

危岩崩塌演化理论及应用

■ 陈洪凯 唐红梅 王林峰 叶四桥 著



科学出版社
www.sciencep.com

危岩崩塌演化理论及应用

陈洪凯 唐红梅 著
王林峰 叶四桥

科学出版社

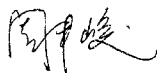
北 京

序

危岩崩塌是一种全球性的山地地质灾害,具有突发、快速、强致灾等特性。我国三分之二以上的国土面积为山区,是世界上受到危岩崩塌灾害最严重的国家之一。作为一种主要的山地灾害,危岩崩塌严重威胁着我国山区居民生命财产、城镇建设、矿山及交通运输安全。随着我国经济建设与基础设施建设的蓬勃发展,系统实施危岩崩塌演化理论和应用技术研究,是国家的迫切需求。科学识别危岩体,揭示危岩崩塌的形成及演化机制,有效预测崩塌落石运动路径,合理估算落石冲击荷载,是危岩崩塌防灾减灾的核心科学研究内容。本书作者陈洪凯教授及其团队,立足三峡及西部地区的危岩崩塌实际,率先在国内系统开展危岩崩塌演化理论及防治实践研究,从危岩主控结构面的抗剪强度、损伤及断裂机制等方面着手,揭示了危岩崩塌链式演化规律并构建其力学演绎机制,建立了崩塌落石运动特性及冲击力计算方法。结合相关技术规范,从危岩稳定性、危岩锚固、支撑、支撑-锚固联合、落石拦挡、崩塌灾害安全警报等方面,系统论述了危岩崩塌理论及工程治理技术,并给出了工程应用方式,实现了岩土力学与地貌学之间的有机融合和科技创新,充分反映了该领域科技研究的最新前沿研究成果,是一部具有开拓性的著作。

本书出版时值我国西部汶川大地震之后,对地震引起的滑坡、堰塞湖洪水以及泥石流次生灾害的深入研究和论理是一个贡献。对我国系统开展抗灾减灾深入研究具有重要参考价值。

中国工程院院士



2009年9月23日

前 言

岩石崩塌是一个严重的全球性山地灾害问题,具有突发、快速、强致灾等基本特性,如落基山脉 Karivhoh 发生的特大型山体崩塌,崩塌体积 20 000 万立方米,崩塌体厚度 200~300m,水平冲出距离 7km,覆盖面积近 18km²,崩塌体下部为强烈挤压的岩石碎屑,上部为大粒径的块状岩体覆盖层;意大利 Alos 山发生的体积 300 万立方米的 Thurwieser 崩塌事件,水平冲出距离 2600m,垂直落距约 1300m。在国内,近年来突发性危岩崩塌事件频繁发生,如 2007 年 11 月 20 日,湖北省巴东县高阳寨国道 318 线 K1405 突发巨型崩塌灾害,一辆车牌号为鄂 Q20684 的大客车被崩塌体掩埋,车内 31 人全部遇难。该崩塌灾害源距离路面以上 34m 处,崩塌体沿陡崖走向的长度约 35m,高约 24m,厚约 5m,总体积约 4512m³,坠落在路面的残余块体体积约 500m³;2009 年 6 月 5 日 15 时左右,三峡库区重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山发生特大型山体崩塌,300 多万立方米的崩塌体快速涌进山谷,产生 700 多万立方米的崩塌堆积物,借助于气垫效应崩塌体沿沟向前高速运动近 1km,80 余人遇难。据不完全统计,我国山区城镇、矿山、交通干线沿线处于“危险”、“较危险”安全等级的潜在崩塌体数千万个,三峡库区仅重庆境内城镇区便存在 5 万多个,2008 年“5·12”汶川大地震期间在公路沿线发生的巨型崩塌事件便超过 3 万次。我国每年产生的崩塌灾害次数 8000 次以上,直接经济损失 50 多亿元。因此,研究揭示危岩崩塌演化理论,实现危岩崩塌防灾减灾,具有紧迫性、科学性。

自 2001 年以来,以三峡库区地质灾害防治全面启动及加快西部公路交通建设为契机,陈洪凯教授带领的研究团队在危岩崩塌研究领域从零星研究阶段进入系统研究阶段,从崩塌源危岩破坏力学机理和崩塌落石运动冲击两方面系统建立了危岩崩塌演化理论,独立承担了《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029—2004)危岩防治工程的编撰任务,先后培养了 15 位专门从事危岩崩塌研究的博士生、硕士生,阶段性研究成果“公路边坡崩塌与灾害防治关键技术研究”获 2008 年河南省科技进步二等奖、“三峡库区危岩灾害发育机理、防治研究与工程实践”获 2007 年度重庆市科技进步二等奖、“生态环境灾变链式理论及孕源断链减灾机制”获 2006 年重庆市自然科学二等奖,获“危岩撑-锚联合支护治理方法”(ZL200610054335.7)和“危岩体崩塌灾害预警仪及其预警方法”(ZL200810069475.0)等国家发明专利,发表了相关论文 200 余篇,出版了侧重于防治技术的专著的姊妹篇《危岩防治原理》(地震出版社,2006)。鉴于在危岩崩塌和西部公路泥石流两个领域科学研究及工程实践中作出的突出贡献,陈洪凯教授 2005 年获得重庆市最高综

合荣誉奖“振兴重庆争光贡献奖”、2007 年被遴选为“新世纪百千万人才工程国家级人选”、2008 年获得重庆市最高技术荣誉奖“重庆市杰出专业技术人才”。

本书是国家自然科学基金“危岩破坏机理研究”(编号 50678182)、重庆市自然科学基金重点项目“三峡水库蓄水后重庆境内地质灾害演变趋势”(编号 2008BA0015)和“三峡库区危岩发育综合机理研究”(编号 2005BA7008)、教育部春晖计划“危岩损伤-断裂机理研究”(编号 2005155002)和国家科技攻关项目“生态环境灾变链式理论及孕源断链减灾机制”(编号 2004BA901A02)等科技项目成果精华的浓缩,遵循“演化”科学理念,初步实现了岩土力学与地貌学之间的有机融合及科技创新,丰富了传统的边坡动力地貌演化理论(Davis 侵蚀循环理论、Penck 边坡演化理论和 King 边坡演化理论)。

在“重庆交通大学岩土与地质工程学术创新团队”中,参与危岩崩塌研究与工程实践的成员先后有 80 余人,大家以“严谨的治学作风,求实的科学态度,勇攀科学高峰”的团队精神为指导,精心协力、兢兢业业,为了获取第一手资料,长期深入三峡库区、横断山、天山、秦岭大巴山崇山峻岭、汶川地震区、武隆鸡尾山山崩现场,数千次冒着坠石的生命危险在危岩崩塌灾害区域从事科学考察,涌现出了一批立志危岩崩塌研究与防治的有为专家与青年。为此,笔者深深感谢团队成员对危岩崩塌研究与实践所作出的一切贡献!

在从事危岩崩塌研究及工程实践中,长期得到兰州大学李吉均院士,重庆大学鲜学福院士,解放军后勤工程学院郑颖人院士,总参周丰峻院士,中国科学院力学研究所李家春院士,中国科学院水利部成都山地所崔鹏教授,中国地质环境监测院刘传正教授,重庆大学许江教授、张永兴教授、尹光志教授,解放军后勤工程学院陈正汉教授、陆新教授、刘元雪教授,重庆市地勘局刘东升教授,西南大学王健力教授、谢世友教授、况明生教授,西南交通大学何川教授、胡卸文教授,重庆交通大学唐伯明教授、王昌贤教授、梁乃兴教授、易志坚教授、周华君教授、王多垠教授、肖盛燮教授等的大力支持和鼓励,在此一并致以诚挚的感谢!

本书共分 10 章,第 1 章由陈洪凯撰写,第 2、4 章由唐红梅撰写,第 3 章由陈洪凯、唐红梅、李明、祝辉和赵鹏撰写,第 5 章由王林峰撰写,第 6 章由姜克春和王林峰撰写,第 7、8 章由叶四桥和陈洪凯撰写,第 9 章由陈洪凯和唐红梅撰写,第 10 章由陈洪凯、王全才和刘光华撰写。全书由陈洪凯教授和唐红梅教授负责统校,王林峰博士负责图件清绘。由于时间仓促,书中错漏难免,敬请各位同仁批评指正(陈洪凯教授电子邮箱 chen.h.k@163.com)。

陈洪凯

2009 年 8 月 18 日

目 录

序

前言

第 1 章 危岩崩塌演化规律地貌学解译	1
1.1 经典地貌演化理论	2
1.1.1 Davis 侵蚀循环理论	2
1.1.2 Davis 侵蚀循环理论的辩证思考	6
1.1.3 Penck 地貌演化模型	6
1.1.4 King 地貌演化模型	8
1.2 岩质陡坡地貌形迹	8
1.2.1 万州太白岩陡崖	8
1.2.2 万州青草背陡崖	9
1.2.3 江津四面山陡崖	10
1.2.4 綦江羊叉河陡崖	12
1.3 岩腔形成过程及其卸荷效应	14
1.3.1 自然风化岩腔	14
1.3.2 压裂风化岩腔	16
1.4 危岩崩塌演绎模式	18
1.4.1 缓倾角岩层群发性崩塌链式演绎规律	18
1.4.2 陡倾角岩层群发性崩塌演绎模式	21
第 2 章 崩塌源危岩分类、荷载及断裂韧度	23
2.1 危岩分类	23
2.1.1 单体危岩分类	23
2.1.2 群体危岩分类	25
2.2 荷载类型及其组合	26
2.2.1 重力及地震力	26
2.2.2 裂隙水压力	27
2.2.3 荷载组合	28
2.3 岩石断裂韧度	28
2.3.1 裂纹扩展的基本类型	28

2.3.2	K_{IC} 的测试方法	29
2.3.3	K_{IIC} 的测试方法	32
2.3.4	K_{IIIC} 的测试方法	33
2.3.5	常见硬质岩石的断裂韧度	35
第3章	崩塌源危岩形成及破坏机理	39
3.1	危岩主控结构面智能显现	39
3.1.1	主控结构面指标及其量化	39
3.1.2	主控结构面智能显现方法	40
3.2	危岩主控结构面抗剪强度参数	44
3.2.1	规范法	45
3.2.2	贯通率法	45
3.3	危岩主控结构面损伤模型及断裂模型	47
3.3.1	宏观卸荷机理	47
3.3.2	主控结构面裂端损伤区	49
3.3.3	主控结构面损伤模型	50
3.3.4	损伤模型应用	53
3.4	危岩主控结构面应力强度因子	55
3.4.1	主控结构面承受荷载	55
3.4.2	断裂强度因子计算方法	56
3.5	危岩主控结构面断裂扩展规律	58
3.5.1	单向应力作用下的主控结构面扩展规律	59
3.5.2	双向应力作用下的主控结构面扩展规律	61
3.6	渗透所用下危岩主控结构面断裂扩展规律	63
3.6.1	主控结构面受力形式	63
3.6.2	渗透力	64
3.6.3	考虑渗透力的危岩主控结构面应力强度因子求解	65
3.6.4	算例分析	67
3.7	危岩主控结构面冻胀力	67
3.7.1	温差效应下主控结构面尖端扩展	67
3.7.2	冻结状态下主控结构面尖端扩展	69
3.7.3	冻结状态下主控结构面冻胀力的弹性力学计算方法	70
3.7.4	算例分析	72
第4章	危岩体形成时间	74
4.1	主控结构面临界形成时间	74

4.1.1 临界岩腔的形成	74
4.1.2 主控结构面孕育时间	76
4.2 主控结构面疲劳断裂寿命	79
4.2.1 危岩主控结构面临界尺寸计算方法	79
4.2.2 裂隙水压力变化过程中主控结构面疲劳断裂寿命计算方法	82
第5章 危岩崩塌规律力学演绎	85
5.1 危岩块相互作用力学机制	85
5.1.1 危岩块间的相互作用	85
5.1.2 危岩块崩落	89
5.1.3 算例分析	90
5.2 陡崖后退力学演绎	91
5.2.1 单一宏观链危岩崩落力学机制	91
5.2.2 复合宏观链危岩崩落力学机制	92
5.2.3 算例分析	95
5.3 陡崖座滑平推破坏机制	97
5.3.1 岩质边坡地貌平推演化机制	99
5.3.2 边坡地貌平推演化过程	104
第6章 危岩崩塌规律数值分析	106
6.1 数值模拟方法简介	106
6.1.1 有限元法基本方程	106
6.1.2 非线性问题处理方法	109
6.2 红岩山危岩崩塌力学模型	109
6.3 红岩山危岩崩塌应力场演变规律	110
6.3.1 初始应力场	110
6.3.2 第一个宏观链临界岩腔形成过程应力场	111
6.3.3 第一个宏观链发育过程应力场	112
6.3.4 第二、三个宏观链复合嵌套发育过程中的应力场	116
6.3.5 第四个宏观链发育过程中的应力场	117
第7章 落石运动路径及运动特性参数	119
7.1 落石运动现场试验	119
7.1.1 试验方案设计	120
7.1.2 不同形状落石试验现象	123
7.1.3 试验结果统计分析	126
7.2 坡面运动状态分类	138

7.3 落石运动路径计算方法	140
7.3.1 基本假定	140
7.3.2 运动路径及运动特性参数计算方法	141
7.3.3 落石运动随机性的反映	153
7.4 落石威胁区域	155
7.5 落石运动路径实例分析	156
7.5.1 危岩带及落石事件概况	156
7.5.2 运动路径及运动特性参数计算	157
7.5.3 计算结果	160
第8章 落石冲击力	161
8.1 现有落石冲击力计算方法比较	162
8.1.1 现有落石冲击力计算方法概况	162
8.1.2 路基规范方法	163
8.1.3 隧道手册方法	163
8.1.4 杨其新、关宝树方法	165
8.1.5 日本道路公团方法	165
8.1.6 瑞士方法	165
8.1.7 各计算公式的比较与分析	165
8.2 基于冲量定理的落石冲击力计算方法	171
8.2.1 冲击力计算模型及理论基础	171
8.2.2 计算假定	172
8.2.3 计算公式	172
8.2.4 冲击力放大系数的确定	174
8.3 落石冲击力在缓冲土层中的扩散	179
第9章 危岩崩塌演化理论的工程应用	180
9.1 危岩稳定性极限平衡分析方法	180
9.1.1 危岩稳定性评价标准	180
9.1.2 危岩稳定性计算方法	181
9.1.3 算例分析	185
9.2 危岩稳定性断裂力学分析方法	186
9.2.1 危岩稳定性断裂分析方法	186
9.2.2 算例分析	187
9.3 危岩锚固体等效参数分析方法	188
9.3.1 刚度系数等效过程	188

9.3.2 锚固岩体等效强度参数 c 、 φ 值的等效过程	191
9.4 危岩锚固机理断裂力学分析方法与设计方法	193
9.4.1 危岩加固锚杆的受力模型	193
9.4.2 应力强度因子求解模型	194
9.4.3 算例分析	197
9.5 危岩支撑-锚固联合断裂力学设计方法	198
9.6 危岩拦石墙与拦石网计算方法	202
9.6.1 拦石墙传力机理	202
9.6.2 拦石土堤厚度计算	203
9.6.3 拦石墙计算方法	203
9.6.4 工程应用	204
9.7 崩塌灾害预警系统	205
第 10 章 工程案例分析	207
10.1 三峡库区万州太白岩危岩防治工程	207
10.1.1 工程概况	207
10.1.2 地理环境	208
10.1.3 工程治理方案	214
10.2 汶川地震区老虎嘴危岩防治工程	221
10.2.1 工程概况	221
10.2.2 老虎嘴滑塌体形成环境	222
10.2.3 工程治理方案	225
10.3 武隆铁矿乡鸡尾山山体崩塌	231
10.3.1 工程概况	231
10.3.2 形成环境	233
10.3.3 形成机制	234
10.3.4 防灾减灾对策	236
参考文献	238

第1章 危岩崩塌演化规律地貌学解译

陡崖上具有力学关联的多个危岩体的失稳称为群发性崩塌(cascading collapse),危岩(perilous rock)是指位于陡崖或陡坡上被多组岩体结构面切割且稳定性较差的岩石块体及其组合^[1],其形成、失稳与运动属于斜坡动力地貌过程的主要表现形式^[2,3]。危岩崩塌是山区主要地质灾害类型及灾害地貌过程,仅在中国长江三峡工程库区重庆境内便有5万多个危岩体,单个体积可至8000 m³,威胁着80多万人和数百亿元生命和财产安全^[1]。目前,国内外学术及工程技术界对危岩这种地质灾害类型科学内涵的界定存在一定差异,主要有三种,即“崩塌”(collapse或avalanche)^[4-10]、“落石”(rockfall)^[11,12]和“危岩”^[13-17]。从崩塌源危岩发育机理和失稳模式来看,这些术语都具有一定的相似性,强调了同一个问题的不同侧面,即“崩塌”是指危岩崩落的动力行为,“落石”是指危岩崩落后的堆积体态,而“危岩”则涵盖了危岩体形成、破坏、失稳和运动全过程力学行为^[1]。斜坡演化一直是地貌学及环境力学研究的核心内容之一。20世纪早期,Davis(1909)、Penck(1924)、Engeln(1948)和King(1950)均提出了坡地发育演化模式,Richard等(1984)认为湿润地区风化作用有利于坡地倾角的逐渐变缓,干旱地区由于顶部岩层的保护作用而使斜坡平行后退,系统评述了Davis地貌侵蚀循环理论、Penck地貌演化理论和King地貌演化理论^[18]。国内学术界对于地表过程的研究侧重于沉积作用阶段,如韩智勇等在进行三峡库区坡地地貌过程研究中偏重于对坡体前部第四纪沉积物研究^[19],杨达源等则从山体峰顶面出发分析三峡库区地貌演化问题^[15,16]。前述研究对于分析区域水土流失是较合理的,而对于三峡库区沿江两岸巨厚层第四纪崩积物形成的动力机理研究,更应重视陡崖(含陡坡)的动力演化过程研究。

2000年初,为配合三峡工程建设,三峡库区地质灾害防治工作全面展开,陈洪凯等对三峡库区陡崖及陡坡上崩塌源危岩进行了系统研究,把三峡库区的危岩分为单体危岩和群体危岩两大类,并将单体危岩分为压剪滑动型危岩、拉剪倾倒型危岩、拉裂坠落型危岩和拉裂-压剪坠落型危岩,将群体危岩分为底部诱发破坏型危岩和顶部诱发破坏型危岩^[13],撰写了危岩防治工程设计规范^[17],用于工程实践,取得了显著的社会效益和经济效益。由于在三峡库区所揭示的危岩中拉裂坠落型危岩和拉裂-压剪坠落型危岩占70%左右,因此系统实施这两类坠落型危岩研究,对于揭示三峡库区崩塌源危岩发育规律、探索边坡演化动力学具有代表性。通过对三峡库区近万个危岩体的现场调查和观测,发现了群发性崩塌链式规律(chained

regularity for cascading collapse)^[2,3,20-22],为优先采用支撑、支撑-锚固联合等防治技术^[17]以及探索万州、云阳、奉节、巫山等长江两岸大量崩积物的动力形成机制^[19]找到了科学依据。

陡崖(陡坡)地貌是丘陵和山区常见的地貌形态,其崖壁坡度一般都大于 60° ,有的甚至大于 90° 或逆坡倾斜。陡崖岩层多呈现软硬岩相间,且硬岩层的厚度较大。陡崖在地形条件、地质条件、降雨、温度、地震和人类活动等多种因素的耦合作用下孕育了众多稳定性较差的危岩块,危岩块之间相互作用而使陡崖上的危岩崩塌具有群发性。

边坡或自然斜坡在外力地质作用下的动力演化过程可以分为缓变地貌过程和灾害(或突变)地貌过程,前者如地表侵蚀,后者如危岩崩塌、滑坡、泥石流。对于岩性均质的边坡或自然斜坡,地表过程通常具有连续性,而对于非均质各向异性的岩体边坡,地表过程则具有宏观连续、微观突变的特点^[23]。陡崖(cliff)或陡坡(steep slope)均是地表过程的阶段性地貌形迹(geomorphologic formality),三峡库区云阳至江津段的地层主要为中生代侏罗系砂岩和泥岩互层组合,岩层倾角较小,一般在 15° 以内;砂岩厚度30~150m,泥岩厚度5~10m。砂岩岩层层面比较清晰、平直,整体性较好的块状岩体厚度10~15m,砂岩出露的地段表现为陡崖或陡坡,而泥岩出露地段则表现为斜坡或平台。

1.1 经典地貌演化理论

地貌系统包括地形及其相关的几何形态,可以通过它的历史性及不同规模、时间、空间的功能性来划分。目前,经典的地貌演化模型(如Davis模型、Penck模型和King模型)均涉及长尺度的循环时间,地表形态均可涵盖当前及过去趋于平衡的相关信息。

1.1.1 Davis 侵蚀循环理论

1) 依据

美国地理学家Davis(1850~1934)于1884~1889年间提出了地貌演化的“侵蚀循环学说”(the cycle of erosion),即“侵蚀循环理论”,也称“Davis 侵蚀循环理论”。

Davis 创建侵蚀循环理论具有两个依据:

(1)达尔文生物进化论。地貌演变(geomorphological evolution)的概念贯穿地貌发育过程始终,暗示一种必然的、连续的思想,强调区域性的地貌形态变化,范围广泛、不可逆的变形过程孕育出有序的地表形态。

(2)自然演化理论。19 世纪下半叶,热力学第二定律诞生,它是建立在封闭系统基础上,系统熵增不可逆。熵较低的封闭系统从高位到低位只需微小的能量变化便能维持系统正常工作,随着时间推移,系统内能分配越来越均匀,熵持续增长,当熵达到最大值时,封闭系统内所有部分所有参量均达到同样的能量水平,系统趋于死寂。

事实上,地表的地形组合并不是封闭系统,它能够开放地吸收因地表隆起获得的重力势能、沉积过程产生的动能、地表或近地表岩石崩塌所释放的太阳能或化学能、河道流量及推移质动能等。Davis 侵蚀循环理论最重要的假定是地貌初始隆起产生的重力势能,随后地貌组合始终保持不可逆的能量水平,最终导致空间上的均匀地貌侵蚀基准平原。该理论每个阶段都与地貌顶部被磨平的潜能衰退相关联,且每个阶段都存在与当地地表及其他能产生冲刷作用的基准面之间所表现出的不同势能相符合的地貌组合,如河谷边坡、河网型式等。

2)假定

1884~1899 年期间,Davis 创建的侵蚀循环理论根据地貌几何形态经过的一系列不可逆变化,把地貌演化过程划分为青年期(youth period)、壮年期(maturity period)和老年期(old age)。Davis 结合 Gilbert 地貌分级提出了纵向流及河谷边坡廓线的平滑曲线概念。河谷边坡最早达到河口,然后一直溯源扩展至分水岭。他认为任何地区的地质结构类型都可以被看做是在一个连续运动的给定过程中如温度和湿润、炎热干燥和高山冰川等,产生地貌形态序列,每个阶段都有一套相适应的地貌和特征。Davis 侵蚀循环理论的假定:① 岩性均一;② 迅速隆起,伴随微量侵蚀,地貌顶面与侵蚀基准面之间的高差较小,呈准平原地貌景观。

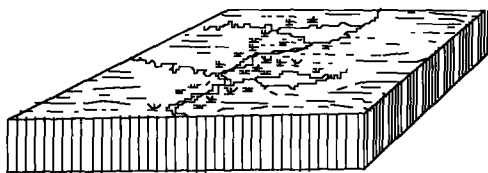
3)分期描述

Davis 侵蚀循环理论演化模式见图 1.1 和图 1.2。

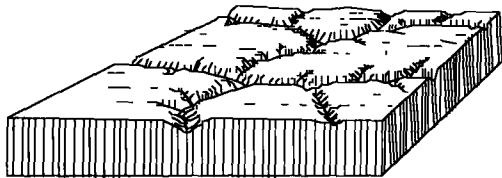
青年期。在地表或海底产生了一个范围宽广的区域,这些区域不是被河流分水岭划分的主干河流和大的支流,而是和许多短小支流合并为侵蚀性的溯源切割。这种溯源侵蚀与河网的垂直切割在整个青年时期使地形迅速发育,逐渐形成陡峭的 V 形谷,其发育过程由于受次生结构面控制产生的岩块崩落与快速运动而紊乱。晚期,主干河流两侧斜坡和急流部位都会由于侵蚀作用而产生侧向演变,最初的高峰平面面积缩小,高山峡谷地貌景观开始出现,主干河流开始分级并出现河曲,在干流沿线地势低平处出现小型冲洪积平原。

壮年期。河流两侧的地形坡度达到最大值,分水岭进一步变窄,山顶夷平面面积进一步缩小直至消失,尖锐的山峰广泛分布,中下游地区河曲发育,支流下蚀作用增强,主干河流纵剖面接近平衡剖面,河流袭夺现象出现,河流两岸阶地发育。晚期,在河流中下游出现较大面积的冲洪积平原。

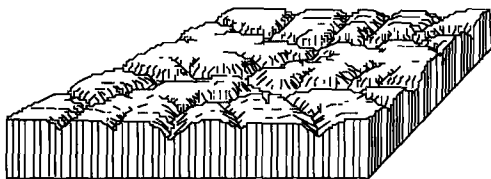
老年期。流域内地貌差异对比缩小,分水岭地势降低,峰谷高差显著减小,河曲广泛发育,埋藏阶地出现,牛轭湖、离堆山、残丘、冲洪积平原广泛分布,呈现典型的准平原地貌景观,外观形态与青年期相似,但海拔高度比青年期显著降低,平原面上的岛山(inselberg)大量残存。



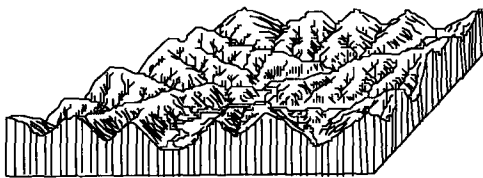
A 地貌隆升面



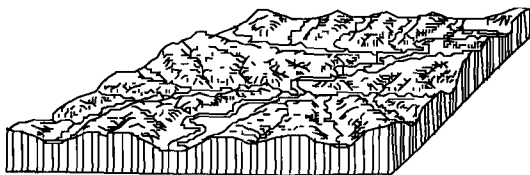
B 青年期早期



C 青年期晚期



D 壮年期早期



E 壮年期晚期

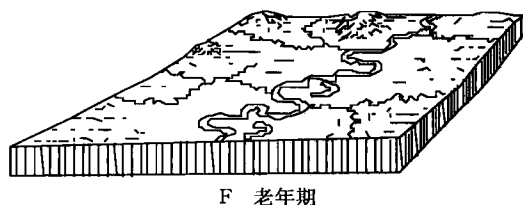


图 1.1 地貌侵蚀循环演变三维模型(续)

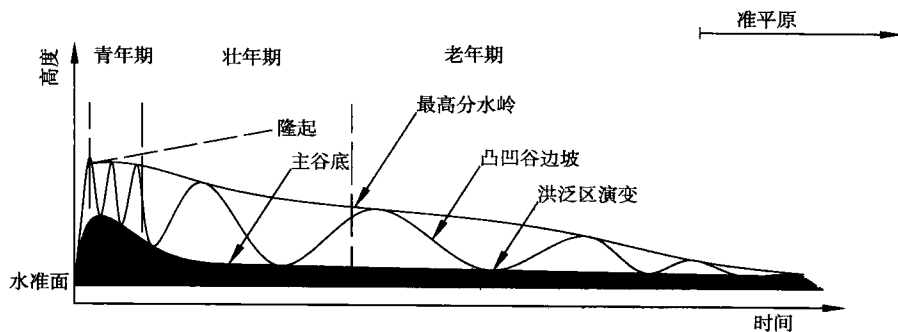


图 1.2 地貌侵蚀循环演变平面模型

4) 侵蚀循环中断现象

一个地区的地貌演化要完整地经历青年期、壮年期和老年期需要相当长的区域地壳稳定时间,换言之,区域性地貌短暂隆升到一定高度后需要经历数千万年的地壳稳定时期方能完成一个完备的侵蚀循环,若在所需的稳定时段内侵蚀基准面发生变化(气候变化与构造隆升),均会造成侵蚀循环中断。侵蚀循环中断机制包括两方面:

(1) 气候突变。区域性长尺度的气候条件如地表径流、河流流量、植被覆盖率、侵蚀速度、堆积物来源、堆积物粒径等发生显著变化(突变),尤其是全球尺度的冰期与间冰期变化时间幅度与地貌侵蚀循环时间尺度不一致时,可导致侵蚀基准面的变化,如冰期时期:气候寒冷,大量地表水呈固态冰雪聚集于高山及高海拔地区,海平面下降即终极侵蚀基准面降低,河流水量减小,导致河流中上游地区河流以加积作用为主,下游地区则以侵蚀作用为主,从河口的终极侵蚀基准面开始发生溯源侵蚀;而在间冰期,河流中上游因水量急增而以下蚀作用为主,下游则因海平面抬升而处于加积发育过程。显然,河流下切相当于进入一个新的侵蚀循环,河流加积则可比拟为进入一个侵蚀循环的老年期。

(2) 构造加速隆升与沉降变化。区域性构造隆升与沉降必然会使地貌侵蚀基准面发生升降变化。侵蚀基准面尤其是终极基准面抬升,使河流下游地区水流速度减慢,加积作用增强,地貌演化过程提前进入老年期。当侵蚀基准面降低时,河

流中下游处于侵蚀演化过程再次进入河流下切阶段,类似于青年期地貌演化过程。构造加速隆升与沉降变化,体现在侵蚀基准面的同步变动,河流演化一般尚未达到平衡剖面,目前所见河流纵剖面存在众多的迭水可以表征区域性侵蚀基准面的变化特征。

1.1.2 Davis 侵蚀循环理论的辩证思考

Richard 等指出,Davis 侵蚀循环的概念过于理想化,而实际的地貌系统极其复杂,平衡的概念和侵蚀循环至今尚未找到充分的理由。事实上,Davis 侵蚀循环理论从一开始便受到了批判,Davis “侵蚀循环理论并不是意味着包括任何实例,因为它是通过假定而不是实际观测创造的地貌演化理论”的声明为学术界攻击该理论火上浇油。Davis 侵蚀循环理论最受关注的是因为它的简单化,将地貌侵蚀循环视为封闭系统,再据此推导出由隆升提供的势能作为初始能。Davis 侵蚀循环理论尤其被德国科技工作者所质疑,并创造了更加灵活的地貌演化模型。迄今,我们已经确信海面升降、气候、水文、植被覆盖等因素变化是连续的,偶尔也会发生强烈突变,控制着侵蚀速度;地势的起伏和坡地控制着地貌侵蚀强度和演变速度,而全新的地貌与区域性地貌系统的复合响应通常与侵蚀循环出现偏差,关键是区域气候变化及构造间隙性隆升间隔时间较短,频率变化较大,与侵蚀循环所需稳定时间难于吻合。

虽然 Davis 侵蚀循环理论受到一定质疑,但是总体来说,该理论仍然是第二次世界大战前最经典的地貌演化理论。基于对 Davis 侵蚀循环理论的辩证思考,先后诞生了彭克(W. Penck)地貌演化理论和金(L. C. King)地貌演化理论。

1.1.3 Penck 地貌演化模型

即使 Davis 侵蚀循环理论在国际传播的全盛时期,欧洲中部和东部的许多地质学家仍然认为该理论过分简单,在这些对立者中,只有瓦尔特·彭克(W. Penck)建立了能与 Davis 侵蚀循环理论相媲美的地貌演化理论(图 1.3)。Penck 地貌演化理论的观点从来没有在英国流行过,部分原因是因为 Penck 的英年早逝,此外该理论出现十年之后便受到 Davis 观念的强烈批判和误导。多年以来,由于 Penck 理论的矛盾性和不可证明性,对于德国以外的科技工作者来说没有途径可以了解 Penck 理论,该理论认为地貌的形成可能是由于地壳运动的原因。

Penck 相信,地貌可以通过可能发生在侵蚀(外在的)和地壳运动(内在的)过程的比率来解释。侵蚀过程会在全球范围内以不同的速度有规律地进行:

① 区域性的地表侵蚀强度与斜坡坡度直接相关;② 侵蚀坡每个线段的倾角都是由堆积物的尺寸决定的;③ 斜坡表面最大堆积物的尺寸随着斜坡倾角而变化,

倾角越大,堆积物最大尺寸也越大;④ 如果风化作用产生的堆积物在滑坡扇均匀分布,则侵蚀作用便可导致扇形体的平行后退;⑤ 如果允许在后退的滑坡扇形体基底聚集部分侵蚀物质,那么将形成一个新的倾角更低的扇形体。

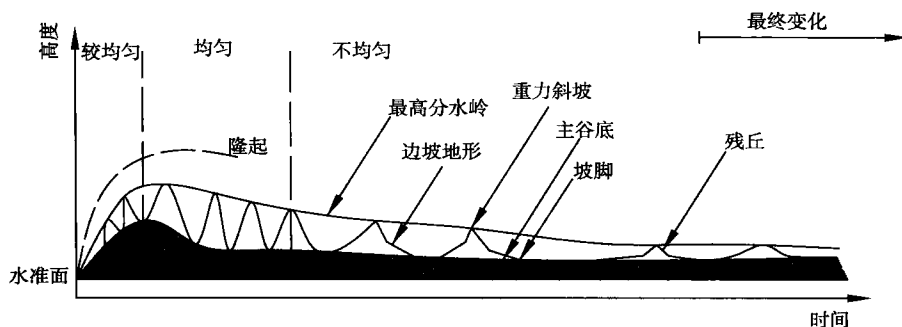


图 1.3 Penck 地貌演化理论

最重要的是, Penck 认为地表大部分侵蚀运动的发生和结束都是相当缓慢的, 遵循的一般形式为: 初始隆升→加速隆升→隆升减速→最终达到静止状态。区域性隆升的开始主要属于增强发育的过程, 该阶段加速隆升的速度超过了河流剥蚀的速度, 最终形成的地貌是由于地壳的不稳定决定的。

术语“增强”(waxing)指的是逐渐递增的河流侵蚀速率, 在增强发育期隆升速度的加快使滑坡扇形体逐渐变陡, 在初始表面或者基准平原产生一个总体凸起的滑坡类型。随着时间的推移, 陡坡扇形体平行后退速度越快, 坡体上凸的半径就越小。应当注意的是 Davis 解释这种上凸坡体主要关注土壤的蠕动。随着隆升的加速, 基准面平原将被一系列的阶地所围绕。在加速隆升时期沿着快速流动的河流纵剖面产生局部凸起, 在边坡下部出现狭窄、陡峭的凸起河谷边坡, 而在其上部则产生了凹陷的河谷边坡。在河谷纵向凸起形迹之间凹陷的河流弯道的形成与山麓阶地密切相关。Penck 理论并没有分析连续加速隆升与连续且间歇加速隆升的特征, 但关于山麓阶级和凸起破裂形成机制也不够清晰, 而 Davis 则通过基准面的间歇性下沉运动解释了坡体的这种断裂的原因。

陡峭坡体的后退在后期会导致分水岭处容易产生残余岛山, 残余岛山消失后, 整个地形便由低角度的凹陷坡体及缓慢消退的滑坡段组成。显然, 坡体消退段包括最陡单元的倾角取决于逐渐由风化作用产生的风化物的主要尺寸。一个极端情况是, 粗糙的风化岩块在后续的崩塌中逐渐变成细粒材料, 地貌中占主体的是陡峭坡体和岩屑堆。

虽然很少有人拥护 Penck 的构造思想, 但是他的观念在风化和坡体后退发育方面仍然十分重要。