程度较轻的部分辉石及长石含量明显高于风化程度较高的外部, R₄中的蒙皂石及绿泥石含量较 R₅中明显增高的现象与薄片鉴定结果符合。地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺的增多主要是由于辉石的溶解及钙长石、钠长石与辉石的绿泥石化, Na⁺的增多主要是由于长石中钠长石部分在酸性水中发生蒙皂石化产生, 其化学反应方程式如下:

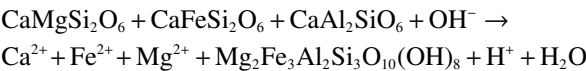
表 5 鸡场滑坡地下水化学成分主成分分析结果
Table 5 Results of the principal component analysis of groundwater in the Touzhai landslide

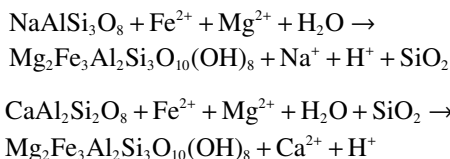
主因子	Z ₁	Z ₂	Z ₃
SiO ₂	0.138	0.960	0.039
Mg ²⁺	0.561	0.514	-0.422
Ca ²⁺	0.947	-0.241	0.145
Na ⁺	0.920	-0.059	0.245
K ⁺	-0.472	0.169	0.799
Cl ⁻	-0.171	-0.743	-0.167
SO ₄ ²⁻	0.842	-0.057	0.030
HCO ₃ ⁻	0.955	-0.144	0.202
特征值	3.949	1.851	1.226
方差贡献率/%	49.365	27.135	15.092
累积贡献率/%	49.356	76.500	91.592

(1) 辉石的溶解

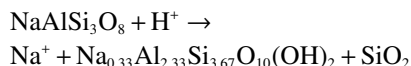


(2) 辉石的绿泥石化



(3) 钠长石及钙长石绿泥石化^[16]

(4) 钠长石的蒙皂石化



而地下水中 SO_4^{2-} 主要是由岩土体中含有的部分硬石膏中的 SO_3 与水发生反应从而使得地下水中 SO_4^{2-} 浓度增加^[17], 硬石膏是重要的造岩矿物, 绝大多数岩石中都有该成分。 HCO_3^- 在地下水中增多则是由于地下水呈酸性, 而 CO_2 在酸性溶液中溶解后存在碳酸的两步电离:



这两步电离都为可逆反应, 在酸性溶液中已有大量 H^+ , 第二步反应中则会趋向生成 HCO_3^- 使得溶液中 HCO_3^- 浓度增大。

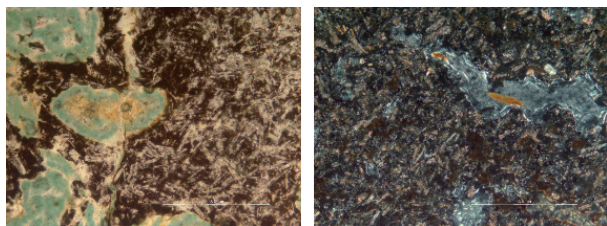


图 5 玄武岩岩块薄片鉴定图

Fig. 5 Thin section analysis of basalt

4.1.2 主因子 Z_2

主因子 Z_2 占总方差的 27.135%, 主要为 SiO_2 和 Cl^- , 且 SiO_2 为最大的正荷载, Cl^- 为最大负荷载。由表 2 可知在岩土体元素成分分析中, 鸡场滑坡区内岩土体是不含有氯化物的, 说明鸡场滑坡岩土体中不能向地下水提供 Cl^- , 而由表 1 可以看出区域内的雨水样本中 Cl^- 含量要远高于地下水中 Cl^- 的含量, 可以推测在区域内水分蒸发过程中 Cl^- 容易被水蒸气带入雨水。结合取样时间为当地 8 月份, 天气较热, 区域内蒸发量增大且滑坡体滑动后多处基岩裂隙水出露, 使得滑坡体内基岩裂隙水的蒸发量变大, Cl^- 由于蒸发作用在地下水中减少。

在主因子 Z_2 中, SiO_2 为最大正荷载。 SiO_2 在中性溶液 ($\text{pH}=7$) 中溶解度最低^[18], 且随酸碱性的增大而增大。从雨水的 pH 可以看出当地雨水呈明显酸性, 且滑坡区雨水 pH 达到 4.9。从 SiO_2 及 pH 在不同取样点的变化来看随着取样高程的变化, SiO_2 在滑坡区最高

点达到最大值, 这是由于区域内岩土体极高的 SiO_2 含量和雨水的酸性造成 SiO_2 大量溶解于地下水中, 随着地下水的流动, 滑坡体内各类氧化物参与到与水的反应中使得地下水的 PH 值增高并接近中性, 此时溶液中的 SiO_2 随着溶解度的减少不再发生溶解, 而是从溶液中析出, 所以随着取样高程的降低 SiO_2 呈现减少的趋势。

4.1.3 主因子 Z_3

主因子 Z_3 中主导因子为 Mg^{2+} 和 K^+ , 占总方差的 15.092%, 其中 Mg^{2+} 为最大负荷载, K^+ 为最大正荷载, 这是由于地下水与岩土体中发生了阳离子的交换作用, 一般认为阳离子的化合价数越高, 其交换能力越强。主因子 Z_3 的结果显示鸡场滑坡区域地下水中发生的阳离子交换与目前阳离子交换能力大小一致。

在主因子 Z_3 中 Na^+ 、 Ca^{2+} 的荷载值很低, 且无正负荷载关系, 说明在滑坡区地下水与岩土体发生离子交换的元素为 Mg^{2+} 和 K^+ 。尽管 Na^+ 、 Ca^{2+} 在地下水中的含量较 Mg^{2+} 和 K^+ 高, 但是滑坡区主要发生离子交换的元素还是 Mg^{2+} 和 K^+ , 可能的原因是 Ca^{2+} 主要参与 Z_1 中矿物的风化作用, 而岩土体中的 Na^+ 主要在岩土体中发生了绿泥石化和蒙皂石化, 产生的易溶物 Na^+ 则直接进入地下水中, 没有进行离子交换作用。而玄武岩中钾长石在风化作用过程中一般发生伊利石化, 从表 3 可以看出玄武岩内部弱风化部分 R_5 中钾长石的含量较 R_4 中高, 而伊利石的含量较 R_4 中低, 说明区域内玄武岩的风化作用中发生了钾长石的伊利石化。而在伊利石 2:1 型层状构造的晶体结构中, K^+ 位于晶体层间的两个层位, 这种 K^+ 相对比较稳定, 只有位于外表面的 K^+ 才能与其他阳离子发生离子交换作用^[18], 这说明在伊利石中发生的 K^+ 交换作用较弱, 因此代表 Mg^{2+} 和 K^+ 的离子交换现象的主因子 Z_3 的方差贡献率相对较低。

4.2 讨论

滑坡区内地下水对岩体结构的影响, 一方面破坏了岩体结构, 使得岩土体力学强度下降; 另一方面由于滑坡区岩体整体呈破碎状, 使得地下水在岩体内的流通过程更为通畅, 在这种条件下, 滑坡区内地下水更容易与岩(土)体发生水-岩化学作用, 导致滑坡区蚀变杏仁状磁化玄武岩中斜长石、辉石等代表性矿物由于水-岩化学作用而转化成为黏土矿物。唐良琴等^[19]提出当黏粒含量达到 30%, 黏土矿物便能完全控制土的整体强度。 R_1 、 R_2 、 R_3 为滑坡后壁岩土体试样, 其中 R_1 黏土矿物含量达到了 47.5%, R_2 、 R_3 黏土矿物

含量也达到了 17.9%、28.2%,可见区域内岩土体的整体强度受黏土矿物的控制。鸡场滑坡内岩体与水的作用是以机械破碎(物理风化)与矿物蚀变(化学风化)为主的耦合作用。从薄片鉴定结果看,送检的 11 个岩样中所有斜长石微晶上皆有强蒙皂石化与强绿泥石化,有的斜长石微晶甚至完全被伊利石与绿泥石替代,岩石间丰富的黏土矿物,使得鸡场滑坡区玄武岩体从“岩石块-岩石块”的接触模式转变为“岩石块-黏土-岩石块”,削弱甚至切断了岩块之间的直接联系,从而降低了岩体的力学强度及稳定性,使得岩体从固相介质向松散介质演化^[20]。这种接触条件的变化使得鸡场滑坡内玄武岩体结构面的内法线方向的三维向心风化在宏观至微观尺度上都明显存在,正是这种在不同尺度上都发生的接触条件改变,使得鸡场滑坡区内岩土体整体稳定性降低。

5 结论

(1)鸡场滑坡地下水为碎裂状玄武岩内的基岩裂隙水,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,区域内雨水呈弱酸性,地下水流经滑坡区后接近中性。

(2)鸡场滑坡内玄武岩体裂隙发育,岩体被切割成 2~20 cm 的碎块,岩块可用手指划出划痕,判断滑坡内玄武岩体处于风化的中级阶段,主要次生黏土矿物为伊利石、蒙皂石、绿泥石。

(3)地下水的化学成分变化受到水-岩(土)相互作用产物的影响,并且可以反映出鸡场滑坡区域内的水-岩(土)作用过程,包括矿物溶蚀、蒸发、矿物沉淀(SiO_2 由于滑坡区内水岩作用导致的地下水随着流经滑坡区的长度增大而增大,最终接近中性,导致 SiO_2 析出含量降低)以及阳离子的交换类型。

(4)鸡场滑坡区的水-岩(土)相互作用过程是一种机械破碎与矿物蚀变相耦合的过程,且此作用在宏观、细观、微观尺度上都有所体现,滑坡区内碎裂状玄武岩的结构特征使得区域内基岩裂隙水与玄武岩有巨大的水-岩(土)反应界面,使得区域内接触条件由“岩石块-岩石块”向“岩石块-黏土-岩石块”变化,使得岩体的力学强度及稳定性降低。这种丰富的水-岩(土)相互作用也使得岩体结构面内黏土矿物含量增加,当黏土矿物含量较高时,其对滑带形成与滑坡解体作用不可忽视。

参考文献 (References):

- [1] 徐则民,黄润秋,唐正光.硅酸盐矿物溶解动力学及其对滑坡研究的意义[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1479 - 1491. [XU Zemin, HUANG Runqiu, TANG Zhengguang. Kinetics of silicate mineral dissolution and its implications for landslide studies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1479 - 1491. (in Chinese with English abstract)]
- [2] LASAGA A C. Chemical kinetics of water-rock interactions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1984, 89(Sup6): 4009 - 4025.
- [3] SHUZUI Haruo. Process of slip-surface development and formation of slip-surface clay in landslides in Tertiary volcanic rocks, Japan[J]. Engineering Geology, 2001, 61(4): 199 - 220.
- [4] WEN Baoping, AYDIN A. Mechanism of a rainfall-induced slide-debris flow: Constraints from microstructure of its slip zone[J]. Engineering Geology, 2005, 78(1/2): 69 - 88.
- [5] 易连兴.西南岩溶山区复合水动力场滑坡影响模式:以关岭县大寨滑坡为例[J].水文地质工程地质, 2020, 47(4): 43 - 50. [YI Lianxing. Impact model of landslide with complex hydrodynamic field in karst mountain areas of Southwest China: A case study of the Dazhai landslide in Guanling County[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 43 - 50. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 严春杰,唐辉明,陈洁渝,等.三峡库区典型滑坡滑带土微结构和物质组分研究[J].岩土力学, 2002, 23(增刊1): 23 - 26. [YAN Chunjie, TANG Huiming, CHEN Jieyu, et al. Studies of soil microstructures and compositions of slipping zone in reservoir district of Three Gorges Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(Sup 1): 23 - 26. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 江泊洧,项伟,曾雯,等.三峡库区黄土坡临江滑坡体水岩(土)相互作用机理[J].岩土工程学报, 2012, 34(7): 1209 - 1216. [JIANG Jiwei, XIANG Wei, ZENG Wen, et al. Water-rock(soil) interaction mechanism of Huangtupo riverside landslide in Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1209 - 1216. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等.软岩在饱水过程中水溶液化学成分变化规律研究[J].岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3813 - 3817. [ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Testing study on variation regularities of solution components in saturation of soft

[1] 徐则民,黄润秋,唐正光.硅酸盐矿物溶解动力学及

- rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3813 – 3817. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孙德安, 李培, 高游, 等. 红黏土浸水变形特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 74 – 78. [SUN Dean, Li Pei, Gao You, et al. An experimental study of deformation characteristics of lateritic clay due to wetting[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(5): 74 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘立才, 郑凡东, 李炳华, 等. 南水北调水源在密怀顺水源地回灌的地下水水质变化试验[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 18 – 22. [LIU Licai, ZHENG Fandong, LI Binghua, et al. Experiment of groundwater quality change for simulating the South-to-North water into the Mihuaishun aquifer[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(4): 18 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郑光, 许强, 刘秀伟, 等. 2019年7月23日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 541 – 556. [ZHENG Guang, XU Qiang, LIU Xiuwei, et al. The Jichang landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou: Characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 541 – 556. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王志兵, 申林方, 徐则民. 头寨滑坡地下水化学特征及其反映的水-岩(土)相互作用[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 111 – 116. [WANG Zhibing, SHEN Linfang, XU Zemin. Hydrochemical characteristics and their implication for the water-rock/soil interaction in the Touzhai landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(1): 111 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李志强, 许强, 李姝, 等. 按主成分分析法研究黄土灌溉区水-岩(土)相互作用[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(23): 161 – 167. [LI Zhiqiang, XU Qiang, LI Shu, et al. Study on water-rock/soil interaction in loess irrigation area based on the principal component analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(23): 161 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王志兵, 徐则民. 头寨滑坡玄武岩腐岩的岩石化学和矿物学特征[J]. 矿物学报, 2008, 28(4): 447 – 454. [WANG Zhibing, XU Zemin. Petrochemistry and mineralogy of basalt saprolite in Touzhai landslide[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28(4): 447 – 454. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11): 1651 – 1659. [XU Qiang. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1651 – 1659. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 沈钦华, 王火焰, 周健民, 等. 含钾矿物中钾的释放及其与溶液环境中离子种类的关系[J]. 土壤, 2009, 41(6): 862 – 868. [SHEN Qinhua, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin, et al. Dynamic release of potassium from potassium bearing minerals as affected by ion species in solution[J]. *Soils*, 2009, 41(6): 862 – 868. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 马水山, 雷俊荣, 张保军, 等. 滑坡体水岩作用机制与变形机理研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(5): 37 – 39. [MA Shuishan, LEI Junrong, ZHANG Baojun, et al. Study on rock-water interaction and deformation mechanism of landslide[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2005, 22(5): 37 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [18] SOEDER D J. The Marcellus shale: Resources and reservations[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2010, 91(32): 277 – 278.
- [19] 唐良琴, 聂德新, 任光明. 软弱夹层粘粒含量与抗剪强度参数的关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(2): 58 – 62. [TANG Liangqin, NIE Dexin, REN Guangming. The relational analysis between the clay grain content and strength characteristics of weak intercalated layer[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(2): 58 – 62. (in Chinese with English abstract)]
- [20] HERMANRUD C, VENSTAD J M, CARTWRIGHT J, et al. Consequences of water level drops for soft sediment deformation and vertical fluid leakage[J]. *Mathematical Geosciences*, 2013, 45(1): 1 – 30.

编辑: 汪美华
刘真真