

## 湿陷性黄土地区土壤洞穴侵蚀研究

李喜安<sup>1</sup>, 彭建兵<sup>1</sup>, 陈志新<sup>1</sup>, 王晓东<sup>2</sup>, 刘东风<sup>2</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安市水利建筑工程公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 土壤洞穴侵蚀是湿陷性黄土地区普遍发生的一种独特的土壤侵蚀方式, 其危害具有多重性。目前土壤洞穴还缺乏统一的分类与命名, 土壤洞穴侵蚀成因机制尚未形成统一的认识和定量的表述。在大量野外调查和前人研究成果的基础上, 首先提出了一套统一的土壤洞穴分类命名方法, 在总结目前关于土壤洞穴侵蚀成因观点的基础上结合各种现场与室内试验成果, 对土壤洞穴侵蚀的成因机制进行了新的探讨, 阐明了对土壤洞穴侵蚀的一些新的看法和观点, 为土壤洞穴侵蚀的进一步深入研究提供了基础。

**关键词:** 土壤; 洞穴侵蚀; 分类; 成因; 湿陷性; 崩解性

中图分类号: S 157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)02-0028-05

## Study on Tunnel Erosion of Soil in Collapsing Loess Areas

LI Xi-an<sup>1</sup>, PENG Jian-bing<sup>1</sup>, CHEN Zhi-xin<sup>1</sup>, WANG Xiao-dong<sup>2</sup>, LIU Dong-feng<sup>2</sup>

(1. *Geology Engineering and Surveying Department, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

2. *Xi'an Construction Corporation of Hydraulic Engineering, Xi'an 710054, Shaanxi, China*)

**Abstract:** Tunnel erosion is a kind of unique and common erosion in collapsing loess areas, which results in multiple damages. Presently, however, there still lack of a uniform system of categorization and nomenclature. There are several different viewpoints about the cause of tunnel erosion of soil, none of which has described it quantitatively. Firstly, a uniform system of categorization and nomenclature is suggested. Secondly, based on the analysis of present viewpoints about the cause of tunnel erosion and various tests, some new thoughts on the cause of tunnel erosion are described. Finally, the process of tunnel-generating is described. All the work mentioned above forms a base to further study of tunnel erosion.

**Key words:** soil; tunnel erosion; categorization; cause; collapsibility; disintegrative

### 1 前言

在我国陕西、山西、甘肃、宁夏、青海等湿陷性黄土地区普遍发生的洞穴侵蚀, 是一种独特而重要的土壤侵蚀方式。这种侵蚀在黄土高原各种黄土地貌的侵蚀过程中扮演着相当重要的角色, 其危害常常具有多重性。它一方面可以直接造成土壤物质的流失, 诱发和助长沟头、沟壁的形成与扩展, 促使地面分割破碎, 最终导致农田面积缩小, 从而对农业生产造成巨大危害<sup>[1, 2]</sup>; 另一方面, 可对黄土区的各种工程建设如铁路、各种等级的公路、引水渠道、蓄水排水设施以及民居等构成严重的威胁与破坏, 造成人民生命财产的重大损失。

土壤洞穴侵蚀的研究, 在 50~60 年代、80~90 年代分别出现了两个研究的高潮, 许多学者在此期间做了许多卓有成效的工作, 取得了许多具有实际应用价值的重要成

果<sup>[1~5]</sup>, 基本奠定了土壤洞穴侵蚀研究的基础。到了 21 世纪, 随着西部大开发各项国策进一步落实, 新的形势对各行各业提出了更高的要求。然而由于多方面的原因, 使得我们对土壤洞穴侵蚀某些方面的研究还存在一些不足。如到目前为止, 土壤洞穴还缺乏统一的分类与命名, 关于洞穴侵蚀的成因观点还不统一等, 给土壤洞穴侵蚀的进一步深入研究带来了诸多不便。

为此, 2001 年 2、3 季度, 我们组织 30 余名科研人员, 分 5 组行程 2 万余 km, 分别沿陕、甘、山、宁、青的国道、省道及县级公路对沿途湿陷性黄土分布地区的土壤洞穴侵蚀情况进行了一次全面调查, 选择了典型黄土地貌单元甘肃会宁白草塬(陇西), 甘肃庆阳黄土塬(陇东)和陕北富县塬(陕北)进行了重点调查研究。并在部分典型地区进行了渗水试验和洞穴形成过程冲刷模拟试验, 同时, 在典型地貌区采集黄土样品 60 余组, 进行了黄土湿陷性室内试验及扫描电镜分析。在

<sup>1</sup> 收稿日期: 2002-11-20

基金项目: 交通部西部重点交通建设科技资助项目(200131881213)。

作者简介: 李喜安(1968-), 男, 陕西丹凤人, 博士研究生, 工程师, 从事地质工程方面的科研工作。

调查研究过程中, 也对沿途水土保持部门进行了调查和资料收集。笔者在前人研究成果的基础上, 以本次野外调查成果及各种现场与室内试验为根据, 首先尝试提出一套统一的命名方法, 其次, 在总结目前关于土壤洞穴侵蚀成因观点的基础上, 阐明了作者对土壤洞穴侵蚀成因的一些认识。

## 2 土壤洞穴的分类及命名

朱显谟 1958 年通过大量的野外观察和分析, 首次把跌穴与陷穴区别开来并统称为洞穴侵蚀<sup>[3]</sup>。关于土壤洞穴的进一步分类与命名, 前人已经做了许多工作, 这些分类中有的较为严密<sup>[1-6, 8]</sup>, 构成了土壤洞穴分类研究的基本框架, 但由于土壤洞穴的形态千变万化, 且各地又有诸多俗称, 如在陇西一带叫“窟圈”、“窟脱”或“灌眼”、“草磨旋子”等, 陇东一带叫“壳囊”、“陷穴”、“地峡”等, 晋西叫“潜渠”, 陕北叫“填窑”, 而关中渭南一带则叫做“地窗”等。而学术上的名称有“洞穴”、“陷穴”、“陷坑”、“黄土井”、“碟形地”、“碟坑”、“塌地”、“落水洞”、“水凼窝”、“暗穴”、“暗沟”、“暗道”、“地下洞道”、“穿洞”、“黄土溶洞”、“盲沟”、“黄土桥”、“跌穴”、“跌坑”等等<sup>[4, 13]</sup>, 由于在分类与命名的过程中缺乏统一的定义与具体的说明, 在许多情况下造成概念混淆, 并时有出现错用误用的现象, 给学术上的研究与交流带来了很大的不便。

在甘肃、宁夏、陕北等湿陷性黄土地区的野外调查所记录的特征鲜明的土壤洞穴数目众多(3 千余个), 种类齐全, 成因复杂, 这给土壤洞穴的分类与命名提供了有利的客观条件; 本文采用的土壤洞穴分类方法是在本次野外调查的基础上, 尽量沿用目前广泛采用的名称, 并对其附以特定的内涵, 力图使土壤洞穴的分类与命名更加全面、具体和清晰明了。

首先, 按土壤洞穴的主要成因将其分为两种, 即自然因

素作用下形成的土壤洞穴与生物因素形成的生物洞穴。其次, 将自然因素作用下形成的土壤洞穴按水的侵蚀方式分为冲蚀成因的冲穴、潜蚀成因的暗穴(陷穴)以及湿陷作用下形成的碟形地。这里所谓的冲蚀是指在地表径流的作用下在地表的不同部位所形成的侵蚀; 潜蚀则是指雨水下渗或地表径流灌入到地面以下后对土壤形成的侵蚀; 湿陷作用是指因水的浸入使土壤发生湿陷变形而产生沉降。冲蚀成因的冲穴按其地形部位以及侵蚀方式分为水凼窝、跌穴; 水凼窝首先是由朱显谟先生提出的, 系“薄层水流在地面以上不远处淘刷成的小坑, 待顶部土体塌落后, 在土壁上形成的直立的半圆筒状凹槽, 常见于沟头陡坎、沟壁和各种跌水及堤埂上面”<sup>[3]</sup>。跌穴则是水流在坡脚、陡坎底部相对平缓的地面上冲淘而成的坑, 规模较大者(直径和深度大于 3 m)可称之为跌坑。水流的潜蚀作用一般先在地下形成暗穴, 其含义与“暗沟”、“暗道”、“盲沟”等名称的含义相同。暗穴在水流等侵蚀作用下进一步扩容, 在上覆土重的作用下塌陷而在地表形成陷穴, 规模大者可(直径和深度大于 3 m)叫做陷坑, 根据陷穴形态的不同也可分为漏斗状陷穴、竖井状陷穴、葫芦状陷穴等。在生物因素作用下形成的陷穴按生物主体的不同分为三类: 第一类为由田鼠、蛇、虫以及其它动物洞(巢)穴发展而成的土壤洞穴; 第二类则为墓穴、废弃的窑洞和土窖、公路土桥、内部未衬砌或维护不良的泄水洞等发展而成的土壤洞穴; 第三类是由于植物根系腐烂或根劈作用形成的空洞进一步发展而成的土壤洞穴。最后应该指明的是, 许多土壤洞穴是自然因素和生物因素综合作用的结果, 对这类土壤洞穴的分类首先应搞清哪种因素为主要因素, 然后再依据前述方法来进行相应的分类与命名(图 1)。

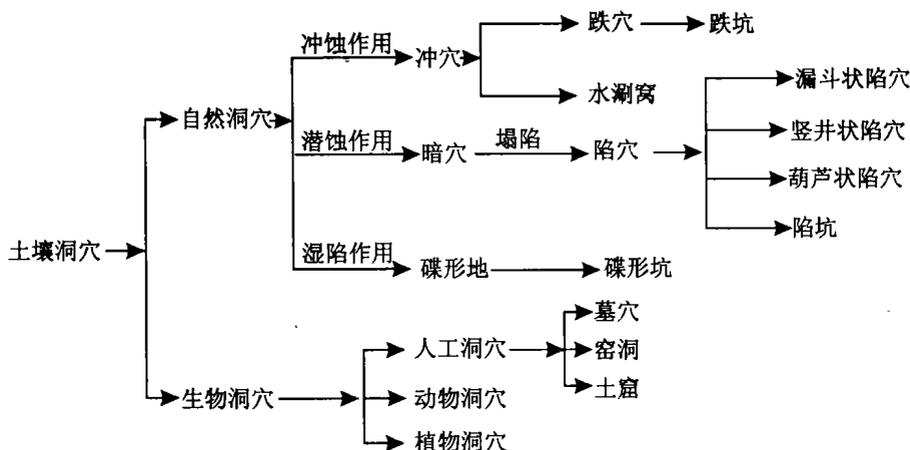


图 1 土壤洞穴的分类命名

## 3 土壤洞穴侵蚀的成因分析

### 3.1 形成土壤洞穴侵蚀成因的主要观点

关于土壤洞穴侵蚀成因的观点到目前为止主要有机械侵蚀说<sup>[3, 9, 10]</sup>、溶蚀说<sup>[11]</sup>、多因素综合成因说<sup>[2]</sup>等 3 种。机

械侵蚀的观点认为洞穴侵蚀是由于地表水沿黄土劈理、节理、裂隙或生物虫孔等浸入或灌入地下而发生机械侵蚀形成暗穴, 并通过暗穴将土颗粒带走, 即潜蚀作用的结果; 溶蚀观点认为黄土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, 加上崩塌作用而形成

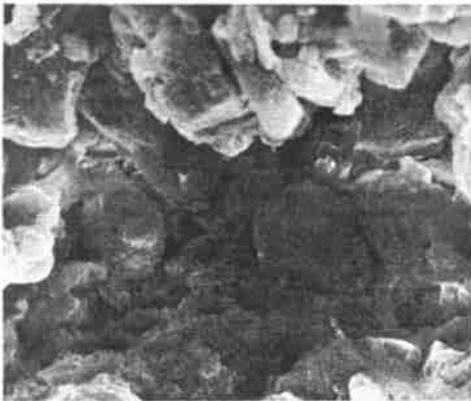
的。多因素的观点则认为黄土洞穴的成因是以机械侵蚀为主的多因素综合作用的结果。

### 3.2 土壤洞穴侵蚀成因

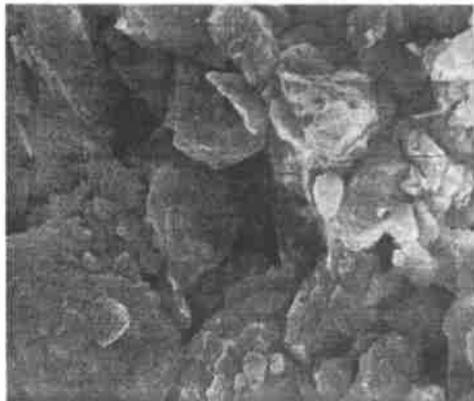
为了弄清土壤洞穴侵蚀的成因,我们在甘肃会宁白草塬(陇西),甘肃庆阳黄土塬(陇东)和陕北富县塬(陕北)等土壤洞穴侵蚀频繁发生地段进行了渗水试验和洞穴形成过程冲刷模拟试验,同时,在典型地貌地段采集黄土样品 60 余组,进行了黄土湿陷性室内实验及扫描电镜分析,由于篇幅所限,具体试验过程的细节从略,而只将一些结论性的成果分别予以简单叙述。

3.2.1 土壤洞穴侵蚀的内因 现场和室内试验结果表明,土壤洞穴侵蚀的形成与其疏松结构、渗透性、自重湿陷性和崩解性等特性紧密相关。这些因素中自重湿陷性和崩解性因素的作用最为突出。实验测得的陇西、陇东、陕北黄土的平均自重湿陷系数分别高达 0.042 6, 0.033 4, 0.020 6; 渗透系数分别为  $1.6 \times 10^{-4}$ ,  $1.4 \times 10^{-4}$ ,  $1.1 \times 10^{-4}$ , 室内标准湿化试验得到的陇西、陇东、陕北黄土在崩解量为 100% 的时刻所经历的时间分别为 98 s、103 s 和 114 s, 表明了这些地区土壤具有极强的崩解性。另外,野外调查结果也表明这些地区

的土壤洞穴侵蚀最为严重,而且呈现出土壤结构越疏松、渗透性、自重湿陷性和崩解性越强的地区的洞穴侵蚀程度越高的规律性。Sem 扫描电镜分析显示出这些地区的黄土微结构多为支架孔隙或架空孔隙(图 2),这也是这些地区的黄土自重湿陷性强的主要原因之一。黄土的湿陷性和崩解性使得黄土在遇水后结构发生破坏并迅速崩解,土粒的快速搬运结果最终导致黄土洞穴的产生。这种现象在甘肃会宁县较为典型。会宁县沉积的马兰黄土渗透性、自重湿陷性和崩解性最强,该县土壤洞穴侵蚀尤为发育,比如在横穿涝池沟的 312 国道黄土梁地段,从 k1990 处的黄土梁边坡上开始,沿与公路走向垂直的方向依次发育陷穴及陷坑 13 个,底部均以暗穴相通。其中发育在边坡上的 2 个陷穴直径为 1.5 m,深 4 m;发育在边坡上的 2 个陷坑直径分别为 6 m 和 4 m,深度分别为 6.5 m 和 4.7 m;又如会宁县紫口四十里铺 207 省道由 k95+ 100 到 k95+ 200 之间的公路两侧 10 m 范围内,共发育陷穴及陷坑共 20 余个,根据其产状等推测,至少有 3 处陷穴的地下通道横穿路基,这些黄土洞穴不仅造成了严重的水土流失,而且致使部分公路边沟断裂,对公路的安全构成严重威胁。



照1 陇西Q,黄土(架空结构)



照2 陇西Q,黄土(支架-镶嵌结构)



照3 陇东Q,黄土(支架结构)



照4 陕北Q,黄土(支架-镶嵌结构)

图 2 土壤微结构

由此可见,土性是土壤洞穴侵蚀的物质基础。从物质组成上看,易形成洞穴的黄土或黄土状土,其可溶盐含量较高(10%~20%),这一特性使黄土遇水易发生溶蚀,同时也对黄土的湿陷性和崩解性有一定贡献;从微观结构上看,易形成洞穴的黄土和黄土状土结构疏松,多具有架空孔隙和支架构造,土颗粒之间通常以可溶盐或黏粒胶结;首先,这样的结构使得黄土的渗透性增大,有利于水的渗入;其次,可溶盐胶结物的溶解以及水膜变厚使得土颗粒之间的连接力变弱,黄土的微结构在自重及水冲力作用下发生破坏;再次,架空孔隙和支架孔隙的疏松结构为土颗粒重组提供了空间;第四,由于自重湿陷而形成的负地形易于积水。总之,黄土的特殊物质组成及微观结构使得黄土具有较高的透水性、湿陷性和崩解性,使得黄土在遇水后发生一系列的物理化学过程,从而易于被侵蚀搬运而形成洞穴。可见,土性是产生洞穴的最根本的内在因素。风成的马兰黄土具有上述土性,这也是为什么洞穴多发生于马兰黄土层中的内在的、最根本的原因。除此之外,本次调查所发现的洞穴侵蚀绝大多数均发育在马兰黄土层中和其上沉积的土壤层中,而在离石黄土层中则很少发现。在马兰黄土中发育的黄土洞穴常常位于某层古土壤之上。这一方面是因为马兰黄土的结构较为疏松,渗透性、湿陷性大,崩解速度快,另一方面,相对致密、渗透性和湿陷性小而抗冲性强的古土壤充当了相对隔水层的作用。在基岩出露深度浅的部位,则基岩为隔水层。

3.2.2 土壤洞穴侵蚀外因 虽然土性是土壤洞穴形成的内在因素,但只具备这样的土性还不足以形成洞穴。众所周知,土壤洞穴的形成是十分迅速的,往往一场暴雨过后就会形成许多洞穴,而洞穴产生的空间一般远大于黄土湿陷所能产生的空间,由此可见仅有湿陷性还不足以产生洞穴,土壤洞穴形成的过程中必然发生大量而快速的物质搬运。所以仅靠“水的旁渗或排泄”难以形成暗穴或陷穴。物质大量快速搬运必须有相应的通道,一种为在地形表面的通道,如边坡上顺坡向的凹形地、黄土垂直节理、卸荷节理等,一般为冲穴(跌穴、水凼窝等)形成时的物质搬运通道;另一种则为“暗穴”,主要由下部开张的构造裂缝、黄土垂直节理、卸荷节理以及各种生物洞穴等所形成。如前所述,陷穴是由暗穴塌陷形成的。在水的侵蚀搬运作用下,暗穴扩容到一定程度,上覆土层在自重作用下塌陷而形成陷穴。因而宏观地可以认为这两种“通道”是土壤洞穴侵蚀发生的空间前提。

无水无以成洞穴,充足的携能水是土壤洞穴侵蚀的原动力。形成黄土地区洞穴侵蚀的水主要来自于降雨在地表和地下所形成的径流。黄土塬的塬面、冲沟及梁峁边坡、阶地面等地形十分有利于雨水汇集并形成径流,所以在径流排泄部位,如黄土塬边、梁峁边缘、冲沟及沟头等处最容易形成洞穴。暴雨的强度和历时对洞穴的发育程度和类型均有影响<sup>[4]</sup>。一方面,高强度短历时的暴雨对土壤洞穴的形成和发展十分有利。另一方面,在湿陷性黄土地区尤其是在降水量较少的半干旱地区,由于降雨量变化率大,丰缺交替明显,这

种现象对土壤洞穴的形成也起着明显的作用。在缺水期,由于土体干缩而有利于构造节理的产生,丰水期暴雨形成的强大径流沿这些节理通道下灌形成暗穴,并对暗穴周壁的土层进行迅速侵蚀搬运,使得暗穴因迅速扩容而形成陷穴或陷坑。

地形地貌也是发生土壤洞穴侵蚀的主要因素之一。在黄土塬畔、梁峁边缘、沟谷边缘、沟头、高级阶地、梯田等地形地貌处洞穴侵蚀较为严重,这是因为这些地形具有一下特点:其一,有汇水面,如黄土塬面、梁峁边坡、冲沟边坡、阶地面、梯田等,有利于形成径流;其二,它们往往是径流排泄最为集中的部位;其三,这些部位往往是黄土垂直节理、卸荷节理以及生物洞穴发育相对较高的部位。其四,起伏大,使得水具备较大的水头差,从而使水获得足够的动力而迅速地搬运土颗粒;其五,普遍存在临空面,为洞穴侵蚀提供了充足的物质搬运空间。调查中发现,地形地貌因素不但与土壤洞穴的发育程度有关,而且对土壤洞穴的种类也起着明显的控制作用。

总之,我们认为:土壤洞穴侵蚀是一个复杂的物理化学过程,而在土壤洞穴形成的过程中,土性、通道、水和地形地貌共同作用,它们是形成土壤洞穴的四个重要因素。

#### 4 土壤洞穴的形成过程

人工洞穴及冲穴的形成机理因比较直观而易于理解,但对于暗穴和陷穴的形成是我们从表面现象所观察不到的。为了说明问题,将暗穴及陷穴的形成过程分为以下四个阶段(图3):

(1) 负地形的产生阶段。在这一阶段,主要是黄土的差异性沉降阶段,沉降量的产生一方面是由于土的微结构破坏而引起湿陷,土壤在自重作用下压密而产生的沉降量;另一方面是由于部分土颗粒塌落到黄土的各种节理、裂隙、劈理或动植物孔洞中引起的沉降量(图3a)。

(2) 暗穴的形成阶段。随着土壤颗粒的不断搬运,各种节理、裂隙、劈理或动植物孔洞迅速扩大,暗穴雏形形成,负地形纵向加深(图3b)。

(3) 暗穴的扩容阶段。暗穴雏形形成后,一方面由于土壤颗粒搬运通道更加通畅,使得地下径流的流量和流速加大;另一方面,根据我们对暗穴周围的应力应变状态进行的有限元分析,结果表明,在土的自重作用下,暗穴的两侧壁为强应力集中区。在地下径流的作用下,这些部位首先屈服破坏,再加上暗穴壁上的土又具有极强的崩解性,在水流的冲刷作用下不断崩解并被搬运,暗穴向两侧不断发展,迅速扩容(图3c)。

(4) 陷穴的产生阶段。暗穴扩容到一定程度,当暗穴壁难以承受上覆土壤的自重压力时,暗穴瞬间塌陷,最终形成陷穴(图3d)。有限元分析结果也表明,暗穴的上部区为最大应变发生的位置,而且大应变区的形状非常接近陷穴的形状,从而可以证明由暗穴形成陷穴这一过程的真实性。

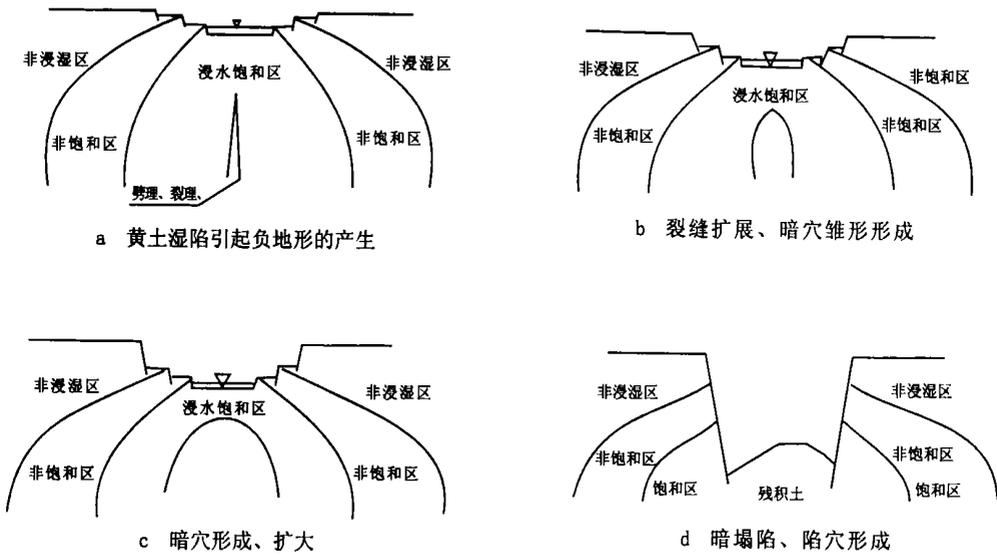


图 3 暗穴及陷穴形成过程示意图

这里要特别说明的是并非所有陷穴的形成都要先形成负地形。实际上在调查中常常发现许多陷穴形成前并没有先形成负地形的迹象,出现这种情况的原因是许多暗穴经常能够延伸较远的距离,暗穴在延伸途中局部地段的扩容、塌陷也可形成陷穴,但此时的水主要是来自于暗穴的进水口,而不是来自此处地表水的下渗。

以前人们根据调查结果得出黄土塬的土壤洞穴侵蚀只发生在塬边,而塬面中则不会发生土壤洞穴的结论,而我们的野外调查结果证明事实并非如此,在一些曾经发生过强烈构造活动的地区的黄土塬面中土壤洞穴侵蚀也普遍存在,如在我国引黄灌溉工程示范区甘肃会宁县白草塬,该县距海原 100 余 km, 1920 年海原地震使塬区形成有规律发育的构造裂缝,裂缝走向以北西和北东为主,有的裂缝由塬中心一直

延伸到塬边,长度达 15 km 以上,引黄灌溉后,塬中心部位的地表水沿地下裂缝(暗穴)下灌,有的会在很远的塬边冲沟流出,塬面中出现十分密集的裂缝带、陷穴、陷坑以及面积达数百平方米、深度为 3~5 米的碟形坑。土壤的洞穴侵蚀导致了灌渠破坏、路基不均匀沉陷、房屋开裂和极为严重的水土流失灾害。

综上所述,本文首先尝试提出了一套统一的土壤洞穴分类命名方法;在此基础上,根据各种现场与室内试验成果,对土壤洞穴侵蚀的内外因进行了详细分析总结,认为土壤洞穴侵蚀是一个复杂的物理化学过程,土性、通道、水和地形地貌是形成土壤洞穴的四个重要因素;根据对野外调查结果的分析,描述了暗穴、陷穴的形成过程,并说明了在构造裂缝发育程度高的黄土塬面仍可以产生土壤洞穴侵蚀的事实。

参考文献:

[ 1 ] 王斌科. 土壤的洞穴侵蚀研究综述[ J ]. 土壤学进展, 1989, 22( 1 ): 9- 14.  
[ 2 ] 陈永宗. 黄土陷穴的成因及其危害[ J ]. 地理学资料, 1958, 23( 3 ): 32- 39.  
[ 3 ] 朱显谟. 黄土区的洞穴侵蚀[ J ]. 黄河建设, 1958, 22( 3 ): 118- 123.  
[ 4 ] 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.  
[ 5 ] 王斌科, 等. 黄土高原的洞穴侵蚀与防治[ J ]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, 第 7 集, 26- 39.  
[ 6 ] 张宗祜, 等. 中国黄土[ M ]. 北京: 地质出版社, 1989. 198- 205.  
[ 7 ] 刘东生, 等. 中国的黄土堆积[ M ]. 北京: 科学出版社, 1965. 55- 95.  
[ 8 ] 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.  
[ 9 ] 罗来兴. 划分晋西北陇东黄土区域沟谷的地貌类型[ J ]. 地理学报, 1956, 22( 3 ): 226- 231.  
[ 10 ] 杨怀仁, 等. 山西南部黄土地形发育和地形区划[ J ]. 地理学报, 1957, 23( 1 ): 26- 30.  
[ 11 ] 陈传康. 陇东南部黄土地形类型及其发育规律[ J ]. 地理学报, 1956, 22( 3 ): 232- 237.