

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.02.14

广西武宣土洞发育水动力条件评价

姜伏伟^{1,2}

- (1. 贵州理工学院资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550003;
2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 本文分析了武宣土洞发育的地质背景、水动力诱发土洞的过程,在理想条件下,建立了土体渗透破坏形成土洞的管道流机理模型,根据管道流理论,分析得出土洞发育水动力条件表达式。通过自行设计的管道流测试仪装置,进行管道流模拟试验,计算得出研究区土洞发育的临界切应力为 21.20 Pa。运用电子扫描电镜技术,测试研究区孔隙等效直径为 31.6 nm,计算得出研究区土洞发育的临界水流为 0.530 cm/min。对比临界水流和现场监测的实际地下水流,评价土洞发育的可能性。结果表明,目前情况下,地下水流未达到临界值,不具备引起黏土流失形成土洞的水动力条件。

关键词: 土洞;管道流;水动力条件;临界切应力;临界地下水流

中图分类号: P642.253

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)02-0090-06

Assessment on the hydraulic condition of forming soil-caves collapse in Wuxuan, Guangxi, China

JIANG Fuwei^{1,2}

- (1. School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550003, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: This paper analyzes the geological background and the process induced by the hydrodynamics of developing soil-caves in Wuxuan, a city in Guangxi Province, China. Under ideal conditions, the mechanism model of the seepage failure of soil to forming soil-caves is the pipe flow. From the theory of the pipe flow, it establishes the expression of the hydrodynamics causing the soil-caves. Next, through the experiment designed to simulate the pipe flow, it obtains the critical shear stress 21.20 Pa to lead to soil-caves in the study area. The equivalent diameter of soil pores is 31.6 nm tested by the electron scanning microscopy. With the known parameters, it calculates the critical velocity of ground water 0.530 cm/min. Comparing the monitoring data of the ground water in the field with the critical hydraulic values, the study assesses the probability of the soil-caves collapse. The result shows that the current hydraulic condition doesn't have enough the dynamic to form the soil-caves collapse in Wuxuan.

Keywords: soil-caves; pipe flow; hydraulic condition; critical shear stress; critical velocity of groundwater

岩溶塌陷是常见的地质灾害,是岩溶区工程安全主要危险因素之一。据已有资料,96.7%的已知岩溶塌陷为土洞塌陷^[1]。由于隐蔽性强,规模小,不易发现,土洞塌陷灾害隐患严重影响岩溶区工程建设及人民生命财

产安全。目前,多数学者关于土洞的研究主要集中在成因机理^[2-9]及试验模拟^[10-14]等方面,基本都认为地下水动力因素是土洞塌陷的主要基本条件,并对地下水的作用进行了探讨。如万志清等^[15]认为地下水动力对土

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2017-01-11

基金项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2016]226)

第一作者: 姜伏伟(1987-),男,博士,主要从事岩土力学与岩溶工程灾害防治研究。E-mail: jfwei_666@126.com

体推拉、剪切作用是形成土洞的主要原因;刘之葵等^[16]分析了地下水位下降过程中对土洞稳定性的影响;欧阳振华等^[17]认为地下水对土体的渗透作用力大于土体的抗剪强度时形成土洞。已有研究主要以定性分析为主,但对其量化研究较少。本文以广西武宣为例,评价地下水动力作用对黏土层土洞发育条件,从管道流角度,分析土洞发育条件判据,定量测试临界值,并结合水动力监测数据,评价当地土洞发育条件。

1 土洞发育地质背景

1.1 土层性质

武宣土层岩性为残积红黏土,分布于黔江一级阶地残丘平原上,富含 Fe、Mn 结核。黏土随深度增加,含水量逐渐变大,地表呈硬塑,底部呈可塑—软塑状态。对钻孔原状样做 10 组常规土工试样,其平均天然含水量 30.5%,湿密度 1.92 g/cm^3 ,孔隙比 0.96,饱和度 93.8%。

根据钻孔揭露,武宣黏土层厚度 5~20 m。厚度随着离河岸远近而变化,近河岸 15~20 m,远离河岸 5~10 m。根据康彦仁等^[1]对中国南方岩溶塌陷和第四系土层厚度的统计,岩溶塌陷主要发生在土层厚度小于 15 m 区域。这表明武宣黏土层条件有利于土洞塌陷的形成。

1.2 溶洞发育

根据武宣 29 个钻孔(进深 1 340 m)统计分析,其中 17 个钻孔发现溶洞 70 个,最大溶洞洞高 14.3 m(根据钻孔岩芯计算),遇洞率为 58.6%。据钻孔资料,研究区线岩溶率一般小于 10%,最大为 57.7%。依据溶洞规模,研究区主要发育洞高 0~1 m 溶洞 48 个,1~3 m 溶洞 18 个和大于 3 m 溶洞 4 个。结合地层岩性、钻孔资料和实地调查,研究区岩溶强发育,存在土体流失的空间,是土洞塌陷的易发区。

1.3 地下水动力条件

选择武宣钻孔水位统计,在 2013 年完整水文年内,研究区地下水在春夏以补排中速型为主,秋季为补排滞缓型,而冬季为补排快速型,这表明该区冬季地下水动态变化大。根据监测水位资料,统计地下水位的变化趋势,研究区在一个水文年内(2013 年)经历了下降→上升→下降→上升→波状起伏→下降→波状起伏七个过程。水位最大上升幅度 7.26 m,最大下降幅度 4.23 m,波状起伏最大幅度 8.45 m,年最大变幅 11.94 m。这表明研究区地下水动力条件变化较大,具备土洞塌陷发育的水动力条件。

2 土洞发育水动力条件

2.1 水动力诱发土洞过程

土洞发育演化过程(图 1)主要为四个步骤^[18~22]:渗透作用→颗粒流失→土洞扩展→失稳塌陷。从上述过程可知,渗透作用下土颗粒流失(即土渗透破坏)是土洞发育的基本条件。渗透作用过程中,地下水通过空隙(主要为孔隙)渗入土体中,其水动力参数受土体孔隙大小、排列方式、分布和有效孔隙制约。这些因素在实际情况下很难界定,导致渗入孔隙内的地下水动力参数未知。

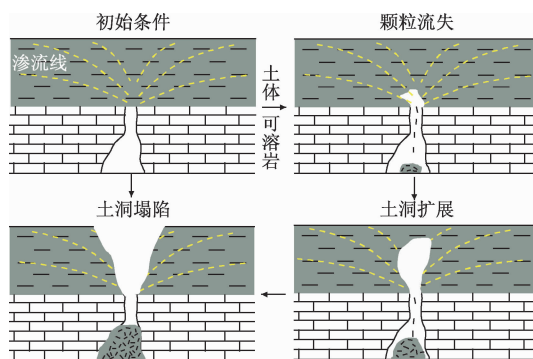


图 1 土洞发育演化过程

Fig. 1 The developing process of soil-caves

为了研究的需要,对地下水渗入土体进行抽象概括,提出以下 4 个理想条件:(1)假设土体孔隙大小均一且均匀分布;(2)假设地下水均匀渗入土体孔隙中;(3)假设土体中不规则的孔隙为连续贯通的圆管,其直径为 d ;(4)忽略孔隙圆管直径尺寸对土体应力分布的影响。

根据 4 个假设条件,地下水渗入土体中概化为地下水在孔隙管道中渗流(图 2)。可依流体管道流理论分析土体的渗流特性^[23],得出渗透破坏相关水动力参数。

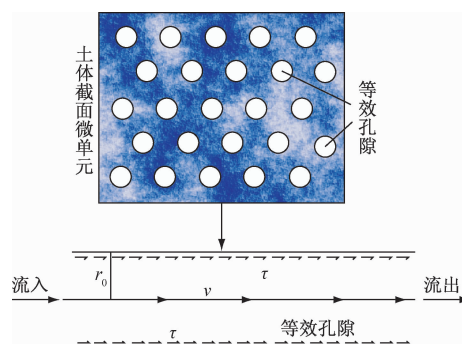


图 2 土体渗管道流模型

Fig. 2 The pipe flow model of seepage in soils

2.2 判据推导

地下水在孔隙管道中流动,选取任意断面微单元

为研究对象,将土体不规则孔隙等效为直径 d 的圆管(图2)。依据管道流理论,管道中管壁受到水流的切应力为:

$$\tau = \gamma R I \quad (1)$$

式中: γ ——流体重度;

R ——水力半径;

I ——管道中水力坡降。

根据牛顿内摩擦定理:

$$\tau = -\mu \frac{dV_r}{dr} \quad (2)$$

式中: μ ——水动力黏性系数;

V_r ——距管轴 r 处流速。

根据边界条件,管壁流速为 0,即:

$$V_r|_{r=r_0} = 0 \quad (3)$$

对于圆管水力半径为:

$$R = \frac{r_0}{2} = \frac{d}{4} \quad (4)$$

式中: d ——管道直径。

土体渗透破坏的临界流量为:

$$Q_{cr} = \frac{\pi d^2}{4} V_{cr} \quad (5)$$

式中: V_{cr} ——管道内水流平均流速。

联合上式得临界切应力:

$$\tau_{cr} = \frac{32\mu}{\pi} \cdot \frac{Q_{cr}}{d^3} \quad (6)$$

土体渗透破坏临界切应力是土体的固有属性,与流体及管径无关。当流体切应力达到土体破坏切应力时,土体破坏。根据假设条件(3),管道直径大小对土体应力无影响。可知,对于同样性质的土体,在不同管道大小渗流破坏过程中,其临界切应力保持不变。根据式(6),对于不同管径 d_1 、 d_2 有:

$$\tau_{cr} = \frac{32\mu}{\pi} \cdot \frac{Q_{1cr}}{d_1^3} = \frac{32\mu}{\pi} \cdot \frac{Q_{2cr}}{d_2^3} \quad (7)$$

这表明,若通过模拟大孔径管道中的渗流破坏,求出其临界切应力,根据式(7)可求出不同小孔隙直径的临界流量等参数。基于此原理,设计室内模拟试验,通过测试大孔径渗流破坏条件,测出土体渗透破坏临界切应力,并进一步计算相关参数。

3 模拟试验

3.1 试验方法

选择研究区代表性钻孔 ZK5,取土层底部岩土界面上原状样。选取结构性良好无裂隙面的 3 组试样,

进行管道流模拟试验,采用自行设计的管道流测试仪试验装置(图3)。采用直径 90 mm,厚度 50 mm 的圆柱形试样进行试验,并在试样中心位置穿刺直径为 1 mm 的圆孔,模拟孔隙管道。

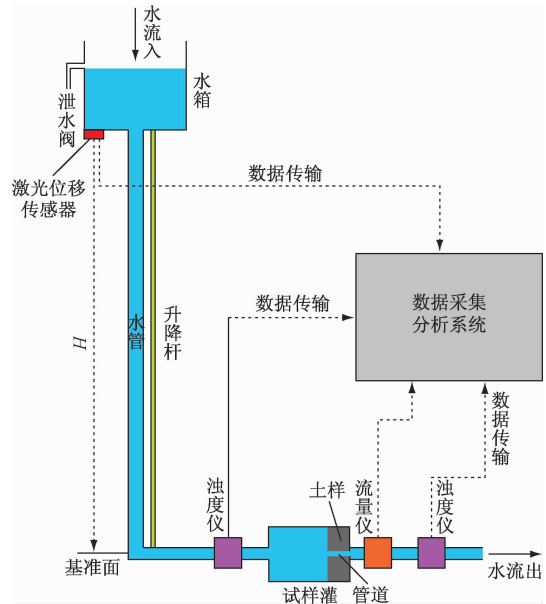


图3 管道流测试仪装置示意图

Fig. 3 Test equipment of the pipe flow

管道流测试仪试验方法为:(a)通过提升装置调节水箱中水头的高度依次为 $H_1, H_2, \dots, H_i$; (b)水通过软管系统,第一浊度仪监测流经管道之前的水的浊度 T_{i1} ; (c)流量仪监测流经管道的水的流量 Q_i ; (d)第二浊度仪监测流经管道之后的水的浊度 T_{i2} ; (e)同时将 H_i, T_{i1}, Q_i 和 T_{i2} 传入数据采集分析器,并绘制 H_i-T_{i1} 曲线、 H_i-T_{i2} 曲线和 H_i-Q_i 曲线。

在数据采集分析器中,进行数据分析。当土样管道内发生破坏时,土颗粒流入水中,引起水中浊度迅速增大,同时管道变大,水流量迅速增加。因此,当出现条件(1): $T_{i1} < T_{i2}$ 和条件(2): H_i-Q_i 曲线从平缓上升变为突然急剧增加(图4)同时出现时,表明在水头 H_i 作用下的水流引起试样罐内土颗粒发生了破坏性流失。而临界破坏的渗透水头介于 $H_{i-1}-H_i$ 之间。从工程安全的角度,取 H_{i-1} 为临界水头,即 $H_{cr} = H_{i-1}$,所对应的流量 Q_{i-1} 为临界流量 Q_{cr} (图4),所对应的临界流速 $V_{cr} = Q_{i-1}/A$,其中 A 为管道的横截面积。

3.2 试验结果

3.2.1 临界切应力

根据渗透水头和流量的关系(图4),判断流量变化,得出 6 个试样的临界流量为 1.458 ~ 1.640 mL/s

(表 1)。由于管道流判据推导是基于层流的情况,计算雷诺系数分析是否满足层流条件。6 个试样中雷诺系数最大为 1 517(表 1)。一般雷诺数 $Re < 2\,000$ 为层流状态,因此试验管道中水流条件为层流,满足判据推导公式条件。

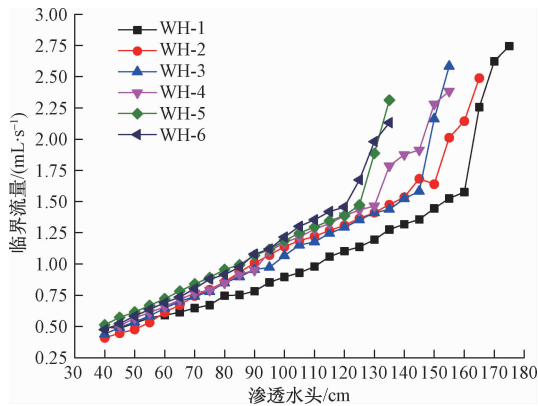


图 4 渗透水头-渗透流量关系图

Fig. 4 Relationship between the seepage water head and flow quality

根据式(6),计算黏土渗透破坏临界切应力,分别为 21.65, 23.0, 21.99, 20.07, 20.41 和 20.09 Pa(表 1)。平均值为 21.20 Pa。采用平均值 21.20 Pa 作为研究区黏土渗流发育土洞的临界切应力。

表 1 临界切应力试验测试结果

Table 1 the drag forces of cohesive soil

试样编号	临界流量/($\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$)	水温/ $^{\circ}\text{C}$	水动力黏性系数/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	雷诺系数	临界切应力/ Pa
WX-1	1.576	8.9	1.348×10^{-3}	1 488	21.65
WX-2	1.640	8.2	1.376×10^{-3}	1 517	23.0
WX-3	1.582	8.5	1.364×10^{-3}	1 476	21.99
WX-4	1.465	9.0	1.344×10^{-3}	1 387	20.07
WX-5	1.473	8.6	1.360×10^{-3}	1 379	20.41
WX-6	1.458	8.8	1.352×10^{-3}	1 373	20.09

3.2.2 现场临界水流

联合式(5)、(6),建立现场土体流失形成土洞的临界流速关系式为:

$$V_{\text{cr}} = \frac{\tau_{\text{cr}} d}{8\mu} \quad (8)$$

式(8)中,已知 τ_{cr} ,计算土体的临界流速还须已知管道流孔隙等效直径 d 和现场条件水动力黏性系数 μ 。采用电子扫描电镜,测试试样孔隙等效直径 d 。在放大 12 万倍情况下,运用面积等效法,在视野范围内统计测试了 43 个孔隙等效直径,其直径为 15.75 ~ 72.08 nm,平均值 31.6 nm(图 5)。取平均值 31.6 nm 代表研究区土样管道流等效直径。

水的水力黏性系数 μ 和地下水温有关系。在取样钻孔 ZK05 内,对地下水温进行监测。根据 2013 年完整水文年地下水温监测资料,研究区地下水温年 21.3 ~ 23.6 $^{\circ}\text{C}$,平均值 22.38 $^{\circ}\text{C}$ 。以平均值 22.38 $^{\circ}\text{C}$ 作为研究地下水温。查表得,水动力黏性系数为 $\mu = 0.948 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

根据式(8),代入已知参数 $\tau_{\text{cr}} = 21.20 \text{ Pa}$, $d = 31.6 \text{ nm}$, $\mu = 0.948 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,求得研究区土洞发育地下水运动临界流速 $V_{\text{cr}} = 0.530 \text{ cm/min}$ ($8.833 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)。

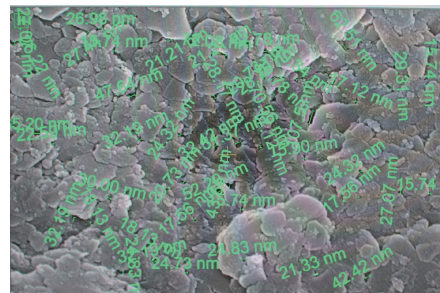


图 5 黏土孔隙直径

Fig. 5 Pores diameter of the cohesive soil

4 水动力条件评价

4.1 现场条件

ZK5 位于残峰马鞍山脚下,近旁发现 1 条断层 F_1 ,此处岩溶强发育。而且钻孔揭示高程 15.0 ~ 20.36 m 为溶洞,洞内半充填细砂、黏土、角砾。这表明 ZK5 附近发育土洞塌陷可能性较大。因而,在研究区内选择 ZK5 为地下水动力监测孔和试样取样点。

在钻孔 ZK5 内,布置地下水位监测传感器,每 20 min 采集 1 次水位参数。根据 2013 年地下水位变化监测资料(每 20 min 监测 1 次水位),该区地下水最大水位为 51.5 m,最小水位 43.1 m,年变幅 8.4 m。1 ~ 3、6 ~ 7 和 10 月份,地下水位总体呈下降趋势。4 ~ 6 和 8 ~ 9 月份,地下水位总体呈上升趋势。而 11 ~ 12 月份,水位上下波动,但变化幅度较小。

钻孔 ZK5 中,基岩面为高程 47 m,根据水位曲线,1 ~ 4 月份地下水位在基岩面以下运动,对土洞发育不产生影响。但为表征临近土层较厚区域的水动力条件,这部分水位参数仍计算在内。

4.2 评价

根据 2013 年钻孔 ZK5 水位自动监测数据,计算每 20 min 内地下水位波动速度(图 6,蓝线)。地下水位的波动速度大小近似于地下水流的速度。本文粗略

地采用水位的波动速度等同于地下水流。由于地下水渗入地下水位下降最大速度(正)为 0.2587 cm/min , 上升最大速度为 0.2324 cm/min 。上升下降速度最大值均小于临界水流 $V_{cr} = 0.530 \text{ cm/min}$ (图 6 红线)。这表明,目前情况下,地下水流未达到临界值,不具备土洞发育条件。

在钻孔 ZK5 周围 3 km 范围内,进行现场走访调查,发现近河岸冲沟边发现 3 处基岩塌陷,未发现土洞塌陷。另外,收集了研究区房屋建设 65 个钻孔资料,未发现隐伏土洞。这表明 ZK5 周围未发现土洞塌陷及其相关迹象。因此,评价结果符合钻孔揭示及其现场调查情况。

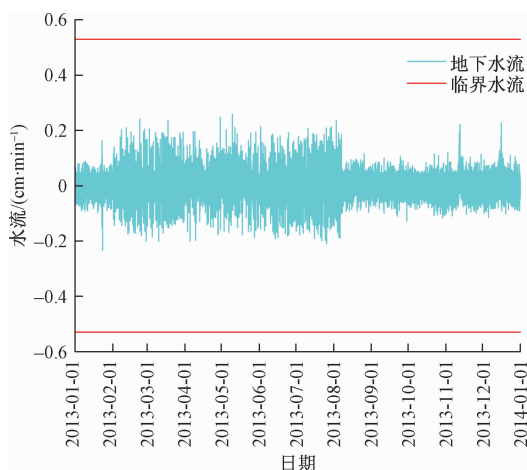


图 6 地下水流速度(地下水向下运动为正,向上为负)

Fig.6 Velocity of groundwater

5 结语

广西武宣土洞发育的临界切应力为 21.20 Pa , 临界流速为 0.530 cm/min 。根据 2013 年地下水动力监测资料,该区地下水位下降最大速率为 0.2587 cm/min , 上升最大速率为 0.2324 cm/min , 两者小于临界值。因此,目前情况下,地下水流未达到临界值,不具备引起黏性土流失形成土洞的水动力条件,其评价结果符合钻孔揭示及现场调查情况。

参考文献:

- [1] 康彦仁,项式均. 中国南方岩溶塌陷[M]. 南宁:广西科学出版社,1990:23-24. [KANG Y R, XIANG S J. Karst collapse in south China[M]. Nanning: Guangxi Science Press, 1990:23-24. (in Chinese)]
- [2] 雷谦荣. 关于地下侵蚀土洞的形成机理与影响因素[J]. 地下空间, 1987(2):62-65. [LEI Q R. On the formation mechanism and influencing factors of

underground erosion soil cave [J]. Underground Space, 1987(2):62-65. (in Chinese)]

- [3] 谭鉴益,覃新丹,蔡峰. 岩溶塌陷形成机理探讨[J]. 广西地质, 1992(2):77-82. [TAN J Y, QIN X D, CAI F. A discussion on the mechanism of karst collapse[J]. Geology of Guangxi, 1992(2):77-82. (in Chinese)]
- [4] 袁莉明. 岩溶地区土洞的发育机制及治理[J]. 土工基础, 2002, 16(1):5-6. [YUAN L M. The development mechanism and remedy of earth caves in karst area [J]. Soil Engineering and Foundation, 2002, 16(1):5-6. (in Chinese)]
- [5] 陈荣波,郑水清. 岩溶土洞的工程特性与鉴别[J]. 广东土木与建筑, 2004(2):21-24. [CHEN R B, ZHENG S Q. Study on the engineering properties and identification of soil-cave [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2004(2):21-24. (in Chinese)]
- [6] 覃羨安,王昆,宋平,等. 昆明新机场土洞形成机理及发育规律研究[J]. 岩土工程界, 2009(3):31-33. [QIN X A, WANG K, SONG P, et al. Research on the formation mechanism and developing regularity of the soil-cave in the international airport in Kunming [J]. Geotechnical Engineering World, 2009(3):31-33. (in Chinese)]
- [7] 蒋小珍,雷明堂,管振德. 单层土体结构岩溶土洞的形成机理[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4):426-432. [JIANG X Z, LEI M T, GUAN Z D. Formation mechanism of karst soil-void in single-layer soil structure condition[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(4):426-432. (in Chinese)]
- [8] 李颜贵,刘子龙,于孝民,等. 唐山黄庄岩溶塌陷形成条件和机理分析[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3):299-307. [LI Y G, LIU Z L, YU X M, et al. Formation conditions and mechanisms of karst subsidence: A case study of Huangzhuang village in Tangshan[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(3):299-307. (in Chinese)]
- [9] 张海坦,李庆华,邓书金. 歌乐山岩溶地面塌陷发育特征[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1):58-63. [ZHANG H T, LI Q H, DENG S J. Development characters of karst collapse in the Gele mountain area [J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(1):58-63. (in Chinese)]
- [10] 陈裕昌. 岩溶地面塌陷模型设计与试验[J]. 铁道工程学报, 1989(3):93-100. [CHEN Y C. Design and experimental model of karst collapse[J]. Journal

- of Railway Engineering Society, 1989(3): 93 - 100. (in Chinese)]
- [11] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜. 岩溶塌陷模型试验——以武昌为例[J]. 地质灾害与环境保护, 1993(2): 39 - 44. [LEI M T, JIANG X Z, LI Y. Model experiment of karst collapse: as a case in Wuchang[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1993(2): 39 - 44. (in Chinese)]
- [12] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜. 唐山市岩溶塌陷模型试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997(增刊1): 187 - 194. [LEI M T, JIANG X Z, LI Y. Model experiment of karst collapse in Tangshan[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997(Sup 1): 187 - 194. (in Chinese)]
- [13] 蒋小珍. 岩溶塌陷发育条件的试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998(增刊1): 191 - 195. [JIANG X Z. The Experimental Study of Karst Collapse Condition[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998(Sup 1): 191 - 195. (in Chinese)]
- [14] 陈学军, 周明芳, 陈富坚, 等. 岩溶地区破坏性抽水致塌试验研究——以广西桂林西城区为例[J]. 地质科技情报, 2002(1): 79 - 82. [CHEN X J, ZHOU M F, CHEN F J, *et al.* Destructive pumping test to study the characteristics of karst collapse in limestone region: a case study in the western urban area of Guilin city[J]. Geological Science and Technology Information, 2002(1): 79 - 82. (in Chinese)]
- [15] 万志清, 秦四清, 李志刚, 等. 土洞形成的机理及起始条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1377 - 1382. [WAN Z Q, QIN S Q, LI Z G, *et al.* Formation mechanism and initial condition of soil cavity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1377 - 1382. (in Chinese)]
- [16] 刘之葵, 梁金城, 周健红. 岩溶区土洞发育机制的分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 45 - 49. [LIU Z K, LIANG J C, ZHOU J H. Analysis of formation mechanism of soil caves in karstic area[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 45 - 49. (in Chinese)]
- [17] 欧阳振华, 蔡美峰, 李长洪. 地表塌陷中隐伏土洞的形成与扩展机理研究[J]. 金属矿山, 2006(6): 16 - 18. [OUYANG Z H, CAI M F, LI C H. Study on formation and expansion mechanism of hidden soil cavity in ground collapse[J]. Metal Mine, 2006(6): 16 - 18. (in Chinese)]
- [18] Waltham T, Bell F, Culshaw. Sinkholes and subsidence[M]. Karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer, Chichester, 2005.
- [19] White W B. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains[M]. Oxford University Press: New York, 1988: 464.
- [20] Ford D C, Williams P F. Karst Geomorphology and Hydrology[M]. Unwin Hyman: London, 1989: 601.
- [21] Beck B F. Environmental and engineering effects of sinkholes: The processes behind the problems[J]. Environ Geol Water Sci, 1988, 12: 71 - 78.
- [22] Sowers G F. Building on sinkholes[M]. ASCE, New York, 1996: 202.
- [23] 姜伏伟, 雷明堂, 管正德, 等. 土洞发育水动力判据及应用研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(增刊1): 77 - 82. [JIANG F W, LEI M T, GUAN Z D, *et al.* Study on the critical hydraulic condition of forming soil-caves in karst area[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(Sup 1): 77 - 82. (in Chinese)]

(上接第81页)

- [24] 张世军. 准噶尔盆地南缘活化沙丘植被自然恢复初探——以梭梭、白梭梭为例[J]. 干旱环境监测, 2010, 24(3): 153 - 157. [ZHANG S J. Initially Searches on Vegetation Restores Naturally on the Activation Sand Dune in the South of the Songorine Basin-Take the Sacsaul, the White Sacsaul as the example[J]. Arid Environmental Monitoring, 2010, 24(3): 153 - 157. (in Chinese)]
- [25] 张萍, 张世军. 新疆北部沙漠边缘植被恢复可能性初探[J]. 干旱环境监测, 2007, 21(2): 97 - 101. [ZHANG P, ZHANG S J. The Research Possibility of Vegetation Restoration at Fringe of Gurbantonggut Desert[J]. Arid Environmental Monitoring, 2007, 21(2): 97 - 101. (in Chinese)]