

# 黄土丘陵沟壑区中大流域侵蚀产沙模型与尺度转换研究

蔡强国<sup>1</sup>, 刘纪根<sup>2</sup>, 郑明国<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 由于侵蚀产沙因子时间和空间上的变异性, 中大流域的侵蚀产沙过程模拟相对于小流域更为复杂化, 目前已存在的物理模型和经验模型均难以很好地运用在中大流域。分析了中大流域的侵蚀产沙特点及已有的模型, 认为尺度转换技术是实现大中流域侵蚀产沙模拟研究重要的途径, 并对尺度转换的方法进行了探讨。

**关键词:** 侵蚀产沙; 中大流域; 尺度; 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)04-0131-05

中图分类号: S157

## Sediment Yield Model and Upscaling for Medium and Large Watersheds in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau

CAI Qiang-guo<sup>1</sup>, LIU Ji-gen<sup>2</sup>, ZHENG Ming-guo<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Academy of Yangtze River, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** Due to the spatial and temporal variations of environmental factors, the processes of soil erosion and sediment yield in medium and large watersheds are much more complex than those in small watersheds. As a result, both empirical and physics-based models can hardly be applied in medium and large watershed with a reasonable result. This paper first illustrates the characteristics of soil erosion and sediment yield in the medium and large watersheds, and then gives a review of the models developed for the watersheds. Some methodologies to upscaling, which may be an important approach to simulating the processes of soil erosion and sediment yield in the medium and large watershed, are also discussed.

**Keywords:** soil erosion and sediment yield; medium and large watersheds; scale; model

土壤侵蚀与流域产沙的预测模拟是与一系列时空尺度紧密相联的, 现有侵蚀产沙模型在时空尺度上较为单一, 并多以坡面及小流域为研究对象。现代的流域治理规划不仅要考虑一次降水过程的侵蚀产沙响应, 而且还要揭示较长系列的侵蚀周期及水沙情势的变化趋势; 并且所涉及的区域较大。因此侵蚀产沙模型的时空尺度应该满足人们的这种需要, 特别是模型所涉及的空间尺度问题。

在侵蚀产沙模拟中有 2 个关于尺度的问题。一个是尺度效应问题, 一个就是尺度转化问题。在不同

的尺度上, 不同的侵蚀产沙过程占优势, 因此有不同的理论和模型。尺度转化问题就是在某一尺度上发展的理论, 能被应用于另一尺度上的侵蚀产沙过程, 一般指根据小尺度上的信息预测大尺度上的泥沙输移过程及其结果。

土壤侵蚀发生在一定的时间和空间范围内, 土壤侵蚀量、泥沙输移过程取决于所观测的时间和空间尺度。目前国内外有关流域侵蚀产沙与输移研究在小流域开展较多, 不同尺度的综合研究较少。

有关流域侵蚀产沙与输移过程随流域尺度复杂

收稿日期: 2007-05-20

资助项目: 国家自然科学基金委员会重点基金项目(40635027); 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2007CB407207); 中国科学院地理科学与资源研究所自然科学基金延伸支持领域前沿项目(CX10G-A04-10)

作者简介: 蔡强国(1946—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事土壤侵蚀、水土保持、流域侵蚀产沙模拟研究。E-mail: caiqg@jgsnry.ac.cn

变化的研究,国际上刚刚开始,已有的研究尚缺乏深度和广度<sup>[1]</sup>。国内有关流域尺度的研究仅限于水文学的一些零星研究<sup>[2-3]</sup>。侵蚀产沙是一个多因素、多层次、多尺度的地学问题。土壤侵蚀问题按尺度的不同可以归结为 4 个层次:小区、坡面、小流域和区域。由于水土流失的复杂性,学科发展以及研究手段的局限,长期以来,国内外关于水土流失的研究主要集中在小区、坡面和小流域的尺度上,对区域水土流失的研究还很薄弱。在我国一般通过宏观分区的方法来实现区域的整体评价,国外(美国)主要是通过建立地面定位监测网络来实现大比例尺评价并结合统计汇总(Aggregation),定期取得全国土壤侵蚀的数据资料;在坡面研究的基础上,通过比例尺转换(主要是Upscaling)的方法来获得区域以至于全球性的土壤侵蚀数据<sup>[4]</sup>。

WEPP 模型堪称目前国际上侵蚀模型的典范,但其适用于田块尺寸范围内,最大范围约 260 hm<sup>2</sup>,林地能用 800 hm<sup>2</sup> 地块,模型不能应用于切沟和河道侵蚀,只能用于农田临时切沟、草皮水路的侵蚀<sup>[5]</sup>。近年来,随着流域过程和形态资料的日益积累和丰富,人们强烈认识到只有宏观研究不断取得进展,微观研究的继续才有可能。如何利用观测的已知信息识别未知的参数即模型参数识别问题和小尺度均匀的侵蚀产沙模拟推广应用到大尺度非均匀系统问题,

即侵蚀产沙的空间尺度和尺度转化问题,仍然是两个迫切需要探讨的问题。

## 1 中大流域侵蚀产沙特点

中大流域一般指的是流域面积在  $1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^3$  km<sup>2</sup> 以上的区域。中大流域的侵蚀、输移、沉积过程交错,空间时间尺度上均不连续,侵蚀产沙过程空间变异十分显著,呈现出复杂化的特点。侵蚀产沙的影响因子在空间的变异性是导致该差异的根本原因。这些因子主要包括降雨雨强、降雨量、土壤理化性质、植被和地形地貌等在时空分布的差异性。有些甚至跨越不同自然带、地貌类型区。因此,中大流域侵蚀产沙过程不同于小流域,存在多种侵蚀产沙类型的组合。侵蚀产沙过程的空间分异明显,存在侵蚀—输移—沉积的复杂组合。

岔巴沟 1967 年 8 月 26 日 2、3、4 号径流场、全坡面(9 号径流场)、毛沟(团山沟)、支沟(蛇家沟)、干沟(岔巴沟)的洪水含沙量过程线(图 1)表明<sup>[6]</sup>,从 2 号径流场到全坡面,再到毛沟、支沟、干沟,其侵蚀方式和强度都发生了明显的变化,2 号径流场的侵蚀强度较小,主要是细沟侵蚀;全坡面则是流域产沙的主要源地,它对毛沟的径流和泥沙起主导作用;毛沟则起到输送泥沙的通道;支沟和干沟则存在泥沙的侵蚀—输移—沉积的复杂转换关系。

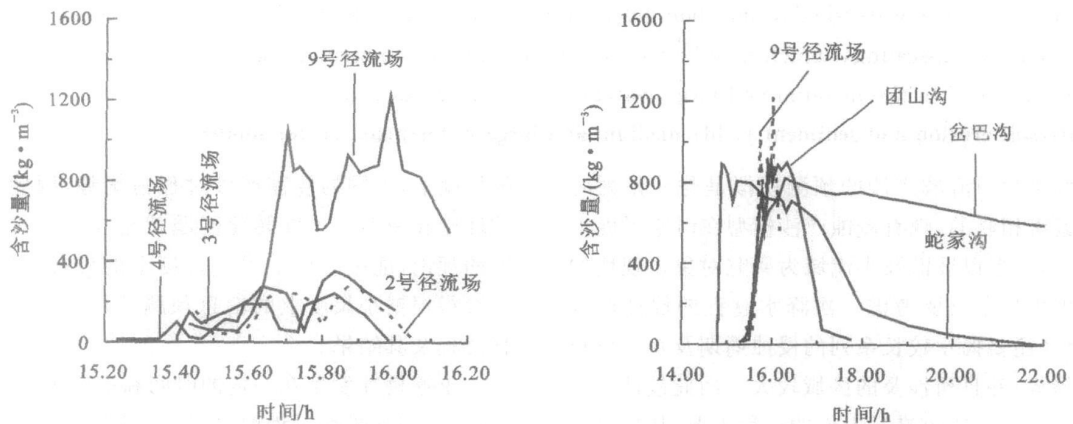


图 1 岔巴沟流域 1967 年 8 月 26 日洪水含沙量过程线随空间尺度的变异

由于大中流域水土流失特征与坡面、小流域的侵蚀状况不同,因此其产沙预测所选用的指标应能够宏观地反映该流域的水土流失特征,如流域气候特征、地形特征、土壤分布、植被覆盖以及土地利用状况等,这些指标常常是某一个统计特征值。例如,把坡度或坡长等坡面指标用于大中流域的评价显然是不可行

的,而应用平均坡度、沟壑密度等指标,同时所采用的因子指标必须具有明确的数量化概念并且资料容易获取。

## 2 中大流域侵蚀产沙模型研究

国内外学者对建立大流域模型研究进行了很多

的尝试,既有从实用性着手的经验统计性模型,如陆中臣建立的晋陕蒙接壤区北片的侵蚀产沙模型和史培军建立的皇甫川流域侵蚀产沙预报研究等<sup>[7-8]</sup>;又有具有一定的物理意义模型如 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)、SHE 模型和包为民的大流域水沙耦合模拟物理概念模型等<sup>[9-11]</sup>。由于大流域模型研究涉及更为复杂的时间和空间的尺度差异的问题,因此如何研究解决这些差异一直以来作为大流域侵蚀产沙模型研究的焦点。

史培军等把皇甫川流域(流域面积 3 240 km<sup>2</sup>)全流域划分为 510 个更小的流域,并定义此为单元小流域,最小面积 0.75 km<sup>2</sup>,最大为 75.36 km<sup>2</sup>,平均为 6.36 km<sup>2</sup>。依据大量野外观测资料,得出以流域为单元的土壤流失量预报模型:

$$Y = (9.9 + 0.732X_1^{11.5} + 8.87X_2^{20.5} + 1291X_3^{-1.2})^2 \quad (1)$$

式中:  $X_1$  ——小流域沟谷切割密度(km/km<sup>2</sup>);  $X_2$  ——小流域砒砂岩石面积百分数(%);  $X_3$  ——小流域植被覆盖度(%)。

蔡强国也以岔巴沟流域(187 km<sup>2</sup>)及其支流实测降雨水文资料为基础<sup>[12]</sup>,系统分析了流域产沙的降雨、径流、地貌因子在流域产沙中的作用,进而将影响产沙的因素概括为径流深、洪峰流量、流域面积、流域沟道密度,并作为产沙预报的指标,建立了有一定产沙机理的岔巴沟流域次暴雨产沙的统计模型:

$$M_s = 10^{2.805} H^{0.659} Q_w^{0.523} A^{-0.413} D^{1.052}$$

式中:  $M_s$  ——流域产沙模数(t/km<sup>2</sup>);  $H$  ——径流深(mm);  $Q_w$  ——洪峰流量(m<sup>3</sup>/s);  $A$  ——流域面积(km<sup>2</sup>);  $D$  ——流域沟壑密度(km/km<sup>2</sup>)。

上面只是考虑了下垫面比较均一的情况下流域次暴雨产沙的统计模式,对不同地区不同作物覆盖、土地利用及各种水土保持措施对流域产沙的作用还缺乏考虑。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是为了预测流域管理措施对水质<sup>[13]</sup>、泥沙和化学物质的影响而开发的一种以天为时间尺度的分布式物理模型<sup>[13]</sup>。模型是由 SWRRB(Simulator for Resources in Rural Basins)模型改进得到的<sup>[14]</sup>,主要用于大型流域的模拟<sup>[14]</sup>,也可以对流域内部的多个次一级流域进行模拟。SWAT 模型的参数主要有以下方面:水文、天气、泥沙、土壤温度、作物生长、养成分、杀虫剂及农业管理措施等。SWAT 在流域结构方面具有较大的灵活性,大流域能够被划分为单一的侵蚀单元或子流域,在每一个子流域的模型结构中,都可以计算径流、泥沙、养分、杀虫剂在流域内的迁移路

径。但模型的一个主要的不足是大区域各因子交互作用模拟方面的欠缺,应综合考虑 GCMs 对于大气的模拟以及较大河流的水文路径以及泥沙输移。模型所需参数较多,因此在应用时需要模型参数进行大量的校准实验或数据,在一定程度上限制了模型的使用。

SHE(System Hydrologique European)模型属于连续的能反映流域空间分布的物理模型<sup>[15]</sup>。模型把流域分割成一个由矩形栅格组成的栅格网,然后针对每一栅格进行计算。此模型是当前分布式侵蚀产沙物理过程模型的一个代表,它基于栅格进行侵蚀及径流的模拟,并能应用于大中流域的模拟当中。模型应用的关键在于栅格大小的选择以及模型参数的校准。SWAT 和 SHE 模型,虽能较好地物理概念上描述产汇流和产输沙过程,但其结构复杂,参数较多,不易率定;且参数间存在较强的互补性,从而使参数及结果存在一定的不确定性。模型的另一个问题是,模型过多的参数也使模型的校正和应用受到影响,因此在数据不全或数据精度不高时,模型的应用往往受到局限。

### 3 侵蚀产沙模型的空间尺度转换

侵蚀产沙模拟研究的一个重要内容就是需要了解尺度改变对于侵蚀产沙过程的影响。陈浩、陈界仁研究发现<sup>[16-17]</sup>,随着流域尺度的变化,产流参数、产沙参数均随流域面积增加而增大,产流系数与流域的变化较产沙系数更为明显。事实上,尺度问题不仅是一个科学挑战,而且还是一个流域管理和侵蚀产沙模型中的实际问题。近年来许多学者(Favis Mortlock, 1996; Kirkby, 1995; Boardman, 1998; Kirby, 1999)在土壤侵蚀的研究中都注意到了空间尺度的变化<sup>[18-21]</sup>,尤其是注重对侵蚀产沙空间转换的研究。然而,在使用侵蚀产沙模型描述基本的侵蚀产沙过程时,存在许多有待解决的问题。小流域侵蚀产沙计算,一般都假定流域内植被、地形、土质等下垫面因素相对均匀。显然,这对一个大流域,常常是不能满足的。例如,坡度、沟道比降、沟壑密度、土质、植被乃至人类活动情况在流域各处的变化,常使得大流域的侵蚀产沙计算更复杂,难度更大<sup>[11,22]</sup>。能否将在小区尺度的数学模拟应用到流域尺度?怎样将在点尺度的物理特性参数如土壤含水量应用到流域尺度上的水沙过程?怎样将空间变化信息整合到栅格里,栅格大小将在多大程度上影响这些空间信息的变化?就流域侵蚀产沙过程而言,微观尺度上的侵蚀因子和过

程变化只能视为其中一个“点”,无论采取将“点”的机理推广到“面”,还是直接从“面”上寻求规律,都会面临许多新的问题,这些问题都与侵蚀产沙的尺度转换有关。

侵蚀产沙模型之间的相互关系及尺度转换是流域侵蚀产沙尺度研究的重要方面。不同尺度间的转换是必要的,特别是用具有较高的空间分辨率以及基于物理过程的侵蚀产沙模型来描述流域侵蚀产沙过程时。如果数据库有相对详细的数据支持,土壤侵蚀模型能够被用于非常小的尺度,而当模型用于描述中尺度的侵蚀产沙过程时,不可避免地涉及到侵蚀产沙的空间变异性。复杂的、基于过程的数学模型由于参数的难获取性以及侵蚀产沙的空间变异规律的复杂性,模型在应用时往往受到较大局限。相反,由于经验模型只包括那些对模型建立具有重大影响的参数,因此在应用时受的限制较小;但是由于其缺少对侵蚀产沙过程和机理的描述,在大范围外延时往往会发生错误。因此,对于侵蚀产沙过程空间尺度转换规律的研究尤为重要和迫切。

王飞根据尺度转化实现的方式<sup>[23]</sup>,认为尺度转换方法包括主导因子更替法,影响因子尺度转换法和泥沙输移比转换法等。丁晶等针对水文尺度问题,提出了 4 种分析新途径<sup>[24]</sup>:分形理论,混沌理论,随机解集原理,小波理论。针对流域侵蚀产沙的尺度问题,综合各方面的分析,我们总结了 5 种理论方法可用于流域侵蚀产沙的尺度转换<sup>[25]</sup>。

(1) 分形。所谓分形,是指局部与总体具有某种相似性,或者说在不同尺度上看起来基本相似的形状,即具有自相似性(Self-similarity)。分形理论可以用最少参数来有效地描述复杂自然现象。它用于对一系列尺度范围内变异性的认识,把不同尺度间变异率的关系定量化。使用分形理论,可以将不同尺度上的地貌或地形差异性以参数的形式定量表示出来,从而用较少的参数表达出了复杂的地貌特征,这样我们在尺度转换中只需对模型中的这些参数进行校正。

(2) 变异函数。通过变异函数可以确定和比较变量因子的空间变异程度及空间变异尺度。

(3) 自相似性。自相似性是指在改变度量尺度的条件下场保持相似性。分析不同尺度上的侵蚀产沙过程的机理是否存在自相似性,对侵蚀产沙尺度转换是很重要的,只有自相似性成立,才能把某一尺度上得出的结论转换到另一尺度上。自相似性分析是分析不同尺度上的侵蚀产沙过程的机理是否存在自相似性,即当我们把小流域的侵蚀模型应用到不同流

域时,其模型结构和框架是否需要改变或调整。

(4) 代表单元面积(REA)。该理论认为将流域按较小尺度划分成许多个子流域来研究水文特性时,随着尺度的增加,增加的流域坡面面积会导致不同子流域之间暴雨响应差别的缩小。就是说存在一种“门槛”尺度,在该尺度下,可以使用连续性假定,而不必知道地貌、土壤或降雨的实际空间变化形式。因此,当流域尺度大于 REA 时,对其水文响应进行简化模拟而又不失去其对各物理要素空间变化影响的考虑是可能的,特别地,对面积比土壤和降雨空间变化相关尺度大得多的流域来说,可以不考虑其小尺度变量空间变化的影响,而只对其进行统计分析和模拟。

(5) 灰色系统方法。从微观模型到宏观尺度的耦合,是一个由“白”到“灰”的过程,这决定了不同尺度间变化的纽带是一种带有突变性与不确定性但又有其内在影响的关系。但采用确定性方法难以找到联系时,它或许可用某种“灰”关系加以提升,反过来,通过对不同尺度模拟“灰”关系研究,进一步可获取对不同尺度模型耦合新的信息,寻求一个最恰当简化关系。

## 4 展望

空间尺度的变大导致侵蚀产沙因子时间和空间上的变异性,这使得中大流域的侵蚀产沙过程模拟相对于小流域更为复杂化。尽管目前已建立了众多的侵蚀产沙物理模型,但大部分仅能在较小空间尺度上才有良好的运用<sup>[26]</sup>,这使得流域尺度的产沙模拟仍然以经验回归模型为主<sup>[27-28]</sup>。统计模型具有较好的实用性,但是大中流域的统计模型所采用的因子无法反映这种时空差异性,因此难以真实地反映侵蚀产沙本身的规律。同时仅对因子进行回归分析的建模方法,物理意义不明确,难以帮助人们进一步认识产沙、汇沙的机制。尺度转换作为土壤侵蚀模型研究的一个重要工具,已引起众多研究者的重视。它可以通过一个小流域的侵蚀模型,通过一定的转换关系,得到大中流域的侵蚀模型。这种转换关系的研究,已成为目前研究的一个热点和难点问题。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Kirkby M J, Imeson A C, Berkamp G, et al. Scaling up processes and models from the field plot to the watershed and regional areas[J]. J Soil and water Conservation, 1996, 54(3): 391—396.
- [2] 夏军. 水文尺度问题[J]. 水利学报, 1993(5): 32—37.
- [3] 李长兴. 论流域水文尺度化和相似性[J]. 水利学报, 1995(1): 40—46.

- [4] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于GIS的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 167—174.
- [5] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology[J]. Trans of ASAE, 1989, 32(5): 1587—1593.
- [6] 刘纪根,蔡强国,刘前进,等. 流域侵蚀产沙过程随尺度变化规律研究[J]. 泥沙研究, 2005(4): 7—13.
- [7] 陆中臣. 晋陕蒙接壤区北片的侵蚀产沙模型,黄土高原(重点产沙区)信息系统研究(续集)[M]. 北京测绘出版社, 1993. 153—178.
- [8] 史培军,刘宝元,张科利,等. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. 资源科学, 1999, 21(5): 9—18.
- [9] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1. Model development[J]. J. Am. Water Resour. Assoc., 1998, 34: 73—89.
- [10] Jain S K B, Storm J C, Bathurst, Refsgaard J C, et al. Application of the SHE to catchment in India. Part 2. Field experiments and simulation studies with the SHE on the Kolar subcatchment of the Narmada River[J]. Journal of Hydrology, 1992, 40: 25—47.
- [11] 包为民,陈耀庭. 中大流域水沙耦合模拟物理概念模型[J]. 水科学进展, 1994, 5(4): 187—193.
- [12] 蔡强国,刘纪根,刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型研究[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 433—439.
- [13] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. A comprehensive surface-ground water flow model[J]. Journal of Hydrology, 1993, 142: 47—69.
- [14] Arnold J G, Williams J R, Nicks A D, et al. SWRRB, a basin scale simulation model for soil and water resources management[M]. Texas A & M Press, 1989.
- [15] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, ‘SHE’, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87: 61—77.
- [16] 陈浩,周金星,陆中臣,等. 黄河中游流域环境要素对水沙变异的影响[J]. 地理研究, 2002, 21(2): 179—187.
- [17] 陈界仁. 流域治理及尺度对产沙模型参数的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 45—48.
- [18] Favis-Mortlock D T, Quinton J N, Dickinson W T. The GCTE validation of soil erosion models for global change studies[J]. Journal of soil and water conservation, 1996, 51(5): 397—403.
- [19] Kirkby M J, Cox N J. A climate index for soil erosion potential(CSEP), including seasonal factors[J]. Catena, 1995, 25: 333—352.
- [20] Boardman J, Favis-Mortlock D T. Modelling soil erosion by water: some conclusions[C]. Modelling Soil Erosion by Water, NATO ASI Series, Springer, 1998.
- [21] Kirby M J, McMahon M L. MEDRUSH and the Catsop basin—the lessons learned[J]. Catena, 1999, 37: 495—506.
- [22] 包为民. 小流域水沙耦合模拟概念模型[J]. 地理研究, 1995, 14(2): 27—33.
- [23] 王飞,李锐,杨勤科,等. 水土流失研究中尺度效应及其机理分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 167—169, 180.
- [24] 丁晶,王文圣,金菊良. 论水文学中的尺度分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(3): 9—13.
- [25] 刘纪根,蔡强国,樊良新,等. 流域侵蚀产沙过程中的尺度转换方法[J]. 泥沙研究, 2004(3): 69—74.
- [26] de Vente J, Poesen J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models[J]. Earth-Science Reviews, 2005, 71: 95—125.
- [27] Van Rompaey A, Bazzoffi P, Jones R J A, et al. Modelling sediment yields in Italian catchments[J]. Geomorphology, 2005(65): 157—169.
- [28] Verstraeten G, Poesen J, de Vente J, et al. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semi-qualitative analysis using reservoir sedimentation rates[J]. Geomorphology, 2003(50): 327—348.