

嶂石岩地貌的演化特点与地貌年龄

陈利江¹, 徐全洪¹, 赵燕霞¹, 李庆辰¹, 张景芳²

(1. 河北省科学院地理科学研究所, 河北 石家庄 050011; 2. 河北师范大学附属中学, 河北 石家庄 050011)

摘要:受地层产状、岩性和节理构造的控制,以丹崖长墙为标志的嶂石岩地貌在演化过程中,存在垂沟在崖面横向侧切发育巷谷,水平掏蚀在崖脚形成岩廊,并引起崖面崩塌卸荷平行后退两种坡面发育机制。巷谷、岩廊、 Ω 型套谷等在平面格局、空间形态和时代序列上都存在明显的自相似特征,符合曼德布罗特分形理论中的自相似体系。嶂石岩地貌演化周期为 294.7×10^4 a,分为幼年期、青年期、壮年期和老年期4个阶段,分别历时 8.3×10^4 a、 83.2×10^4 a、 115.2×10^4 a和 88.0×10^4 a。嶂石岩地区的嶂石岩地貌具有明显的分层性,其分异由长城系砂岩、寒武系灰岩的软硬岩层互层引起,并非不同时代发育的嶂石岩地貌。

关键词:嶂石岩地貌;地貌演化;自相似;地貌年龄

中图分类号: P931.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2011)08-0964-05

嶂石岩地貌是郭康先生于1992年发现的一种旅游景观地貌类型,发育于中元古界长城系石英砂岩中,在太行山中、南段山脊线东侧广泛分布,其中以河北省赞皇县嶂石岩地区发育最为典型,故命名为嶂石岩地貌^[1],其以丹崖长墙延续不断,阶梯状陡崖层次清晰, Ω 型障谷相连成套,块状造型棱角鲜明,垂直沟缝自始至终而著称。

1 嶂石岩地貌的发育背景和演化特点

1.1 嶂石岩地貌的发育背景

嶂石岩地貌是在岩性、构造和气候等因素有机组合下得以发育、完善的。其中广泛出露在太行山中、南段山地的中元古界长城系红色石英砂岩产状平缓,岩性坚硬,节理发育,成为嶂石岩地貌发育的基础^[2];而喜马拉雅运动第Ⅱ幕以来,太行山地沿东麓山前大断裂的强烈抬升,使其与东部平原的相对高差增大,为地貌营力对嶂石岩地貌的塑造提供前提;同时,太行山中段山地地处中温带地区,气候的剧烈波动和显著的干湿交替使山地物理风化强烈,岩石崩塌加剧,频发的洪水也使地表物质运移迅速,成为嶂石岩地貌塑造的主要动力^[3,4]。

1.2 嶂石岩地貌的发育机理

1) 楔状横切机理。由于长城系红色砂岩年代古老,岩性坚硬,在历次的构造运动中受到侧向挤

压,在岩层承受的挤压应力聚集和应力释放过程中产生的波动效应(或振荡效应)使岩层中的节理在一定间隔内相对密集成带,形成节理密集带。节理密集带内的节理密度最高达50条/m(一线天),是普通岩层节理密度的50~100倍。节理密集带的宽度可从几十厘米到几米,甚至十几米。由于密集的节理使岩石更加破碎,成为抗蚀能力较差的软弱带,故流水(包括水流和冻融)、重力、风等外营力便沿此软弱带向陡壁横向切入,形成竖直的沟缝(其边界为节理密集带的边界)。该沟缝可切入陡壁数米、数十米甚至上百米(一线天为112 m)。而在沟缝切入陡壁后,如与其它方向的节理密集带交汇或抵达与之共轭的节理密集带的交叉处,则沟缝便出现分叉现象而形成次级沟缝。如此发展,逐级分叉,形成多等级的树杈状沟谷系统(图1a)。该发育机理是嶂石岩地貌发育的框架,也是形成方山、排峰、塔柱的主要机制。

2) 水平掏蚀机理。在非节理密集带,嶂石岩地貌的发育则更多地表现为外营力对软弱岩层(泥岩、页岩及泥质砂岩)的水平掏蚀作用,以及由此引起的上覆岩层的崩塌。由于嶂石岩地区发育嶂石岩地貌的主体岩层——长城系的产状平缓,上、下岩层均呈大致水平或微倾斜状(倾角小于 10°)层层叠垒。风化侵蚀首先从底部的赵家庄组泥岩

收稿日期:2010-11-20; 修订日期:2011-04-11

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(D2008001160)资助。

作者简介:陈利江(1964-),男,陕西省华县人,副研究员,主要从事资源与灾害方面研究。E-mail: clj4088@163.com

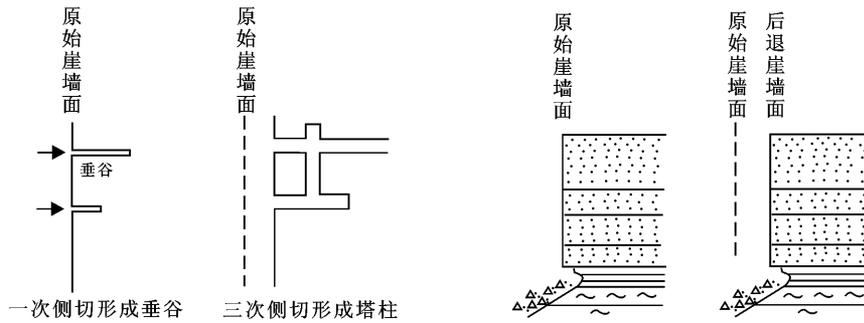
图1 嶂石岩地貌两种发育模式^[2]

Fig. 1 Sketch of landform development model in Zhangshiyan

层段开始,沿着近于水平的方向,软弱岩层被掏蚀,形成岩廊或岩洞(如回音壁下的岩廊、冻凌背的云中舞厅、鸳鸯洞等)。紧靠其上的上覆岩层象悬臂梁一样承受起自重及其上面百米厚岩层的压力。随着掏蚀程度的不断加深,其承受之压力(或称负载)也不断增加,当掏蚀深度(水平方向)达到一定数值时,上覆岩层开始卸荷塌落。塌落的方式包括错落(即整个岩块沿节理面整体塌落,但塌落的岩体整体性并未遭到破坏)和崩塌(即岩块在塌落过程中解体,崩解成更小的岩块或碎石并形成倒石堆)。错落直接导致陡崖后退,即一次性快速完成卸荷塌落,如正西套和小西套交界的岬角处的错落体等;而崩塌则可以一次性快速完成卸荷塌落(如九女峰三县隘西北翼在1966年邢台地震时的崩塌和2009年春季的崩塌),也可以逐次缓慢完成卸荷塌落。其中逐次缓慢卸荷塌落在沿岩块崖面由下向上逐次崩落的过程中,逐步向内、向上形成反梯状塌落面,最终造成整个崖壁的后退。如一线天岩廊、天闸(悬洞)、云中舞厅等处。导致上覆岩体卸荷塌落的掏蚀深度(水平方向)所达到的最大值为山体卸荷崩塌阈值,即当水平掏蚀深度超过崩落阈值时,便产生整个崖壁的后退运动。如果上覆岩层整体性较好,平行于崖面的垂直节理不够发育,山体卸荷的阈值可能较高,反之,山体卸荷的阈值较低。

一次大的陡壁崩塌后退可使下伏软弱岩层的掏蚀深度大为减小,甚至为零,整个山体处于稳定状态。但下伏软弱岩层水平掏蚀作用仍在进行,随着软弱岩层掏蚀深度的积累,达到阈值时,上覆坚硬岩层再次卸荷崩塌,造成陡崖又一次后退(图1b)。

总之,楔状横切机理主要是对总体格局的控制作用,即将大块的山体进行切割,支解为大小不同的块体;而水平掏蚀机理则主要造成各块体崖壁的

后退。二者是嶂石岩地貌发育演化的最主要机理。

1.3 嶂石岩地貌演化过程中的自相似性

受到构造和岩性的共同影响,嶂石岩地貌呈现为多种形态的地貌景观,包括正地貌中的长崖、台栈、断墙(石墙)、方山、排峰、石柱、残丘、孤石等,以及负地貌中的岩缝、垂沟、巷谷、岩廊、 Ω 型套谷等。但在同一演化阶段的不同区域(或部位),以及不同阶段的同一种形态,都保持了惊人的自相似性。

例如 Ω 型套谷,处于青年演化阶段的纸糊套、大西套、小西套、正西套等尽管尺度不同,但其所呈现的 Ω 形态完全相同,类似的 Ω 型套谷形态可以追踪到处于壮年演化阶段的莲头寨地区。甚至在老年阶段初期的九女峰地区,尽管背对背发育的 Ω 型套谷谷顶已相互重迭,形成九女峰排峰,但各自仍保持着清晰的 Ω 型套谷形态,从而使九女峰排峰中间南北贯通,两端则保持石墙形态;而在万丈红绫地区,沿着南北向大陡崖,一字排开的4个 Ω 型套谷在尺度、形态上亦完全可以类比,底栈至二栈间的陡崖处发育的 Ω 型套谷与其上二栈至三栈陡崖处发育的 Ω 型套谷亦如影随形。

重门锁翠景区(冻凌背)4道天然豁口,在形态和尺度上十分相似,发育于底栈顶部岩廊呈上平下斜楔状。在纸糊套、莲头寨、九女峰地区均呈现同一种形态;发育于二栈顶部的岩廊则呈现为以顶点为对称点,顶、底分别向上和向下倾斜的楔形。在冻凌背云中舞厅和乳泉寺亦如出一辙。

关于楔状横切机理中所论及的各级巷谷系统,在其空间展布与结构形态上亦非常相似。总之,由于受到同一因素的影响或制约,嶂石岩地貌中的各种地貌类型(包括正地貌和负地貌)均具有各自在时间、空间(包括横向和纵向)上的自相似性,符合曼德布罗特分形理论中的自相似规律^[5,6]。

2 嶂石岩地貌的发育阶段与地貌年龄

2.1 发育阶段

嶂石岩地貌不同地貌体的分布与组合表明,其发育过程经历幼年期、青年期、壮年期和老年期4个阶段。

1) 幼年期(长墙、岩缝、垂沟、巷谷形成阶段)。在甸子梁期夷平面^[7,8]形成以后,随着喜马拉雅构造运动第Ⅱ幕的开始,太行山中段地区的地壳快速隆起,从而使山体构造隆升,坚硬的石英砂岩岩层出露,并在其前缘形成陡崖^[9,10]。由于崖面上垂直节理,尤其是垂直节理密集带的存在,外营力便沿此侵蚀而发育成楔形岩缝,并向岩体内横向(或侧向)切入,如一线天、小天梯、槐泉寺、回音壁、冻凌背等崖壁上大小不等的岩缝。岩缝进一步发展而成为巷谷。

2) 青年期(方山、断墙、Ω型套谷形成阶段)。巷谷进一步扩大发育为障谷。障谷两壁又生成岩缝并发育成次级巷谷,如果相邻的巷谷间距在10~30 m间,则数个巷谷可组成一个套谷即Ω套谷。此阶段由于次级巷谷的延长,山体被分割成方山,方山进一步发育为断墙。如大王台、仙人台、古佛岩、喻玉崖等。

3) 壮年期(石柱、排峰形成阶段)。一方面障谷向下层侵蚀发育成叠套谷,另一方面更次一级的沟缝或巷谷将方山进一步切割成排峰、石柱。如鸡冠寨、九女峰等。

4) 老年期(块状残丘、孤石形成阶段)。排峰受到进一步侵蚀、分割而发育为塔柱(石柱),塔柱进一步风化而倒塌,形成块状残丘、孤石或块石堆,如白马垱等。标志着嶂石岩地貌一个发育过程或演化旋回的结束。

嶂石岩地貌在一个完整地貌旋回中,正地貌经历水平尺度远远大于垂直尺度(长崖、方山)到水平尺度远远小于垂直尺度(塔柱),再到水平尺度接近垂直尺度(残丘、孤石)的过程,而负地貌则经历了垂直尺度远远大于水平尺度(垂沟)至水平尺度大于或等于垂直尺度(巷谷),再到垂直尺度和水平尺度均消失的过程。

2.2 地貌年龄

在小天梯-白马垱剖面上,嶂石岩地貌发育演

化的幼年期地貌,如岩缝、垂沟、巷谷位于小天梯、一线天;青年期地貌,如方山、断墙位于莲头寨,Ω型套谷位于正西套;壮年期地貌,如排峰、石柱位于九女峰;老年期地貌,如块状残丘、孤石位于白马垱。即自小天梯至白马垱处于不同发育阶段的地貌体展示了嶂石岩地貌发育演化的全过程,保留嶂石岩地貌本轮演化旋回在空间上的完整记录^[8]。该轮演化自白马垱开始,最早的幼年期嶂石岩地貌岩缝、垂沟、巷谷切至白马垱一线,嶂石岩大陆崖位于白马垱以东。随着垂沟、巷谷系统的发育和嶂石岩大陆崖的向西后退,白马垱地区发育为方山、断墙和Ω型套谷,进入青年期地貌演化阶段,而此时的幼年期地貌已深入到九女峰一带。在随后的嶂石岩地貌演化过程中,白马垱一带逐渐进入壮年期和老年期,直至目前的残丘和孤石阶段,成为嶂石岩地貌演化旋回结束的标志;而九女峰一带则分别经历青年期、壮年期,目前已进入老年期的初期阶段;而莲头寨仅经历了幼年期和青年期,目前进入壮年期的初期阶段;目前的万丈红崖则标志着青年期演化阶段的开始;作为典型巷谷的小天梯、一线天目前呈现出幼年期地貌的典型特征。小天梯、一线天-白马垱剖面记录的嶂石岩地貌发育演化旋回(图2)。

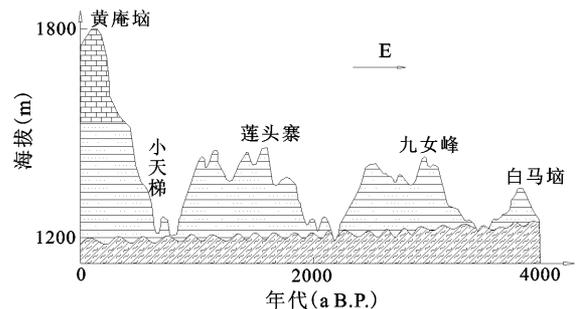


图2 黄庵垱至白马垱剖面

Fig. 2 Geomorphic section from Huangyan to Baiyannao

在1:5万地形图上进行剖面实测,白马垱距小天梯谷源距离为3 978 m,即白马垱一带的嶂石岩地貌演化旋回中,嶂石岩大陆崖后退3 978 m,按照1.35 mm/a或13.5 m/10⁴a推算^①,其所需时间为294.7 × 10⁴a,即嶂石岩地貌完整的演化旋回需时或生命期为294.7 × 10⁴a;同理,九女峰距小天梯谷源距离为2 790 m,演化至目前需时206.7 × 10⁴a;莲头寨距小天梯谷源距离为1 235 m,演化

① 河北省科学院地理科学研究所. 河北地貌环境及其形成演变. 2010.

至目前需时 91.5×10^4 a; 万丈红绫距小天梯谷源 (即小天梯巷谷的长度) 为 112 m, 其发育时间需 8.3×10^4 a。综上所述, 可以得出嶂石岩地貌演化的旋回周期 (嶂石岩地貌生命周期) 为 294.7×10^4 a, 其中老年期演化阶段 $A_1 = 88.0 \times 10^4$ a; 壮年期演化阶段 $A_2 = 115.2 \times 10^4$ a; 青年期演化阶段 $A_3 = 83.2 \times 10^4$ a; 幼年期演化阶段 $A_4 = 8.3 \times 10^4$ a。因此, 白马埡残丘、孤石地貌年龄 294.7×10^4 a B. P., 九女峰等石柱地貌的年龄是 206.7×10^4 a B. P., 莲头寨方山地貌的年龄是 91.5×10^4 a B. P., 小天梯巷谷地貌的年龄是 8.3×10^4 a B. P.。

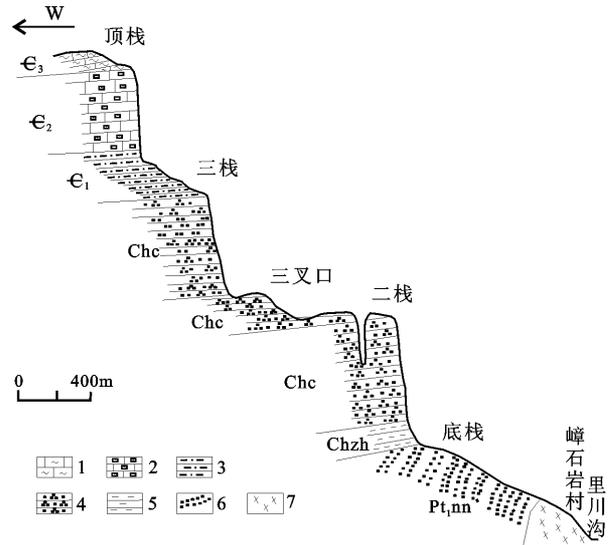
3 关于嶂石岩地貌发育问题的讨论

3.1 嶂石岩地貌发育的分层性

发育嶂石岩地貌的长城系——寒武、奥陶系地层产状平缓, 坚硬岩层与软弱岩层相间成层分布, 因而形成嶂石岩地区 600 m 高的阶梯状大陆崖。阶梯状陡崖在横断面上崖栈相间 (图 3)。其中赵家庄组、常州沟组二段、寒武系馒头组为软弱层被水平掏蚀, 发育岩廊或台栈, 而常州沟组一段、三段、寒武系张夏组为坚硬岩层, 发育陡崖, 因而形成嶂石岩地貌的分层发育, 即下伏的坚硬岩层成为上覆岩层地貌发育的暂时侵蚀基准面。但由于嶂石岩地貌一个完整旋回需时 294.7×10^4 a, 故以二栈后缘为掏蚀崖廊, 以常州沟组三段为陡崖的第二层, 嶂石岩地貌往往不能发育至老年期即被后退的一级大陆崖所干扰而形成叠套地貌; 而以三栈后缘为掏蚀崖壁廊, 以寒武系张夏组为陡崖的第三层, 嶂石岩地貌同样在发育过程中被后退的第二级大陆崖干扰而形成更上层的叠套地貌, 从而形成嶂石岩地貌发育的分层性和叠套性, 虽然有学者称其为晚第三纪旋回期和第四纪旋回期, 即不同时代的嶂石岩地貌^[11]。事实上, 其可能是嶂石岩地貌在同一时期、不同层位发育结果, 而非不同时期地貌。

3.2 Ω 型套谷的成因

野外考察过程中的现场观测表明, 嶂石岩地区发育的 9 个典型 Ω 型套谷中, 均未发现位于弧形套谷顶端的控制性断裂或节理密集带, 而在纸糊套 (天下第一回音壁)、正西套、小西套、大西套等 Ω 型套谷长达 200 ~ 300 m 的巨大弧形陡壁上, 间隔 10 ~ 30 m 的穿层节理或节理密集带则非常醒目。因此, Ω 型套谷的成因可能与节理 (或节理密集带) 的分布关系更为密切, 因为在小天梯、一线天



1. 条带状灰岩; 2. 泥晶灰岩; 3. 粉砂质页岩;
4. 石英砂岩; 5. 泥岩; 6. 变质砂岩; 7. 辉绿岩

图 3 嶂石岩地层剖面^[2]

Fig. 3 Geologic section of Zhangshiyuan

及其分支巷谷处, 由于节理密集带的间距均超过 30 m, 故均为沿节理密集带发育的独立巷谷而未演化成套谷^[12, 13]。

4 结 论

1) 地层的产状、岩性和构造裂隙 (节理或节理密集带) 是控制嶂石岩地貌发育的主导因素。中元古界长城系石英砂岩产状近于水平、岩性坚硬、节理发育, 厚达 402 m 的常州沟组红色石英砂岩下伏 15 m 厚赵家庄组紫红色泥岩使地貌营力得以沿节理密集带侧向切入而形成巷谷; 沿赵家庄组泥岩水平掏蚀发育岩廊, 从而导致上覆的常州沟组卸荷塌落而导致崖面的整体后退。二者伴随嶂石岩地貌发育的全过程。

2) 嶂石岩地貌演化过程中的岩缝、垂沟、巷谷、 Ω 型套谷、岩廊、陡崖等均呈现惊人的自相似形态, 符合曼德布罗特分形理论的自相似规律。

3) 嶂石岩地貌发育演化分为 4 个阶段, 即幼年期、青年期、壮年期和老年期。小天梯—白马埡剖面清晰展示嶂石岩地貌发育演化的全过程。据该剖面上处于不同发育阶段的地貌体之间的距离, 依据嶂石岩大陆崖后退速率, 计算出嶂石岩地貌的完整演化旋回或生命周期为 294.7×10^4 a, 其中幼年期为 8.3×10^4 a, 青年期为 83.2×10^4 a, 壮年期为 115.2×10^4 a, 老年期为 88.0×10^4 a。

4) 受长城系和寒武系地层岩性软硬相间的控制, 嶂石岩地貌发育呈现出明显的分层性, 即坚硬岩层成崖, 软弱岩层成栈。因此, 在嶂石岩地区, 三层大陆崖后退过程中均伴随着新的嶂石岩地貌体的形成。所以, 分层嶂石岩地貌均为第四纪地貌而非新第三纪和第四纪地貌。

5) 嶂石岩地貌会随着 600 m 大陆崖的后退而不断向西发展迁移。因此, 嶂石岩地貌中单个地貌体会随着时间的推移逐渐老化而消失, 但在老地貌体消失的过程中, 还会生成新的地貌体, 如九女峰景区的方山首先被北东-南西相向发育的套谷切割解体为南北向的北寨和东西向的南寨两堵石墙, 而北寨和南寨又分别被东西向和南北向巷谷切割成塔柱和排峰。目前方山痕迹全无; 位于其西侧的莲头寨则被南北、东西两组巷谷切割而出现解体迹象, 而位于莲头寨西北侧的馒头峰才刚刚被其西侧南北向巷谷切割而与万丈红绶大陆崖分离, 初具方山雏形。所以, 就整体而言, 嶂石岩地貌不会随着时间的推移而消失, 直至其发育的岩层、构造等发育基础不具备为止。

参考文献:

- [1] 郭 康. 嶂石岩地貌之发现及其旅游开发价值[J]. 地理学报, 1992, 47(5): 461~471.
- [2] 郭 康, 邱明慧, 张 聪, 等. 嶂石岩地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 25~54.
- [3] 朱 诚, 彭 华, 欧阳杰, 等. 浙江方岩丹霞地貌发育的年代、成因与特色研究[J]. 地理科学, 2009, 29(2): 229~237.
- [4] 王清濂, 刘劲松, 马志文, 等. 嶂石岩地貌再认识——分布规律、类型划分及美学特征[M]//中国地理学会地貌第四纪专业委员会. 地貌·环境·发展. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 287~291.
- [5] 周春林, 袁林旺, 刘泽纯, 等. 南京汤山地区的地貌与岩溶发育演化[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 47~51.
- [6] 艾南山, 陈 嵘, 李后强. 走向分形地貌学[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(1): 92~96.
- [7] 骆培聪, 张明锋. 福建丹霞地貌旅游景区客流时间分布特性及其影响因素[J]. 地理科学, 2010, 30(3): 377~383.
- [8] 吴 忱, 马永红, 张秀清, 等. 华北山地地形面地文期与地貌发育史[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1999: 180~201.
- [9] 高红山, 潘保田, 鄢光剑, 等. 祁连山东段河流阶地的形成时代与机制探讨[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 197~202.
- [10] 吴 忱, 张秀清, 马永红. 太行山燕山主要隆起于第四纪[J]. 华北地震科学, 1999, 17(3): 1~7.
- [11] 高亚峰, 焦慧元. 太行山嶂石岩地貌与云台山地貌特征[J]. 资源旅游, 2007, 2(4): 44~48.
- [12] 郭 康, 邱明慧, 马辉涛. 主宰“障石岩地貌”的两种坡面发育模式[J]. 地理学与国土研究, 1997, 13(1): 61~63.
- [13] 黄华芳, 李智广, 王 健, 等. 河北省平山县水帘洞遗址地质地貌环境初探[J]. 地理科学, 2010, 30(4): 630~635.

The Development Characteristics and Geomorphologic Age of Zhangshiyuan Landform

CHEN Li-jiang¹, XU Quan-hong¹, ZHAO Yan-xia¹, LI Qing-chen¹, ZHANG Jing-fang²

(1. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050011, China;

2. Middle School Affiliated to Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050011, China)

Abstract: Under the control of stratigraphic trend, structure and lithology, there are two slope development modes during the development progress of Zhangshiyuan Landform marked with the long red cliff, which are the wedge-shaped lateral cutting mode with cutting the cliff to form lane valley, and the horizontal digging mode with digging horizontally at the foot of the cliff to form rock porch leading to the cliff collapse back. The lane valley, rock porch and the Ω -shaped valley have the respective self-similarity features in different location or scale. The cycle of Zhangshiyuan Landform development is 294.7×10^4 a. It can be divided four stages: infancy stage lasted for as long as 8.3×10^4 a, young stage 83.2×10^4 a, robust stage 115.2×10^4 a and old stage 88×10^4 a. In Zhangshiyuan region, Zhangshiyuan landform is layered clearly, caused by hard stratum alternating with soft stratum but not the different stages of Zhangshiyuan landform.

Key Words: Zhangshiyuan landform; geomorphologic evolution; self-similarity; geomorphologic age