

重力地貌套环演化理论初步研究^{*}

陈洪凯

(西华师范大学 地理科学学院, 四川 南充 637009)

摘要:不同空间尺度的地貌发育本质上属于由危岩崩塌、滑坡和泥石流表征的重力地貌演化问题。针对“夷平”和“加积”这 2 种经典的地貌作用,引入岩土力学和应用力学方法,综合 Davis、Penck、King 等 3 个著名地貌演化理论,初步提出了重力地貌套环演化理论;该理论认为在大尺度构造稳定时期内区域性地貌演化存在由重力地貌过程的“宏观尺度缓变效应环”“微观尺度缓变效应环”和“急变效应环”组成的复合结构。依据该理论分析了重力地貌过程“三环”效应,提出重力地貌过程宏观尺度缓变效应以数万年为基数、微观尺度缓变效应以几年至几百年为基数、急变效应时间尺度一般为几分钟至几小时;探讨了该理论的科学属性,认为它是重力地貌减灾的方法论和实践论,它回答了“重力地貌是什么、怎么样”的问题;以“演化”为纲、以“过程”为目,提出了“过程遏制”与“方向调控”相结合的重力地貌减灾新思想。重力地貌套环演化理论丰富了传统地貌学的科学内涵,对于推动重力地貌工程减灾有着积极意义。

关键词:重力地貌套环演化理论;重力地貌过程;过程遏制;方向调控;重力地貌减灾

中图分类号:P931.91

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)04-0059-11

地貌发育过程一直是地貌学研究的热点和难点,是认识不同空间尺度区域性地貌格局的重大科学问题,也是应用地貌学尤其是重力地貌减灾的理论基础。Davis、Penck、King 等 3 个经典的地貌演化理论均涉及长尺度循环时间,且其中的地表形态均可涵盖当前及过去趋于平衡的相关信息^[1];李吉均^[2]通过分析青藏高原不同时期的地貌形成过程及气候变化,把青藏高原运动分成喜马拉雅运动、昆仑-黄河运动、共和运动等阶段,并指出青藏高原的隆升孕育了亚洲季风气候;吴珍汉等人^[3]在研究西藏当雄地区构造地貌及演化过程时,构建了青藏高原腹地挤压缩短与地壳增厚区域构造活动和地貌环境变迁的动力学过程;郭进京等人^[4]采用构造地貌方法研究了西秦岭武都-岷县地区的Ⅰ级夷平面(山顶面)、Ⅱ级夷平面(主夷平面)和Ⅲ级夷平面(剥蚀面);Jennifer 等人^[5]采用正向三维热动力学模型预测符合磷灰石(铀-钍)/氦年代测定数据中地质上切口的时间-温度历史,发现雅鲁藏布江的地貌演化明显受到晚中新世下游基准面下降的影响;黄晓力等人^[6]基于地貌发育的空间特点,提出一种适用于地貌学研究的空代时理论,分析讨论了地貌学空代时的研究范式;刘静等人^[7]基于近些年来构造地貌学的研究实例,梳理了构造-气候-地表过程相互作用问题;刘芬良等人^[8]利用 GPS、光释光和电子自旋共振手段,测得金沙江巧家-蒙姑段河谷的高程及地质沉积数据,发现气候变化及堵江堰塞事件对河谷下切存在抑制作用;Hill 等人^[9]采用岩溶水文模型研究了美国亚利桑那州大峡谷的地貌演化过程,发现地表径流的改变影响着峡谷地貌演化过程;潘保田等人^[10]利用 Landlab 平台构建区域地貌演化模型,分析了青藏高原河西走廊中段区域山体隆升的时代和岩石抬升速率,并以准周期性谷间距、地形高差及出水口数量为评判标准,提出了约束山体隆升年代和速率的新评价方法;丁智强等人^[11]发现可以采用洼地-高程积分值(hypsometric index, HI)来定量评价喀斯特区地貌演变问题,当洼地 HI 大于区域 HI 时,喀斯特地貌逆向演化,向起伏度增大的青年期发展,高原隆升到冰缘地貌带后地貌形态和高程处于稳定状态;姜勇彪等人^[12]基于面积-HI 与 Davis 理论,定量研究了江西丹霞地貌演化问题,指出丹霞地貌的发育与区域内红层有关,丹霞地貌的分布由武夷山隆升所控制;安妮等人^[13]利用差分 GPS 测量法精确厘定了涟江阶地的级序和高程,发现涟江四级阶地记录了在更新世以来 4 次构造抬升背景,流域经过多期自北向南“削高补低”的地貌改造,逐步由构造洼地演变为山间盆地的地貌过程。综上所述,“演化”(evolution)是不同尺度地貌发育的共性特征,对它的研究目前已从传统的定性推断发展到半定

^{*} 收稿日期:2025-03-05 修回日期:2025-05-02 网络出版时间:2025-09-10T11:34

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51678097;No. 51378521)

第一作者简介:陈洪凯,男,二级教授,俄罗斯自然科学院外籍院士,研究方向为重力地貌减灾与工程安全,E-mail:chk658@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250910.0905.002

量分析阶段。笔者引入岩土力学和应用力学方法,从地貌发育过程及它的力学描述角度来探讨重力地貌套环演化问题,由此开启地貌演化理论的力学化进程,从而为破解在将地貌学服务于重大工程减灾工作时面临的学科瓶颈提供理论依据。

1 重力地貌套环演化理论简论

1.1 理论模式

演化是重力地貌的核心,其中包括“夷平”(razing action)和“加积”(stacking action)这 2 种地貌作用(图 1)。然而,组成地貌的物质类型多种多样、演化速度有快有慢,因而演化过程极易转化成重力地貌灾害。笔者引入岩土力学和应用力学方法,综合 Davis、Penck、King 等 3 个经典地貌演化理论,提出了重力地貌套环演化理论,如图 2 所示。重力地貌套环演化理论是一种新的地貌演化分析方法,具有三环复合嵌套的多维度结构特征。“三环”包括“宏观尺度缓变效应环”(long dimension evolution)、“微观尺度缓变效应环”(creep dimension evolution)和“急变效应环”(disaster-causing evolution)。其中,宏观尺度缓变效应环表征了一个地区的总重力地貌演化模式,全域覆盖急变效应环;微观尺度缓变效应环则赋存在宏观尺度缓变效应环框架内与部分急变效应环的交叉部位。宏观尺度缓变效应环受控于传统地貌演化,微观尺度缓变效应环表现为长时间尺度力学效应,急变效应环表现短历时动力学效应。从研究方法上看,重力地貌过程宏观尺度缓变效应主要采用地貌学和地质学方法进行研究,微观尺度缓变效应主要采用流变力学和损伤理论进行研究,而急变效应主要采用断裂力学、突变理论、爆炸力学等方法进行研究。总之,这一理论强调任何地貌格局都是重力地貌过程中宏观尺度缓变效应环、微观尺度缓变效应环和急变效应环复合嵌套物理力学行为的宏观表象,属于逻辑模型控制下的物理力学复合行为,由此打通了传统地貌学服务工程建设的最后一道科学壁垒。

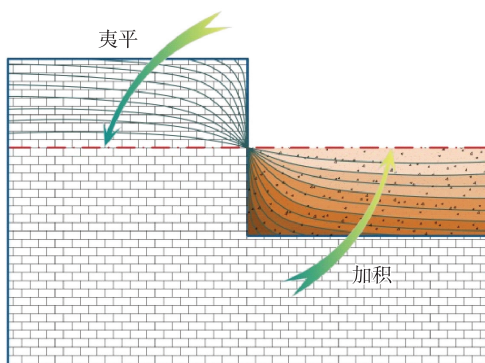


图 1 地貌夷平与加积作用

Fig. 1 Leveling and accretion of landform

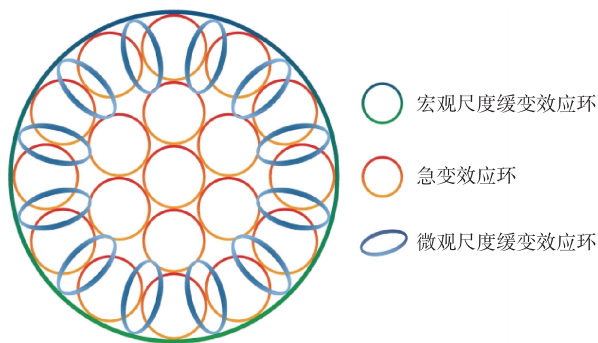


图 2 重力地貌套环演化结构

Fig. 2 Nested-loop structure for gravitational geomorphology evolution

1.2 理论解译

1.2.1 宏观尺度缓变效应

经过区域性的正地形风化、剥蚀和搬运作用以及负地形吸纳物质堆积,地形在夷高填低过程中趋于平坦化。上述变化属于重力地貌过程缓变效应,其中包括宏观尺度缓变效应和微观尺度缓变效应。一个地域的重力地貌过程缓变效应必须建立在地质构造运动相对静止的状态下,例如在新生代初期至早第三纪的 1 200 多万年内,青藏高原处于喜马拉雅运动一幕后的构造平静期,在此期间产生了青藏高原第 1 次全域性夷平作用,海拔为 300~500 m;早第三纪晚期至晚第三纪末期,是喜马拉雅运动二幕后的构造运动平静期,历时约 2 000 万年,在此期间出现了青藏高原第 2 次夷平作用。显然,正是这 1 000~2 000 万年时间尺度的构造平静期,孕育了青藏高原广袤的地貌夷平作用。而对于类似于四川盆地尺度的地貌格局,川中丘陵峰顶线夷平面的时间尺度则为 800 万年左右。图 3 显示了长江三峡深切河谷岸坡重力地貌典型的空问结构,它后部的高陡岩石边坡地貌呈现以危岩为表征的链式发育特征;河谷深切,岸坡后退演化,表现为图 4 中 A→B→C 的宏观链物理演进。由此可见,重力地貌过程的宏观尺度缓变效应常用地质年代描述,以数万年为基数。

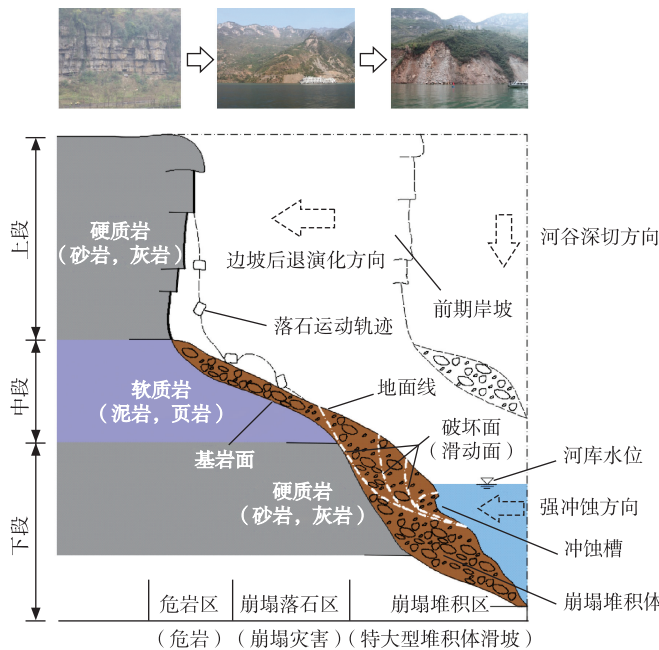


图3 长江三峡深切河谷岸坡重力地貌空间结构

Fig. 3 Spatial pattern of gravitational geomorphology in deep cutting valley at the Three Gorges of Yangtze River

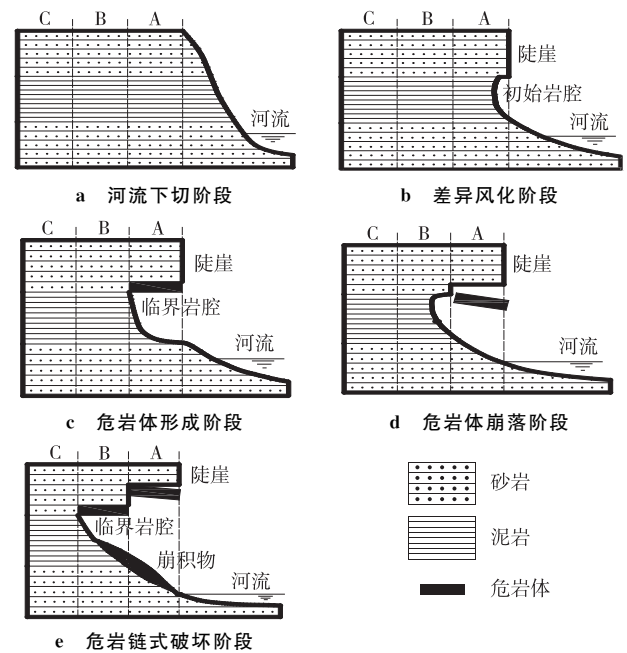


图4 缓倾角岩层河谷岸坡危岩链式发育模式

Fig. 4 Chain developing model of perilous rocks in deep valley with gently dipping rock formations

1.2.2 微观尺度缓变效应

微观尺度缓变效应主要表现为坡地岩土体在降雨和自重作用下的地表径流及面洗作用;岩土体在坡脚及沟谷内淤积,是传统水土流失的表观形式,可用水土流失通用方程描述,即:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P,$$

其中: A 为单位面积多年平均土壤侵蚀量, R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 为植被和经营管理因子, P 为水土保持措施因子。

对于图4所示的每个宏观链,如A部分在该宏观链底部的岩腔发育到临界尺寸(一般为3~5 m)后,危岩块体在岩腔顶部从下到上逐渐崩落的微观链服从重力地貌过程中微观尺度缓变效应规律。又如重庆南川金佛山甄子岩陡崖地貌演化过程(图5),其中危岩体平均宽度为35 m,当岩腔深度达到危岩体宽度的2/3左右时^[14],危岩体突发性破坏。根据危岩底部碳质页岩风化速度观测结果(图6),该边坡一个地貌演化轮回所需时间在600年左右,与当地县志记录较为接近。显然,该边坡存在a、b、c等3个危岩体(图5),它们逐一形成、破坏、崩落,边坡平行后退,表现重力地貌过程微观尺度缓变效应特征。重力地貌过程微观尺度缓变效应的时间尺度以几年至几百年为基数。

沟、河、库岸坡的重力地貌过程缓变效应以冲蚀槽龛的形成标志,它的动力作用是水流冲蚀和浪击浪蚀作用;当槽龛深度达到临界尺寸后,槽龛顶部岩土体坍塌,岸坡后退演化(图7),物理模型试验结果也证实了该现象^[15]。对于在边坡表面的松散土体而言,它在降雨作用下易形成坡面泥石流,表现为自然挖掘型和局部软化型这2种演化模式(图8)。此外,陈洪凯等人^[16]发现的火后泥石流烧猪皮效应也是典型的重力地貌过程微观尺度缓变效应。

1.2.3 急变效应

重力地貌过程急变效应对地表较小尺度地貌形态的快速刻画与塑造作用,表现为坡地岩土体在地质作用下的快速启动、快速输运和快速停淤过程,如危岩失稳破坏、崩塌落石在地表的运动与冲击、淤埋泥结石体的失水固结、滑坡宏观尺度的变形与破坏等,相关研究实例如下:陈洪凯等人^[14]研究重庆南川甄子岩危岩坐溃破坏时,发现危岩下座初期底部碳质页岩在荷载作用下存在破碎和喷射(图9),危岩体下座30 m左右时发生持续性碎裂解体(图10);王圣娟等人^[17]发现三峡水库蓄水期间岸坡破碎岩体被水体浸泡后,引发了岸坡雪崩式破坏(图11);陈洪凯等人^[18]在研究泥石流运动特性时,针对粘性泥石流提出了泥石流压胀机理——它的核心是由于

泥石流流体中固液分相流速差在泥石流体内孕育了压胀核,压胀核内压急剧增大到临界值后突然爆裂,产生泥石流龙头。重力地貌过程急变效应的时间尺度一般是几分钟至几小时。

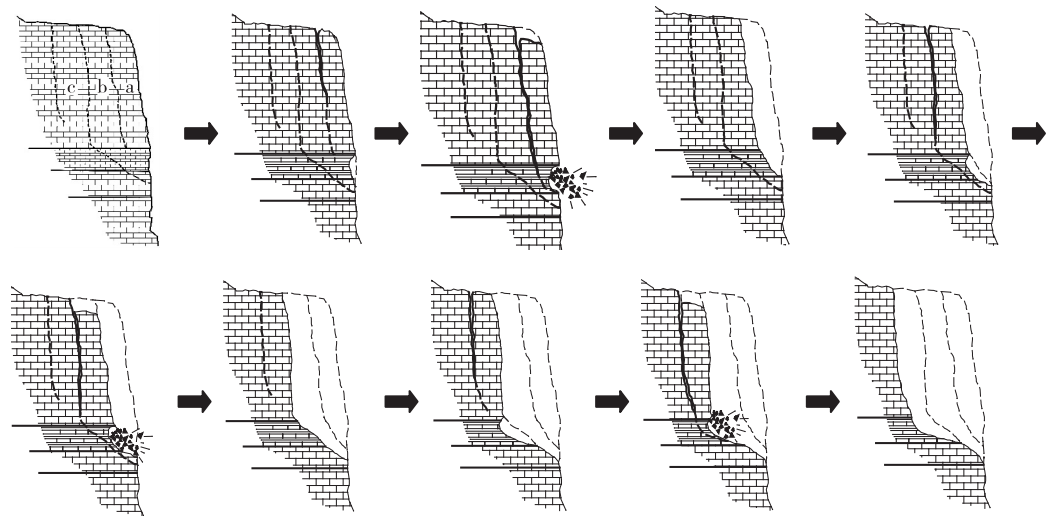


图 5 重庆南川甄子岩陡崖地貌演化过程

Fig. 5 Geomorphologic developing process for the Zhenziyan escarpment, Nanchuan, Chongqing

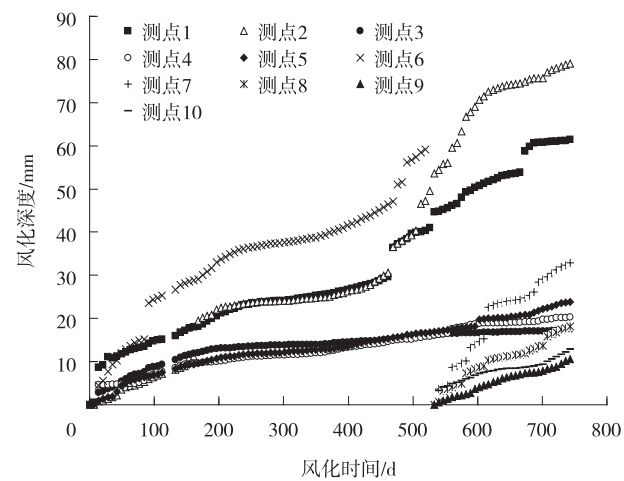


图 6 重庆南川甄子岩陡崖坡脚碳质页岩风化曲线

Fig. 6 Weathering curves of carbonaceous shale at the foot area of Zhenziyan escarpment, Nanchuan, Chongqing

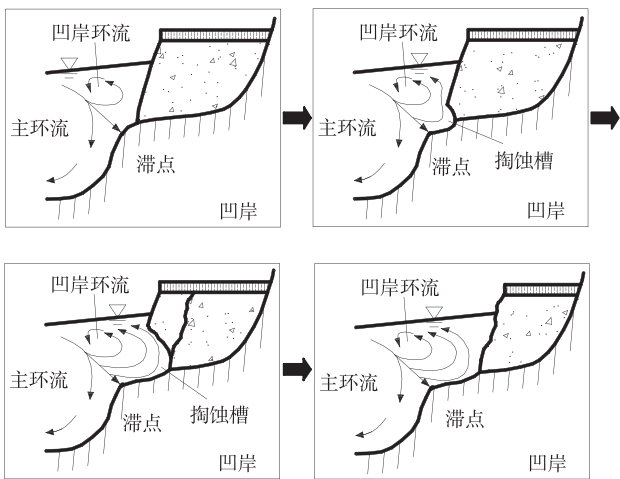


图 7 岸坡冲蚀槽(龕)地貌演进模型

Fig. 7 Geomorphological development process of bank slope triggered by impact troughs or niches

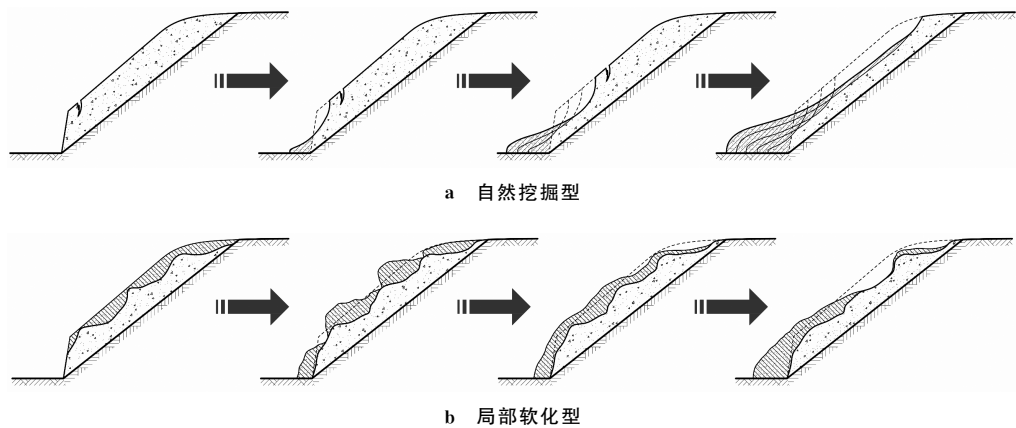


图 8 坡面泥石流演化模式

Fig. 8 Development models for slope debris flow

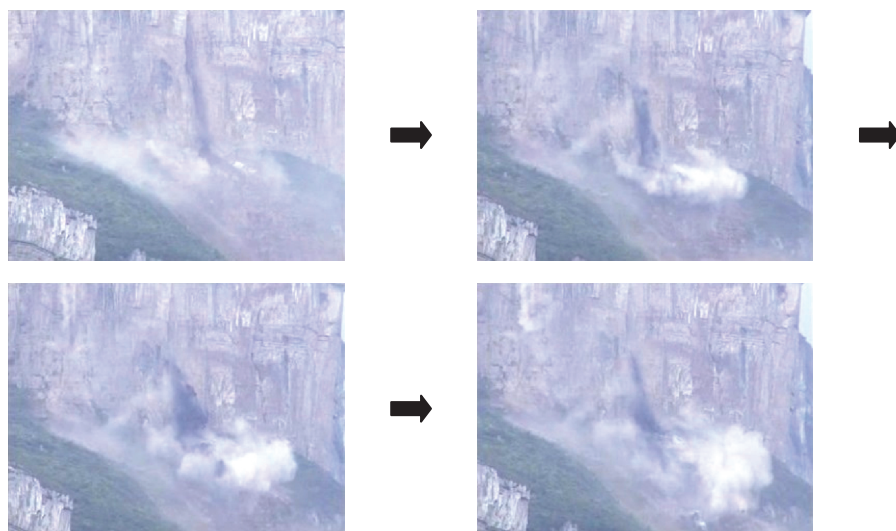


图 9 重庆南川甄子岩危岩基座碳质页岩压裂喷射

Fig. 9 Particle injection of carbonaceous shale locating in base of the Zhenziyan perilous rock, Nanchuan, Chongqing

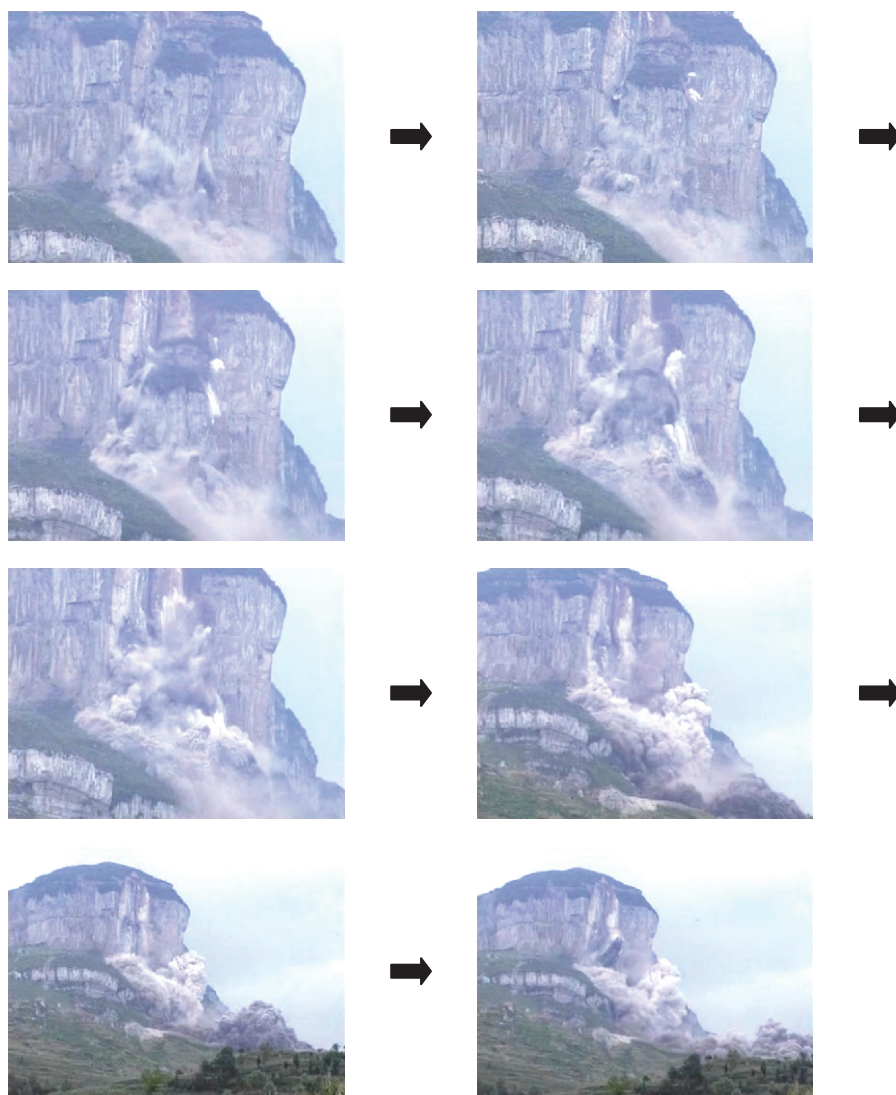


图 10 重庆南川甄子岩危岩下座破坏解体过程

Fig. 10 The seating-disintegration process of the Zhenziyan perilous rock, Nanchuan, Chongqing

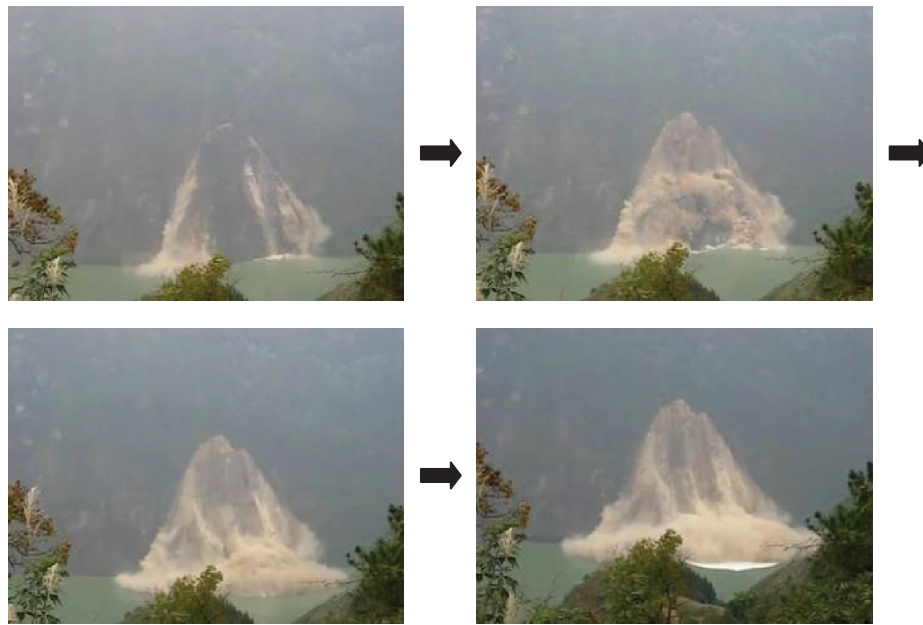


图 11 三峡水库蓄水期间巫峡龚家方岸坡发生雪崩式破坏

Fig. 11 Avalanche damage of Gongjiafang bank at Wu Gorges during impoundment of the Three Gorges Reservoir

近几十年来,国内外学者均十分重视灾害链研究,例如肖盛燮构建了灾害链式理论^[19],崔鹏等人^[20]构建了汶川地震区山地灾害链,何思明、刘威等人^[21-23]提出了滑坡引发堰塞湖等灾害链问题。迄今为止,灾害链基本停留在逻辑层面,属于“逻辑链”范畴,对于宏观尺度的防灾减灾工作有一定指导意义;而在解决灾害控制问题方面,本研究提出的重力地貌过程急变效应则更具科学性、实用性。

长期以来,在将地貌学服务于重大工程减灾方面,人们一直没有找到更好的切入点,或者说应用地貌学来服务于重大工程减灾存在学科壁垒,因为它的理论短板在于重力地貌过程力学描述进展缓慢。现有灾害链研究要么停留在概念设计阶段^[19-20],要么停留在单一灾害种类的物理变化过程模拟方面^[21]。陈洪凯等人^[15,24-25]对重力地貌过程力学描述问题进行了系统研究,如把危岩主控结构面类比为边裂纹,构建了危岩联合断裂强度因子(K_e)的计算公式:

$$K_e = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta}{2} (K_I (1 + \cos \theta) - 3K_{II} \sin \theta) = f(\sigma, \tau), \theta = \arcsin \left(\frac{K_{II}}{2K_I^2} (2K_I - 9K_{II} + \sqrt{(9K_{II} - 2K_I)^2 + 32K_I^2}) \right),$$

其中: K_I 和 K_{II} 分别为I型断裂应力强度因子和II型断裂应力强度因子(单位: $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), θ 为断裂扩展角(单位: $^\circ$), σ 和 τ 分别为危岩主控结构面未贯通区法向应力和切向应力(单位: kPa); K_e 是 σ 和 τ 的函数,在实际工作中,可通过应力传感器实时采集 σ 和 τ 的数值,由此精确捕捉到危岩灾害精确预警信号。

陈洪凯等人^[26]还通过计算危岩弹性应变能,并假定应变能全部转化为动能,由此建立了危岩破坏瞬时速度计算式:

$$v = 2 \sqrt{\frac{2\Delta E}{m}}, \quad (1)$$

其中: v 为危岩破坏瞬时平均速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ΔE 为危岩应变能(单位: kJ); m 为危岩体质量(单位: kg)。然后,他们依据式(1)得到危岩坐滑、坐倾和坐溃破坏模式判别式,并计算出长江三峡巫峡望霞危岩破坏瞬时平均速度为 $2.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。按照危岩破坏瞬间危岩体顶部至底部速度线性分布,他们推知望霞危岩破坏瞬间危岩体底部的突变速度约为 $5.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,危岩体顶部和底部存在较大水平运动速度差,它的破坏表现为转动与平动共存;但是由于危岩体底部受到基座阻滑,且危岩体顶部后靠母岩壁面并产生明显的摩擦作用,最终危岩体停靠在母岩上,除右上角压碎破损外,危岩体整体旋转 30° 左右。这一结果与现场实际情况相符(图 12)。

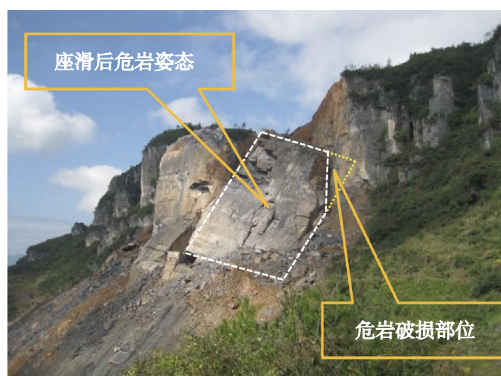


图12 望霞危岩后倾坐滑破坏示意图

Fig. 12 Illustration at backward sliding damage for the Wangxia perilous rock

2 讨论

2.1 重力地貌套环演化理论是重力地貌减灾的方法论

重力地貌演化是一个复杂的地质地貌过程,危岩形成与破坏、落石运动、泥石流运动与冲击、滑坡变形与破坏等都是重力地貌演化的表现形式与动力学现象。为了在更高层面辨识和认知区域性、局地性重力地貌问题,需要从纷繁复杂的重力地貌现象中抽象和提取出共性规律与科学原理。显然,重力地貌套环演化理论是一种方法论。众所周知,方法论是一种以解决问题为目标的理论体系或系统^[27],也是一个哲学概念。重力地貌套环演化理论是关于“重力地貌是什么、怎么样”的根本观点,用这一观点去认识、利用和改造重力地貌,对于服务国民经济建设、支撑重力地貌减灾需求具有重要意义。

根据重力地貌套环演化理论,一个地区或一个不同尺度的地貌格局的中长期地貌环境变化受控于缓变效应,属于自然作用范畴,是认识世界的宏观本底架构。充分掌握了缓变效应,就对该地区及地貌格局的重力地貌演化趋势有了明确的方向性认知。急变效应则体现了该地区及地貌格局的重力地貌短期演变方式与趋势,与人类近期生存环境密切相关,也为人类工程活动提供了关键性防控元素。敬畏自然,协调人地关系,实现可持续发展,这也是人地伦理^[28-29]的表现形式。

中华人民共和国成立以来,川藏公路、川藏铁路、青藏公路、青藏铁路、三峡工程、雅下水电工程、向家坝水电工程、白鹤滩水电站、孟底沟水电站、大藤峡水电站、中巴经济走廊喀喇昆仑公路等一大批重大工程相继开建及持续营运,人类活动已全面延伸至青藏高原地质环境脆弱区。在进行重大工程新建与改扩建时,均可根据重力地貌套环演化理论去认知地貌环境,抽丝剥茧,科学认识重大工程所在地区的重力地貌过程缓变效应与急变效应,切实做到遵从、利用和改造自然,循序渐进,以最小的代价,实现重大工程的社会、经济、环境、生态等多重效益的最大化。

2.2 重力地貌套环演化理论是重力地貌减灾的实践论

重力地貌套环演化理论是一个聚焦坡-谷地貌系统的高度综合的地貌演化理论,涵盖了复杂的地质地貌物理学作用,从实践中提取地貌演化的缓变效应和急变效应,据此开展机制模拟及力学分析,并以此为指导,科学分析和预测该地域或线(路)域的地貌环境变化和地质灾害发育机制与规律,服务社会经济建设。

长期以来,地质灾害防治主要是针对危岩崩塌、滑坡、泥石流等具体灾害类型进行工程处治,是对重力地貌过程急变效应的节点控制。而在重力地貌套环演化理论指导下,瞄准重力地貌物理力学演进过程,以“过程遏制”和“方向调控”为着力点,研发新技术,遏制发育进程,调控演进方向,则可实现重力地貌灾害的靶向治理。例如,为了遏制斜坡表层稳定性较差的大型崩塌堆积体发生变形破坏,陈洪凯等人^[30]研发了固坡抗滑支挡系列新技术,如土质滑坡筏板式格构-锚杆-锚索复合抗滑结构及方法(图13),获得了固坡结构所需锚索数量和锚杆数量计算公式。此外,陈洪凯等人^[31]还研发了一种高速水幕泥石流冲击方向调控新技术——在泥石流沟凹岸未设置高速水幕时,从上游高速运动而来的泥石流直接冲击岸坡,造成泥石流弯道凹岸冲刷;但在设置高速水幕装置后,泥石流体还未运动到岸坡时便已经调向,使岸坡免遭泥石流冲击毁损(图14)。

在重力地貌套环演化理论研究及应用中,需综合采用传统的地质地貌分析法、现场勘测和长时间尺度观测

量测方法、大型物理模拟及数值仿真、工程力学、流体力学、环境力学及结构工程学等一系列研究方法,以“演化”为纲,以“过程”为目,“过程遏制”和“方向调控”相结合,纲举目张,从而推进该理论在实践中的应用。

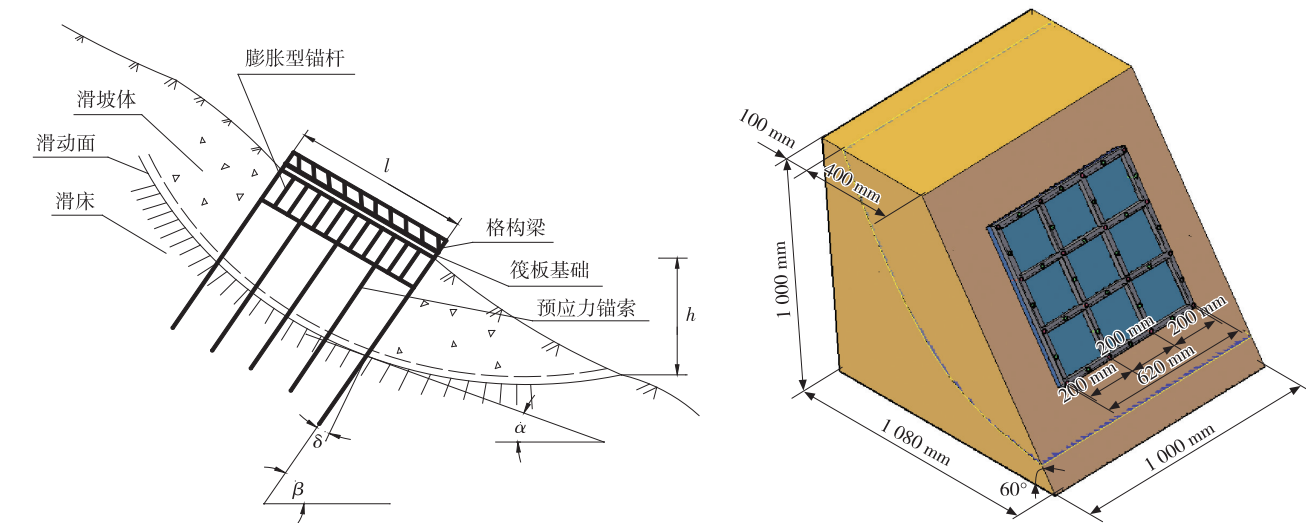


图 13 筏板式格构-锚杆-锚索复合抗滑结构

Fig. 13 Composite anti-slide structure and method of raft-typed lattice frame-anchor rod-anchor cable for earth landslide

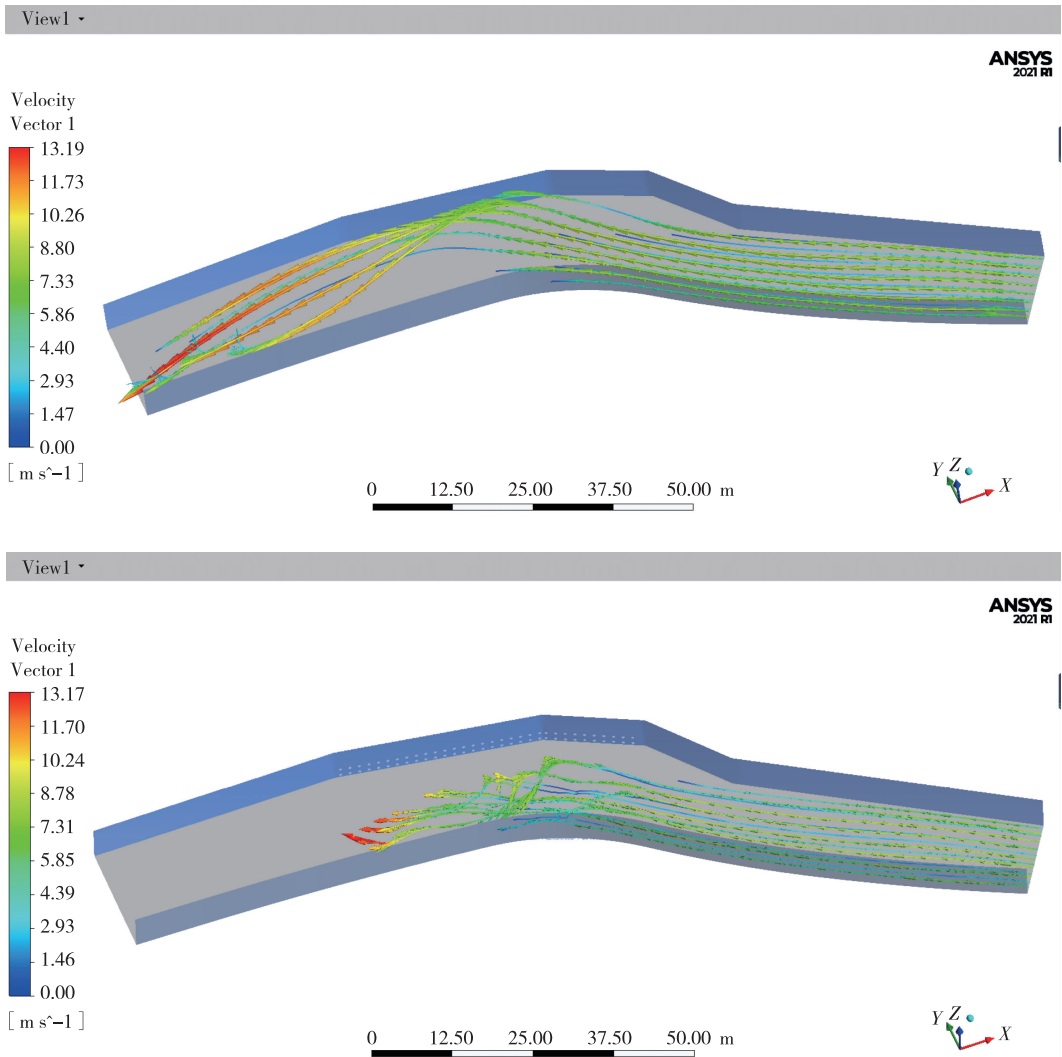


图 14 高速水幕泥石流冲击方向调控方法

Fig. 14 Regulation for movement direction of debris flow using high-speed water curtain

3 结束语

“夷平-加积”地质地貌作用体现了重力地貌“演化”这一核心科学问题。聚焦重力地貌的传统地貌特征及物理力学描述,笔者提出了重力地貌套环演化理论,认为在大尺度构造稳定时期内区域性地貌演化存在重力地貌过程的宏观尺度缓变效应环、微观尺度缓变效应环和急变效应环的复合结构,并详细论述了重力地貌过程的“三环”效应,提出重力地貌过程宏观尺度缓变效应以数万年为基数、微观尺度缓变效应以几年至几百年为基数、急变效应时间尺度一般为几分钟至几小时。重力地貌套环演化理论是重力地貌减灾的方法论和实践论,它回答了“重力地貌是什么、怎么样”这一问题。以“演化”为纲,以“过程”为目,将“过程遏制”与“方向调控”相结合,这是重力地貌减灾的新思想。

参考文献:

- [1] RICHARD J C, STANLEY A S, DAVID E S. *Geomorphology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [2] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 1-12.
LI J J. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 1-12.
- [3] 吴珍汉, 胡道功, 刘崎胜, 等. 西藏当雄地区构造地貌及形成演化过程[J]. 地球学报, 2002, 23(5): 423-428.
WU Z H, HU D G, LIU Q S, et al. The formation and evolution of tectonic landform of damxung area in central Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(5): 423-428.
- [4] 郭进京, 韩文峰, 梁收运. 青藏高原东北缘岷县-武都地区构造地貌演化与高原隆升[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 383-392.
GUO J J, HAN W F, LIANG S Y. Tectono-morphological evolution of the Minxian-Wudu area on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and plateau uplift[J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 383-392.
- [5] SCHMIDT J L, ZEITLER P K, PAZZAGLIA F J, et al. Knickpoint evolution on the Yarlung River: evidence for late Cenozoic uplift of the southeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 430: 448-457.
- [6] 黄晓力, 丁浒, 那嘉明, 等. 地貌发育演化研究的空代时理论与方法[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 94-104.
HUANG X L, DING H, NA J M, et al. Theories and methods of space-for-time substitution in geomorphology[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 94-104.
- [7] 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 等. 构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究[J]. 科学通报, 2018, 63(30): 3070-3088.
LIU J, ZHANG J Y, GE Y K, et al. Tectonic geomorphology: an interdisciplinary study of the interaction among tectonic climatic and surface processes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(30): 3070-3088.
- [8] 刘芬良, 高红山, 李宗盟, 等. 金沙江巧家-蒙姑段的阶地发育与河谷地貌演化[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1095-1105.
LIU F L, GAO H S, LI Z M, et al. Terraces development and their implications for valley evolution of the Jinsha River from Qiaojia to Menggu[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 1095-1105.
- [9] HILL C A, POLYAK V J. A karst hydrology model for the geomorphic evolution of Grand Canyon, Arizona, USA[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103279.
- [10] 潘保田, 蔡顺, 耿豪鹏. 山体隆升历史与地貌演化过程的数值模拟约束: 以青藏高原东北缘河西走廊中段的周边年轻上升山地为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(4): 523-536.
PAN B T, CAI S, GENG H P. Numerical simulation of landscape evolution and mountain uplift history constrain: a case study from the youthful stage mountains around the central Hexi Corridor, NE Tibetan Plateau[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(4): 523-536.
- [11] 丁智强, 王平, 李玉辉. 基于面积-高程积分值的喀斯特地貌演化动力机制研究[J]. 第四纪研究, 2021, 41(6): 1546-1557.
DING Z Q, WANG P, LI Y H. Dynamic mechanism of karst geomorphology evolution based on hypsometric index[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(6): 1546-1557.
- [12] 姜勇彪, 郭福生, 黎广荣, 等. 江西丹霞地貌演化阶段与分布及其构造控制探讨[J]. 地质论评, 2024, 70(1): 44-58.
JIANG Y B, GUO F S, LI G R, et al. Study on the evolution of Danxia landform in Jiangxi Province and its structural factors[J]. *Geological Review*, 2024, 70(1): 44-58.
- [13] 安妮, 蒋玺, 钱焕, 等. 贵州涟江惠水段河流阶地特征与地貌演化研究[J]. 地质论评, 2023, 69(5): 1991-2002.
AN N, JIANG X, QIAN H, et al. River terrace characteristics and their geomorphic significance in Huishui Basin along Lianjiang River in Guizhou Plateau[J]. *Geological Review*, 2023, 69(5): 1991-2002.

- [14] 陈洪凯,王圣娟.三峡库区灰岩地区岩质边坡危岩坐溃演化机制研究:以重庆市金佛山甄子岩为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2017,34(3):38-43.
CHEN H K,WANG S J. Study on sinking-disintegration evolution mechanism of perilous rock for rock slope in limestone area of Three Gorges Reservoir Area; taking Zhenziyan cliff of Jinfo Mountain in Chongqing City as an example[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2017,34(3):38-43.
- [15] 陈洪凯.重力地貌过程力学描述与减灾(库岸滑坡)[M].北京:科学出版社,2020.
CHEN H K. Mechanics description and disaster mitigation of geomorphological processes (bank landslide)[M]. Beijing:Science Press,2020.
- [16] 陈洪凯,张斌,王圣娟,等.火后泥石流烧猪皮效应[J].水土保持学报,2025,39(3):345-351.
CHEN H K,ZHANG B,WANG S J,et al. Study of the "roasted pigskin-effect" of post-fire debris flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2025,39(3):345-351.
- [17] 王圣娟,陈洪凯.类土质岸坡雪崩式破坏机制研究:以三峡库区龚家方岸坡为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2018,35(6):34-39.
WANG S J,CHEN H K. Study on avalanche failure mechanism for soil-similar bank; taking Gongjiafang bank of Three Gorges Reservoir Area as an example[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2018,35(6):34-39.
- [18] 陈洪凯,杜榕桓,唐红梅,等.泥石流龙头压胀机理探析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(5):790-793.
CHEN H K,DU R H,TANG H M,et al. Study on blasting mechanism of high pressure core in debris flow[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2008,27(5):790-793.
- [19] 肖盛燮.灾变链式理论及应用[M].北京:科学出版社,2006.
XIAO S X. Catastrophic chain theory and its application[M]. Beijing:Science Press,2006.
- [20] 崔鹏,韦方强,陈晓清,等.汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J].中国科学院院刊,2008,23(4):317-323.
CUI P,WEI F Q,CHEN X Q,et al. Geo-hazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2008,23(4):317-323.
- [21] 何思明,白秀强,欧阳朝军,等.四川省茂县叠溪镇新磨村特大滑坡应急科学调查[J].山地学报,2017,35(4):598-603.
HE S M,BAI X Q,OUYANG C J,et al. On the survey of giant landslide at Xinmo Village of Diexi Town, Maoxian County, Sichuan Province, China[J]. Mountain Research,2017,35(4):598-603.
- [22] 刘威,何思明.金沙江沃达潜在滑坡诱发灾害链成灾过程数值模拟[J].工程科学与技术,2020,52(2):38-46.
LIU W,HE S M. Numerical simulation of the evolution process of disaster chain induced by potential landslide in woda of Jinsha River Basin[J]. Advanced Engineering Sciences,2020,52(2):38-46.
- [23] LIU W,HE S M. Dynamic simulation of a mountain disaster chain: landslides, barrier lakes, and outburst floods[J]. Natural Hazards,2018,90(2):757-775.
- [24] 陈洪凯.重力地貌过程力学描述与减灾(岩石崩塌)[M].北京:科学出版社,2019.
CHEN H K. Mechanical description and mitigation of gravity geomorphic processes (rock collapse)[M]. Beijing:Science Press,2019.
- [25] 陈洪凯,张瑞刚,唐红梅,等.压剪型危岩破坏弹冲动力参数研究[J].振动与冲击,2012,31(24):30-33.
CHEN H K,ZHANG R G,TANG H M,et al. Elastic & impulsive dynamic parameters of a ruptured compression-shear perilous rock[J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(24):30-33.
- [26] 陈洪凯,王圣娟.望霞危岩破坏模式及其力学解译[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2018,35(1):48-55.
CHEN H K,WANG S J. Study on failure model of Wangxia perilous rock and its mechanical interpretation[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2018,35(1):48-55.
- [27] 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域:开放的复杂巨系统及其方法论[J].自然杂志,1990,12(1):3-10.
QIAN X S,YU J Y,DAI R W. A new field of science: open complex giant systems and their methodology[J]. Nature Magazine,1990,12(1):3-10.
- [28] 郑度.21世纪人地关系研究前瞻[J].地理研究,2002,21(1):9-13.
ZHENG D. Prospects of studies on man-land relationship in the 21st century[J]. Geographical Research,2002,21(1):9-13.
- [29] 蔡运龙.人地关系研究范型:哲学与伦理思辩[J].人文地理,1996,11(1):1-6.
CAI Y L. A paradigm of the research on man-earth relationship: philosophical and ethical speculations[J]. Human Geography,1996,11(1):1-6.
- [30] 陈洪凯,王圣娟,杨铭.土质滑坡筏板式格构-锚杆-锚索复合抗滑结构及方法:ZL201510023336.4[P].2017-01-25.

CHEN H K, WANG S J, YANG M. Composite anti-slide structure and method of raft-typed lattice frame-anchor rod-anchor cable for earth landslide; ZL201510023336. 4[P]. 2017-01-25.

[31] 陈洪凯, 胡卸文, 王圣娟, 等. 用于泥石流沟弯道凹岸防护的防护系统及防护方法; ZL202010500161. 2[P]. 2020-08-28.

CHEN H K, HU X W, WANG S J, et al. The protection system and protection method for the concave bank protection of debris flow ditch bend; ZL202010500161. 2[P]. 2020-08-28.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

A Preliminary Study on Nested-Loop Evolution Theory for Gravitational Geomorphology

CHEN Hongkai

(School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong Sichuan 637009, China)

Abstract: The development of landforms at different spatial scales essentially belongs to the problem of gravity geomorphological evolution characterized by perilous rocks, landslides, and debris flows. Paying attention to two classic geomorphic function of “leveling” and “accumulation”, a nested-loop evolution theory for gravitational geomorphology has been preliminarily proposed through integrating the three famous geomorphological evolution theories of Davis, Penck, and King by introducing geotechnical mechanics and applied mechanics. Following the new theory, during stable period of tectonic movement, regional geomorphological evolution involves a composite structure of “macro scale gradual change effect loop”, “micro scale gradual change effect loop”, and “rapid change effect loop” of gravity geomorphological processes. Based on the theory, the “three-loop” effect of gravity geomorphology process is analyzed, and the time scales of macro scale gradual change effect with tens of thousands of years, micro scale gradual change effect with years to hundreds of years, and rapid change effect loop with minutes to hours are given. Some scientific attributes of the new theory are discussed, reminding of a methodology and practical approach for gravity geomorphological disaster reduction, which answers the question of “What is gravity geomorphology and how is it”. Further, a new idea of gravity geomorphological disaster reduction combining “process containment” and “impact direction steering” has been proposed, with “evolution” as the guiding principle and “process” as the objective. The theory enriches the scientific contents of traditional geomorphology and has positive significance for promoting the disaster reduction of gravity geomorphology in engineering.

Keywords: nested-loop evolution theory for gravitational geomorphology; gravity geomorphic process; process containment; impact direction steering; disaster reduction of gravitational geomorphology

(责任编辑 方 兴)