

黄土高原的洞穴侵蚀与防治

王斌科 朱显謨 唐克丽

提 要

本文通过野外调查和实验分析,运用区域对比的方法,从类型特征、地理分布和形成机制方面,分析讨论了洞穴侵蚀的基本特点和形成原因。文中作出了各种洞穴形成演化的示意图和黄土高原洞穴侵蚀略图,分析探讨了洞穴侵蚀的地理分布和形成过程。结果表明,洞穴侵蚀是一种特殊的流水侵蚀类型,是沟蚀发生的重要环节和胚胎。洞穴侵蚀发育与黄土的疏松结构和节理裂隙密切相关。它具有一定的区域差异,以黄土高原典型黄土带和六盘山以西地区最为发育。并通过分析其危害和成因,为研究沟蚀发生、发展规律和洞穴侵蚀防治提供了依据。

在黄土高原地区坡面向沟道演变过渡的沟缘、沟头及跌水下部等部位,常发生流水的潜蚀作用,即洞穴侵蚀。其形成演化往往成为沟蚀发生和加剧的重要标志和环节。除诱导沟头前进,沟底下切和塬畔、阶地切割碎碎外,洞穴也常发生于田间工程、道路和居民窑洞等部位,造成很大危害。所以,弄清洞穴侵蚀的形成原因和演化过程,不仅有助于分析研究沟蚀的发生、发展规律,也便于采取措施减少洞穴侵蚀之害。

一、概 况

洞穴侵蚀的影响因素较多,形成原因复杂,又不象沟蚀那样普遍。所以,本文以较大面积的野外考察为主,考虑洞穴侵蚀的区域差异及分布规律,运用区域对比的方法,结合室内外有关实验资料,分析研究其本质特征和形成原因。

野外调查涉及晋西、陕北、宁南、陇东、陇中、陇西和关中等地,在侵蚀比较严重的30多处作了定点调查,历经干旱半干旱和半湿润等自然带,包括戈壁沙漠、石质山地和不同切割侵蚀程度的黄土丘陵及渭河阶地、台塬等地形区,穿过沙黄土、典型黄土和粘黄土带。天然植被、土壤类型和土地利用方式等都有显著差异。

野外调查和室内所进行的主要实验项目有:

1. 沟道流域洞穴出现频率的调查统计。
2. 洞穴形态特征和发育部位,包括其形态结构,大小和出口位置及其微地形特征等。
3. 与洞穴有关的黄土性征,如节理、厚度、层次结构和碳酸盐情况等,以及黄土的渗透、崩解和机械成分等实验。
4. 黄土微结构的正交偏光镜鉴分析。

二、洞穴侵蚀的基本特征

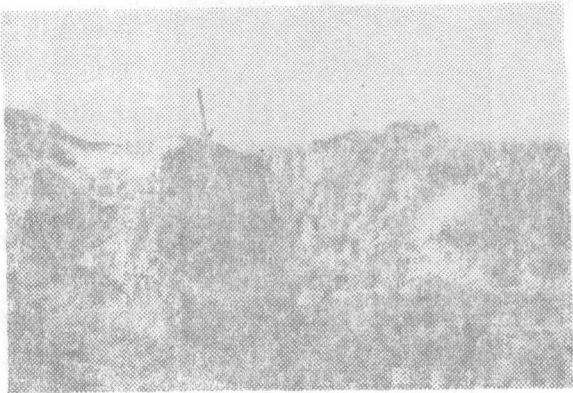
不同地形部位和不同沉积物中的洞穴,其形态特征和形成过程有所不同,以前有关论述把它统称为陷穴^{[1][2][3]}。朱显谟把它区分为陷穴、跌穴和水涮窝三类^[4]。在此基础上,结合我们的野外观察与分析,洞穴侵蚀主要有以下几种类型(表1)。

表1 洞穴的类型特征表

类 型		形 态 特 征	分 布 部 位
水 涮 窝		直立的半圆形凹槽。	跌水陡崖的立壁或地埂。
跌 穴	跌 穴	竖井状,一般口径2—8米,深2—10米,地下穴道较发育,多与沟床或坡面走向一致,以群体形态为多,有时可成较大的暗沟。	沟头或陡壁下部,沟床、谷坡都较常见。
	水 冲 穴	互相连通的小土坑,口径和深度多为数十厘米。	浅沟底部或谷坡道路上。
陷 穴	竖 井 穴	初期可呈壶状,地下穴道平缓,一般口径1—5米,深2—10米,堰畔者较深。	堰畔、阶地和梯田边缘,沟缘平缓部位和一些道路上亦可见到。
	漏 斗 穴	口大腔小,地下穴道倾角较大且与洞腔呈渐变关系,口径和深度都较小。	梁塔斜坡或边缘。
	黄 土 碟	口径远大于深度的碟形洼地,底部无出口。	平缓低洼的塬面或梯田内部。

1.水涮窝。系洞穴的一种过渡形态,常见于沟头、沟谷陡壁和各种跌水或堤埂上面,最初在地面不远处见一内凹的小土坑,后呈直立的半圆筒状凹槽(如照片1)。其形态大小与下泻水流和土体抗冲性能有关;高度随跌水高度和土层性质而异,一般宽1—2米,深不到1米。

2.跌穴。出现于水涮窝下部,沟头沟缘及其它陡崖等有跌水条件的部位。在侵蚀活跃的切沟沟床上尤其常见(照片1)。跌穴以竖井状为主,其口径和深度都较大。据野外统计,大部分直径2—8米,深2—10米。跌穴初期呈不规则的小坑,称为跌窝,随窝底加深扩大,最后洞穿成穴。有时成串珠状群体,称串珠洞。这在沙黄土区分布较广。据在兴县西沟的调查,有一半以上的切沟沟底都有串珠洞发育,少则3—5个,多则7—8个成串。



照片1 谷缘水涮窝与跌穴(安塞)

跌穴的地下穴道比较发育,口径一般0.5—1米,其走向多与坡面或沟床的倾向一致,其发育深度受出口基面控制。有时与古滑坡裂隙或构造裂隙相连,可形成庞大的地



照片2 暗沟及其上部结构(甘谷)

下洞廊, 亦称暗沟(照片2)。它往往隐伏于坡面或沟床之下和塬畔集流线下部很深部位。甘谷县扎拉坡有一暗沟, 断续总长约800多米, 伴有50多洞穴, 陷落部分呈10多米深的槽形地堑, 未塌陷部分呈天然隧道, 连续最长达30多米, 洞高2-5米, 宽2-4米, 顶部可见裂缝, 但无石笋和石灰华等。在秦安、定西等地亦有类似现象, 有的入口不明。从现场观察分析, 它与地震等内力作用所成的大型裂隙有关。

3. 陷穴。以其发生部位和形态特征可分为壶状陷穴、漏斗状陷穴和竖井状陷穴。前者口小腔大, 形似壶而得名, 为陷穴发育过程中的过渡形态, 待顶部土体全部塌陷后便成为竖井状。竖井状陷穴为洞穴侵蚀中最主要的一种(照片3), 常见于塬畔、阶地、梯田边缘或骤然转缓的地形部位, 深度一般大于口径。据统计, 塬畔者深而细, 口径1.5米, 深10-18米, 个别可达30多米; 阶地和梯田上者粗而浅, 口径2-8米, 深2-10米, 竖井状陷穴距塬边较远, 约30-50

米。漏斗状陷穴常见于梁塔坡或沟谷边缘有一定坡度的地方, 其口大腔小, 呈漏斗形, 体形较小、口径1-3米, 深3-5米, 距边缘部位也比较近。



照片3 沟台地上的陷穴(安塞)

道路上的陷穴多出现于弯道内侧低洼容易积水部位, 尤其是嵌入地面以下的路段。在一些沟间小路边缘, 也常因流水冲刷和重力性裂隙而致洞穴, 并因此加剧滑塌。梯田上的陷穴出口多发育于填土结合部位, 土坝上的陷穴多出现于坝端和基部。窑洞位置低, 或距离蓄水设施太近也易遭受洞穴之害。可见, 田间工程上的洞穴侵蚀与其工程质量有关, 这点很值得注意。

在一些较平缓的阶地和梯田上, 陷穴亦可呈串珠状群体分布, 但个数少且分布有限, 在沟谷边缘亦可呈平行排列。陷穴和跌穴有时亦可重迭发育, 二者往往不易严格区分(图1)。陷穴和跌穴发展的结果可形成天然桥(照片4)。

黄土碟可视为陷穴的特例或过渡形态, 主要分布于陇中、陇东等地的塬面, 沟壕或鞍部等相对平缓低洼部位, 呈浅碟形洼地, 无明显穴缘, 口径数米到数十米不等, 深度仅1-2米甚至更浅。

由上述分析可见, 黄土洞穴的形态结构与喀斯特形态存在一定差异, 概括起来有如下几个特点, 也可反映其形成机制的不同。

1) 阶地中等地震裂度较大地区见有一些较大水平暗沟外, 黄土洞穴的垂直部分比较

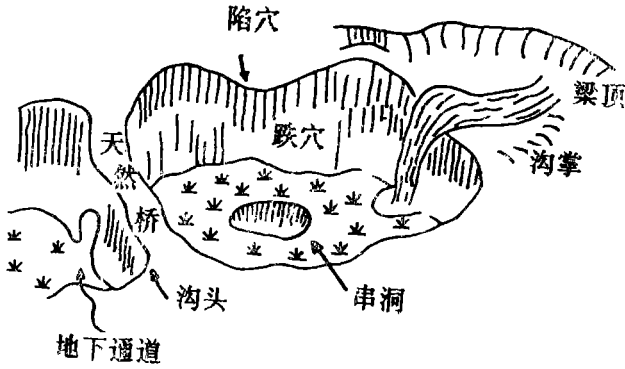


图1 沟头洞穴的群体发育(天水)



照片4 有小路通过的天然桥(定西)

发育, 地下水平穴道不很发育, 一般比较短小且陡, 出口多见于破碎地形的边缘部位。

2) 黄土洞穴多为单出单入的个体形态或直线式群体形态, 出入口高差明显, 结构简单, 没有溶洞那种复杂的网状联结。地下穴道的走向多沿坡面或沟床的最大坡度方向或不透水层的倾向发育, 一般没有地下穴道的隐没和突然转折现象。

3) 黄土洞穴的空间尺度远较石灰岩洞穴为小, 一般直径1-8米, 深度5-10米, 超过20米者很少。地下洞道最长不超过20-30米, 较长者多呈阶梯状断续相连, 比降大而顺直, 截面呈窄△形。

4) 黄土洞穴中既没有稳定水位的地下水流, 也没有规则的地面径流, 形态的时间对比性差, 在海拔高度和相对高度上都没有成层性。

三、洞穴侵蚀的地理分布

野外调查表明, 洞穴侵蚀的区域差异较大, 地区性分布规律复杂, 反映出洞穴侵蚀影响因子的复杂多样性, 尤其是新构造运动, 大地形条件和人为活动等非地带性因素的交错影响。

(一) 地区性分布规律。根据若干典型沟道小流域的调查统计(如表2), 并结合沿途观察和部分前人资料, 绘制成黄土高原地区洞穴侵蚀水平分布图, 见图2。由此可见, 洞穴侵蚀的地区分布大致有以下特点:

1. 在陕甘黄土高原, 洞穴侵蚀程度具有北部较南部、西部较东部为强的趋势。沙黄土带南缘的会宁、固原、环县、安塞、绥德至兴县一线洞穴侵蚀最强。安塞茶坊一条不足1平方公里的小沟头内, 见有洞穴100多个, 80%的切沟底部都发育着跌穴或串珠洞, 口径多在2-6米, 有的可达10米以上, 跌水高度可达30多米。固原上黄附近的东河岸上,

表2

黄土高原洞穴分布情况统计表

地点 项目	榆中	定西	会宁	固原	西峰	甘谷	榆林	绥德	安塞	洛川	澄城	河曲	兴县	离石
沟道名称	兴隆坡	安家沟	梢(中下部) 杈(河)	东(右岸) 河	南(中) 小河(段)	扎拉坡	青云沟	王茂沟(部分)	罗锅沟	黑木(中) 沟(段)	南社塬畔	道黄沟	西(部分) 沟	小切沟
洞穴数目(个)	11	115	247	269	78	98	极少	61	103	36	24	49	157	78
沟道面积(平方公里)	3.00	1.6	2.18	3.42	0.96	1.28	2.0*	0.65	0.83	1.0*	2.0*	2.33	1.48	0.96
每平方公里洞穴数	3.7	71.9	113.3	78.7	82.1	76.3	/	93.6	124.0	36	12	21.8	106.6	81.7
洞穴主要类型	陷穴	陷穴 跌穴	陷穴 跌穴	陷穴	陷穴 跌穴	陷穴 跌穴	/	跌穴	跌穴	陷穴	陷穴	跌穴 陷穴	跌穴	陷穴 跌穴

* 为目估面积

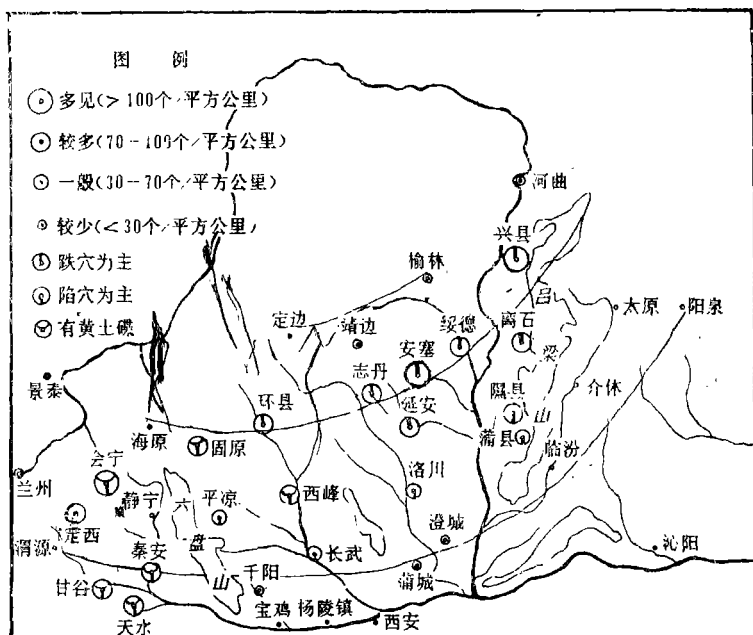


图2 黄土高原地区洞穴侵蚀水平分布图

洞穴最密处状如繁星,每隔4-5米1个,深3-5米,以竖井状为主。而相应的延安以南的富县、洛川及渭北台塬沟壑区洞穴侵蚀则较弱。

六盘山以西的洞穴侵蚀普遍较强,各种类型的洞穴都有分布,形态发育也较典型。据在会宁梢杈沟调查统计,观察的11条切沟内几乎每条沟底都有串珠洞发育,少则3-5个,多则10多个,且其两岸发育的小悬沟底部也有类似现象。该沟谷坡较缓,约15-25°,新黄土覆盖50-60米以上,坡面切沟比较发育,且其底部多有2-3级跌水发育,有利于串珠洞的形成,它本身也随着串珠洞的演化而向沟头移动(图3)。沟阶地和沟缘斜坡农田

上的陷穴也比较发育，许多发育在滑坡裂缝上，口小而深。天水一带黄土层较北部为薄，但黄土节理裂隙发育，构造性裂隙亦多，滑坡等重力侵蚀活跃，以发育于裂隙上的陷穴、串珠洞和暗沟为多，梯田上的陷穴也比较发育，也有黄土碟分布。陇东破碎塬区，塬畔沟头的陷穴比较发育，一般也比较深，在10-20米之间，口径5-10米。沟谷边缘的陷穴较小，约1-3米。其沟道一般深而狭窄，谷坡陡直，沟头跌水较高，沟床串珠洞比较发育。黄土区边缘接近沙漠地带的中卫、皋兰、景泰、榆林和靖边等地洞穴侵蚀极弱或几乎没有。

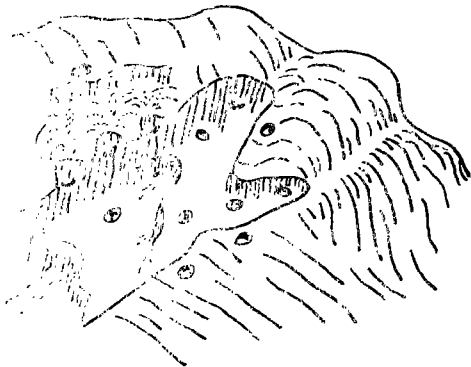


图3 洞穴发育与跌水移动(会宁)

2. 晋西黄土地区洞穴普遍较多，南北渐变趋势不明显。该地黄土厚度大约50-140米，上限高，等厚度线呈南北向分布，北部以新黄土为主。西临黄河峡谷，地面切割强烈，北部切割深约100-200米，兴县西沟沟道密度达8.0公里/平方公里。梁大沟深，谷坡宽

展，黄土沙性大，结构疏松，坡面切沟密布。沟床串珠洞极为发育，在所调查的8条切沟内，每条沟头都有跌穴，7条沟床发育串珠洞，多串有3-7个洞穴。一些相邻较近的岔沟底部还发生横向串通，形成网状(如图4)。离石一带的梁面比较宽缓，而现代沟谷切割较深，谷坡陡直。除沟床跌穴较发育外，沟谷边缘和沟壕的陷穴也多。隰县一带沟谷边缘和坡耕地上的陷穴较多。

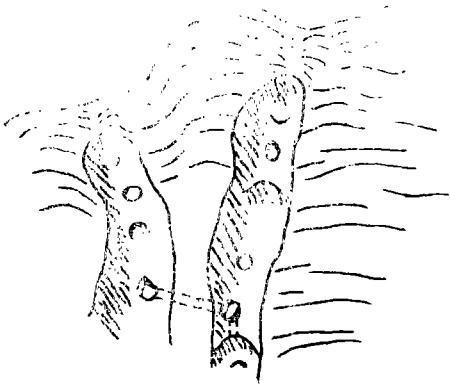


图4 陷穴的串通(兴县)

3. 洞穴类型具有一定的区域分布特征。据在几个地区的粗略统计(表3)，陇中、陇东陷穴比较发育，陕北北部跌穴比较发育。无论陇中、陇东或陕北、晋西，洞穴类型

表3 各地洞穴侵蚀类型统计表

地区	项目	陷穴(个)	跌穴(个)	黄土碟(个)	暗沟(个)	陷穴占总洞穴比例(%)	地区	项目	陷穴(个)	跌穴(个)	陷穴占总洞穴比例(%)	地区	项目	陷穴(个)	跌穴(个)	陷穴占总洞穴比例(%)
会宁		116	129	2		47.3	固原		178	91	66.2	河曲		4	45	82
定西		36	79	1	8	31.3	绥德		5	61	8.2	兴县		0	157	0
甘谷		51	47	1	2	52.0	安塞		0	124	0	离石		29	49	37.2
秦安		34	17	2	2	64.2	洛川		25	11	69.4	隰县		较多		
西峰		54	22	1		69.3	澄城		20	4	83.3					

中北部(典型黄土)跌穴的比例较南部(粘黄土)为大,而南部陷穴的比例较北部大。黄土碟仅见于陇中、陇东地区,暗沟主要发育于陇中一带,反映了黄土性质和地形条件等的综合影响。

4.对不同沉积物而言,黄土碟仅见于新黄土中,陷穴主要在新黄土中发育,跌穴在老黄土中都有发育,与黄土的节理发育程度和塑性有关,暗沟多见于老黄土中。红土中各种洞穴都很少见。

(二)洞穴区域分布与黄土颗粒成分和结构的关系。黄土的颗粒成分与结构直接影响其孔隙性、密实度以及渗透、崩解性能。因而,黄土物质成分与结构的区域分异规律与洞穴侵蚀的地理分布密切相关。

1.黄土颗粒成分的区域分异规律。据13个地区的土样分析结果(表4),黄土中均无大于0.25毫米的粗沙颗粒;其新黄土细粉沙颗粒以榆林和榆中两地为高,分别为45.6%和11%,其最低含量在澄城(5.6%);而粘粒含量以澄城为高(19.5%),表现出颗粒成分

表4 黄土颗粒组成表(%)

土 层	地 点	粒 级	%					
			0.25—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	0.005—0.001	<0.001	<0.01
新 黄 土	榆 中		11.0	54.8	8.1	8.7	17.4	34.2
	定 西		9.7	53.5	7.3	9.5	20	36.8
	甘 谷		8.2	54.6	10.2	8.9	18.1	37.2
	固 原		9.0	55.2	9.2	10.1	16.5	35.8
	西 峰		8.9	60.3	7.8	6.9	16.1	30.8
	榆 林		46.6	37.7	3.0	3.4	10.3	16.7
	绥 德		30.8	50.4	3.0	3.2	12.6	18.8
	安 塞		31.5	53.6	2.0	2.7	10.2	14.9
	洛 川		7.6	56.6	9.4	8.9	17.5	35.8
	澄 城		5.6	51.5	10.4	13.0	19.5	42.9
	河 曲		37.0	45.5	3.4	3.7	11.4	17.5
	兴 县		38.0	43.6	2.0	3.9	12.5	18.4
	离 石		25.0	52.8	4.1	4.6	13.5	22.2
老 黄 土	甘 谷		3.8	44.7	11.5	14.0	26.0	51.5
	西 峰		9.5	42.4	10.2	12.3	25.6	48.1
	榆 林		22.3	37.6	8.1	12.0	20.0	40.1
	绥 德		21.2	49.5	5.9	7.2	16.2	29.3
	洛 川		26.0	41.0	12.0	20.2	26.8	59.0
	蒲 城		3.7	49.1	12.3	13.5	21.4	47.2
	离 石		26.5	45.7	4.3	8.0	15.5	27.8

注:比重计法测得,粒级单位,毫米。

由南向北,自东而西逐渐变粗的趋势(如图5),与前人的研究结果基本一致。各地黄土中粗粉粒均高于细粉粒并占优势,在50%以上,因而可蚀性极高。陕北黄土较同一带陇中黄土颗粒的沙性为大;老黄土较当地新黄土的颗粒成分为粘,红色土最为粘重。

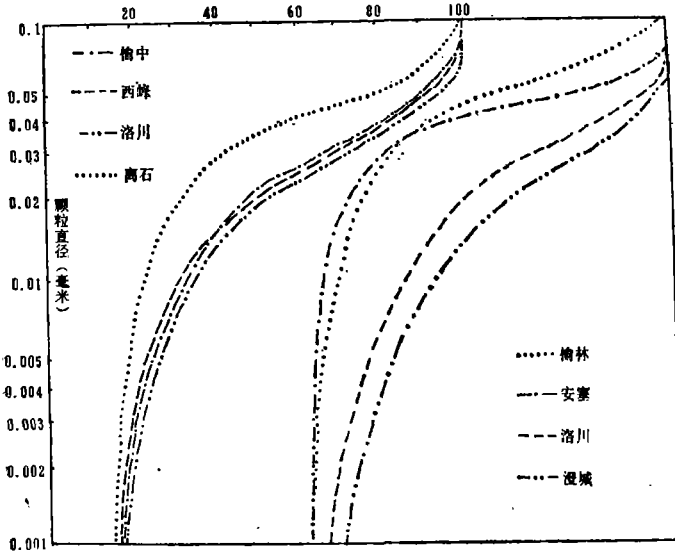


图5 新黄土颗粒组成的水平变化

在一定范围内,土体颗粒成分较粗,则结构疏松,容重小,孔隙度大,渗透强,崩解快,而塑性差,节理不很发育。北部沙黄土——典型黄土带的黄土,结构疏松,故洞穴侵蚀较强;陕北黄土的颗粒成分较粗,而节理不很发育,塑性差,因而跌穴发育,陇中、陇东黄土结构疏松,节理又发育,因而利于陷穴形成;而南部粘黄土结构相对密实,则洞穴较少。晋西也有类似现象。

2.黄土的微结构特征。黄土薄片的镜下观察表明,新黄土粗粒成分较高且存在区域差异。甘谷和西峰黄土小于0.01毫米的颗粒为多,大于0.03毫米者镶嵌于小颗粒之中;而陕北黄土粗颗粒几乎均匀分布,大部分在0.03—0.05毫米之间,个别可达0.07毫米;老黄土的颗粒相对较细,以小于0.01毫米者为主,因而比较密实。

陇中、陇东和宁南黄土中架空大孔较多,孔径可达0.3—0.5毫米,个别可达0.7毫米以上;同时微裂隙比较发育,其宽约0.01—0.03毫米,有时可达0.1—0.3毫米。关中黄土亦有类似现象,但结构致密。裂隙发育与黄土粘粒的胀缩过程有关,它对黄土的局部渗透和湿陷变形都有影响,是黄土陷穴发育的重要内因。陕北黄土也比较疏松,但以不规则孔为主,架空孔隙和微裂隙较少,节理较差,不利于局部渗透,故陷穴不甚发育。

老黄土相对密实,孔隙度小,且以0.01毫米左右的小圆孔为主,大于0.5毫米的大孔或不规则孔较少,故老黄土渗透、崩解性都弱,不易形成陷穴,但粘粒含量高,节理较为发育,宽度可达0.1毫米左右,有的超过0.5毫米。因而使老黄土能够形成较大而深的裂缝、立壁和土跌水,为跌穴和暗沟的发育提供了条件。

(三)洞穴的局地发育与形成条件。洞穴在坡面不同部位的分布和发育情况主要与微地形和局地径流特征有关。微地形的坡面分异,决定了局地地表径流特征,因而洞穴的

局地发育有一定特点。

1. 陷穴主要发育在塬畔、梯田、阶地和台地等平坦地形的边缘部位, 梁塔坡面接近沟缘的凹形坡和由陡转缓部位, 沟壕地和集水盆下部和浅沟下段等处都有发育。塬畔的陷穴多距塬畔2—50米, 最多不超过80米。梁塔坡面和沟头、沟缘的陷穴距沟缘线较近, 多在2—10米。这些特点主要与其节理发育有关。调查发现, 这些部位常因干裂和重力撕裂等作用, 黄土裂隙极为发育, 尤其是沟头和塬畔, 常见许多平行于沟缘线的裂隙。据在西峰调查, 这种裂隙主要集中于距沟边2—30米范围内, 有的可伸展数米到数十米长, 甚至导致滑坡, 常形成平行于沟边的串珠状陷穴, 阶坎较高的梯田、阶地边缘亦有类似现象。

2. 滑坡体与坡积黄土中陷穴比较发育。多见于滑坡裂隙和滑坡体与原土体接触部位。土坝、地埂和梯田等的填土结合部位也常因浸水而穿洞, 山区小路弯道内侧因常积水亦易成穴; 阳暖干燥的阶地、梯田和地埂、路基等处也因动物频繁活动容易发生陷穴。但凸形坡和梁塔坡上部无陷穴分布, 塬面中央, 较完整的阶地内部, 河漫滩和低阶地上也无陷穴发育。

3. 跌穴主要发育于沟头、沟缘以及陡崖、立壁等有跌水条件和充沛径流的部位。尤以切沟沟床最为典型, 且多呈串珠状群体发育。它是侵蚀沟处于雏形和活跃期的标志。

总之, 各种地形部位的洞穴发育都与黄土节理和动物洞穴等有密切关系。由这些部位的微地形和地表径流等特征可分析得出洞穴发育的基本条件。

1) 充沛的地表径流。和其它水蚀类型一样, 洞穴发育的主要外营力也是流水, 高强度的暴雨和利于地表水流聚集的地形部位是其发育的基本条件。

2) 导致地表径流局部强烈下渗的途径。如黄土的垂直节理、裂隙及动物穴和植物腐根孔等, 这是径流能在土内聚集并发生作用的重要前提。

3) 表层抗蚀性大于心土层的土体结构。这是洞穴这种特殊形态之所以能够形成的基本物质基础。在黄土区, 表土层因植物活动和成土过程, 抗蚀性较强且具一定塑性, 而心土层极易分散冲刷, 故易形成洞穴。

4) 出水口。水流集中入渗到土体内部, 沿弱透水层或交错节理侧向运动并在适宜部位排出地面, 同时发生溯源潜蚀作用, 才能形成洞穴。没有出口, 潜流就不能形成或发生作用, 土体内物质也难以排出, 则洞穴就不能发展。黄土垂直节理发育, 且地形切割破碎, 波折起伏较大, 为此提供了充分条件。

四、洞穴侵蚀的形成过程

黄土的洞穴侵蚀是与喀斯特作用不同的。这不仅在于黄土性质与石灰岩不同, 也与黄土区的气候条件和径流特征有关。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。黄土区气候干燥, 以暴雨所成的暂时性地面径流为主, 通常情况下, 土体干燥, 不具备溶蚀条件, 自由地下水少且多深埋于洞穴发生部位以下, 即使泉水出露处也很少见泉华现象。同时, 黄土中的主要可溶盐碳酸钙溶解度低, 为14.45毫克/升(25℃), 总量少(10-15%), 难以发生象石灰岩区那样的溶蚀作用。此外,

喀斯特过程的速度极慢，而黄土洞穴往往在一两次暴雨中即可见雏形。所以，洞穴的形成过程以流水的机械冲刷和潜蚀作用为主。

1. **水涮窝**。大量野外观察表明，水涮窝的形成是由于坡面股流在下泻过程中有一小部分沿陡壁成跌水流动，在抗冲性较弱的部位发生的淘刷、舐蚀作用(如图6a)所成。由于地面土壤发生层的抗冲抗蚀性较强，而下伏黄土母质则较差，尤其是地面植被较好时，其差异更大。随着水流不断冲刷，当侧壁内凹到一定程度，上部抗冲性较强的土体不能维持其自重时则发生塌落，从而使之破开成半圆筒状，其结果促使沟头前进。这是沟头侵蚀发育的一个重要特点。

2. **跌穴**。跌穴系坡面水流沿跌水下泻，对土体产生强烈冲刷作用所成。除黄土的抗冲性外，跌水是其形成的基本条件，其上部多与坡面浅沟相连。据陕西水文地质局在绥德的统计(如表5)，跌穴最大出现频率的坡度为40—50°。因而其地面径流的流速快，

表 5 跌穴与坡度的关系(绥德)

坡 度 (度)	<10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	>60	合 计
洞穴出现次数	0	5	8	71	157	26	1	268
出现频率(%)	0	1.9	3.0	26.2	59.0	9.7	0.2	100

下渗弱，加之流经跌水，冲刷力极强。起初将下部冲成跌窝，并随之加深扩大。由于表层抗冲性较强，水流沿底层下渗，并在下方陡坡或次一级跌水上冲出开口，水流复又流出地面。由于水流在下部的冲刷和上部的冲刷，往往使跌水跳跃式后退，从而形成一个跌穴的串珠状群体(如图6)，其结果导致沟床的整体下切和沟头进展。

在陡坡农田或浅沟、悬沟底部和一些道路上，有时由于水流的紊动性冲刷，可形成一个个台阶或凹坑，并由此加剧了冲刷作用的不均匀性，低洼处冲刷更强，而凸起处则相对冲刷渐弱，这样不断发展的结果，凹坑洞穿成穴，而凸起部分则悬空成微天然桥。这类洞穴可称为水冲穴，其形态一般仅数十厘米左右，但它对促使浅沟的加深演化和道路的破坏很有影响。

与沟蚀类似，跌穴发育与地面径流强度有密切关系。据在茶坊的调查(如表6)，随着集水面积的扩大和跌水高度的增高，跌穴体积有增大的趋势。这也表明了跌穴发育与浅沟侵蚀的关系，后者为地面径流的聚集提供了充分的条件。

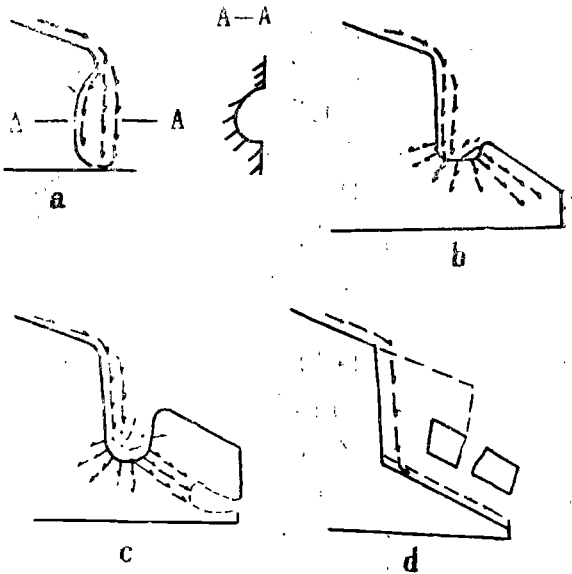


图6 跌穴形成示意图

跌落水流若冲入因地震等内力作用所成的深大裂缝时，则可形成位置较深，伸展较

表 6

集水面积与跌穴特征的关系

积水面积 (平方米)	跌水高度 (米)	跌穴直径 (米)	深度(米)
1,400	20	10.0	8.0
1,320	13	7.5	6.0
1,000	15	8.0	6.5
450	12	8.0	6.0
700	10.5	6.2	7.0
550	8.5	5.0	4.5

远的暗沟(如图7)。而这类裂缝在陇中等地震裂度较大地区容易见到,其宽度约5—30毫米,可见深度数到数十米,地面部分较窄甚至隐没。这是深大暗沟形成的重要原因。

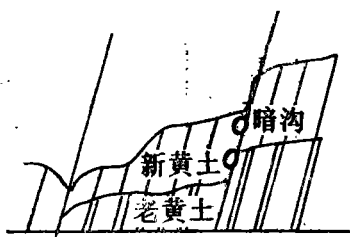


图7 秦安断裂剖面图

3. 陷穴。有关陷穴的形成问题,许多学者曾有过论述。杨怀仁谈到(1957),黄土陷穴系径流沿黄土壁理进行的地下侵蚀作用所成^[3]。朱显谟(1958)认为,陷穴的形成过程,基本与水涮窝相似,不过水先由地表下渗,然后在土体的裂隙中汇集而发生冲刷作用而成^[4]。著名土壤学家 Thorp(1963)^[8]和美国学者

Fuller(1922)^[7]在谈到我国黄土地区的洞穴侵蚀时也有类似的观点。总之,适宜水流积聚和排泄的地形,土层的抗冲抗蚀性差异及土内裂隙的存在是陷穴形成的基本条件。

在相对平缓低洼的地形部位,降雨时水流聚集并强烈下渗,由于上部土壤层抗蚀性强较,不易崩解分散,入渗水流首先使下部土体迅速崩解成近饱和状态,抗冲性极差。侧渗沿裂隙等途径一直发展到沟壁、陡崖等地形部位并浸出,从而在侧壁侵蚀出现缺口,并向土内逐渐溯源发展,形成地下穴道。这一步为侵蚀物质的搬运输出提供了条件,随着水流的不断下渗和潜蚀,上部土体不能维持自重时便塌陷成穴(图8)。最初地面穴口呈不规则形状或口小腔大,即所谓壶状(图8c)。由于凸出部分容易崩塌和侵蚀,使之逐渐演化成竖井状陷穴。如果发育于梁塔坡边缘等坡度较大部位,则因后期水流的直接冲刷作用,陷穴可发展为口大腔小,穴道陡直的漏斗形状(图8d)。

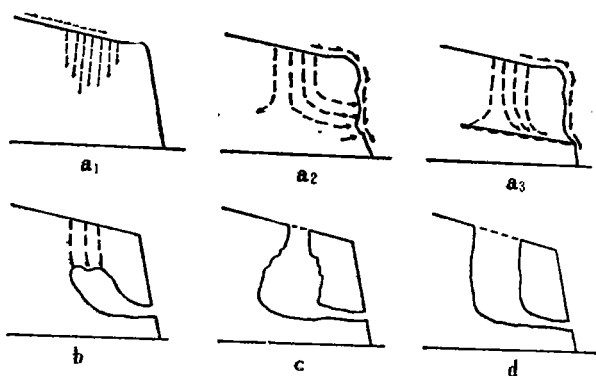


图8 陷穴形成示意图

陷穴一般都有地下穴道和出水口,其地下穴道的口径远较其腔体为小。陷穴发育深度受出口基面的控制,出口位置均高于附近沟床且与穴底保持一定高差。地下穴道多沿

黄土节理裂隙和两种抗蚀性明显不同的土层或地层之间发育，其走向多与坡面或土层接触面倾向一致。陷穴出水口初期常呈狭缝状，逐渐演化为拱形，即抵抗重力作用的稳定形。一些较大的陷穴出口附近，可见微形冲积扇发育。

陷穴发展的规模与其发生部位，集水区大小，深度和发育时间等都有关系。据西峰水土保持站调查(表7)，集水面积越大，集中的水流越多，所成的陷穴就越深越大。陷穴的形成

表7 集流面积与陷穴特征的关系(西峰)

陷穴直径(米)	陷穴深度(米)	集流面积(平方米)	陷穴距沟边距离(米)
19.0	10.0	600	1.5
15.0	5.0	500	1.5
17.5	8.0	480	3.0
6.0	3.5	240	2.0
1.8	5.0	105	0.7

速度不定，调查分析表明，由地面出现洞口之前这段时间一般较短，少则一次暴雨，多则几次暴雨或几年，而以后的演化则较慢。黄土碟系黄土漫水后湿陷所成，对黄土自重湿陷有指示意义，有的黄土碟可发展为陷穴。此外，黄土区的鼠洞和树木腐根孔部都能导致陷穴发育。填土结合部位的夯实处理不好是田间工程和一些道路上陷穴发生的主要原因。

五、洞穴侵蚀的危害与防治

洞穴侵蚀虽不象沟蚀那样普遍、频繁，但它对人类生产和经济活动的危害有时较沟蚀更为直接和严重。主要表现在以下几个方面：

1. **加剧沟蚀，分割蚕食土地资源。**洞穴发展演化的结果，总是导致沟蚀加剧。宁县马槽沟在1960年一次暴雨中，因沟头上部出现暗沟而使沟头一次向源前进了40多米。据澳大利亚学者研究，当洞穴侵蚀起主导作用时，沟头前进速度达2.5米/年，而没有洞穴的地方，其沟头前进速度小于0.5米/年^[11]。沟缘的洞穴发育促进了沟岸的扩张与破碎，增加了新的悬沟与岔沟。许多串珠洞发育在切沟和悬沟的沟床上，结果导致沟床的大幅度整体下切。

2. **造成平缓农田的土壤侵蚀。**较为平缓的坡耕地或梯田，一般土壤侵蚀比较微弱，细沟也不易形成。但洞穴一旦发育，侵蚀量极大。据天水水土保持站在武山县的调查，从1959—1961年3年中，每年每平方公里梯田平均发生陷穴85个，合侵蚀量200多吨/平方公里·年。1962年6月的一次暴雨(历时115分，总量37毫米)后，19.2公顷梯田上形成大小陷穴193个，合侵蚀量达6,300吨/平方公里·年。

3. **危害交通线路和田间工程。**陇海铁路甘草店段在1954年一次暴雨中因路基钻洞而造成客车颠覆。甘谷扎拉坡一条大路弯道内侧因积水形成一直径2米，深10多米的洞穴，底部穿过路基，威胁车辆通行。有些洞穴位于道路中央，迫使路线改道。绥德辛店沟一条20多米长的拦泥土坝暴雨时漏水而发生洞穴，濒临溃决，影响拦泥效益和坝地生

产。黄土区许多梯田边缘常因暴雨时发生陷穴而塌坍，有的地方水流一次洞穿几台梯田。一些涝池、渠道和水库也常因水流穿洞而致毁坏，为此修复要花去大量财力物力。

4. 造成窑洞、坑院破坏，威胁人民生命财产安全。塬区的居民窑洞若距离蓄水设施太近或位置过低，暴雨时常因洞穴发生而受害。1964年一次暴雨中，西峰有两个坑院与50米外的蓄水池间出现暗沟使洪水灌入院内，16孔窑洞被淹，2孔塌顶。泾川因同类事故，除粮食、牲畜等受损外，有11人死亡。一些耕地和草丛中的洞穴也常跌伤人畜等，造成很大经济损失。

由此可见，洞穴侵蚀的危害是不可忽视的，分析研究并设法防止其发生发展十分必要。根据洞穴侵蚀的特点和形成过程分析，防止洞穴的发生发展主要可从外因着手，控制和改变径流状况。同时根据洞穴发生的特征条件，在雨季来临之前，及时检查有关梯田和田间工程，发现隐患，立即整治，对已经形成的洞穴亦应尽早处置，减轻危害。

1) 控制坡面径流，保塬固沟。洞穴主要发育于塬畔，沟头等水流集中部位。结合封沟埂，护沟护塬林草等措施，拦蓄和引散水流，使之不能下沟下塬，并尽可能拦截水流于距塬畔或沟边30—50米的裂隙密集发育区之外，使水流从地面和“地下”都不能下坡下沟。涝池和引蓄水设施的布设也应该注意这点。同时推广横坡等高耕作法，深耕耨作和水平沟耕作法，禁止陡坡开荒，分散和减弱农田径流与侵蚀程度。密切配合鱼鳞坑和连水窑等水土保持工程，充分拦截坡面水流。在塬面则应采取一切措施，促使全部降水就地拦蓄入渗。

2) 采取各种途径增强土壤的均匀下渗能力和抗冲抗蚀性能。土壤渗透性和抗冲抗蚀性能对洞穴侵蚀有直接影响。植被不仅能缓和产流，减弱冲刷，而且能提高土壤肥力和结构稳定性，拟制裂隙的形成，增强土壤的均匀下渗和抗冲性能。因而合理利用土地，改进林草栽培技术，增大被覆面积和增施粪肥，改良土壤结构和抗冲性能是减轻洞穴侵蚀的根本途径。

修建梯田、坝地，改变小地形，不仅能控制径流，减小冲刷，也能改善土壤结构状况和肥力水平，增强入渗，提高产量。但应注意工程质量和田面水流的调节处理，避免水流沿田埂下泻或强烈聚集。特别是在原为沟谷和回填土部位，田面应适当加高，生土结合处严密夯实，以防止沉陷、聚水和渗漏。

3) 注重工程质量，及时检查漏洞，平复隐患。在黄土区施工，应根据其疏松多孔，易渗透、崩解和胀裂的特性，切实做好客土结合部位的夯实防渗处理，避免人为造成的渗漏。在田间工程广泛集中的地区，雨季来临前应对一些重要的土坝、道路、田埂和窑洞等进行检查，发现裂缝、孔洞或其它隐患，及时填补堵塞，或切断径流来源，把洞穴消灭在初生阶段。结合农事，适当进行灭鼠，及时挖除地边的枯朽树根也很必要。对已经出现的洞穴，应尽早尽快整治，防止其蔓延发展，整治的方法主要有两种：

填充法：对于体积小而发展快(即雏形阶段)的洞穴应予及时填充。一般可用土石块等夹拌树枝草秸等物，先堵塞地下穴道，并分层夯实填满。有时可清基，修壁植实，效果更好。填平后，填土应稍高出地面，以防沉陷。在周围还可修筑土埂和排水沟，防止复发。

封围法：一些填充工程量大而位置又不很重要的洞穴可以修围埂，阻断水流继续侵

入,使之稳定,并堵塞穴道出口,处理穴底,逐步改造利用。对一些腔大而浅的洞穴,还可直接削平立壁,就地耕种,并阻绝水流再度集中,逐步平复低洼。对一些沟头还在发展的洞穴,群众利用它种植芦苇,既有收获,又稳定了穴底,效果很好。

总之,只要认真研究洞穴侵蚀的特点和规律,及时总结推广群众的经验,坚持以防为主的方针,把生物措施和工程措施结合起来,把防治洞穴与防治沟蚀结合起来,洞穴侵蚀是可以防止的。

参 考 文 献

- [1] 罗来兴: 划分晋西北陕北东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型,《地理学报》,1956年,22(8)。
- [2] 陈传康: 陕东南南部黄土地形类型及其发育规律,《地理学报》,1956年,22(8)。
- [3] 杨怀仁等: 山西南部黄土地形发育和地形区划,《地理学报》,1957年,23(1)。
- [4] 朱显谟: 黄土区的洞穴侵蚀,《黄河建设》,1958年8期。
- [5] 陈永宗: 黄土陷穴的成因及危害,《地理学资料》,1958年8期。
- [6] 朱显谟: 黄土高原水蚀的主要类型及有关因素,《水土保持通报》,1981年4期。
- [7] M. L. Fuller: Some Unusual Erosion Feature in the Loess of China, *Geogl.Rev.*,1922,Vol. 12,pp570-584.
- [8] W. W. Rubey: Gullies in the Great Plains Formed by Sinking of Ground, *Am. J. Sci.*, 1928,Vol.12, pp417.
- [9] J. Thorp: Geography of Soils in China, *Natural Geological Survey of China*, 1936.
- [10] J. E. Flether: Piping, *Trans. AGU*, 1954, Vol.35(2), pp258-263.
- [11] R. J. Crouch: A role of Tunnel in Gully Head Progression, *J. Soil Cons. NSW.*,1983, Vol. 38(1),pp148-159.
- [12] P. L. Hosking: Tunnel Erosion in New Zealand, *J. Soil & Water Cons.* 1967, Vol.22, pp149-151.

Tunnel Erosion and Its Control in the Loess Plateau

Wang Binke Zhu Xianmo Tang Keli

Abstract

In this paper, common feature and causes of tunnel erosion is discussed with the field survey and sample test, from its types, distribution and mechanism, using the method of comparing one region with another. The patterns of formation and evolution on the tunnels and their distribution map in the Loess Plateau have been given. The distribution and process of tunnel erosion is studied, the result shows that tunnel erosion is one of water erosion types, and an important link and embryo of gully erosion. It is closely related to loose structure and crack of loess. It has regional variation. Its highest erosion intensity fits in the loess region to west of Liupan mountain and silty loess zone of Loess plateau. Useful data is given for study of gully erosion and tunnel control.