

云台山世界地质公园瀑布成因分类研究

贾丽云¹⁾, 张绪教^{1)*}, 杨东潮²⁾, 周轶群¹⁾, 樊克锋²⁾, 张晋喆¹⁾,
王兴民²⁾, 宫程²⁾

1) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2) 河南省地质矿产勘查开发局第二地质队, 河南郑州 450001

摘要: 地貌的分类是地貌学研究的重要内容之一, 成因分类又是地貌形态分类的基础。瀑布既是一种非常重要的造景地貌, 又是地质公园重要的地质遗迹及旅游资源, 因此, 对瀑布进行系统的成因分类学研究, 对提升瀑布的科学价值及旅游价值均具有非常重要的意义。云台山世界地质公园是我国第一批世界地质公园, 园区分布有规模不等、形态各异、成因多样的瀑布及瀑布群, 为瀑布成因分类研究提供了极好的素材。通过详细的野外地质调查, 根据瀑布发育的构造条件、岩性差异、水动力条件、岩溶及人工作用等方面, 将瀑布按成因划分为岩槛型、裂点型、断裂型、溶蚀型、钙华型和人工型等 6 类。本研究提升了云台山瀑布研究的科学价值, 同时也为瀑布的分类学提供了参考方案。

关键词: 瀑布; 成因分类; 地质公园; 云台山

中图分类号: P931.1; K878; F592.99 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.02.13

Genetic Classification of Waterfalls in Yuntai Mountain World Geopark

JIA Li-yun¹⁾, ZHANG Xu-jiao¹⁾, YANG Dong-chao²⁾, ZHOU Yi-qun¹⁾, FAN Ke-feng²⁾,
ZHANG Jin-zhe¹⁾, WANG Xing-min²⁾, GONG Cheng²⁾

1) *China University of Geosciences, Beijing 100083;*

2) *No. 2 Geological Party, Henan Bureau of Geology and Mineral Resources, Zhengzhou, Henan 450001*

Abstract: The classification of physiognomy is an important part of geomorphology, and genetic classification is the basis for the classification of landforms. The research on the classification of waterfalls can increase the scientific and tourism value, as the waterfalls are not only very significant landscapes but also important geological heritages and tourism resources in geoparks. Waterfalls and waterfall groups of different sizes, types and geneses are distributed in Yuntai Mountain World Geopark, which provide good materials for the study of genetic classification of waterfalls. This paper has summarized the genetic classification and characteristics of waterfalls through field geological investigation in the Yuntai Mountain World Geopark. According to tectonic activities, lithologic conditions, dynamic action, karst deposits and the influence of human activities on the development of Yuntai Mountain World Geopark, the waterfalls can be classified into threshold waterfalls, knick-point waterfalls, faulted waterfalls, karst corrosion waterfalls, tufa waterfalls and artificial waterfalls. The results not only provide scientific evidence for improving the potential value of waterfalls in geo-tourism but also play a reference role in the study of waterfall classification.

Key words: waterfalls; genetic classification; geopark; Yuntai Mountain

本文由河南省财政厅“2006年云台山世界地质公园地质遗迹保护”专项基金资助项目(编号: 2006-HJ-3)资助。

收稿日期: 2011-12-14; 改回日期: 2012-01-14。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 贾丽云, 女, 1982年生。硕士研究生。从事地理学专业地貌与新构造运动方向研究。E-mail: 13933890787@139.com。

*通讯作者: 张绪教, 男, 1964年生。博士, 副教授。主要从事地貌与第四纪地质、新构造运动的教学及科研工作。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路29号。电话: 010-82322082。E-mail: zhangxj@cugb.edu.cn。

地貌的成因,是地貌学非常重要的研究内容之一。景观地貌在地质遗迹中所占比重很大,其成因研究对地质公园建设有重要意义(张绪教等,2005)。随着地质遗迹调查研究工作的深入和拓展,地质遗迹的分类研究也越来越完善(赵汀等,2009),但对某一类地貌景观在成因上的详细分类还有待加强。瀑布,既是一种景观地貌,又是地质公园重要的地质遗迹及旅游资源。近年来,国外对瀑布成因的研究,大多以某一地区瀑布的地质背景、形成条件和演化机理等方面为主(Bartorelli, 2000; Hayakawa et al., 2008; Lamb et al., 2007),如美国、加拿大的尼亚加拉瀑布和巴西的伊瓜苏瀑布(Hayakawa et al., 2009, 2010)。国内瀑布的研究主要集中在黄果树瀑布、雅鲁藏布大峡谷瀑布、黄河壶口瀑布(龚明权等,2009)等地。罗德仁(1987)最早对黄果树瀑布群的成因进行研究;20世纪90年代中国科学院青藏高原综合科学考察队对雅鲁藏布大峡谷进行科考探险,并对其发现的瀑布群有较详细的成因研究,其研究成果将我国的瀑布成因研究提升到了一个较高的层次(杨逸畴,1999);屈茂稳等(2002)、张兆琪等(2009)曾从构造、基岩岩性以及外力作用等方面对黄河壶口瀑布成因进行分析。

而关于瀑布的成因分类,20世纪60年代Schwarzbach(1967)对冰岛的瀑布群进行过成因分类,把冰岛的瀑布分为侵蚀型和堆积型两大类,侵蚀型又分为17小类,堆积型分为2小类,另外,Alexandrowicz(1994)曾对外巴尔喀阡山地质作用控制的瀑布进行分类。国内对瀑布的成因分类研究,只在旅游资源学方面有所提及(甘枝茂等,2007),而对某一地区详尽且有实例的成因分类研究还极少。由此可见,瀑布的成因分类研究有待加强。研究瀑布的成因类型,一方面有助于研究地貌的成因及演化历史、提升地貌景观的科学价值;另一方面,也有助于开发瀑布的旅游价值,带动当地的地质旅游及

经济发展。因此,对瀑布进行成因分类,不仅具有重要的理论意义,而且具有一定的现实意义。

云台山世界地质公园位于豫西北的焦作市,地处太行山南端晋豫两省结合部,是一处以地质构造、地貌景观、水体景观为特征,集科学价值与美学价值于一体的综合性世界地质公园(樊克锋,2004)。在该园区分布有规模大小不等、形态各异、成因多样的瀑布及瀑布群,为瀑布成因分类研究提供了极好的素材。对该区域不同类型的瀑布进行成因分类研究,不仅可以分析其形成的地质背景,为瀑布的分类学提供参考方案,还可以开发云台山瀑布在地质旅游方面的潜在价值。

1 瀑布分类原则及方法

瀑布的分类方法多种多样。有按水流量的洪枯多寡、跌水次数分类的,有按瀑布本身的气势、造型分类的,也有按瀑布的分布特点、瀑面形态、水文地质条件及产生的环境条件等等分类的(罗正富,1990),如表1所示。

在地貌分类中,成因分类是根据地貌形成的最主要的动力及影响因素而进行的一种分类方法,既可以有单一成因分类方式,也可以有多成因分类方式,因此在地貌分类学里,成因的分类是最重要,也是最复杂的。瀑布的成因分类也是如此,因为形成瀑布的陡崖或陡坎的成因有很多种,而表现形式基本都是水体的落差。在瀑布的成因分类研究中,分析造成瀑布水流落差的岩石陡坎的形成原因是关键。以此为基础对瀑布进行分类,是瀑布成因分类的出发点。

云台山世界地质公园瀑布的成因分类研究,是根据形成瀑布流水落差陡坎的主要因素——构造条件、岩性差异、水动力条件、岩溶以及人工作用等几方面进行的,公园里各种类型瀑布的成因并不是单一的,本分类仅按当今瀑布陡坎形成的主要原因进行分类。

表1 瀑布的多种分类
Table 1 The classification of waterfalls

分类依据	瀑布种类
水流量的洪枯多寡	常年瀑布、季节性瀑布和偶发性瀑布
跌水次数	单级瀑布和多级瀑布
气势、造型	雄壮型和秀丽型等类型
产生的环境条件差异	江河干支流上的瀑布、山岳涧溪瀑布和地下飞瀑
分布特点	孤立型瀑布和群体型瀑布
瀑面形态	幕帘型、新月型、分流型、人字型、蛇影型
水存在的状态	水流型、冰川型、冰水交替型
水文地质条件	地表逸流型、暗流型、泉水型、溶洞型、落水洞、天窗型等

2 云台山世界地质公园瀑布形成的地质背景

云台山世界地质公园内的瀑布, 主要分布在云台山园区子房河与青龙峡园区青龙河的中上游(图1), 其它园区也有少量分布。

公园主要出露的寒武纪、奥陶纪地层形成于中朝地台长期稳定发展的地质历史时期(杨欣德等, 2000), 主要岩性为石英砂岩、灰岩、泥岩及白云岩。地层岩性对瀑布地貌景观的形成起到了重要作用, 软硬岩层互层的特点和抗侵蚀能力的不同为岩槛型瀑布的发育创造了有利条件; 不同岩性的含水性及透水性的不同, 造成大气降水在岩石中垂直下渗时, 水流方向由垂直运动状态改为水平运动状态, 进而切穿山体顺崖壁流下是溶蚀型悬瀑形成的重要原因。

研究区内以间歇性、差异性、及掀斜性的抬升运动为主要特点的新构造运动对公园景区瀑布的形成起了主导作用(王凤云等, 2005)。云台山景区内, 对瀑布景观形成起到控制作用的主要是一组走向近东西向的正断层, 断层北侧地层的抬升速率高于南侧的抬升速率, 这种差异性的抬升运动使得软、硬不同岩性的岩层处在同一水平面上, 流水常时间在软、硬不同岩层上的侵蚀, 致使较软岩层先被剥蚀、

掏空, 岩层中发育的两组近垂直的节理裂隙, 则加剧了较硬岩层的崩塌, 造就了公园内以裂点型瀑布和断裂型瀑布为主的特点。

综上所述, 软硬岩石互层的地层特点、差异性的抬升运动、水流的侵蚀作用、构造裂隙的发育以及一定的岩溶作用, 共同造就了云台山世界地质公园成因多样、形态各异、美轮美奂的瀑布景观。

3 云台山世界地质公园瀑布的成因分类及特征

根据上述瀑布成因分类的原则与野外地质调查, 并结合云台山世界地质公园地质背景及主要景区瀑布的分布情况, 云台山世界地质公园的瀑布按成因类型可分为: 岩槛型瀑布、裂点型瀑布、断裂型瀑布、钙华型瀑布、溶蚀型悬瀑和人工型瀑布。

3.1 岩槛型瀑布

岩槛型瀑布, 是指河床基岩软、硬相间, 由于二者抗流水侵蚀能力的差异, 导致较坚硬的岩石形成陡坎, 而软弱岩石则被侵蚀成平台, 在河床上形成“岩槛”, 进而使流水产生落差而形成的瀑布。

岩槛型瀑布的规模大小及分布特征既与其形成的时间有关, 也和河床基岩的岩性有关。由于流水作用是一个长期而缓慢的过程, 对河床基岩的侵蚀需经较长时间才能形成高差较大的岩槛, 但如果河

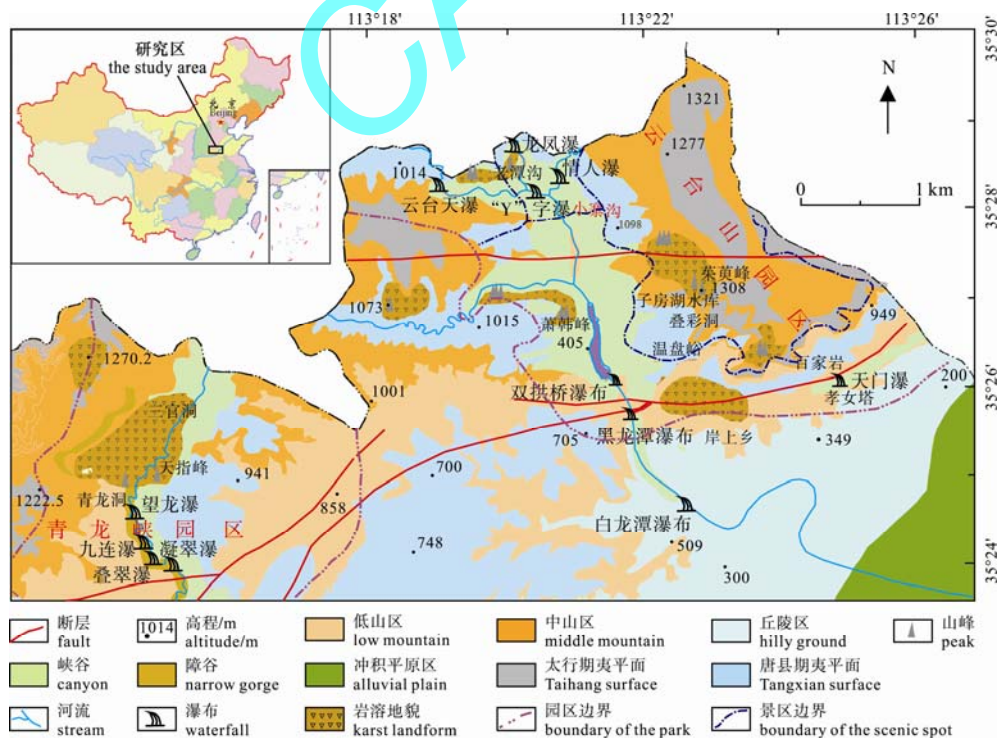


图1 云台山世界地质公园主要瀑布分布图
Fig. 1 Waterfall distribution in Yuntai Mountain World Geopark

床基岩软硬相间的岩层厚度差异不大,即使时间较长,形成的岩槛型瀑布落差也会较小。当软硬相间岩层在流域多次重复时,河流溯源侵蚀过程中,在软弱岩石的层面上易形成缓倾的平台,而坚硬的岩石则成为岩槛,该过程逐级向河流上游方向进行,便形成了多级岩槛型瀑布。岩槛型瀑布成群出现,常形成层层叠瀑、潭瀑相连、错落有致的瀑布群景观,成为地质公园中极具美学观赏价值的造景地貌。

在云台山世界地质公园的五个园区中,岩槛型瀑布主要发育在青龙峡园区和云台山园区,青天河园区仅有少量分布。在青龙峡园区,从青龙河下游沿着河谷向上,发育大量岩槛型瀑布,层层叠加,形成一个颇具规模的瀑布群。每级瀑布落差不大,最大落差为8 m,最小落差仅为1 m,由于水量充沛,流量较大。

青龙峡中叠翠瀑即为岩槛型瀑布(图版 -1),河床中出露中寒武统张夏组(C_{2z})中厚层白云岩与中薄层泥灰岩互层。白云岩抗侵蚀能力相对较强,属于能干层,在流水作用下不易被侵蚀;而泥灰岩属于软弱层,抗侵蚀能力相对较弱,在流水作用下容易被侵蚀,两者抗侵蚀能力的差异是岩槛型瀑布形成的主要原因。在河流的下切过程中,遇到较软弱的泥灰岩层时,侧方侵蚀作用加强,致使河谷变宽,形成平坦宽阔的河谷地貌。当河流的溯源侵蚀进行到一定阶段,遇到抗侵蚀能力较强的中厚层白云岩地层时,河流侵蚀的速度减缓,厚层的白云岩便形成一个陡坎,水流的冲刷和侵蚀作用在瀑布的下方形成冲蚀坑,进一步加大了瀑布的落差,形成典型的岩槛型瀑布(图2)。

云台山地区分布较广的中寒武统张夏组(C_{2z})和

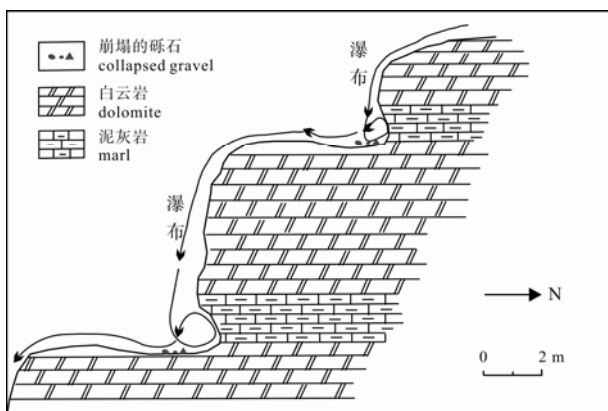


图2 青龙峡中叠翠瀑形成剖面示意图
Fig. 2 Schematic profile of Diecui waterfall in Qinglong canyon

中奥陶统马家沟组(O_{2m})白云岩、灰岩与泥岩、泥灰岩互层,真厚度达590 m(中华人民共和国国土资源部,2003),包含多个厚度不等的软、硬韵律层,因而在河谷中形成了数量众多的岩槛型瀑布。云台山小寨沟中的“丫”字瀑(图版 -5)以及青天河上游地段的九连瀑属于该类型的瀑布。不同岩石的岩性差异是岩槛型瀑布形成的主要因素,河流的溯源侵蚀也是重要条件,两者相辅相成,缺一不可。此外,岩石的崩塌对岩槛型瀑布的形成也起到一定的辅助作用,它们共同造就了云台山世界地质公园岩槛型瀑布群的独特景观。

3.2 裂点型瀑布

裂点是由于河流侵蚀基准面下降所引起的河流的下切与溯源侵蚀过程中,溯源侵蚀所达到的那一段河床向上的地貌陡坎或坡折(曹伯勋,1995)。裂点型瀑布是由裂点导致河床的落差增加而形成的瀑布。

影响裂点形成的主要因素包括河床上基岩岩性的差异、新构造活动和溯源侵蚀过程中的岩块崩塌等(赵逊等,2005)。裂点型瀑布落差的大小与岩性和溯源侵蚀的时间有关。由于构造运动引起地壳抬升、侵蚀基准面下降,河流溯源侵蚀形成裂点,裂点的形成又加剧了河流的溯源侵蚀作用,从而增大瀑布陡坎的高度,所以,裂点型瀑布的高差与新构造运动的幅度和期次密切相关。由于河流主流线一般靠近河谷的中间,所以河谷的中间部位易被先侵蚀崩塌,故裂点型瀑布形态上前缘呈弧状弯曲。因此地壳的抬升运动、河流的侵蚀作用、崩塌作用以及地层岩性的差异共同造就了裂点型瀑布。

云台山世界地质公园中,裂点型瀑布主要分布在云台山园区。其中落差高达314 m的“云台天瀑”为最典型、壮观的裂点型瀑布(图版 -7),也是云台山世界地质公园的主要景观之一。

云台天瀑的形成与构造运动导致的地壳抬升、河流溯源侵蚀形成的裂点有关。本区仅在新近纪(N)以来就发生过两次大规模的间歇性抬升运动,分别以太行期和唐县期的夷平面解体为标志。第四纪以来,唐县期夷平面解体之后,云台山地区又共发生了六次抬升运动(马寅生等,2007;张绪教等,2011)。早期大幅度的构造抬升导致河流强烈下蚀,当下切到抗侵蚀能力较弱的寒武纪下部地层时,下部基岩的侵蚀速率要大大高于中上部基岩,底部极易形成侵蚀凹槽或穴,致使上部厚层灰岩或白云岩失去支撑,在重力作用下发生大规模崩塌,使瀑布陡坎进一步加大;多次构造抬升,逐渐形成每一级裂点,

如图 3-1、3-2 是云台天瀑形成的初期阶段。第四纪构造抬升运动使河流继续下切, 不断形成新的裂点然后发生崩塌, 直至形成现在雄伟壮观、高差达 314 m 的云台天瀑 (图 3-3、3-4)。

3.3 断裂型瀑布

水体沿断层崖跌落形成的瀑布称为断裂型瀑布。在较坚硬的岩层中, 断裂作用常形成断层崖, 当水流顺崖壁流下时便会形成瀑布。断裂型瀑布形成的原因主要是断裂作用。

断裂型瀑布主要为正断层所致, 水流分布于断层面上, 落差即为断层两盘的断距, 因此瀑布的规模大小与正断层的断距有关。断裂型瀑布在野外识别时, 可以通过观察瀑布前缘陡坎是否平直、河谷两岸是否能追索到同期断裂面等证据来判断, 在形态上与裂点型瀑布的主要区别是断裂型瀑布较平直, 而裂点型瀑布一般顶部崖壁形态呈弧形弯曲。

云台山世界地质公园中断裂型瀑布主要分布在云台山园区, 以百家岩孝女塔北部天门瀑(图版-3)及红石峡沟口黑龙潭瀑布(图版-8)为代表。前者的落差达到 125 m, 后者的落差也达 25 m, 两者的形成均与构造活动有关, 断裂作用是这类瀑布形成的主要原因。在黑龙潭瀑布和天门瀑的南侧即

为 NEE 走向的黑龙神庙断层, 该断层在晚新生代以来发生过强烈的活动, 形成断层面南倾的正断层。断裂活动导致北侧质地坚硬的中元古界云梦山组(Pt₂y)石英砂岩上升, 南侧中奥陶统马家沟组(O₂m)质地相对软弱的灰岩、白云岩下降, 二者呈断层接触, 形成了高差较大的朱红色石英砂岩岩壁, 流水顺势而下, 形成天门瀑及黑龙潭瀑布等断裂型瀑布景观(图 4)。

3.4 钙华型瀑布

钙华型瀑布, 即流水中溶解的碳酸钙由于温度、压力的改变或生物作用的影响, 溶解度降低而在河床中沉淀堆积成钙华台地, 造成河床相对高差的加大而形成的瀑布。

钙华的形成既受气候、水文地质条件的控制, 又受河床岩性及地貌条件的影响。河水流经碳酸盐岩地区时, 水中会溶解大量的 CaCO₃, 当遇到枯水季节或地貌条件的影响, 压力、温度和水分蒸发等因素造成 CO₂ 溶解度降低不断逸出时, CaCO₃ 便会过饱和和沉积下来(刘再华等, 2009), 形成钙华堆积。由于钙华沉积的速率较慢, 在较短的时间里难以形成厚度较大的钙华, 现代河床中发育的主要为较年轻的钙华台地, 故钙华型的瀑布一般落差都不是很

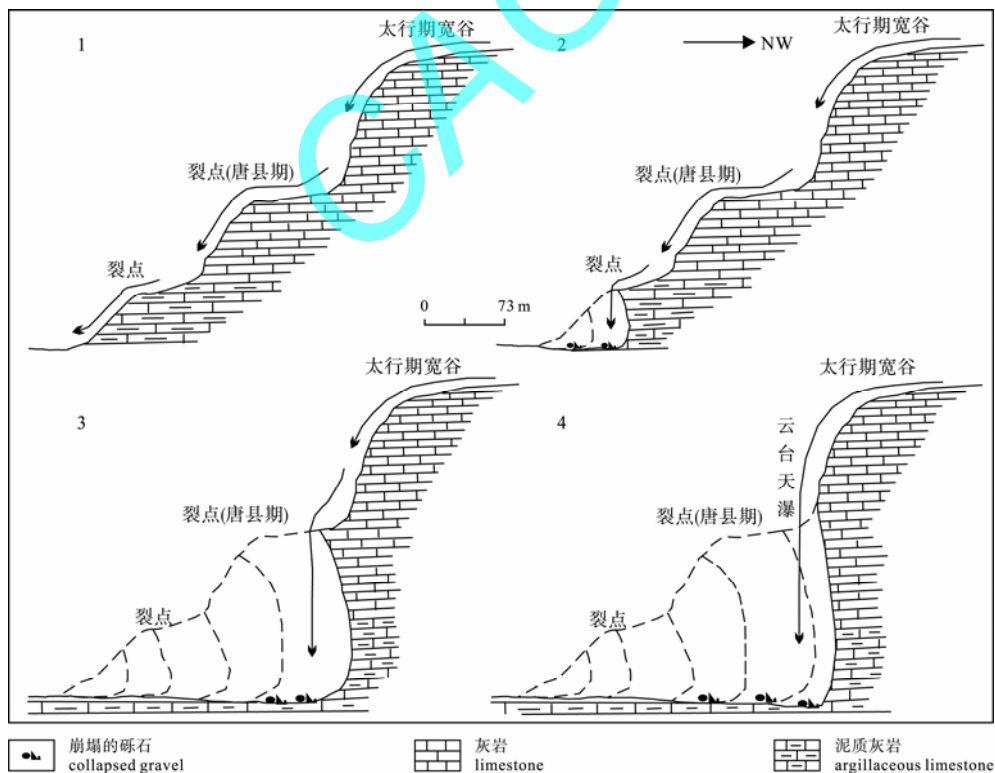


图 3 云台天瀑形成剖面示意图

Fig. 3 Schematic profile of Yuntai waterfall

3-1-地壳抬升, 河流下切; 3-2-溯源侵蚀; 3-3-继续溯源侵蚀; 3-4-形成云台天瀑;

3-1-beginning of the stream downcutting as a result of crustal uplift; 3-2-head erosion; 3-3-continuation of head erosion; 3-4-formation of Yuntai Waterfall

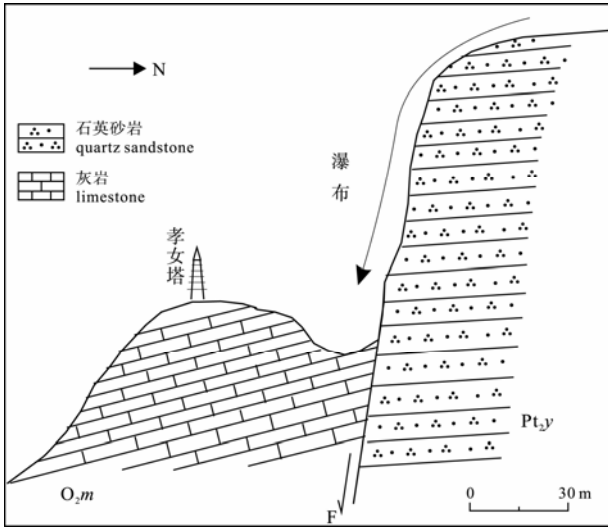


图 4 天门瀑形成剖面示意图
Fig. 4 Schematic diagram showing the formation of Tianmen waterfall

大。钙华的形成受季节性水流的影响较大，湿热的雨季，河谷中水流流速快、地表径流 CO_2 含量高、水体中 $CaCO_3$ 的溶解度相对较大(Liu et al., 2007; 王海静等, 2011)、沉积区钙华沉积速度较快，因此形成的钙华厚度大；而干旱的枯水季则刚好相反，无论是钙华的厚度还是台地的规模都比较小。不同气候轮回形成的钙华层不断加大地形的高差，进而形成了钙华型瀑布。

碳酸盐岩岩性、流水的化学溶蚀与沉积作用以及气候环境是影响钙华型瀑布形成的三个主要因素。公园内钙华景观主要分布在青龙峡园区，该区主要地层为灰岩、白云岩等碳酸盐岩地层，且产状近水平，为钙华瀑布的形成提供了基础条件。其它园区如云台山园区、青天河园区也有少许分布。

望龙瀑的第一级瀑布为钙华型瀑布(图版 -2)。在形成初期的丰水季节，水流经过碳酸盐岩区(运移区)溶解了大量的 $CaCO_3$ ，加上有利的地貌条件，如地形较平缓处(沉淀区)，压力变小，水层变浅，水中的 CO_2 极易蒸发，使 $CaCO_3$ 过饱和和沉淀下来，形成层状钙华堆积。枯水季节，岩坎处水流量非常小，水与空气充分接触，水中的 CO_2 蒸发加快，过饱和的 $CaCO_3$ 便沿细流逐层沉淀，形成钙华，这样，钙华逐年堆积导致河床陡坎增加，便形成了钙华型瀑布(图 5)。

3.5 溶蚀型悬瀑

溶蚀型悬瀑是指地下溶洞或暗河中的地下水体从崖壁上岩溶洞穴口流出、悬挂于崖壁而形成的瀑布。

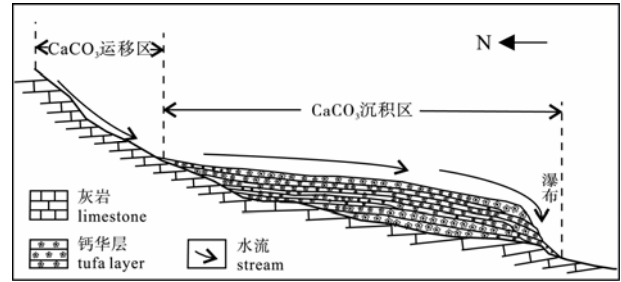


图 5 钙华型瀑布形成剖面示意图
Fig. 5 Schematic profile showing the formation of tufa waterfall

溶蚀型悬瀑的形成也同岩溶作用密不可分，但与钙华型瀑布不同之处在于它是与岩溶的溶蚀作用有关，而钙华型则与岩溶的沉积作用有关。在垂直循环带中，地表水向地下垂直渗流，当遇到局部隔水层时，形成上层滞水，此时地下流水的运动方式由垂直运动改为水平运动，形成水平循环带，这是可溶性岩层与隔水层接触界面上发育的水平溶洞形成的主要原因(赵逊等, 2005)。地下溶蚀作用在可溶性岩石中形成的水平溶洞或者暗河，是该种瀑布形成的基础及早期阶段。

当地壳抬升时，会导致地方性侵蚀基准面的下降、河流的下蚀作用加强，当河流侵蚀作用下切至岩溶洞穴底板之下时，地下溶洞则会出露地表、洞口悬挂于陡崖之上，原来在地下溶洞或暗河中水平流动的地下水体，顺着陡壁下泻，形成悬挂于谷壁的溶蚀型悬瀑。根据溶洞规模的大小和水流季节性，溶蚀型悬瀑的流量与形态不尽相同。

在云台山世界地质公园景区内，出露厚度近 1000 多米的寒武—奥陶纪的碳酸盐岩，加上丰富的地下水以及构造裂隙的发育，为岩溶作用创造了有利的条件。景区内主要发育中奥陶统马家沟组中厚层白云岩和灰岩夹中薄层的页岩、泥岩及泥灰岩。上部白云岩及灰岩裂隙比较发育，厚度较大。而下部岩性较软弱的泥岩、页岩则构成了不透水的隔水层。当大气降水沿着岩石裂隙下渗，遇到隔水层时，水流的运动方式由垂直运动改为水平运动，促进了水平溶洞的形成，当水流从岩石裂隙处或者溶洞中流出时，即形成了奇特的悬瀑。该类瀑布景观主要发育在云台山园区与青龙峡园区，云台山园区“龙凤壁”即为典型的溶蚀型悬瀑景观(图版 -6)，在青龙峡园区，青龙河谷壁上能观察到不同海拔高度上的溶蚀型悬瀑(图 6)。

对云台山四个园区主要 25 个溶洞的分布高程统计发现，全区溶洞分布主要集中在 1100 ~

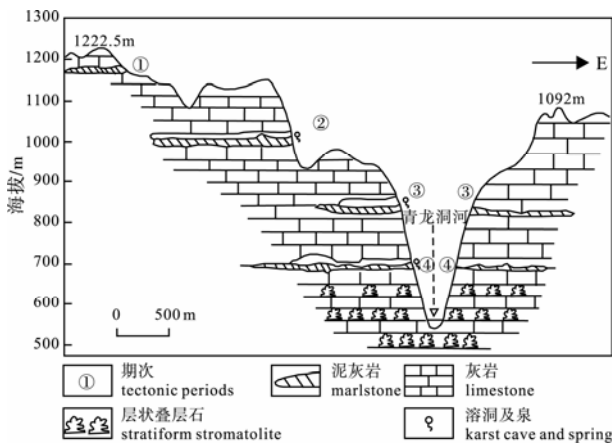


图6 青龙峡景区溶蚀型瀑布发育示意图 (据赵逊, 2005 修改)

Fig. 6 Schematic diagram showing the formation of karst corrosion waterfall in Qinglong Canyon(modified after ZHAO Xun, 2005)

1200 m、750 ~ 850 m、450 ~ 500 m 三个高度范围(图7), 溶洞高程分布具有较好的规律性。不同高度的水平溶洞的形成规模及发育位置是由当时地下水位控制的, 只有当地下水位比较稳定, 水平溶蚀作用持续时间较长时才能在地下潜水面附近形成一定规模的溶洞(张绪教等, 2011)。所以, 水平岩溶洞穴的发育应该说明当时地壳处于稳定期, 由于后期多次构造运动的抬升, 使其现今分布于不同高度之上(图6)。其中最早的第1期水平溶洞由于形成时间较长, 海拔较高, 已经没有地下水出露, 其余3期水平溶洞仍有地下水流动, 形成了多级溶蚀型悬瀑。

3.6 人工型瀑布

由人工作用导致流水从高处向低处跌落而形成的瀑布称为人工型瀑布。如通过人工筑坝、管渠引流等方式使水体升高后跌落形成的瀑布都属于人工

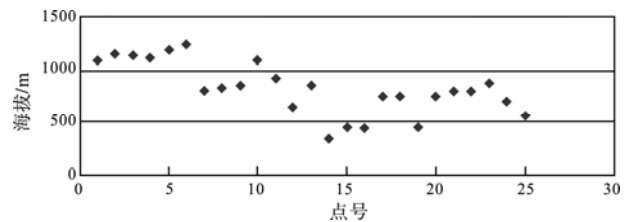


图7 云台山地质公园溶洞海拔分布图 Fig. 7 The elevation distribution of caves in Yuntai Mountain World Geopark

型瀑布。

这些人工瀑布景观虽然没有大自然的鬼斧神工, 但它们借自然之形, 仿自然之性, 引自然之象, 循自然之理(张琪等, 2010), 与周围景致协调一致, 弥补美感空缺, 往往也具观赏价值成为景观的焦点。

在云台山世界地质公园, 景色最为绮丽的人工型瀑布当属云台山园区红石峡中的双拱桥瀑布(图版-4), 朱红色的砂岩堤坝在河床中拦腰筑起, 形成落差达近10 m的瀑布。另外, 在青天河园区和青龙峡园区也可见到少量的人工型瀑布。

总之, 通过对云台山世界地质公园的瀑布景观进行成因分类研究, 将各个园区的瀑布根据成因进行了系统分类, 依次划分为岩槛型、裂点型、断裂型、钙华型、溶蚀型以及人工型瀑布, 同时, 本研究对各类瀑布的形成动力、影响因素及主要特征等进行了系统总结(表2), 为今后其它区域瀑布的研究提供了思路和参考。

4 结论与讨论

通过对云台山世界地质公园详细的野外地质考察与综合研究, 不仅对瀑布进行了成因分类, 而且总结出各类瀑布在野外的识别标志: 岩槛型瀑布的规模与区内较坚硬岩层厚度相关, 若厚度较小往往

表2 云台山地质公园瀑布成因分类及特征 Table 2 Genetic classification and characteristics of waterfalls in Yuntai Mountain World Geopark

瀑布类型	形成动力	影响因素	主要特征	典型代表
岩槛型	差异侵蚀作用	岩性差异; 河流溯源侵蚀; 构造活动	与区域差异地层厚度有关, 一般成群分布; 层层叠瀑, 潭瀑相连, 错落有致	青龙峡园区: 小寨沟中的“Y”字形瀑布; 青天河上游的叠翠瀑、九连瀑等
裂点型	下蚀作用、溯源侵蚀; 重力崩塌作用	侵蚀基准面的变化; 水体流量; 岩性及构造	规模一般较大, 落差大; 瀑布前缘呈弧形凹进	云台山园区: 云台天瀑
断裂型	断裂作用	岩性、断裂性质及断距	沿断裂分布; 瀑布前缘陡崖较平直; 断裂可追踪	云台山园区: 天门瀑, 黑龙潭瀑布
钙华型	流水中钙质的化学沉积作用	气候因素; 岩性; 地表水文地质条件	气候温湿; 钙华台地前缘凸出; 一般落差不大	青龙峡园区: 望龙瀑
溶蚀型	岩溶作用, 下蚀作用	地层岩性; 气候; 地下水文地质条件	溶洞洞口悬挂于谷壁, 水流量受季节影响	青龙峡与云台山园区: 龙凤瀑
人工型	人工活动	园区规划; 自然地理条件	分布在旅游景点; 与周围景致协调	云台山园区: 双拱桥瀑布

成群分布,形成层层叠瀑,潭瀑相连,错落有致的景观;裂点型瀑布规模和落差都较大,并且瀑布前缘呈弧形弯曲;断裂型瀑布则沿断层分布,顺河谷谷壁可追踪到断裂构造,其前缘形态较平直,这也是在形态上区分裂点型和断裂型瀑布的关键;钙华型瀑布在岩坎处发育层状钙华台地,河床凸出,一般落差不大;溶蚀型悬瀑一般发育在水平溶洞水流流出谷壁处,大小不一、形态各异,在同一区域往往发育有不同高度的多级溶蚀型悬瀑;人工型瀑布明显有人工作用的痕迹,比如管渠引流或人工筑坝加大水体落差等,但若能做到人工与自然景观的协调,依然能增加景区的灵秀之美。

大多数瀑布都是多成因瀑布。有些岩槛型瀑布在后期会有钙华堆积而形成钙华型瀑布,如叠翠瀑形成瀑布陡坎的主要原因是地层岩性差异,但由于当地的气温、湿度等条件合适,其上也有钙华堆积,后期可能朝钙华型瀑布发展;有些裂点型瀑布在后期受到了断裂影响;有些溶蚀型悬瀑会受到钙华堆积、断裂的影响;有些成因类型的天然瀑布经过人为作用后成为人工型瀑布,如青龙峡园区中的盘龙瀑等等。

另外,在对陕西商南金丝峡等其它地质公园的瀑布进行考察时,根据各成因类型的特征及野外识别标志均能从上述六类中找到其对应的类型,说明上述瀑布的成因分类具有一定的普遍性和参考价值。当然,由于调查范围的局限性,瀑布成因分类可能还不是十分的全面,需要进一步补充和完善,使瀑布成因分类系统更加全面、客观和科学。

总之,以云台山世界地质公园具典型代表性的瀑布为例,并结合陕西商南金丝峡等地质公园的考察,对瀑布的成因进行分类研究,把瀑布按成因分为岩槛型、裂点型、断裂型、钙华型、溶蚀型及人工型六类,并分别讨论了它们的形成动力、影响因素及主要特征。本研究不仅提升了云台山瀑布研究的科学价值,而且为瀑布的分类学提供了参考方案。

参考文献:

曹伯勋. 1995. 地貌学及第四纪地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 50-51.

樊克锋. 2004. 云台山世界地质公园地质概况[M]. 北京: 中国大地出版社: 20-25.

甘枝茂, 马耀峰. 2007. 旅游资源与开发[M]. 天津: 南开大学出版社: 65.

龚明权, 马寅生, 田明中, 陈英玉. 2009. 黄河壶口瀑布国家地质公园旅游资源评价[J]. 地球学报, 30(3): 325-338.

刘再华, 田友萍, 安德军, 王海静, 唐淑, 张金流, 孙海龙, 刘彦, 张清明. 2009. 世界自然遗产-四川黄龙钙华景观的形成与演化[J]. 地球学报, 30(6): 841-847.

罗德仁. 1987. 黄果树瀑布群成因初探[J]. 贵州地质, 10(1): 99-102.

罗正富. 1990. 瀑布及其类型的划分[J]. 四川地质学报, 10(4): 275-300.

马寅生, 赵逊, 赵希涛, 吴中海, 高林志, 张岳桥, 赵汀, 吴珍汉, 扬守政. 2007. 太行山南缘新生代的隆升与断陷过程[J]. 地球学报, 28(3): 219-233.

屈茂稳, 庞桂珍, 郭威, 李国填, 陆付雄. 2002. 黄河壶口瀑布成因及与晋陕峡谷的关系[J]. 西安工程学院学报, 24(3): 47-51.

王风云, 张忠慧. 2005. 中国云台山世界地质公园的新构造运动特征[J]. 化工矿产地质, 27(1): 15-20.

王海静, 张金流, 刘再华, 台永东. 2011. 基于水化学和同位素特征的四川黄龙沟泉群分类研究[J]. 地球学报, 32(3): 367-372.

杨欣德, 史晓颖, 陈建强. 2000. 中朝地台南部下、中寒武统层序地层特征[J]. 现代地质, 14(1): 9-14.

杨逸畴. 1999. 雅鲁藏布大峡谷河床瀑布的发现及其特征和成因[J]. 地理研究, 18(4): 342-348.

张琪, 姚明甫. 2010. 人工瀑布的设计探讨[J]. 农业科技与信息(现代园林), (4): 62-64.

张绪教, 李海霞, 吴芳, 宋立峰, 陈伟涛. 2005. 景观地貌在地质公园规划建设中的地位和作用[C]//姜建军, 赵逊, 陈安泽. 中国地质学会旅游地质与国家地质公园研究分会成立大会暨第20届旅游地质与地质公园学术年会论文集. 北京: 中国林业出版社: 160-166.

张绪教, 李宗敏, 贾丽云, 宫程, 张晋喆, 陈洁, 李波, 赵钊, 陈宇鹏. 2011. 云台山新构造运动与造景地貌的关系研究报告[R]. 北京: 中国地质大学(北京).

张兆琪. 2009. 黄河壶口瀑布地质遗迹成因[J]. 华北国土资源, (2): 65-66.

赵汀, 赵逊. 2009. 地质遗迹分类学及其应用[J]. 地球学报, 30(3): 309-324.

赵逊, 马寅生, 吴中海, 高林志, 赵汀, 赵希涛, 吴珍汉, 杨守政. 2005. 云台山主要景观地质学背景研究[M]. 北京: 地质出版社: 137-141.

中华人民共和国国土资源部. 2003. 中国河南焦作云台山世界地质公园申报综合报告[R]. 北京: 中华人民共和国国土资源部.

部: 7-8.

References:

- ALEXANDROWICZ Z. 1994. Geologically controlled waterfall types in the Outer Carpathians[J]. *Geomorphology*, 9(2): 155-165.
- BARTORELLI A. 2000. The great waterfalls of the Paraná River basin and their relation with tectonic alignments[C]//In Brazil 2000, 31st international geological congress; abstracts volume, Anonymous, International Geological Congress, Géologique International, Resumes. August, 31.
- CAO Bo-xun. 1995. *Geomorphology and Quaternary Geology*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 50-51(in Chinese).
- FAN Ke-feng. 2004. The geology of Yuntai Mountain World Geopark[M]. Beijing: China Land Press: 20-25(in Chinese)
- GAN Zhi-mao, MA Yao-feng. 2007. Touristic resources development and exploitation[M]. Tianjin: Nankai University Press: 65(in Chinese).
- GONG Ming-quan, MA Yin-sheng, TIAN Ming-zhong, CHEN Ying-yu. 2009. Tourism Resource Evaluation of the Hukou Waterfall National Geopark at the Yellow River[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(3): 325-338(in Chinese with English abstract).
- HAYAKAWA Y S, MATSUKURA Y. 2009. Factors influencing the recession rate of Niagara Falls since the 19th century[J]. *Geomorphology*, 110(3-4): 212-216.
- HAYAKAWA Y S, MATSUKURA Y. 2010. Stability analysis of waterfall cliff face at Niagara Falls: An implication to erosional mechanism of waterfall[J]. *Engineering Geology*, 116(1-2): 178-183.
- HAYAKAWA Y S, YOKOYAMA S, MATSUKURA Y. 2008. Erosion rates of waterfalls in post-volcanic fluvial systems around Aso Volcano, southwestern Japan[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(5): 801-812.
- LAMB M P, HOWARD A D, DIETRICH W E, PERRON J T. 2007. Formation of amphitheater-headed valleys by waterfall erosion after large-scale slumping on Hawai'i[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7-8): 805-822.
- LIU Zai-hua, LI Qiang, SUN Hai-long, WANG Jin-liang. 2007. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO₂ and dilution effects[J]. *Journal of Hydrology*, 337(1-2): 207-223.
- LIU Zai-hua, TIAN You-ping, AN De-jun, WANG Hai-jing, TANG Shu, ZHANG Jin-liu, SUN Hai-long, LIU Yan, ZHANG Qing-ming. 2009. Formation and Evolution of the Travertine Landscape at Huanglong, Sichuan, One of the World Natural Heritages[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 841-847(in Chinese with English abstract).
- LUO De-ren. 1987. A Preliminary Discussion on the Origin of Huang Guoshu Waterfall Groups[J]. *Guizhou Geology*, 10(1): 99-102(in Chinese with English abstract).
- LUO Zheng-fu. 1990. Waterfall and its classification[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 10(4): 275-300(in Chinese).
- MA Yin-sheng, ZHAO Xun, ZHAO Xi-tao, WU Zhong-hai, GAO Lin-zhi, ZHANG Yue-qiao, ZHAO Ting, WU Zhen-han, YANG Shou-zheng. 2007. The Cenozoic Rifting and Uplifting Process on the Southern Margin of Taihangshan Uplift[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(3): 219-233(in Chinese with English abstract).
- QU Mao-wen, PANG Gui-zhen, GUO Wei, LI Guo-tian, LU Fu-xiong. 2002. On the genetic analysis of Hukou fall in the Yellow River and its relation with Jinshan gorge[J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 24(3): 47-51(in Chinese with English abstract).
- SCHWARZBACH M. 1967. Icelandic waterfalls and a genetic classification of waterfalls in general[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 11(4): 377-417.
- The Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. 2003. The comprehensive Report of Yuntai Mountain World Geopark. Henan, China[R]. Beijing: The Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China: 7-8(in Chinese).
- WANG Feng-yun, ZHANG Zhong-hui. 2005. Characteristics of Neotectonic Movements in Yuntaishan World Geopark, China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 27(1): 15-20(in Chinese with English abstract).
- WANG Hai-jing, ZHANG Jin-liu, LIU Zai-hua, TAI Yong-dong. 2011. Classification of Spring Groups Based on Hydrochemical and Isotopic Features of Huanglong Ravine[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(3): 367-372(in Chinese with English abstract).
- YANG Xin-de, SHI Xiao-ying, CHEN Jian-qiang. 2000. Sequence features of the lower-middle Cambrian in the southern sino-korea platform[J]. *Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 14(1): 9-14(in Chinese with English abstract).

- YANG Yi-chou. 1999. The discovery of Yalu Zangbo Great Canyon and the researches on its characteristics and the cause of its formation[J]. Geographical Research, 18(4): 342-348(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qi, Yao Ming-fu. 2010. Discussion on Design of Artificial Waterfall[J]. Modern Landscape Architecture, (4): 62-64(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xu-jiao, LI Hai-xia, WU Fang, SONG Li-feng, CHEN Wei-tao. 2005. Geomorphologic Landscape's Status and role in the Geopark planning and construction[C]// JIANG Jian-jun, ZHAO Xun, CHEN An-ze. Collected papers of the inaugural meeting of the Commission on Tourism Earth Science and Geopark, Geological Society of China, and the 20th Conference of Geology Geomorphology and Geopark. Beijing: China Forestry Publishing House: 160-166(in Chinese).
- ZHANG Xu-jiao, LI Zong-min, JIA Li-yun, GONG Cheng, ZHANG Jin-zhe, CHEN Jie, LI Bo, ZHAO Zhao, CHEN Yu-peng. 2011. Report for The relationship between Neotectonics and Geomorphologic landscape of Yuntai mountain[R]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese).
- ZHANG Zhao-qi. 2009. The Geologic origin of Hukou waterfall in the Yellow River[J]. Huabei Land and Resources, (2): 65-66(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Ting, ZHAO Xun. 2009. Geoheritage Taxonomy and Its Application[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(3): 309-324(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Xun, MaYan-sheng, WU Zhong-hai, ZHAO Ting, ZHAO Xi-tao, WU Zhen-han, YANG Shou-zheng. 2005. Study on the Geological Settings of Yuntai Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House: 137-141(in Chinese with English abstract).

图版说明

图版 I Plate I

- 1-青龙峡中叠翠瀑(岩槛型瀑布);
 - 2-望龙瀑(钙华型瀑布);
 - 3-天门瀑(断裂型瀑布);
 - 4-双拱桥瀑布(人工型瀑布)
 - 5-小寨沟中的“Y”字瀑(岩槛型瀑布)
 - 6-龙凤壁悬瀑(溶蚀型悬瀑);
 - 7-云台天瀑(裂点型瀑布);
 - 8-黑龙潭瀑布(断裂型瀑布)
- 1-the Die Cui waterfall in Qinglong canyon(threshold waterfalls);
 - 2-Nine waterfall(tufa waterfalls);
 - 3-Tianmen waterfall(faulted waterfalls);
 - 4-Shuanggongqiao Waterfall(artificial waterfalls);
 - 5-the "Y" waterfall in xiaozhai gully(threshold waterfalls);
 - 6-Longfeng cliff Hanging waterfall(corrosion waterfalls);
 - 7-Great Yuntai waterfall(knick-point waterfalls);
 - 8-Heilongtan waterfall(faulted waterfalls)

图版 I Plate I

