

湿陷性黄土地区土壤洞穴侵蚀模式研究

李喜安^{1,2}, 彭建兵², 郑书彦², 田安家³

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 成都 610059;

2 长安大学地质工程与测绘工程学院, 西安 710054; 3 山西省运城市禹都大道 214 地质队, 山西 运城 044000)

摘要: 通过野外调查研究, 认为土性、侵蚀通道、降雨以及黄土地区的地形地貌是形成土壤洞穴侵蚀不可或缺的四大要素。以水的作用途径、作用方式及其作用结果为主线, 将土壤洞穴的形成模式概括为: 冲蚀-贯通型模式、冲蚀-潜蚀-贯通型模式、湿陷-潜蚀-贯通型模式、冲蚀-潜蚀-湿陷-潜蚀-贯通型模式以及复合型模式等五大类型。

关键词: 湿陷性; 黄土; 洞穴侵蚀; 模式

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)05-0025-03

Study on Cave Erosion Modes in the Collapsible Loess Area

L I X i'an^{1,2}, P E N G J ian-bing², Z H E N G S hu-yan², T I A N A n-jia³

(1. National Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Geology Engineering and Survey Engineering Institute, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. No. 214 Geology Team of Yudou Road, Yuncheng City of Shanxi Province, Yuncheng, Shanxi 044000, China)

Abstract: By means of field research, it points out that four elements are necessary when a cave erosion occurs, i.e. soil quality, erosion channel, rainfall as well as landform and topographic features. Based on the main line of the path, way and result of the action of the water, the cave erosion process is generalized into five modes: abrasion-breakthrough mode, abrasion-underground erosion-breakthrough mode, collapse-underground erosion-breakthrough mode, abrasion-underground erosion-collapse-underground erosion-breakthrough mode and the compound mode.

Key words: collapsibility; loess; cave erosion; mode

作为黄土地区一种独特而重要的土壤侵蚀方式, 土壤洞穴侵蚀早就引起了人们的关注^[1,2]。而作为倍受关注的土壤洞穴侵蚀成因问题, 经过国内外众多学者将近一个世纪的不懈努力取得了一定的成果, 初步形成了机械侵蚀说、溶蚀说、多因素综合成因说等三种学说, 为土壤洞穴侵蚀的成因论打下了理论基础^[3]。然而由于土壤洞穴侵蚀成因的复杂性等原因, 各种学说之间一直存在着激烈的争议, 以至于到今天为止, 土壤洞穴侵蚀的成因问题仍然是人们争论的焦点, 洞穴侵蚀成因观点的不统一给土壤洞穴侵蚀的进一步深入研究带来了诸多不便。

鉴于此, 笔者立足于野外调查, 在多年来相关工作积累的基础上, 深入详细地分析总结了各种成因的土壤洞穴侵蚀的形成过程, 在此基础上将土壤洞穴侵蚀模式概括为冲蚀-贯通型、潜蚀-冲蚀-贯通型、湿陷-潜蚀-贯通型、冲蚀-潜蚀-湿陷-潜蚀-贯通型以及复合型模式 5 种模式。

1 土壤洞穴侵蚀成因的主要观点

1.1 机械成因说

这类观点认为土壤洞穴侵蚀是流水沿黄土劈理下渗或从动物洞穴贯入地下而发生地下机械侵蚀引起的(罗来兴, 1956), 因为陷穴发育的地区总是在沟边、塬畔、黄土裂隙众

多的地点(朱显谟, 1958); 陷穴形成的主导因素除因土状堆积物的性质、径流的局部集中外, 与地面的波折、地下裂点及暴雨性质也有关系(杨怀仁, 1957), 并把陷穴的形成与沟头的形成联系起来, 认为其与沟蚀作用相似^[4]。

1.2 化学溶蚀成因说

认为土壤洞穴侵蚀是一种碎屑喀斯特, 是由于地下水的溶蚀及胶体土粒被重力水悬浮而流失, 加上崩塌作用所成的(陈传康, 1956), 并把黄土柱、黄土墙、黄土塔和陷穴、盲沟等侵蚀形态与喀斯特地区的地形相比, 称为“假喀斯特(或黄土喀斯特)”^[4]。

1.3 多因素成因说

认为陷穴形成过程中既有机机械作用, 也有化学作用, 它是这两种作用共同作用的产物。就这两种作用的影响大小比较而言, 以机械作用为主, 尤其是保证土粒能被运移的缝隙存在, 起了决定性作用(陈永宗, 1958)^[4]。

20 世纪 80~90 年代我国的一些学者对黄土洞穴的成因作了进一步探讨, 王斌科(1988)^[3]认为黄土物质结构疏松, 垂直节理发育, 遇水容易崩解, 这是洞穴形成的内在原因。适宜水流积聚和排泄的地形, 土层的抗冲蚀性差异及土内裂隙的存在是陷穴形成的基本条件, 基本上仍是机械侵蚀为主的成因观点的深化。王景明(1996)^[5]研究认为构造节理控制了

* 收稿日期: 2005-06-22

基金项目: 交通部西部交通建设科技攻关项目资助 项目编号: 2001-318-812-13

作者简介: 李喜安(1968-), 男, 在站博士后, 目前主要从事工程地质与地质灾害等方面的教学与科研工作。

相应地区的黄土喀斯特及潜蚀地貌形态、展布方向和发育程度,是黄土喀斯特和潜蚀地貌的重要构造基础,发展了多因素成因的观点。

2 湿陷性黄土地区土壤洞穴侵蚀模式

不同种类的土壤洞穴,其成因机理不尽相同,同一种类的土壤洞穴在其不同的发展演化阶段其侵蚀机理也会有较大差异,甚至对于同一土壤洞穴的不同部位,其侵蚀机理也常常差异较大,因而关于土壤洞穴侵蚀的成因不能一概而论,这也是土壤洞穴侵蚀成因难以统一的最主要的原因所在。

土壤洞穴侵蚀是一个十分复杂的物理化学过程,其作用对象多为疏松多孔的具有特殊结构的强湿陷性、强崩解性和渗透性的黄土,作用途径是黄土地层中发育的垂直节理、构造节理、卸荷节理、湿陷节理等等强径流通道或强渗流通道,作用方式主要以水的冲蚀作用和潜蚀作用为主,兼有湿陷作用、崩解作用、重力作用、风化作用、生物作用等一系列综合因素的影响^[4]。由此可见黄土土性的特殊性是形成土壤洞穴侵蚀的根本

内因,而在土壤洞穴的形成过程中,侵蚀通道、降雨以及黄土地区的地形地貌则是形成土壤洞穴的必不可少的外部因素。土性、侵蚀通道、降雨以及黄土地区的地形地貌这些因素共同作用,互为因果,相互加剧,构成了形成土壤洞穴侵蚀不可或缺的四大要素。但总体来看,对于任何一种土壤洞穴,水的作用都是形成洞穴的前提,因而可以以水的作用途径、作用方式及其作用结果为主线,将土壤洞穴的形成模式概括为5种。

2.1 冲蚀-贯通型模式

冲蚀-贯通型土壤洞穴形成的前提条件是黄土地层中存在细小的初始径流通道,这些通道可以是植物洞穴,也可以是动物洞穴如鼠穴或其它动物巢穴以及人工洞穴(如窑洞等),有些还可以是未被填充的各种裂隙如构造节理、卸荷裂隙等。由于这些通道中没有被填充,通道内的自由空间为黄土的崩解创造了有利条件,因而通道壁的黄土在动水作用下迅速被冲蚀而形成洞穴。根据其汇水部位的不同可分为两种类型。一种为陡倾边坡底部形成跌穴而汇水;另一种是在陡倾边坡的上部边缘局部负地形汇水(图1)。

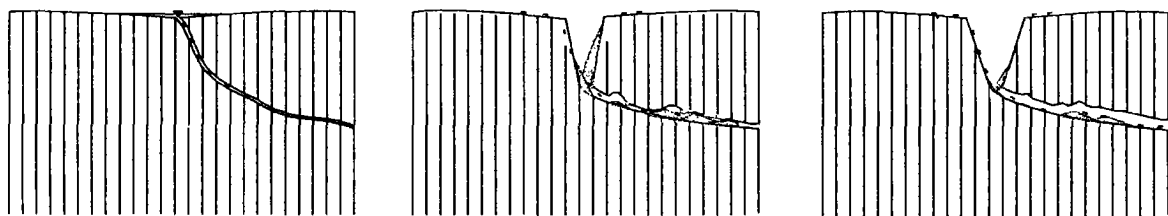


图1 土壤洞穴侵蚀—贯通型模式剖面图(陡倾边坡上部边缘附近)

冲蚀-贯通型土壤洞穴的延展长度一般较小,多分布于黄土塬梁峁以及梯田边缘的耕作层土壤以及滑坡体、边坡、填土等结构松散的扰动土层中,原状黄土层中分布较少。

2.2 潜蚀-冲蚀-贯通型模式

潜蚀-冲蚀-贯通型土壤洞穴形成的前提条件是黄土地层中存在优势渗流通道。这些优势渗流通道通常主要是岩性差异界面或被后期松散黄土物质所填充的各种构造裂隙、湿陷裂隙、卸荷裂隙,少数情况下也可能是被填充的植物洞穴、动物洞穴,个别情况下也发生于黄土不均匀成土作用所形成的岩性差异界面附近。在黄土地层浸水时,地下水首先沿这些优势渗流通道下潜形成渗流,对通道内部的松散填充物进行以机械潜蚀为主的潜蚀,其结果导致渗流通道内的松散物质被侵蚀搬运乃至渗流通道贯通,进而变为地下集中径流通道,这些初始的地下径流通道就是土壤洞穴的雏形。随着径流通道的形成,黄土受到的侵蚀由地下渗流对裂隙内充填松散物质中的细颗粒的潜蚀作用为主,变为以集中水流对充填松散物质以及通道壁进行快速冲蚀为主,在水流的冲蚀作用下,土壤洞穴雏形迅速扩大从而形成洞穴侵蚀。潜蚀-冲蚀-贯通型土壤洞穴形成过程中,径流通道形成前主要以水的机械潜蚀作用为主,兼有部分化学潜蚀(溶蚀)作用,而在径流通道形成后,则主要以冲蚀作用为主,伴随着土的湿化散解以及重力崩塌作用。其形成模式根据其汇水区和排泄区的情况可分为单汇单排、单汇多排、多汇单排以及多汇多排四种形式,不同形式的潜蚀-冲蚀-贯通型土壤洞穴由于汇水排水能力不同而使得侵蚀速度也有差异,其中以多汇形式的土壤洞穴侵蚀速度最为迅速(图2)。

2.3 湿陷-潜蚀-贯通型模式

湿陷-潜蚀-贯通型的土壤洞穴也是首先通过黄土地层中存在的优势渗流通道形成。在一次降雨中,黄土地层表

面的下渗深度很有限,一般不超过1m,不能达到湿陷黄土层的厚度,因而黄土要在短时间内形成湿陷就必须在黄土地层中存在能够使得渗流快速下渗的垂向或近垂向的优势渗流通道。这些优势渗流通道多为被松散黄土物质所填充的垂直节理或各种构造裂隙、卸荷裂隙等等。降雨时地表径流首先沿这些优势渗流通道下渗,使得浸湿带内的黄土产生自重湿陷而产生湿陷沉降,进而成为汇水区(碟形地或陷穴)。随着汇水区的形成,参与自重湿陷的黄土层的深度不断增加,当遇到黄土层内的侧向优势渗流通道时,渗流便会沿着这些通道进行侧向潜蚀。侧向渗流通道可以是被松散黄土物质所填充的垂直节理或各种构造裂隙、卸荷裂隙,也可以是由黄土不均匀的成土作用所形成的强渗透带。随着渗流侧向潜蚀作用的发展以及径流通道的贯通,渗流的侧向侵蚀由以潜蚀作用为主过渡到以冲蚀作用为主,通道壁不断扩大最终形成土壤洞穴(图3)。

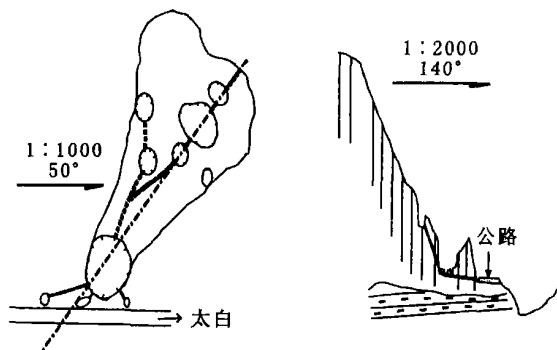


图2 土壤洞穴侵蚀—潜蚀—贯通型模式平面图(甘肃省合水309国道梁边掌状沟中)

图3 土壤洞穴侵蚀的湿陷—潜蚀—贯通型模式剖面图(陇西会宁白草原)

湿陷- 潜蚀- 贯通型土壤洞穴形成过程中, 在径流通道形成前主要以水的湿陷作用以及机械潜蚀作用为主, 而在湿陷作用的过程中则伴随有化学潜蚀(溶蚀)作用。径流通道形成后, 则主要以冲蚀作用为主, 伴随着土的湿化散解以及重力崩塌作用。此类土壤洞穴的形成模式也可根据其汇水区和排泄区的情况分为单汇单排、单汇多排、多汇单排以及多汇多排四种形式。湿陷—潜蚀—贯通型的土壤洞穴在黄土塬边普遍发育, 而在塬的中心一般不发育, 但在构造节理切割程度较强的黄土塬的中心也有发育。如在会宁白草原, 由于海原地震形成的构造裂缝延伸至黄土塬的中心, 因而在塬中心发育的很多碟形地下部均有此类土壤洞穴发育^[4]。

2.4 冲蚀- 潜蚀- 湿陷- 潜蚀- 贯通型模式

冲蚀- 潜蚀- 湿陷- 潜蚀- 贯通型土壤洞穴的形成, 从

水流的冲蚀作用开始, 汇水部位常常冲蚀作用强烈, 可形成跌穴、跌坑等有利于地表径流汇集的负地形, 负地形形成后汇水量增大, 渗流在侧向渗透压力作用下沿负地形下部的优势渗流通道开始发生潜蚀。潜蚀作用的途中, 通道上部的黄土地层在特定条件下也可能发生湿陷、崩解而产生沉降或塌落。根据湿陷部位的渗流方向, 可分为一般自重湿陷以及逆向自重湿陷两种形式。一般情况下, 在地表上沿通道延展方向存在有利于汇水的地形, 那么在该部位水流就容易下渗而发生湿陷。这种模式与湿陷- 潜蚀- 贯通型模式基本相同, 故此不赘述。逆向自重湿陷是指黄土层在特定条件下(如滞流或通道阻塞等)由于自下而上的渗透作用而引发的自重湿陷, 这种湿陷的结果最初一般形成葫芦状陷穴, 进而可发展为漏斗状陷穴(图4)。

图4 土壤洞穴侵蚀的冲蚀—潜蚀—贯通型模式剖面图(通道堵塞引起黄土逆向自重湿陷)

2.5 复合型模式

土壤洞穴的形成模式并非是一成不变的, 在一定条件下, 或在土壤洞穴发育的不同阶段, 各种模式之间存在着一定的转化关系。而复合模式正是土壤洞穴形成模式之间互相转化的中间过渡模式, 它往往是前述两种或两种以上模式的组合。

在土壤洞穴的形成过程中, 在水流的作用下, 在某个地段可能因被疏松的黄土物质所充填而以渗流的潜蚀作用为主, 而在另

一地段可能洞穴是中空的, 主要以径流的冲蚀作用为主。甚至在同一黄土地层的相同单元体中的不同部位, 由于黄土的孔隙性及其连通性的差异, 也可能同时存在潜蚀和冲蚀作用。另外, 在土壤洞穴的发展过程中, 在水流的多次作用下, 由于水流的选择性侵蚀, 抗冲性较强的地层也可能被切穿, 此时水流继续下切直至下一相对强抗冲刷性地层, 如此反复侵蚀的结果可能导致形成纵向上叠置的复杂的双层甚至多层土壤洞穴(图5)。

图5 土壤洞穴侵蚀的复合型模式剖面图(黄延高速富平段塬边冲沟中, 左: 纵断面图; 右: 横断面图)

设施, 沿途多设立废物箱, 供游人使用; 或者设立警示牌, 提示旅游者不要随地乱扔废物, 保护库区旅游资源^[7]。水库发展养殖业, 应该因地制宜, 合理放养, 搭配适当, 科学管理, 在保证水质的前提下, 以保护环境、减少污染为目的, 对大面积增殖养鱼进行科学规划, 合理调整鱼类种群结构, 提倡养殖清水鱼类, 投放生态鱼, 以鱼除藻, 以达到既发展水库经济, 又不破坏水库环境的目的。^[9]

4.3 水库运行管理

(1) 水库水量径流调度的调节。研究水库的蓄水量、发电量、供水和灌溉等用水之间的关系, 科学的确定下泄量, 增大下泄流量, 稀释冲洗水库, 缩短水滞留时间, 可减少利于富营养形成的物理因素, 维持水体环境的正常功能, 使水体符合特定使用功能的需要。下泄流量应由流域管理委员会、水资源部门及用户合作实施河流流量的具体管理。^[10]在条件成熟时, 可彻底放水清淤, 以解决底泥释放营养盐问题。

(2) 减轻库区内航运污染, 船上应装备防止油污染的设备。在污水处理厂的出水口处建立生物净化塘, 利用水生生物强化出水的N、P去除率。

4.4 采取工程措施

(1) 采用截污、排污工程, 在人口密集的城市库区沿岸埋

设污水管道, 把污水集中统一处理^[4], 减少入库营养物质负荷量; 及河道整治工程、底泥疏浚工程等工程措施防治水库富营养化。

(2) 防治富营养化的前置库对策。前置库对策是有效的富营养化治理对策之一。该对策也称为“水库串对策”, 其主要含义是利用水库一般入口在上游, 出口在下游, 经常存在从上游到下游的水质变化梯度特点, 在水库形态适宜情况下, 将水库一分为二或分成一系列的子库, 延长水力停留时间, 增强泥沙及营养盐的沉降量, 同时利用子库中浮游藻类或大型水生植物吸收、吸附、拦截营养盐的功能, 使营养盐成为有机物或沉降于库底。这样使进入下级子库或主库水中的营养盐含量降低, 从而抑制主库中藻类过度繁殖, 减缓主库富营养化进程的目的。换言之, 根据水库的特点, 在水库上游区域或主要入流处设置前置库, 充分利用沉降和“生物反应器”的作用, 使入水得以净化, 减少营养元素的输入, 从而保障主库的水质, 防治水库的富营养化。该项措施除磷效益明显, 在国际上得到越来越广泛的应用, 著名的ZALA河口上的Balanton水库则是杰出的实例。该水库面积100 km², 1955年建了20 km²的前置库, 利用藻类和大型水生植物除磷, 效果明显, 除磷能力可达95%。^[11]

参考文献:

- [1] 朱爱民, 余秋梅, 黄学才. 长江流域9座大型水库水体营养状态评价[J]. 水利渔业, 2001, 21(6): 30-32
- [2] 李锦秀, 廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J]. 科技导报, 2003, (2): 49-52
- [3] 丁兆运. 岩马水库富营养化机制及防治的生态对策[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 290-292
- [4] 姜世中. 对湖泊水库富营养化系统分析方法的研究[J]. 内江师专学报, 1996, 11(4): 41-48
- [5] 马经安, 李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 575-578
- [6] 金相灿. 中国湖泊水库环境调查研究(1980-1985)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990 1-11
- [7] 李万庆, 李金中, 等. 于桥水库网箱养鱼对水质影响分析[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(4): 33-35
- [8] 方建华. 东风水库水质污染变动趋势分析[J]. 云南环境科学, 1995, 14(2): 21-24
- [9] 毛毅. 小型水库富营养化现状评价及综合整治对策[J]. 甘肃环境研究与监测, 2003, 16: 87-88
- [10] 陈汉辉. 澳大利亚水华控制和管理[J]. 环境导报, 1995, (5): 32-33
- [11] 边金钟, 王建华, 等. 于桥水库富营养化防治前置库对策可行性研究[J]. 城市环境与城市生态, 1994, 7(3): 5-10

(上接第27页)

土壤洞穴形成的复合型模式是其形成模式中最为复杂的一种。通常在各种节理(主要是构造节理)发育程度高^[6]、节理切割关系复杂、开启程度及充填程度不一、地层条件及地形条件多变的黄土塬边冲沟、黄土梁边冲沟处, 尤其是在沟脑部位更为发育, 因而复合型模式也常常是黄土冲沟扩展的一种主要模式。

3 结论

(1) 土壤洞穴侵蚀是一个十分复杂的物理化学过程, 其作用对象多为疏松多孔的具有特殊结构的强湿陷性、强崩解性和渗透性的黄土, 作用途径是黄土地层中发育的垂直节

理、构造节理、卸荷节理、湿陷节理等等强径流通或强渗流通道, 作用方式主要以水的冲蚀作用和潜蚀作用为主, 兼有湿陷作用、崩解作用、重力作用、风化作用、生物作用等一系列综合因素的影响。

(2) 以水的作用途径、作用方式及其作用结果为主线, 将土壤洞穴的形成模式概化为: 冲蚀-贯通型模式、冲蚀-潜蚀-贯通型模式、湿陷-潜蚀-贯通型模式、冲蚀-潜蚀-湿陷-潜蚀-贯通型模式以及复合型模式等五大类型, 形象地反演了不同模式的土壤洞穴的形成过程, 揭示了黄土暗穴在不同演化阶段的各自特点, 同时也为土壤洞穴侵蚀的进一步深入研究提供了依据。

参考文献:

- [1] M L Fuller. Some Unusual Erosion Feature in the Loess of China[J]. Geogl Rew., 1922, 12: 570-584
- [2] W W Rubey. Gullies in the Great Plains Fomed by Sinking of Ground[J]. Am J. Sci., 1928, 12: 417
- [3] 王斌科. 引起洞穴侵蚀的主要因素的探索[J]. 水土保持学报, 1989, 3(3): 84-90
- [4] 李喜安. 黄土暗穴的成因及其公路工程灾害效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2004 1-168
- [5] 王景明, 卜臣. 黄土喀斯特与水土流失灾害[J]. 中国水土保持, 1990, 3(3): 18-33
- [6] 李喜安, 彭建兵, 陈志新, 等. 湿陷性黄土地区土壤洞穴侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 28-32