

文章编号: 0451-0712(2005)11-0142-05

中图分类号: U416.169

文献标识码: A

黄土高原地区黄土洞穴的成因研究

李喜安^{1,2}, 彭建兵², 郑书彦², 陈志新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 成都市 610059;

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

摘要: 通过野外调查统计手段对黄土高原黄土洞穴的成因进行了研究。结果表明:黄土洞穴形成的控制因素主要包括地层厚度、土性、构造、地形地貌以及水文地质和气候条件等,其中黄土地层的土性、厚度及其空间组合形式和形态构成了形成黄土洞穴的物质基础。不同深度的黄土洞穴,其形成的主控因素不同,表层黄土洞穴多为生物成因,浅层黄土洞穴主要与黄土地层抗水蚀能力的垂直分异以及浅层的各种节理裂隙有关,中层黄土洞穴主要与节理裂隙有关,深层及极深层黄土洞穴与构造节理直接相关。

关键词: 黄土高原;黄土洞穴;成因;地质灾害;水土流失

黄土洞穴是我国黄土高原第四纪地层中较为常见的一种独特的地质现象,随着我国西部各项建设的进一步开展,黄土洞穴逐渐演变成成为黄土高原上的一种独特的地质灾害,其危害主要表现在以下几个方面。

(1)对黄土地区的各类工业与民用建筑均构成不同程度的威胁,主要包括对交通运输、各类地下输送管道、拦蓄水工程、厂房和民居等的危害,尤其对交通运输工程的危害最为普遍而严重。如甘肃 211 国道及宁夏 101 省道部分路段都曾因黄土洞穴的严重破坏而改线;陇海铁路甘草店段在 1954 年 8 月因暴雨使得路基中发育的洞穴塌陷,造成路面钻洞,竟引起客车颠覆;定西地区每年 7 月~10 月,因暴雨形成的黄土洞穴而对公路造成的经济损失近亿元^[1]。

(2)黄土洞穴常常还造成严重的水土流失。如宁县马槽沟在 1960 年的一次暴雨中,因沟头发生洞穴侵蚀而使得沟头一次向原畔推进了 40 m;武山县在 1959 年~1961 年的 3 年当中,梯田上平均发生洞穴 85 个/(a·km²),合侵蚀量 200 t/(a·km²);邓家堡在 1962 年的一场暴雨中,19.2 hm² 的梯田上形成陷穴 193 个(含陷穴坍塌而成的地边壑),合侵蚀量 6 300 t/km²^[2]。

(3)黄土洞穴常常引发其他种类的地质灾害。黄土洞穴的发生与发展影响着其他地质灾害的发生和

发展,并最终导致水土流失、崩塌、滑坡、泥石流等各种地质灾害的形式表现出来。许多黄土崩塌、滑塌以及中—小型滑坡与黄土洞穴的发生和发展关系密切,甚至互为因果。另外,作为黄土高原地区地表水的一种排泄方式,黄土洞穴也是为黄土地区的泥石流灾害提供水源、物源等必要物质条件的一种重要途径^[1]。

关于黄土洞穴最早的研究始于 1920 年代,此期间 Fuller(1922)、Rubey(1928)将黄土洞穴作为一种土壤侵蚀的独特方式而对其成因进行了一些初步探讨^[3,4]。20 世纪中期我国一些土壤学家和地理学家曾在总结野外考察和群众经验的基础上进行了一些研究工作,主要工作也是针对黄土洞穴的成因提出了一些见解,初步形成了机械侵蚀成因说^[5,6,7]、化学溶蚀成因说^[8]以及多因素作用成因说^[9]的理论观点,一些国外学者(美国 Thorp^[10]、Fletcher^[11];澳大利亚 Newman^[12]、Downes^[13]等)在此期间也曾做过一些相关方面的研究;20 世纪后期以及 21 世纪初期,朱显谟、王斌科等对黄土洞穴的成因及分类做了进一步探讨^[2,14,15,16,17]。然而一直到目前,关于黄土洞穴成因的各种观点不但难以统一,而且仅有的部分成果也大多只停留在对黄土洞穴现象的描述和成因的简单推测上,尚未形成一种较为系统的黄土洞穴成因论。

1 黄土洞穴的分类及其分布特征

1.1 黄土洞穴的分类

野外调查表明黄土洞穴的大小、深度以及形态差异很大,尤其是大小和深度具有明显的层次性,它们代表了黄土洞穴主要成因主控因素的不同以及洞穴发育的不同阶段^[1]。黄土洞穴从产状上主要可分为与黄土地层垂直的竖向洞穴(从形态上可分为竖井状陷穴、葫芦状陷穴、跌穴、蝶形地等)以及与黄土地层近似平行的黄土洞穴,而后者又可从断面形态上分为圆形、圆拱形、狭缝状、三角形以及不规则形状等。根据断面大小还可分为微型暗穴(洞径 ≤ 10 cm)、小型暗穴(洞径 $10\sim 50$ cm)、中型暗穴(洞径 $50\sim 150$ cm)、大型暗穴(洞径 $150\sim 400$ cm)和巨型暗穴(洞径 ≥ 400 cm),黄土洞穴的发育深度变化范围较大,从几十cm到50余m不等,具体可分为表层(深度 ≤ 1 m)、浅层(深度 $1\sim 3$ m)、中层(深度 $3\sim 10$ m)、深层(深度 $10\sim 20$ m)以及极深层(深度 ≥ 20 m)黄土洞穴。

1.2 黄土洞穴的分布及其特征

表层黄土洞穴数量众多且在整个黄土高原广为分布,主要受地层分布、地形地貌、地表水活动方式以及生物活动(鼠、兔、蛇等)等因素的控制,地域规律不明显。由于表层黄土洞穴发育地层的局限性,使得其在分布上具有极强的随机性,而且其工程危害性不大;另一方面由于其数量过于众多,若对此一并进行统计不但客观上具有相当大的难度,而且还容易掩盖其他洞穴的分布规律,因此一般不列入野外调查统计之列。

浅层、中层、深层以及极深层黄土洞穴分布的影响因素复杂多样,通常受新构造运动、大地形条件以及人为活动等非地带性因素的相互交叉影响^[1]。这种情况下只有在各调查区选取洞穴比较发育的典型区域,通过平行对比的方法对黄土洞穴密度进行统计分析以揭示其宏观分布规律。总体看来,浅层、中层、深层以及极深层黄土洞穴的分布相对具有一定的地域规律,表现在以下几方面。

(1)黄土洞穴发育密度由西北向东南呈递减趋势(图1),其中由兰州—环县—吴旗—佳县一线向西北由很发育突然变为不发育,呈突变趋势;由该线向东南由很发育逐渐变为不发育,即呈渐变趋势。

(2)不同黄土地貌或微地貌单元黄土洞穴的发育密度具有明显差别,其中各类地貌单元中发育的冲沟中,黄土平梁、黄土塬及黄土残塬、表层有黄土

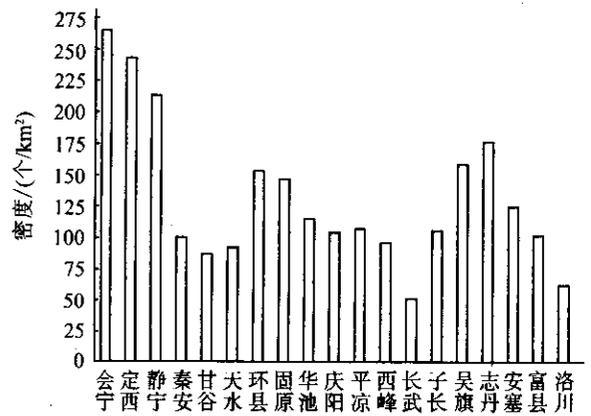


图1 黄土洞穴发育区洞穴发育密度统计

沉积的冲积扇边缘地带及与冲沟之间的斜坡地带的地形变化强烈的微地貌上黄土洞穴发育最为强烈。黄土塬及黄土台塬、黄土梁面的中心部位、黄土崩的地形变化不明显的微地貌上,黄土洞穴发育较少或不发育。

(3)黄土洞穴发育区的土壤侵蚀模数普遍较大。

(4)黄土洞穴发育区的植被覆盖条件普遍较差。

2 黄土洞穴的成因

影响黄土洞穴成生的因素众多,主要包括地层厚度、土性、构造、地形地貌以及水文地质和气候等因素。其中黄土地层的土性、厚度及其空间组合形式及其形态构成了形成黄土洞穴的物质基础,是形成黄土洞穴的根本内因。构造、地形地貌以及水文地质和气候等因素是形成黄土洞穴必不可少的外部因素。对于不同种类的黄土洞穴,其形成的主控因素又有一定的差别。

2.1 黄土地层的厚度

黄土洞穴的形成受黄土地层厚度控制。因而在陇东、陇西、陕北以及关中等黄土地层相对较厚的黄土高原地区洞穴发育程度较高,而在其他黄土分布稀薄的地区黄土洞穴一般不发育。同时,黄土洞穴的分布在一定程度上又受湿陷性黄土厚度控制。湿陷性黄土厚度一般在 $8\sim 15$ m之间,20 m以下的深度已经很少见到,而黄土洞穴也多为 $3\sim 20$ m的中层及深层洞穴,大于20 m的极深层洞穴则较少见。但在一些地段,如存在深度较大的卸荷裂隙的深切冲沟边缘,以及构造节理发育地段,地表水沿这些节理裂隙落入而强烈冲蚀,使洞穴发育深度有可能大于20 m。

2.2 黄土的特殊性质

黄土洞穴的形成和分布与黄土物质的特殊性质,尤其是与其颗粒成分、疏松程度、湿陷性及崩解性等有着紧密的联系。民和~皋兰~海原~佳县~米脂一线以北的砂黄土带(图2中A区)黄土洞穴基本不发育,其主要原因是由于其砂性过大,黄土表层过于疏松而极易崩解和塌陷,在空间上不易形成架空结构。民和~皋兰~海原~佳县~米脂一线以南和甘谷~秦安~华亭~西峰市~合水~延安~延川~离石一线之间的黄土带(图2中B区)黄土洞穴普遍发育,其主要原因是表层黄土的砂性低于下伏土层而强度则大于下伏土层,因而有利于在空间上形成中空的架空结构而产生洞穴。千阳~彬县~宜君~黄龙~吉县~蒲县一线以南的粘黄土带(图2中C区)属于黄土洞穴的弱发育区或不发育区,其主要是因为黄土层粘性普遍增大,抗冲性增强而湿陷性、崩解性、渗透性普遍降低,这些土性因素使得黄土的抗侵蚀能力增强而不易受到侵蚀,因而很少在黄土层中形成黄土洞穴。

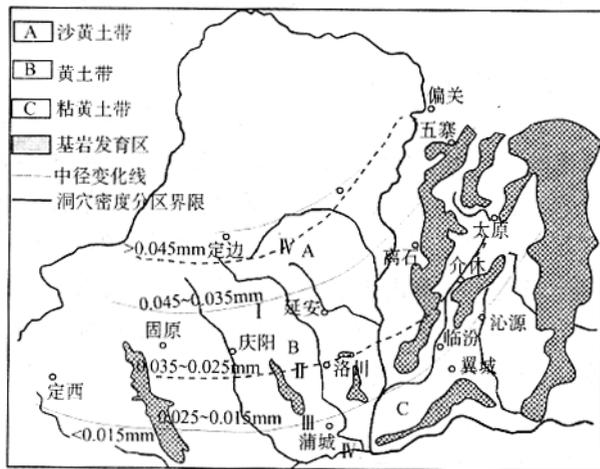


图2 黄土高原黄土颗粒组成及黄土洞穴发育分区对比

2.3 地质构造因素

由于地质构造控制了黄土高原的区域地貌轮廓,因而也就控制了黄土的形成、分布和地形的发育,因而对黄土洞穴的形成和分布也起着十分重要的控制作用。黄土高原及其周边的破坏性地震大大破坏了黄土地层的完整性(表1),不仅能够直接触发滑坡、崩塌等重力侵蚀现象的发生而且对黄土地层产生松动作用,使得黄土中富含的各种原生、次生隐伏节理开启,在黄土层中形成十分发育的构造裂隙,由于这些构造裂隙本身为弱抗侵蚀带,便于水流沿其进行选择侵蚀;另一方面构造裂隙本身就是物

质搬运的良好通道,它的存在使得水分携带黄土物质的远距离大量搬运成为可能。

表1 1177年~1976年黄土高原地区五级以上地震统计^[18]

震级	5~6	6~7	7~8	>8	总计
次数	128	30	17	5	180
%	71.1	16.7	9.4	2.8	100

2.4 地形地貌因素

地形地貌尤其是局部的微地形地貌与黄土洞穴的形成关系密切。黄土塬、梁、峁上发育的黄土冲沟、凹型地(负地形)、凸型坡、滑坡体、崩塌堆积体、梯田等微地貌,由于其上土层的厚度及土性、地形起伏状况、地层产状、汇水排水条件、地层中各种节理的种类和发育程度、生物作用的强弱等地层条件不同,使得其上黄土洞穴的发育程度及种类也不尽相同。如:陷穴以凹形和凸凹形坡为主,常见于塬畔、沟掌、沟坎等破碎地形的边缘部位;跌穴主要发育于直形坡和凸形坡下方有跌水条件的部位,暗穴则多发育于与陷穴、跌穴等黄土洞穴相连接的地形较为宽缓地带,黄土碟仅见于低洼平缓部位等。

2.5 水文地质及气候条件

在黄土高原,形成黄土洞穴的水来源于大气降雨,7月~9月是降雨相对集中的时期,黄土洞穴也多在该期形成,说明洞穴的形成与地域性降雨、水流下渗和冲刷有关。在黄土洞穴发育区,洞穴可以成为地下水补排的主要途径。若黄土洞穴延伸至含水层,地表降雨汇集而成的径流通过洞穴直接对含水层进行补给。若黄土洞穴在其延伸途中没有与含水层连通,径流则会以通过洞穴并在直立坡面的某层古土壤或基岩面上的隔水层面上发育的洞穴出口(一般为暗穴出口)的方式集中排泄。

3 不同深度黄土洞穴的基本特征及其成因特点

不同深度的黄土洞穴成因差别较为明显,其中表层黄土洞穴发育深度一般在黄土地层或剖面露头表层的1 m以浅,以微型洞穴占绝大多数,兼有部分小型洞穴。表层黄土洞穴普遍发育于耕作土层和各类工程弃土或堆积土层的较浅层位。耕作土层中发育的表层黄土洞穴其生物成生作用明显,多为动物巢穴或植物孔洞或因此而形成的黄土洞穴,洞穴形态多呈圆形或近似圆形。弃土或堆积土层中的表层黄土洞穴,或者是生物成因,或者是在特殊的地形条

件下由于地表水冲蚀或溶蚀作用的结果(如由跌穴发展而来),其洞穴特征不鲜明。

浅层黄土洞穴发育深度在1~3 m之间,多为中型黄土洞穴及少数大型洞穴。浅层黄土洞穴大多发育于原状黄土地层或沉积较厚的新近堆积的黄土状土地层当中,以发育于马兰黄土中的浅层黄土洞穴最为典型,具体情况视当地黄土地层的沉积情况而异。浅层黄土洞穴发育的地层,一般来说表层地层的粘性较下部为大,抗水蚀能力较强,而相应洞穴发育的地层部位的富砂质黄土的抗水蚀能力相应较弱,再向下常常是一套抗水蚀能力较强的地层(常为 S_0 或 S_1)(表2),这种地层抗水蚀能力的垂直分异十分有利于形成空腔而产生浅层黄土洞穴。另外,浅层黄土洞穴的形成也与浅层的各种节理裂隙如黄土的垂直节理、卸荷裂隙、湿陷裂隙有关,在适当的地形条件下,地表水通过这些节理裂隙对抗水蚀能力相对较弱的黄土地层进行侵蚀,使得节理开启、裂隙扩大而最终形成黄土洞穴。浅层黄土洞穴已经具有较为明显的洞穴特征,洞穴产状较为稳定,延伸长度一般较短,洞穴断面形态较为多样,大多数浅层黄土洞穴呈圆形、直立的椭圆形或拱形,部分呈不规则形态。浅层黄土洞穴是一种较为典型和常见的黄土洞穴,已经具有前述较为明显的地域分布规律。

表2 黄土高原浅层黄土洞穴发育地层的抗冲性^[15]

地点	定西	天水	西峰	安塞	绥德	离石
新近堆积黄土层	0.159	1.266	0.182	0.156	0.163	0.147
原状黄土层	0.085	0.065	0.099	0.036	0.025	0.147
古土壤层	—	—	0.266	—	0.075	0.424

中层黄土洞穴发育深度在3~10 m之间,多为大型黄土洞穴及部分中型黄土洞穴。中层黄土洞穴大多发育于原状马兰黄土地层中,在离石黄土出露较浅的部分地区,离石黄土地层中有部分中层黄土洞穴,少数的中层黄土洞穴发育于沉积较厚的新近堆积的黄土状土地层。马兰黄土地层中广为发育的中层黄土洞穴的底板通常是抗冲性较强的 S_1 地层。中层黄土洞穴的成因主要与黄土的垂直节理、卸荷裂隙、湿陷裂隙的开启和水力侵蚀有着直接关系,部分中层黄土洞穴的形成还与构造节理的存在相关(图3)。中层黄土洞穴具有十分明显的洞穴特征,洞穴产状较为稳定,延伸长度长,断面多为拱形,中层黄土洞穴是黄土高原最为典型的黄土洞穴,在数量

上占黄土洞穴的绝大多数,具有明显的地域分布规律。

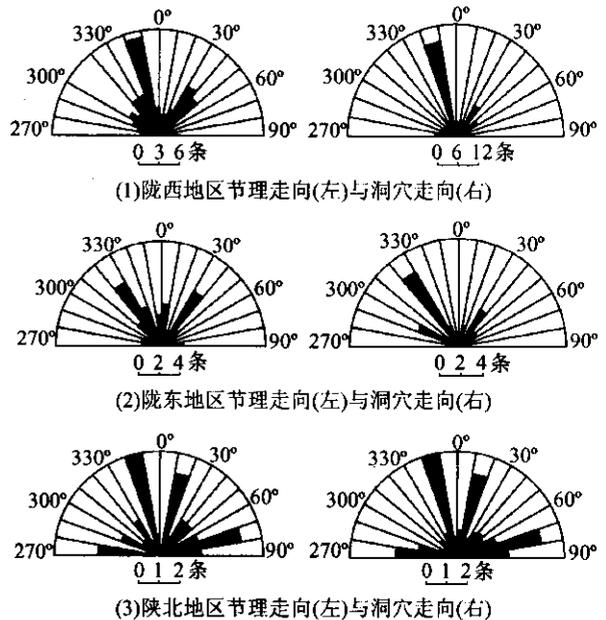


图3 黄土高原典型地区中层、深层和极深层黄土洞穴走向及构造节理走向玫瑰花图

深层黄土洞穴发育深度在10~20 m之间,大多为中型、大型或巨型黄土洞穴。深层黄土洞穴大多发育于原状马兰黄土或离石黄土地层中,深层黄土洞穴的底板通常是抗冲性较强的 S_1 、 S_2 或 S_3 地层,在黄土地层沉积较薄的地区,在洞内水流的强烈下切作用下底板穿透后水流侵蚀至下一层古土壤表面,从而在纵向上形成双层甚至多层洞穴。深层黄土洞穴的成因主要与黄土中的构造节理密切相关,洞内常有清晰的构造节理行迹。深层黄土洞穴产状稳定,延伸长度长,洞穴形成初期的断面形态常呈狭缝状、三角状等,稳定时则以拱形为主,深层黄土洞穴是一种典型的黄土洞穴,在数量上仅次于中层黄土洞穴,在分布上明显受构造节理发育程度的控制(图3)。

极深层黄土洞穴发育深度大于20 m,洞穴断面大小及形态不稳定,洞穴内部常有巨大的中空空间,向出口断面变小。极深层黄土洞穴大多发育于原状离石黄土地层中,深层黄土洞穴的底板通常是抗冲性较强的 S_2 或 S_3 或者更深的古土壤层。黄土高原的极深层黄土洞穴数量很少,且一般不出露于地表或出口较小,但其产状稳定,延伸长度往往可以达到数km甚至数十km。极深层黄土洞穴的断面内大外小,在内部常常可以形成“黄土喀斯特”等潜蚀地貌。极深层黄土洞穴的成因主要与大型构造节理或断裂相

关(图 3)。

4 结 语

(1)黄土高原地区黄土洞穴发育密度由西北向东南呈递减趋势,向西北呈突变趋势,而向东南则呈渐变趋势。各类地貌单元发育的冲沟中,黄土平梁、黄土塬及黄土残塬的边缘地带及与冲沟之间的斜坡地带,缓梁浅谷或深谷的斜坡地形变化强烈的微地貌上黄土洞穴发育最为强烈。黄土洞穴发育区的土壤侵蚀模数普遍较大而植被覆盖条件普遍较差。

(2)黄土洞穴形成的控制性因素可以归纳为地层厚度控制因素、土性控制因素、构造控制因素、微地形地貌控制因素以及水文地质和气候条件控制因素等。

(3)表、浅、中、深、极深层黄土洞穴的洞穴特征、发育密度、成因类型具有较明显的差别,由表层到极深层黄土洞穴的数量由多到少,规模由小到大,洞穴特征也越来越明显。表层黄土洞穴多为生物成因,浅层黄土洞穴主要与黄土地层抗水蚀能力的垂直分异以及浅层的各种节理裂隙有关,中层黄土洞穴主要与节理裂隙有关,深层及极深层黄土洞穴则与构造节理有直接关系。

参 考 文 献:

[1] 李喜安. 黄土暗穴的成因及其公路工程灾害效应研究[D]. 长安大学, 2004.

[2] 王斌科. 土壤的洞穴侵蚀研究综述[J]. 土壤学进展,

1989, (1).

[3] M L Fuller. Some Unusual Erosion Feature in the Loess of China. Geogl. Rew. , 1922, 12.

[4] W W Rubey. Gullies in the Great Plains Fomed by Sinking of Ground. Am J. Sci. , 1928.

[5] 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).

[6] 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).

[7] 朱显谟, 等. 黄土区的洞穴侵蚀[J]. 黄河建设, 1958, 3.

[8] 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).

[9] 陈永宗. 黄土陷穴的成因及其危害[J]. 地理学资料, 1958, (3).

[10] J Thorp. Geography of Soils in China. Natural Geological Survey of China, 1936.

[11] J E Flether. Piping, Trans. AGU, 1954, 35(2).

[12] J C Newman. J. Soil Cons. N. S. W. , 1957, (13).

[13] P G Downes. J. Soil and water Cons. 1962, (17).

[14] 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).

[15] 王斌科. 引起洞穴侵蚀的主要因素探索[J]. 水土保持学报, 1989, 3(3).

[16] 王斌科, 朱显谟, 唐克丽. 黄土高原的洞穴侵蚀及防治[A]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1988.

[17] 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).

[18] 陕西省地质矿产局第二水文地质队. 黄河中游区域工程地质[M]. 北京: 地质出版社, 1986.

A Study on Origin of Loess Caves in Loessal Plateau

LI Xi-an^{1,2}, PENG Jian-bing², ZHENG Shu-yan², CHEN Zhi-xin², TIAN An-jia³

(1. National Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Science and Engineering, Chengdu 610059, China; 2. Geology Engineering and Surveying Department, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. 214 Geology Team of Yudou Road, Yuncheng City of Shanxi Province, Yuncheng 044000, China)

Abstract: On the basis of the field survey and statistic, the causes of loess caves in the loessal plateau are studied in this paper. Result shows that the controlling causes of loess caves include the thickness of the loess layer, loess quality, structure, land form, hydrology, geology and climatic conditions, of which the loess quality, thickness of the loessal layer as well as their combinations formed the bases of loess caves. Loess caves of different depths have different main causes. The cause of superficial loess caves is related to biologic activities, of shallow layer caves to their differentiation of the anti-water erosion ability as well as the fissures inside, of middle layer caves to the fissures inside, and of deep and extra deep layer caves to the tectonic joint.

Key words: loessal plateau; loessal cave; origin; geology disaster; waterloss and soil erosion