

# 流域降雨侵蚀模型研究进展<sup>\*</sup>

肖飞鹏<sup>1,2</sup>, 程根伟<sup>1</sup>, 鲁旭阳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 流域降雨侵蚀模型是预报水土流失、评价水土保持措施、指导流域生态与环境建设的重要工具。回顾了国内外流域降雨侵蚀模型的研究历程, 按其研究方法将模型分为经验相关模型、物理过程模型和概念性模型 3 类, 阐述了流域降雨侵蚀模型研究现状和存在的问题, 并进一步对模型的未来研究方向与趋势作出了分析与展望。

**关键词:** 流域降雨侵蚀模型; 产沙模型; 研究进展

中图分类号: S157.1      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2009)01-0098-04

## A Review of the Watershed Rainfall Erosion Model

XIAO Fei peng<sup>1,2</sup>, CHENG Gen-wei<sup>1</sup>, LU Xu yang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;  
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Watershed rainfall erosion model is an important mathematical method that predicting soil and water loss, evaluating of soil and water conservation measures, and guiding the building of watershed ecology and environment. The development of watershed erosion models in home and abroad was described in this paper. Watershed erosion models can be divided into three categories: empirical model, physical process model and conceptual model. The paper also discussed the situation and advance trends of watershed erosion models research.

**Key words:** watershed rainfall erosion model; sediment yield model; research review

土壤侵蚀和流域产沙是地球表面普遍存在的自然现象, 是侵蚀循环的主要过程之一。地表物质在雨滴、流水等外营力作用下分散和移动形成水蚀, 被侵蚀的物质汇集到河川中, 沿河槽向下游运动, 沿程发生沉积与推移, 最终到达流域出口, 这个过程便构成流域侵蚀与产沙<sup>[1]</sup>。流域降雨侵蚀模型就是用来模拟流域降雨侵蚀的实际物理过程与结果的数学模型。本文简述了流域降雨侵蚀模型的研究历程, 分析了流域降雨侵蚀模型研究现状及存在的问题, 并进一步对流域降雨侵蚀模型研究前景与趋势进行展望, 以期促进流域侵蚀模型的研究, 为预报水土流失、评价水土保持措施、指导流域生态与环境建设提供技术支持。

### 1 流域降雨侵蚀模型研究历史

在 20 世纪 30、40 年代, 人们根据实测资料用经

验相关法建立一些形式比较简单的关系方程式来研究水土流失问题, 这个阶段的降雨侵蚀模型只限于坡面尺度。比如在 1947 年, Musgrave 研究表明土壤侵蚀量除与坡长、坡度间存在正相关外, 还与最大 30 min 降雨量、植被覆盖度和土壤类型相关, Musgrave 所建立的侵蚀方程式可用于估算洪水期流域的总侵蚀量<sup>[2]</sup>。第一个有影响力的流域降雨侵蚀模型是美国农业部科学与教育管理委员会于 1965 年提出的通用土壤流失方程 (USLE)<sup>[3]</sup>, USLE 以降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、作物覆盖和水土保持措施作为 5 大影响因子定量计算某一时期内土壤侵蚀总量。早期的流域侵蚀模型大多是类似于 USLE 的因子模型。

20 世纪 60 年代以后, 随着侵蚀机理研究的逐步开展、相邻学科的发展及计算机技术的兴起, 开始涌现一批有物理成因基础、考虑土壤侵蚀与产沙主

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-09-19  
基金项目: 水利部公益性专项支持(2007SH Z1-34)  
作者简介: 肖飞鹏(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向为水文与生态环境。E-mail: iaofeipeng01@126.com  
通信作者: 程根伟(1956-), 男, 四川成都人, 博士, 研究员, 主要从事水文与水资源、山地环境和森林生态研究。E-mail: gwcheng@imde.ac.cn

要物理过程模型, 模型开始变得复杂, 模拟精度也有一定提高。1967 年美国 Stanford 大学 Negev 应用 Stanford-IV 模型模拟地表径流与面蚀, 并计算细沟和切沟侵蚀, 应用泥沙率定曲线, 将雨滴击溅及细沟和切沟侵蚀产生的物质划分为河流悬移质和推移质<sup>[4]</sup>。这期间产生了许多代表性模型, 如 AMR 模型、SSU 模型和 SSARR 模型等, 这些模型在建模时都考虑了流域侵蚀产沙的子过程, 并利用输入降雨等水文过程来模拟水文和侵蚀过程的相互影响。

20 世纪 90 年代至今, 计算机编程技术逐渐被广泛掌握, 遥感(RS)和地理信息系统(GIS)发展快速, 流域侵蚀模型的研究取得突破式发展, 这个阶段对流域侵蚀的物理过程分解更为细微, 模型开始具有分布式特征, 流域降雨侵蚀模型也由传统的集总式模型向流域进行单元划分的分布式模型过渡。美国国家土壤侵蚀实验室于 1985 年着手研制具有分布式模型轮廓的 WEPP 模型(Water Erosion Prediction Project), WEPP 模型流域版于 1998 年正式推出<sup>[5]</sup>。WEPP 模型是目前国际上最为完整的侵蚀模型之一, 主要包括了气候模型、地表水文、亚地表水文、水分平衡、土壤条件、植物生长、残茬管理、地表水流、细沟侵蚀和细沟间侵蚀、沟底水流过程、沟蚀、汇流等模块<sup>[5]</sup>。此类模型还有欧洲的 EUROSEM<sup>[6]</sup>和 LISEM 模型<sup>[7]</sup>、澳大利亚的 GUEST 模型<sup>[8]</sup>等。

我国流域侵蚀模型起步相对较晚, 研究大多紧随国外。20 世纪 60 年代, 孟庆枚等根据黄土丘陵沟壑区各水土保持试验站的径流小区资料, 建立了一个土壤流失方程, 较全面地考虑了各种影响侵蚀产沙的因素<sup>[9]</sup>。进入 80 年代以后, 针对我国河流泥沙日益严重的问题, 流域侵蚀模型的研究在我国得以快速发展起来, 期间以黄土丘陵沟壑区小流域产沙过程模型为典型代表。90 年代以后, 由于 3S 技术的发展, 流域侵蚀确定性模型的研制在我国也取得了重大进展, 蔡强国建立了一个反映侵蚀-输移-产沙过程的小流域侵蚀产沙过程模型<sup>[10]</sup>。谢树楠从泥沙运动力学的基本理论出发, 结合水文学、气象学、土壤学和地理地貌学原理, 建立了适用于大、中、小流域的暴雨产沙模型<sup>[11]</sup>。汤立群等从流域水沙产生、输移、沉积过程的基本原理出发, 根据黄土地区地形地貌和侵蚀产沙的垂直分带性规律, 建立了流域产沙随时间、空间分布的确定性模型<sup>[12]</sup>。总体而言, 流域降雨侵蚀模型的研究经历了一个由经验性模型向分析型、确定型模型的转移, 从统计模型向描述过程的物理模型转移的过程。

## 2 流域降雨侵蚀模型分类

流域降雨侵蚀模型按其研究方法大致可归为 3 大类: 一类是基于观测资料, 从影响侵蚀产沙的主要因子入手的经验相关模型, 此类模型也被称为因子分析模型; 一类是以侵蚀产沙的物理机制分析为基础的物理过程模型, 也可称为确定性模型; 另一类是介于前两者之间的既进行影响因子回归分析又具备一定物理意义的概念性模型。

### 2.1 经验相关模型

所谓经验相关模型, 就是在大量实测资料的基础上, 按照误差最小原理建立起来的自变量与因变量之间的关系式。其基本特征是: 依据实际观测资料, 利用统计相关分析方法, 建立水蚀和产沙量与降雨、植被、土壤、土地利用、耕作方式、水土保持等主要控制因素之间的多元回归因子关系式, 以此估算水蚀或产沙量。用该方法建立的模型, 结构简单, 方法简捷、直观、计算容易, 目前仍被视为一种有效的土壤侵蚀产沙模拟工具。

较早建立流域降雨侵蚀模型大多属于此类模型。这类模型国外主要以通用土壤流失方程(USLE)和修正的通用土壤流失方程(RUSLE)<sup>[13]</sup>为代表。国内有刘宝元等以 USLE 模型为蓝本建立的中国土壤流失模型(CSLE)<sup>[14]</sup>、尹国康等提出的小流域宏观产沙模型<sup>[15]</sup>等。

通用土壤流失方程(USLE)<sup>[13]</sup>: USLE 考虑因素全面、因子具有物理意义、形式简单、所用资料广泛、统一了土壤侵蚀模型形式, 在全世界得到了广泛应用如式(1)。

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:  $A$ ——单位面积上土壤流失量;  $R$ ——降雨侵蚀力因子;  $K$ ——土壤可蚀性因子;  $L$ ——坡长因子;  $S$ ——坡度因子;  $C$ ——作物覆盖和管理因子;  $P$ ——水土保持因子。

### 2.2 物理过程模型

物理过程模型是一种确定性模型, 它以物理成因为基础, 从产沙、水流汇流及泥沙输移的物理概念出发, 利用各种数学方法把气象学、地貌学、水文学、水力学、侵蚀力学、土壤学和泥沙运动力学的基本原理结合起来, 经过一定的简化, 以数学的方式描述流域系统内发生的有关径流泥沙运动的物理过程, 并采用适当的计算方法预测给定时段内的产沙量及其过程。根据模型结构的不同, 物理过程模型又可分为集总式模型和分布式模型两类。

集总式模型将流域系统作为一个整体来考虑,

用一系列的参数反映全流域的各种下垫面条件和水流泥沙物理过程,模型参数具有整个流域的统计特征,模型的成因性强,参数多、结构复杂,但由于其参数具有统计学意义,因此难以在时间和空间尺度上推广应用。这一类代表性的模型有:水蚀预报模型(WEPP)<sup>[5]</sup>、欧洲土壤侵蚀预报模型(EUROSEM)<sup>[7]</sup>。

水蚀预报模型(WEPP)流域版<sup>[5]</sup>: WEPP 模型是建立在水文学与侵蚀科学基础之上的连续模拟模型。WEPP 模型将整个流域划分为坡面、渠道与拦蓄设施 3 个部分,主要包括了气候模型、地表水文、亚地表水文、水分平衡、土壤条件、植物生长、残茬管理、地表水流、细沟侵蚀和细沟间侵蚀、沟底水流过程、沟蚀、汇流等模块。其中土壤侵蚀过程主要包括侵蚀、搬运和沉积三大过程。暴雨所产生的径流及其挟带的侵蚀泥沙在从坡面向沟道汇集并最后从流域出口输入到较大一级的流域过程中,侵蚀、沉积、搬运连续发生,坡面侵蚀包括细沟侵蚀和细沟间侵蚀,其侵蚀基本理论为: (1) 细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主,而细沟侵蚀以径流侵蚀为主。(2) 侵蚀量( $E$ )是搬运能力( $T_c$ )和输沙量( $q_s$ )的函数:

$$E = \alpha(T_c - q_s) \text{ 或 } E/D + q_s/T_c = 1 \quad (2)$$

也就是说,当输沙量小于泥沙搬运能力时,侵蚀状态以侵蚀-搬运过程为主,相反,则以侵蚀-沉积过程为主。(3) 从细沟间到细沟的泥沙通过式(3)计算:

$$D_i = K_i \cdot I_e^2 \cdot G_e \cdot S_f \quad (3)$$

式中:  $D_i$  ——从细沟间剥蚀的泥沙量;  $K_i$  ——细沟间土壤可蚀性;  $I_e$  ——有效的降雨强度;  $G_e$  ——林冠覆盖调整因子;  $S_f$  ——坡度调整因子,  $S_f$  通过式(4)来计算。

$$S_f = 1.05 - 0.85e^{-4 \sin A} \quad (4)$$

式中:  $A$  ——地面坡度。

分布式模型是将流域系统划分为若干个相对均匀的单元流域,每个单元上都有反映下垫面条件和水流泥沙过程的参数,分块分过程模拟,最后集成,其特征是以流域面上分散的水文与侵蚀参数来描述流域的时空变化特性,模型参数随空间坐标变化而变化。流域分布式模型充分考虑流域下垫面空间分布不均对流域侵蚀过程的影响,模型的灵活性大、适应性强,便于推广应用。由于分布式模型所具有的参数分布式特征更加符合客观实际,该类模型具有比较明显的优点:具有很高的物理成因基础,理论上可较好地克服经验相关模型及集中式物理过程模型的区域限制问题,能更好地模拟和表达流域侵蚀产

沙的物理过程,对单次暴雨产沙的预报精度更高并可以预测预报流域侵蚀产沙在时间和空间上的变化。典型的分布式流域侵蚀模型有 SHE (System Hydrologique Europeen) 模型<sup>[16-17]</sup>、基于 GIS 的流域侵蚀预报模型(GeoWEPP)<sup>[18-19]</sup>、荷兰土壤侵蚀预报模型(LISEM)、SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)<sup>[20]</sup>。

基于 GIS 的流域侵蚀预报模型(GeoWEPP)<sup>[18-19]</sup>: 在继续完善流域版 WEPP 的物理过程数学模拟基础上,通过嵌入 ArcGIS 强大的空间分析功能,实现 WEPP 与流域土壤参数数据库、土地利用类型和地形数据(DEM)的自动连接,为 WEPP 提供连续的时空信息源。GeoWEPP 中,通过设定临界源区和最小沟道长度,利用 DEM 自动提取流域边界、沟道和典型坡剖面,生成沟道网和子流域,分析流域水流流路。模型将研究流域按自然子流域的形状进行离散,划分为下垫面特征相对均匀的子流域,把子流域作为模型的计算单元,这些子流域再与干流河道相联结,单元内和单元之间的水文与侵蚀过程清晰,单元内容易引进成熟的传统侵蚀模型。

### 2.3 概念性模型

概念性模型是以流域侵蚀现象的物理概念作为基础进行模拟的,它所模拟的不完全是真实的物理实体,而是对侵蚀的物理现象进行概化,它是把流域侵蚀过程作为一个整体系统来研究,是对流域复杂侵蚀现象的一种概化模拟。概念性模型是介于物理过程模型和经验黑箱型模型之间的一种类型,既有一定的物理基础,又具有统计回归模型的特点,操作简便,输入变量少,模拟精度较高,对观测数据精度要求也不很严格,因此在工程实践中应用也最为广泛,典型的有 Standford-IV 模型、AMR 模型等<sup>[4]</sup>。

Standford-IV 模型<sup>[4]</sup>: 模拟地表径流与面蚀,并计算细沟和切沟侵蚀,应用泥沙率定曲线,将雨滴击溅及细沟和切沟侵蚀产生的物质划分为河流悬移质和推移质。

## 3 流域降雨侵蚀模型存在的问题

在众多的流域降雨侵蚀模型中,每种模型各有其优越性,同时也都存在一定的局限性。经验相关模型最早研制,结构简单,易于应用,目前仍然适用于对精度要求不高的流域侵蚀定量估算,但模型自身的两个限制因素严重制约该类模型的进一步发展与应用:一是模型缺乏物理机制,本质上限制了其精度的进一步提高;二是因变量是根据实测资料利用误差最小原理确定,因此模型对实测资料在时间、空

间尺度上的代表性有比较严格的要求, 这一点也同时限制模型在无资料或资料缺乏地区的应用。

概念性模型在一定程度上弥补了经验相关模型缺乏物理机制的缺陷, 模型考虑了更多的物理过程与影响因素, 模型也更加复杂, 在 20 世纪推出了许多经典模型, 是目前在生产实践中应用最为广泛的一类模型。但概念性模型同样由于其自身方法与结构上的缺陷存在 3 个不足: ①模型结构能反映侵蚀的主要物理过程, 但没有考虑地表植被、土壤、地形等属性在水平坐标上的不均衡性, 而这种不均衡性往往对模拟精度影响极大。②模型的参数是集总性的, 通过回归得到, 具有统计学意义, 但不能反映时间与空间上的变化。③模型对侵蚀物理过程是一种概化模拟, 物理过程模拟不够严格、细致。由于此类模型缺乏物理机制, 限制了其精度的提高及模型的进一步发展, 另外, 该类模型在建模型时需要大量的实测资料, 区域局限性很大, 模型移植性差, 虽然模型在资料年限内模拟精度能有一定保证, 但用于预测与外延精度较低, 因此, 所暴露的问题也很多。

流域侵蚀物理过程模型物理意义明确, 基本上能模拟流域水蚀物理机制及水沙输移过程, 虽然研究时间较短, 但发展迅速、潜力巨大, 其中, 分布式流域侵蚀模型是目前研究的前沿领域。分布式模型最大的问题是由于受到人类认识自然水平及相关学科的限制, 现阶段还未能做到完全的物理模拟, 许多环节只能通过假设与简化来解决, 影响了模拟精度, 另外, 分布式模型由于需要大量的流域地表参数, 在很大程度上也限制了模型的实际应用。分布式流域侵蚀模型目前仍然处在研究和小范围应用阶段, 在一些小流域中应用取得了较好的效果, 但还难以应用于大中型流域, 流域侵蚀分布式模型要做到真正的物理过程模拟还有有待于进一步提高。

## 4 流域降雨侵蚀模型研究展望

流域侵蚀模型是体现水蚀过程的最重要的手段, 必然朝着再现水蚀物理过程的方向发展。未来流域侵蚀模型研究的重点将是在现有分布式模型的基础上加强下述 3 个方面研究: ①要加强坡面侵蚀过程的观测并将其应用在模型中; ②必须考虑尺度转换问题, 尺度转换必须选择合适的外延方法; ③分布式模型应该与遥感技术相结合, 解决流域内参数的获取问题。达到上面所述的这些条件, 目前的分布式模型就会逐渐转化为数值模型。

新技术的发展与应用、人类认识世界的能力存在一个循序渐进的过程, 不可能一步到位, 同时, 社

会需求是多样性、多层次的, 目前的各类模型都能在某一方面找到其用武之地, 单一再好的模型也难以满足社会全部需求。因此, 由于实际条件的限制及社会多层次的需求, 预计各类模型都将继续存在并继续发展完善。比如一些结构简单、简便实用的随机模型和经验相关模型经过进一步发展完善也能满足社会低层次的需求。对于大多数流域侵蚀经验相关模型而言, 由于该类模型多数是集总参数式的, 在很多情况下, 使实际的物理过程消失了, 模型模拟精度很大程度上是靠调整参数来实现的, 因此, 经验相关模型今后的发展方向, 应该是多用实际的观测和试验数据, 保证实际物理参数的可靠性, 尽量减少集总参数, 使模型尽可能体现实际的物理过程。

综上所述, 随着相关学科的发展、新技术的应用及关键物理过程的深入研究, 三类流域侵蚀模型都将得到极大的发展。其中, 物理过程模型特别是分布式模型将是未来很长一段时间的研究热点, 最终的趋势是这类模型无限接近流域真实的侵蚀产沙物理过程。

### 参考文献:

- [1] 田磊, 戴静, 祁永刚. 流域侵蚀产沙模型述评[J]. 水土保持研究, 2002, 9(4): 77-79.
- [2] Musgrave G W. The quantitative evaluation of factors in water erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1947, 2(3): 133-138.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil loss equation to guide conservation farm planning[C]. Int. Congr. Soil Sci. Trans., 1960: 418-425.
- [4] Crawford N H, Linsley R K. Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV [R]. Technical Report. No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, 1966.
- [5] Cochrane T A, Flanagan D C. Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54(4): 678-685.
- [6] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 527-547.
- [7] De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1107-1117.

5 结 语

通过以上对毛乌素沙地的成因以及以往对该区的治理情况分析,毛乌素沙地的治理需要通过各种途径的试验,找出最合理最有效的措施。除了建立防风沙体系,采用镶边式治沙以及在沙漠戈壁及活化沙丘的边缘,尽快建立起以灌木为主的防风防沙生物隔离带;对草场沙化、退化地区实行“轮封轮牧,半饲半牧,补粮增效”的办法,恢复草场生产力等措施之外,在这里提出治理毛乌素沙地的新思路:通过“覆土盖砂”的方法来治理毛乌素沙地,这种方法不仅可以提高土壤含水量,有利于植被的生长发育,减少风沙危害,而且可以使其变为生态经济区或者良田,从根本上解决沙地的治理问题。

参考文献:

[ 1 ] 任苍玉.毛乌素沙地沙漠化原因探讨[ J ].地质灾害与环境保护,2002,6(2):30-31.  
[ 2 ] 刘保生,靳鹤龄,吕海燕,等.150 ka 以来毛乌素沙漠的

堆积与变迁过程[ J ].中国科学,1982,2(1):89-90.  
[ 3 ] 高国雄.毛乌素沙地能源开发对植被与环境的影响[ J ].水土保持通报,2005,4(2):106-107.  
[ 4 ] 吴薇.近 50 年来毛乌素沙地的沙漠化过程研究[ J ].中国沙漠,2001,6(2):166-167.  
[ 5 ] 朱震达,陈广庭,王涛,等.中国土地沙质沙漠化[ M ].北京:科学出版社,1994:188-198.  
[ 6 ] 郝高建,赵先贵,赵昕.毛乌素沙地南缘地区沙漠化防治中的新思路[ J ].宁夏大学学报:自然科学版,2004,3(1):76-78.  
[ 7 ] 赵延宁,丁国栋,王秀茹,等.中国防沙治沙主要模式[ J ].水土保持研究,2003,9(3):118.  
[ 8 ] 张强,孙向阳,王涵,等.毛乌素沙地土壤的持水性研究[ J ].林业科学研究,2004,17(增刊):63-65.  
[ 9 ] 罗俊宝,孙保平.腾格里沙漠月亮湖公路沿线退化白刺沙堆封育及其防沙效益[ J ].干旱区资源与环境,2005,19(4):207-210.  
[ 10 ] 王哲,张国盛,王林和,等.毛乌素沙地天然臭柏群落种子产量、种子库及幼苗更新[ J ].干旱区资源与环境,2005,19(3):195-200.

(上接第 101 页)

[ 8 ] Rose C W, Williams J R, Sander G C, et al. A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I . Theory for a plane land element [ J ]. Soil Science Society of America Journal, 1983,47(5):991-995.  
[ 9 ] 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.  
[ 10 ] 蔡强国,陆兆熊.黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[ J ].地理学报,1996,51(2):108-117.  
[ 11 ] 谢树楠,王孟楼,张仁.黄河中游黄土沟壑区暴雨产沙模型的研究[ M ].北京:清华大学出版社,1990.  
[ 12 ] 汤立群,陈国祥,蔡名扬.黄土丘陵区小流域产沙数学模型[ J ].河海大学学报,1990,18(6):10-16.  
[ 13 ] Renard K D, Forste G D, Weesies G A. Prediction rainfall erosion by water: a guild to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [ M ]. Washington D C: Agric. Handb. 703. U. S. Gov. Print. Office, 1997.  
[ 14 ] Liu Baoyuan,Zhang Keli,Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation [ C ]// Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference, Vol. II:

Process of Soil Erosion and Its Environment Effect. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 21-25.  
[ 15 ] 尹国康.黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因分析[ J ].地理学报,1998,51(2):108-116.  
[ 16 ] Jondt Clausen T. Systeme Hydrologique Eurppeen: a short description [ C ]// Danish Hydraulics Institute. SHE Report 1. Denmark: Horsholm, 1979.  
[ 17 ] Beven K J, Warren R, Zaoui J. SHE: towards a methodology for Physically based distributed forecasting in hydrology [ C ]// Hydrological Forecasting. IAHS Publication, 1980: 133-137.  
[ 18 ] Renschler C S. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach [ J ]. Hydrological Processes, 2003,17: 1005-1017.  
[ 19 ] Renschler C S, Flanagan D C, Engel B A, et al. Geo WEPP- The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project[ C ]. ASAE meeting paper No. 022171, St. Joseph, Michigan, 2002.  
[ 20 ] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydro logic modeling and assessment, Part I: model development [ J ]. Journal of the American Water Resources Association, 1988, 34(1):73-89.