

流域侵蚀过程研究

朱永恒^{1,2}, 濮励杰¹

(1. 南京大学城市与资源学系, 南京 210093; 2. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241000)

摘要: 论文系统总结了流域侵蚀的概念和流域侵蚀系统及其过程, 认为流域侵蚀系统是一种开放系统, 并具体阐述了流域侵蚀力、流域侵蚀系统的空间结构、功能和演化过程。重点分析了流域侵蚀的模型与模拟方法, 包括流域整体侵蚀强度模拟、流域侵蚀发展过程模拟与流域侵蚀内部差异模拟三个方面。

关键词: 流域; 流域侵蚀; 流域侵蚀系统; 流域侵蚀过程

中图分类号: S 157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)02-0015-03

Research on Process of Erosion in Catchments

ZHU Yong-heng^{1,2}, PU Li-jie¹

(1. Dept. of Urban and Resources, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

(2. Institute of Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: The conception, the system and process of erosion in catchments were summarized. The system of erosion in catchments is an open system, and the erosive forces, spatial structure, function and evolvement process of erosion in catchments was respectively expatiated. The model and simulation of erosion in catchments were analyzed.

Key words: catchments; erosion in catchments; system of erosion in catchments; the process of erosion in catchments

把流域作为一个经济和生态单位进行研究正在兴起, 有利于了解自然界各要素之间的协同发展规律, 为更好的对流域系统进行管理提供理论依据。流域越来越成为经济活动和环境保护的基本单元, 设计和贯彻有效土壤侵蚀与沉积控制策略需要精确的估算土壤侵蚀速率, 从而实现可持续的土地和水资源利用。

1 流域侵蚀的概念

流域侵蚀是指在内外力共同作用下, 流域内地表土层剥离、输移的过程, 从而导致流域自然环境的改变如地形起伏变化、水土资源质与量的改变等。流域侵蚀是一个缓慢的过程, 但是在越来越强烈的人类活动干扰下, 流域侵蚀速率在提高, 特别是那些人类活动集中区, 侵蚀速率明显高于自然环境维持较好的地区, 主要是因为人类通过改变地表覆盖而改变地表粗糙度, 从而改变侵蚀的速率^[1]。

流域侵蚀是流域内水系发展和流域地貌演变的基本动力, 并且是泥沙输移与沉积的物质来源, 在它们的共同作用下, 流域整体海拔逐渐降低, 最终形成准平原, 而且水系也逐渐达到均衡状态, 形成稳定的流域地貌系统和水系结构。

流域侵蚀根据侵蚀动力分为水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀和人为侵蚀四种类型^[2], 根据侵蚀部位分为沟蚀、面蚀和河道侵蚀三种类型^[2]。坡地上被侵蚀的物质可以直接进入河道成为河流泥沙的组成部分, 也可以暂时停积在坡地上成为后来的侵蚀对象, 因此坡地上的侵蚀量一般大于产沙量, 只有在地面条件有利, 搬运力很强的地区, 两者才会接近或近似相等^[3]。

2 流域侵蚀系统及其过程

2.1 流域侵蚀系统是一种“开放系统”

在物质能量的交换过程中, 系统内的物质运动状态、能量的分配以及各部分之间的结构不断地发生自我调整, 系统自我调整的最终目的在于力求使系统的输入经过处理和输出达到逐渐适应和稳定的状态。一方面从大气和地壳中不断接收水和泥沙; 另一方面又源源不断地将水和泥沙输送到大海。由于天气现象的多变性和地表物质组成的复杂性, 输入流域各个部分的泥沙不可能总是正好和这些响应部分输出的部分相等, 流域地表不可避免地会有一定数量的冲淤变化, 因此, 流域地貌无时无刻不处于变化和发展之中。

① 收稿日期: 2004-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(70341021); 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金(2003); 安徽师范大学青年基金(2001QL33) 基金联合资助

作者简介: 朱永恒(1975-), 男, 安徽含山人, 博士生, 讲师, 研究方向为水土流失。

2.2 流域侵蚀力

主要包括重力侵蚀、降雨溅蚀和流水侵蚀^[4]。重力侵蚀是指位于坡面上的物质由于其向下移动的势能大于阻力时而发生位移的现象,主要为后面的流水侵蚀提供物质来源,例如崩塌和滑坡都是在重力作用而形成的自然灾害。降雨溅蚀是指地表物质在雨滴的冲击下而发生位移的现象。这两种侵蚀作用主要发生在坡面上,是坡面地貌形成的主要动力。流水侵蚀是指河流的水流破坏并掀起地表物质的作用,包括侵蚀、磨蚀和溶蚀,统称为河流的侵蚀作用。流水侵蚀按照作用方向分为下切侵蚀和侧方侵蚀两种,按照侵蚀的方式分为面状侵蚀和线状侵蚀。

流域侵蚀所带来的侵蚀总量包括溶质输移模量和输沙模量两部分,气候湿润的欧洲大陆的溶蚀量占侵蚀总量的 60%,而较干旱的澳洲,溶蚀量仅占侵蚀总量的 4.8%,全球平均溶蚀量约占侵蚀总量的 18%,这一估值与岩石圈中碳酸盐含量是可比的^[4]。

侵蚀是引起地表物质迁移的外因,也是塑造地形的主要因素,通过侵蚀作用,才能引起土壤和基岩的破坏,因此,它是流域系统物质侵蚀、搬运和沉积过程的主要环节。也就是说,只有有了侵蚀,才会有流域系统的产沙、输沙和滞沙过程。例如一个小流域,地表土层在降雨、重力等营力作用下发生侵蚀、搬运和堆积,构成了一个完整的流域侵蚀系统,流域系统的上游因水土流失而降低,下游河床因淤积而抬高。

2.3 流域侵蚀系统的空间结构

Schumm^[1]根据流域功能把流域系统分为三个子系统:坡地子系统、河道子系统、三角洲子系统。它们之间通过能量流动和物质循环联系起来,构成一个开放系统,并且三个子系统之间也自成一体,各有其特点。坡地子系统产生大量的泥沙,暂时储存在子系统内或者源源不断的供应给河道或三角洲子系统,河道子系统的主要作用在于输沙,而三角洲子系统是接受泥沙沉积的场所。

2.4 流域侵蚀系统的功能

即流域侵蚀系统内以及的系统外部的物质循环和能量流动,是陆地水循环和地球化学循环的一部分,包括流域系统中泥沙的侵蚀、输移和沉积(Erosion-Transport-Deposition),不断塑造着系统的形态和结构^[5]。

对于流域系统的三种功能,侵蚀是指发生在坡地上的溅蚀和冲蚀以及河道侵蚀,输移发生在沟道中,而沉积主要集中在三角洲、沟道和坡地下部。但是对于一个流域侵蚀系统来说,侵蚀发生在坡地(物质的完全损失),沉积发生在河口。总体上,流域内部物质的损耗量与流域面积的比值代表着流域的侵蚀速率^[6]。

一个流域可以看作水系与坡地系统的组合,风化作用为流域侵蚀提供物质,在重力和流水作用下,风化物质首先发生侵蚀,被水流带到水系(河流湖泊)中,发生搬运和堆积,并在这一过程中水系得以形成和发展,流域整体降低,逐渐夷平。可以用流域范围内的侵蚀模数或侵蚀速率来度量流域侵蚀的强度,并且要考虑侵蚀模数的时空分布,即一个流域的侵蚀或降低并不是时时地地都是相同的,而是随着时间而变

化,随着空间位置而不同。这一点对于流域管理来说非常重要。而流域范围内的侵蚀与堆积是同时发生的,并不是所有的侵蚀物质都被输送到河口,而是在输移过程中发生一定的沉积,并作为下一步侵蚀的物质。对此进行描述的是泥沙输移比,是对流域内物质损耗的度量,也是对流域内物质的重新空间分配进行度量。

2.5 流域侵蚀的演化过程

首先假定某一地区的原始地貌是一个简单的平原,这个平原经过地壳运动而被抬升,抬升到一定高度后转变为稳定状态,这时降雨及其流水侵蚀开始起作用。大致分为三个阶段^[2]:第一阶段,流域侵蚀幼年期。河流顺着被抬升的原始倾斜地面发育,水文网稀疏,在河谷之间存在着宽广平坦的分水地。随着河流的下切侵蚀,河流比降开始加大,坡折增多,横剖面呈狭窄的 V 字形,谷坡陡峭。较大的河流逐渐趋于均衡状态。此后,谷坡的剥蚀速度相对大于河流下切速度,河谷不断展宽。这个时期侵蚀作用以重力侵蚀和溯源侵蚀为主。

第二阶段,流域侵蚀壮年期。谷坡不断后退,使分水岭两侧的谷坡日益接近,终于相交,原来宽平的分水地面最后变成狭窄的脊岭。但这时的谷坡仍然较陡峭,崩塌、滑坡过程仍很活跃。随着谷坡侵蚀作用的不断进行,谷坡逐渐减缓,山脊变得浑圆,谷坡上岩屑很多,谷坡上部的岩屑通过土溜或土壤蠕动向下搬运,下坡的岩屑主要是受流水片状冲刷和谷坡侵蚀,这时在谷坡下部常呈凹形坡。壮年期阶段的主河一般都已趋于均衡状态,到壮年期最后阶段,较小的支流也渐渐趋于平衡状态,这时的河谷比较开阔,山脊也浑圆低矮。该时期侵蚀作用以侧蚀和重力侵蚀为主。

第三阶段,流域侵蚀老年期。河流停止下切侵蚀,分水岭将渐渐下降,地面成微微起伏的波状地形。河流蜿蜒曲折,河谷展宽,谷坡较稳定。如果有局部坚硬岩石区,因抗侵蚀力强而保留有突出的山丘,孤立在周围平缓起伏地形之上,称为侵蚀残丘。整个地面称为准平原,它代表河流地面发育的终极阶段。该时期侵蚀作用以侧蚀为主。

戴维斯提出流域侵蚀演化过程是一个循环往复的过程^[2]。随着地质构造运动的发展变化,流域侵蚀演化过程可以从第二阶段或第三阶段发生回春现象,完整的流域侵蚀演化过程很难找到,但是从历史过程来看,流域侵蚀演化过程其实就是一个循环往复的过程,结果使流域侵蚀地貌长期处于非平衡态^[7]。

3 流域侵蚀的模型与模拟

对流域侵蚀进行模拟,主要包括三个方面的内容,一是把流域作为一个均匀的整体来模拟它的侵蚀强度,可用侵蚀速率或侵蚀模数来表示;二是模拟流域侵蚀强度(侵蚀速率或侵蚀模数)的时间变化过程;三是模拟流域内部在时空上的侵蚀差异。侵蚀模数是指单位时间内单位面积上被侵蚀物质的数量 $t/(km^2 \cdot a)$,侵蚀速率是指单位时间被侵蚀物质的厚度 (m/ka) 。对流域侵蚀进行模拟的目的是了解流域侵蚀的速度、是否超过流域的本底侵蚀、流域侵蚀的发展阶段以及流域侵蚀的主要影响因素等。这些对于流域治理、保护和

流域管理具有非常重要的现实意义。

3.1 流域整体侵蚀强度模拟

把流域作为一个均匀整体, 定量表示流域侵蚀强度的指标是流域侵蚀模数或侵蚀速率, 可以通过以下两类模型来加以模拟:

(1) 经验相关模型。流域泥沙由于在产生、输送和淤积等整个过程比较复杂, 加之受地形地貌地质条件和人为因素等的限制, 使流域泥沙运动的机理难以掌握。因此, 流域侵蚀产沙模型大多为经验相关模型。该类模型缺乏明确的物理成因机制, 区域性限制很大, 在一些小流域中尚有一定的适用性, 但在大中长尺度流域中其适应性不强。

流域侵蚀产沙量经验公式是根据产沙量与影响侵蚀产沙的各种因素的应验关系建立的。从侵蚀产沙过程来看, 影响因素主要有降雨侵蚀力、径流量大小、土壤分离的难易程度、水流冲刷携带泥沙的能力。降雨溅蚀力取决于雨滴动能、雨滴数量和降雨强度; 影响土壤分离难易程度及产沙量的因素有地质、土壤类型及结构、坡度、植被及土壤含水量等; 水流的挟沙能力取决于水流及泥沙的特性, 如流量、流速、能坡、泥沙组成、黏滞性等。美国通用土壤流失方程(USLE)就是其中的一个典型:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

式中: E ——从一个特定的地块得到的单位面积上平均年土壤流失量($t/hm^2 \cdot a$); R ——该地平均年降雨侵蚀能力的系数(根据雨能和暴雨强度的检测); K ——土壤可蚀性因子($t/hm^2 \cdot a$); L ——坡长(m); S ——坡度($^\circ$); C ——种植管理系数; P ——水土保持实施情况系数(J/m^2)。

后来 Williams 于 1975 年发展了该模型, 提出了修正的土壤流失量通用方程(MUSLE), 该模型可以计算一次降雨(暴雨)的侵蚀产沙量。

我国众多学者根据黄土高原小流域侵蚀观测值建立了大量的经验方程, 对于各个小流域侵蚀产沙量的计算及预测未来发展态势非常有用。

(2) 物理成因性模型。基于侵蚀力学、水力学、水文学及泥沙运动力学等基本理论, 利用各种数学方法, 把流域侵蚀产沙、水沙汇流及泥沙沉积的物理过程经过简化, 所建立起来的能模拟物理过程的产流产沙模型。在建立模型时, 既考虑物理概念、物理过程, 又适当借用水文的方法, 灵活性较大。该类模型在形式上又分为集中型和分散型, 前者对资料要求很严, 考虑因素多, 成因性非常强, 但模型结构复杂, 参数多, 实际应用困难; 后者则克服了前者的许多不足, 它将流域划分为若干均匀的单元, 使每一个单元上影响因素各有侧重, 进行分过程分别模拟, 最后再将各单元进行拼接, 计算出流域总的产流产沙量。这样使得模型的物理概念更加明确, 操作性强, 便于在实际中应用推广。例如汤立群^[8]所研究的流域产流产沙模型, 在建模时按自然水系划分单元, 又将单元区分为几个微地貌区, 各单元水沙过程演算至流域出口迭加得出流域产流产沙过程。这样不仅解决了降雨、侵蚀产沙和下垫面的不均匀性, 同时也解决了水沙的演算问题, 并根据水流做功和能量平衡原理推导出各个微地貌区上的侵蚀产沙量计算公式, 从而建立

起具有物理过程基础的侵蚀产沙模型。

该类模型以 Simons 等在科罗拉多州立大学发展的科罗拉多州立大学水流和泥沙推演模型(CSU)为代表。该类模型较好地解决了经验方程的弊端, 模型可分过程分别模拟, 且物理概念明确, 它不仅适合小流域侵蚀产沙的模拟, 同时对大中长尺度流域也比较适合。但是物理成因模型仍然面临着很多问题, 例如, 流域侵蚀泥沙输移比问题、重力侵蚀问题、分散性成因模型的推广问题等。

根据以上模型的模拟, 可以计算出一个流域整体上侵蚀的强度。尹国康^[9]计算了全国47个流域的侵蚀速率, 例如松花江流域侵蚀速率为 $1.4 m/ka$, 黄河洛口以上流域侵蚀速率达 $64.5 m/ka$, 黄河三门峡以上流域侵蚀速率达 $142.6 m/ka$, 长江大通以上流域侵蚀速率为 $14 m/ka$ 。对于一个流域来说, 计算模拟出来的侵蚀速率很大不一定意味着该流域发生强烈的水土流失, 还取决于与背景侵蚀速率(本底侵蚀或自然侵蚀速率)的对比, 如果实际侵蚀速率大于背景侵蚀速率, 则该流域发生水土流失, 对土地质量产生不利的影响, 需要加以治理。

3.2 流域侵蚀发展过程模拟

随着时间的推移, 流域侵蚀强度会发生变化。例如, 在流域刚刚形成时, 流域地貌处于幼年期, 流域侵蚀强度很大, 而在老年期, 流域处于均衡状态, 侵蚀水平较低, 除非一次新的构造活动打破了流域的均衡状态, 流域侵蚀强度将加大。另外, 随着人类活动强度和范围的加大, 流域侵蚀也会发生变化, 当人类活动不当时, 通常造成侵蚀加剧, 而采取了科学的水保措施和土地利用方式, 流域侵蚀强度将相应地降低。在时间上, 可以通过流域侵蚀产沙过程线来描述侵蚀过程, 并可以分辨出流域侵蚀的自然侵蚀和加速侵蚀。自然侵蚀是一种地质过程, 是地质环境中的一个主要方面, 受自然演变规律支配, 是没有人类活动影响下地面发生的侵蚀作用。加速侵蚀是指当自然侵蚀过程受到人类活动影响而加速发展, 达到了对土地利用产生不良影响, 引起下游河道加剧淤积而影响防洪安全时的侵蚀现象。

1978 年 Williams 提出的瞬时泥沙线(IUSG)就是对这种侵蚀过程的模拟。陆中臣等^[1]通过构建一个流域的侵蚀过程线, 包括自然侵蚀过程线和加速侵蚀过程线, 来反映一个流域的侵蚀强度的变化, 以及该流域是否存在加速侵蚀、加速侵蚀占流域总侵蚀的百分比等, 例如他们在黄土高原的实地研究中发现丘陵沟壑区自然产沙过程线是逐渐增加的, 但增加量极小(年平均加速率大约为 0.2%), 而加速侵蚀过程线增加较快, 但是目前的人类活动加速侵蚀量只占总侵蚀量的 30% , 不是黄土高原小流域侵蚀的主导动力, 这对于流域治水治沙具有很高的理论指导意义。

3.3 流域侵蚀内部差异模拟

从时空两个方面对流域侵蚀进行模拟, 并反映出流域内部的侵蚀强度的差异。李清河等^[10]在对黄土高原小流域实地研究的基础上, 开发模拟了完整的流域侵蚀系统。它是在与地理信息系统支持平台松散耦合基础上, 利用DEM提供

(下转第 35 页)

干林带,以乡土乔、灌、草合理搭配,从迎风面起,依次为草本(苦豆子、麻黄等),灌木(梭梭、枸杞、柽柳等),小乔木(沙棘、沙枣等),乔木(胡杨、榆树、新疆杨等)。

3.4 控管牧业不合理行为,保护草场,发展草场

首先,建立保护和可持续发展的牧业机制,调控放牧量,搭配牲畜种类,实行轮牧制等各种手段防止草场退化。其次,在草场与戈壁、沙漠交界处也应建立防护林体系,防止草场沙化。再次,严管偷采草药者,这样的行为会导致滥采滥挖,致草场退化。最后,增大人工草场面积,降低天然草场压力,发展生态经济。

3.5 改变不合理行为,防治盐渍化沼泽化

首先,改变原始粗旷式的漫灌灌溉方式,避免人为抬升地下水水位导致大量耕地出现盐渍化和沼泽化。其次,兴建高技术高质量的水利设施和农田排水设施,施行井渠结合的用水方式。再次,合理规划条田,进行土地平整,为精量灌溉

参考文献:

[1] 陈正江.系统动力学与干旱区生态——经济系统仿真[M].西安:西安地图出版社,2002.137-150.
[2] 闫顺.艾比湖及周边地区环境演变与对策[J].干旱区资源与环境,1996,10(4):30-37.
[3] 罗明灿.浅谈艾比湖的变迁及景观生态保护[J].新疆农业大学学报,1996,19(3):71-73.
[4] 李遐龄.艾比湖生态环境综合治理和经济可持续发展的研究[J].干旱区资源与环境,1997,11(2):27-36.
[5] 伊玛木·塔依尔,亚尔买买提·台外库力.艾比湖的涸缩对湖周围生态环境的影响及其治理对策探讨[J].新疆大学学报,2001,18(2):208-211.
[6] 贾宝全.保护艾比湖生态环境的目标与途径的探讨[J].干旱区资源与环境,1997,11(2):81-87.
[7] 周长海.艾比湖生态危机及恢复重建措施[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):71-77.
[8] 苏颖君,张振海,包安明.艾比湖生态环境恶化及防治对策[J].干旱区地理,2002,25(2):143-148.
[9] 樊自立,孙焕章,邹德生.新疆土地开发对生态与环境的影响及对策研究.[M].北京:气象出版社,1996.175-217.
[10] 罗正东.东川生态环境建设与泥石流综合治理[J].水土保持研究,2003,10(4):234-237.

(上接第17页)

地形特征的功能,运用水文模型进行流域径流水文分析,并结合通用土壤流水方程及沿程传递模型,建立了分布式小流域土壤侵蚀模拟模型,它可以计算不同时间(全年或次降雨)和空间(单元格、地块或整个流域)的土壤侵蚀量。在构建土壤侵蚀量模型时,考虑雨滴和地表径流两种作用力,因此土壤侵蚀模型应该包括水文模型和泥沙模型,而泥沙模型分为两个组成成分,即分离和输移,分离又包括雨滴击溅分离和地表径流分离;上述每种组成成分的动态性可用基本的水力学、水文学、气象学和其他物理关系加以描述以及影响侵蚀的土壤特性的参数进行描述。在对黄土区流域进行综合治理

参考文献:

[1] 陆中臣,等.流域地貌系统[M].大连:大连出版社,1991.
[2] 杨景春.地貌学教程[M].北京:高等教育出版社,1985.
[3] 倪晋仁,等.河流动力地貌学[M].北京:北京大学出版社,1998.
[4] 叶青超.黄河流域地表物质迁移规律与地貌塑造研究[M].北京:地质出版社,1992.
[5] 陆中臣.流域侵蚀产沙和物质转移[J].地理研究,1989,8(2):101-111.
[6] 林承坤.泥沙与河流地貌学[M].南京:南京大学出版社,1992.
[7] 武春龙,李璧成,雷会珠.小流域侵蚀地貌演化的计量分析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):12-18.
[8] 汤立群.物理成因产沙模型研究中亟待解决的几个问题[J].泥沙研究,1999,(5):23-28.
[9] 尹国康.流域地貌系统[M].南京:南京大学出版社,1991.
[10] 李清河,等.黄土区小流域土壤侵蚀模型系统解析[J].水土保持通报,2000,20(1):28-31.
[11] 白清俊.流域土壤侵蚀预报模型的回顾与展望[J].人民黄河,1999,21(4):18-21.

创造条件。最后,种植水稻改良利用盐碱地,施行水旱轮作。

4 小 结

艾比湖沿岸地区,被专家形象地比喻为艾比湖流域区乃至整个天山北坡带的“肾脏”,其系统的紧密性,决定了一旦发生问题,必然出现一系列的正反馈负反馈效应,从而典型问题会扩散至全区域。艾比湖的问题是这一区域的核心问题。解决好这一问题,则其它问题也就容易解决。因而,应着眼全局,着眼未来的可持续性,以艾比湖为核心,整体协调博乐、精河地区人口、资源、环境和发展系统,制定各种等级的科学规划,实现良性循环和可持续发展。对经济结构进行战略性调整,协调人地关系,由绿洲平面扩张转向以改造中低产田为主的绿洲生态经济深度开发,由传统狭隘的经济模式转向生态经济绿色经济模式,由单项资源开发转向多元特色产业化发展,实现区域经济大发展和生态环境大改善的目标。