

流域输沙函数应用的尺度限制

魏翔^{1,2}, 李占斌^{1,3}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 安徽工程科技学院, 安徽 芜湖 241000; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 阐述了在流域产沙预测模型研究中, 将试验水平范围的输沙函数的运用范围扩大, 产生了数据来源的不确定性或错误的原因在于: 模型不完善、重要过程的省略、初始条件的缺乏、初始条件的敏感度、异质性问题、外部动力等。数据来源的不确定性在小尺度、短时间内是能够控制的。大尺度的异质性是使得输沙函数不能仅仅建立在数量化的基础上, 而应是系统历史的函数。因此, 大尺度的流域产沙模型必须建立在突变量的发现及其相应的动力特征基础上, 而不应是试验模型按比例放大。

关键词: 泥沙输移; 大尺度系统; 流域产沙预测模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2007)01-0095-04

中图分类号: P931.3

Scale Limitations of Watershed Sediment Transport Formula in Application

WEI Xiang^{1,2}, LI Zhan-bin^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of

Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Anhui University of Technology and

Science, Wuhu, Anhui 241000, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The sources of uncertainty or error that arise in attempting to scale up the results from laboratory sediment transport studies include model imperfection, omission of important processes, lack of knowledge of initial conditions, sensitivity to initial conditions, unresolved heterogeneity and occurrence of external force. The sources of uncertainty that are unimportant or can be controlled on a small scale and over a short time may become important in the application on a large scale and over a long time. Control and repeatability, hallmarks of laboratory experiments, usually lack the large scale characteristic of large systems. Heterogeneity is an important concomitant of size, and tends to make large systems unique. Uniqueness implies that prediction cannot be based upon first-principles quantitative modeling alone, but must be a function of system history as well. In large systems, the construction of successful predictive models is likely to be based upon the discovery of emergent variables and a corresponding dynamics, rather than upon scaling up the results of well-controlled laboratory studies.

Keywords: sediment transport; large scale system; predictive model of watershed sediment yield

1 输沙函数应用问题

泥沙输移是在实验室中被广泛研究的过程。几十年来,在人工水槽(小尺度范围)试验研究中得出的经验和半经验模型反过来又在实验中得到验证和完善。这些模型反映出系统物理过程的决定因子如颗粒大小、表面坡度等的性质^[1]。而这些模型或表达式是在自变量很好控制的试验中得出的。对不同预测方程进行比较发现,它们之间很少有一致性。美国工程师协会对几个著名输移方程的泥沙输送率进行比较发现^[2],不同模型的预测结果有明显差异。当这些方程运用于大尺度范围的泥沙预测时,如果对系

统中的局部条件缺乏详细了解,其结果可能产生很大偏差。

如果像 Meyer-Peter 这样的实验模型是准确的结构模型的话^[1],理论上它应该可以按比例放大应用于大系统。几十年来,按比例放大通常意味着运用局部泥沙量速率表达式乘以水流宽度来计算全部水流泥沙量^[2,6-7]。如今,按比例增大计算的局限由于基于格子法的数值模拟手段(可以将大量的局部信息综合到一起)而消除。一个典型的例子就是美国农业部的通用水土流失方程(主要是用来估计农田和牧场的可能侵蚀量)被 WEPP(Watershed Erosion Prediction Project)取代^[4-5]。WEPP是建立在计算机基础

上具有详细的动力机制的土壤流失预报模型。这种以计算机为基础的方法用于预测未来泥沙输送的模型将会逐步增多。从小空间、短时间尺度的泥沙输送的建模到大尺度范围的应用,由于存在着原始资料的不确定性和错误而影响预测精度,从而使泥沙输送的基本物理过程模型运用于大尺度系统的预测模型受到限制。

2 输沙模型应用的局限性

2.1 模型的不完善性

虽然试验尺度条件下的泥沙输送模型总是在不断发展和完善,但这并不能提高预测大尺度泥沙输送的精度。例如,粒径大小分级作为变量代替平均粒径似乎应该能够提高河床演变的预测精度,但是每一个天然沉积河床在垂直和层面上的梯度变化都是不同的,这种变化测定的困难使得模型要想更实用、更完善有着一定难度。基于这样的原因,大尺度泥沙输移系统的定量化研究不能直接运用从试验中得出的泥沙输送方程。因为输沙规律是非线性的,必须寻找新的、更高等级的大规模尺度规律。实际上,大规模尺度下输沙规律的可应用性取决于该尺度规模下应用的有效性,这些规律不能期望从试验尺度下的输沙方程中直接或简化而获得。

对于推移质输移无论是工程经验还是有关研究都表明小规模输沙方程是不可靠的。美国工程师协会的报告总结指出^[2]:推移质输移的产沙量公式最多只能用来估算。Gomez 和 Church 统计分析了 12 个推移质方程得出这样的结论^[6]:没有一种方程能够预测砂砾质河床的推移质运移。上述提到的输沙模型中河床和流量等条件应是很清楚了解的。这样的模型作为大规模尺度预测的基础存在很大问题。此外,这些模型本身只代表大尺度输沙模型系统中的一部分不确定的资料而不是重要的代表性的资料。要想通过对小尺度输沙方程的改良来弥补模型的不完善进而提高大尺度预测精度其作用是很有局限的。从某种意义上来说,在小尺度范围的知识与预测只能有益于小尺度模型的完善与发展。

2.2 重要过程的省略

小尺度的侵蚀与沉积模型的不断完善并不能纠正由于省略重要的物理过程而带来的缺陷。系统的空间范围越大,时间越长,不只一种重要过程出现的机率越大。例如某个局部流水过程也许是冲积扇形成的主导作用,但在别的地方泥石流可能是导致冲积扇形成的重要因素^[7]。泥石流可容纳 80%~90% 的泥

[8]

流运动的条件有很大的不同,而大多数的输沙公式是在水流条件下的水槽中得出的。如果水流的侵蚀和沉积模型用在泥石流占主导地位的地方,无论怎样改善水流模型都不会起作用。

2.3 初始条件的缺乏

初始条件是一个模型建立之前必须确定的。在水流传送中,这些初始条件包括粒径分布、河岸物质的粘结性、河床地形的详细描述、河道植被的分布以及水流特性等。侵蚀能够使以前埋藏的物质暴露出来,因此初始条件还应包括在河床表面下的泥沙随深度变化的分布特性。这些初始条件在一些区域系统中只是部分的或近似的了解而不是完全掌握。

就预测能力而言,局部特定地方的数据收集至少与模型选择或模型提炼同样重要。不断提高数据收集当然有助于对初始条件的理解。更重要的是阶段性的数据收集与模型反馈相结合可作为连续预测的实际手段。总之,特定系统的行为预测与实际系统的行为会有所偏差。这种偏差的产生与初始条件的不完全确定有关,同时也受其它资料来源不可靠的影响。物理系统状态的阶段性监测提供了修正模型的必要观测信息,通过这些信息可以修正或重置初始条件。因此,所有大尺度泥沙输移系统的可靠预测都要求数据收集和反馈的结合。一旦系统变量值与预测值偏离,数据收集可以提供信息修正模型,从而完成连续预测。

2.4 初始条件的敏感性

像泥沙输移过程这样的非线性系统存在着初始条件的敏感性,这种敏感性对系统演化的细节预测产生阻碍。对初始条件的强烈依赖是混沌行为的最主要特点^[9]。

判断一个环境系统是否混沌并不总是很容易的^[10]。碎屑输移与沉积^[11],河网的演化和水系的辫状化都显示在经过足够长的时间后^[12-14],如果初始条件发生轻微的改变,则这些系统的构成细节要想重新推算出来是不可能的。因为真实的初始条件在实际中都是很少了解的,在这样的系统中预测错误总是存在的。

2.5 系统的异质性问题

在一些物理系统中,预测能力随规模增大而相应增长,因为在较大规模下小尺度范围存在的异质性被均质化。但并不是所有的系统都具有这种均质性质。在大尺度泥沙输移系统中规定一个有意义的平均量是不太可能的,植被覆盖、土壤类型、河床暴露及细沟、水流等都随地方不同发生变化,从而呈现一定的接

作为单元变化规律使用,而在大的单元,如果单元内存在较大的差异,那么基本物理输沙方程(试验范围)将不能作为单元演化的规律使用。

由于地表的不规则产生水流深度的变化导致相应的剪切力分布发生变化,输沙率 q_s 是剪切力 τ 的函数。平均输沙率并不能通过平均水流深度或平均压力计算得出^[15]。

植被的出现对海拔高度有细微影响,在水道的低阶地上一一般植被生长较好。低水位很少受植被影响,而在高水位时,植被会对水流产生阻力,根系具有抗侵蚀作用,而泥沙及其它碎屑物则可被植被拦截。此外,低水位的水道上面的地表有不同的糙度,大的碎屑(岩)物和结皮较少出现在低水位的水道。但如果单元内出现异质现象,那么每个单元内部状态随时间演化的非线性问题则需要解决。

这并不意味着不能找出异质单元的内部规律性,但这种规律应是单元水平上的,而不是从最基本的输沙理论中得出的。幂指数的输沙方程最初用在地理重建模型和地形模拟模型上。在这些研究中,单元规律被认为在相似的地形和地层中产生最终形态的地形和地层中是最有效的。但这些规律并不能通过对基本物理过程模型的简单平均得出。在 Tetzlaff 和 Harbaugh 提出的输沙模型中^[16],大尺度流水侵蚀和沉积研究中的推移质输移公式表达为平均流量或剪切力的幂函数。但流量或剪切力在单元内的变化却没有涉及表面糙度和颗粒大小的变化,而这些变化正是大多数模型的基础,因此在大尺度范围规律的应用也应遵循一些基本规律如质量和能量守恒定律,其采用的变量也应是重要的而且能够测量的,如果采用平均将出现问题。

2.6 外部作用力

外部作用力产生于能通过其系统边界与外界进行物质与能量交换的开放系统中。像数据来源不可靠一样,外部作用力随系统规模的增大在预测中的地位越来越明显。在实验条件下,与外界隔离是能够实现的。而大系统总是要受外界作用力如风暴及气候变化等的作用。在水流输沙中,外部作用力可以是风暴造成的,流量增加也可以是支流汇入的水沙、滑坡、回水影响、地质抬升和基准面下降等。如果有未能预测的外力产生,那么模型的预测能力将受到影响。随机出现的外力如:大坝放水或蓄水,其作用力是可以估计的;风暴的作用,则需要通过统计方法进行。如果作用力是在无法预料的事件中产生,例如由于气候变化造成的干旱使植被覆盖产生变化或土地使用变化,

3 结 论

小尺度输沙模型是建立在有关的物理变量如颗粒大小,水流剪切力等基础上的,它在大尺度范围输沙预测的应用受到资料来源不准确的限制。这包括模型不完善、重要过程的省略、初始条件不足、初始条件的敏感性、系统的异质性问题以及外部动力的发生。这些资料来源的不可靠可能在以实验室输沙模型为蓝本的,按比例增加的大尺度输沙预测中产生。相应地,依靠我们对小尺度范围输沙物理行为过程的理解来完成大尺度的输沙预测是困难的。

系统规模是模型预测能力限制中最基本的因素。无法预料的过程出现、初始条件的了解不足、外部动力的发生以及系统的异质性问题都随着规模的增大而越显重要。而它们往往可以在小规模系统中得以避免。可控制性和可重复性被一般认为是科学的标志,更准确地说应该是小规模标志。那些试验范围很好用的分析方法(如简化法)在大尺度输沙系统中是不能应用的。对初始条件了解不足的问题是许多大尺度系统本身造成的,初始条件的偏差在某种程度上可以通过数据收集来减少。

试验尺度下的输沙模型能否通过按比例放大作为大尺度泥沙预测的基础一直是争论的焦点。简化论经常用小尺度现象来解释大尺度行为,在单一的小系统中能很好地运作。但在大尺度下,在基本物理过程不会出现的突发变量可能将是预测模型的最大障碍。尽管这些变量不是从基本物理过程得出的,但仍然遵循一些物理限制规律如质量守恒定律和能量守恒定律。突发变量经常用来描述大的异质系统的行为。这些变量无法从基本输沙方程中推出,除非在局部条件一致的非常环境下。在大尺度下产生的简单变量并不能从简单物理规律起作用的小尺度范围中生成。就预测而言,在大尺度输沙系统中通过对大尺度模型和小尺度现象比较,提高对突发变量的认识,也许比单纯发展小尺度的物理基本模型更为有用。因此在大尺度下泥沙预测模型必须建立在突变量的发现及其相应的动力特征基础上,而不是在能较好控制的、试验尺度下的研究进行简单地按比例扩大。

[参 考 文 献]

- [1] Meyer-Peter E, Muller R. Formulas for bed-load transport [C]. in: Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, Stockholm, 1948. 39—64.

- Vanoni V A. American Society of Civil Engineers, Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54. American Society of Civil Engineers, New York, 1975.
- [3] Singh K P, Durgunoglu A. Predicting sediment loads[J]. Civil Engineering, 1992, 62: 64—65.
- [4] Wischmeier W H. Use and misuse of the universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1976, 31: 5—9.
- [5] Lane L J, Nearing M A, Laflen J M, et al. Description of the US Department of Agriculture Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model[M]. in: Overland Flow, 1993.
- [6] Gomez B, Church M. An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers[J]. Water Resources Research, 1989, 25: 1161—1186.
- [7] Whipple K X, Dunne T. The influence of debris flow rheology on fan morphology[J]. Owens Valley, California, Bulletin of the Geological Society of America, 1992, 104: 887—900.
- [8] Johnson A M, Rodine J R. Debris flow[M]. in: Slope Instability, edited by Brunsden D, Prior D B, Wiley, Chichester, 1984. 257—361.
- [9] Lorentz E. The Essence of Chaos, University of Washington[J]. Seattle, 1993: 227.
- [10] Ruelle D. Where can one hope to profitably apply the ideas of chaos[J]. Physics Today, 1994, 47: 24—30.
- [11] Tetzlaff D M. Limits to the predictive stability of dynamic models that simulate clastic sedimentation[M]. in: Quantitative Dynamic Stratigraphy, edited by Cross T A, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989. 55—65.
- [12] Howard A D. A detachment-limited model of drainage basin evolution[J]. Water Resources Research, 1994, 30: 2261—2285.
- [13] Howard A D, Dietrich W E, Seidl M A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 13971—13986.
- [14] Murray A B, Paola C. A cellular model of braided rivers[J]. Nature, 1994, 371: 54—56.
- [15] Baird A J, Thornes J B, Watts G P. Extending overland flow models to problems of slope evolution and the representation of complex slope-surface topographies[M]. in: Overland Flow, edited by Parsons A J, Abrahams A D, Chapman and Hall, New York, 1993. 199—223.
- [16] Tetzlaff D M, Harbaugh J W. Simulating Clastic Sedimentation, van Nostrand Reinhold[M]. New York, 1989. 202.

(上接第 94 页)

(4) 安全系数随着植物根系分布范围的增加而提高,在护坡工程实践中,对于同等强度的植物根系,应选取根系发达,向坡体延伸长度大的植物种类。

[参 考 文 献]

- [1] Wu T H, McKinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 114(12): 19—33.
- [2] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and Soil Bioengineering, Slope Stabilization, A Practical Guide for Erosion Control[M]. New York: John Wiley & Son, 1996.
- [3] Barker D H. Continuing and future developments in vegetative slope engineering or ecoengineering[A]. in: Proceedings of the International Conference on Vegetation and Slopes[C]. Oxford: [s. n.], 1994. 29—30.
- [4] 姜志强,孙树林,程龙飞.根系固土作用及植物护坡稳定性分析[J].勘查科学技术, 2005, 4: 12—14.
- [5] 姜志强,孙树林.堤防工程生态固坡浅析[J].岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2133—2136.
- [6] 胡利文,陈汉宁.锚固三维网生态防护理论及其在边坡工程中的应用[J].水运工程, 2003(4): 13—15.
- [7] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社, 2003.
- [8] 周跃,骆华松,徐强,等.乔木的斜向支撑效能及其坡面稳定意义[J].山地学报, 2000, 18(4): 306—312.
- [9] 解明曙.林木根系固坡土力学机制研究[J].水土保持学报, 1990, 4(3): 7—14.
- [10] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折剪法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报, 2002, 24(3): 343—346.