

WEPP 模型概述

张玉斌^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}, 贾媛媛^{1,2}

(1. 中科院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;
2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘要: WEPP 模型是 USDA 为了克服 USLE 的缺点而推出的以替代 USLE 的新一代水蚀预测模型。对 WEPP 模型的基础理论、特点、结构、功能模块等方面进行了详细介绍, 其中功能模块包括天气随机生成模块、冬季过程模块、灌溉模块、水文过程模块、土壤模块、植物生长模块、残留物分解模块、地表径流模块、侵蚀模块。
关键词: 水蚀; 预报模型; WEPP; 应用
中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2004)04-0146-04

WEPP Model and Its Application

ZHANG Yu-bin^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}, JIA Yuan-yuan^{1,2}

(1. *The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2. *Northwest Sci-tech University of Agriculture & Forestry, Yangling Shaanxi 712100, China*)

Abstract: WEPP model is the physically-based model of water erosion prediction, developed by USDA for replacing USLE to use soil erosion investigation in the United States. The authors outline WEPP model, including fundamental theory, characteristics, structure, and function modules and components. Function modules are composited of weather generator, winter process, irrigation component, hillslope surface hydrology, soil component, plant growth component, residue decomposition and management, hydraulics of overland flow and hillslope erosion component, etc.
Key words: water erosion; prediction model; WEPP; application

土壤侵蚀预报模型作为评价土壤侵蚀强度, 指导人们合理利用土地资源, 管理并维持人类长期生存环境的重要技术工具, 受到世界各国的普遍重视。美国水蚀预报模型——WEPP(Water Erosion Prediction Project)^[1~6]是由美国农业部(USDA)组织农业研究局、土壤保持局(现改名为自然资源保护局)、森林局和美国内政部土地管理局等部门以及十几所大学进行开发的科研项目。WEPP 实际上是 USDA 推出的用以替代 USLE 的新一代土壤侵蚀预测模型。该项目计划利用 20 年左右的时间完成坡面版(Hillslope version)、流域版(Watershed version)和网格版(Grid version)的研发。从 1985 年正式开始立项研究开发, 于 1987 年完成了用户需求报告, 规定了 WEPP 的基本框架, 1989~1995 年间进行了不断的验证和改进, 并于 1995 年发布了第一个官方正式版

本 WEPP'95。随后又相继于 1998 年、2000 年和 2001 年分别颁布了不同版本。WEPP(v2001. 300)为最新版本, 是对早期往上版本的修正与完善。目前开发研制成功的主要是坡面版本和流域版本, 网格版仍是空白。在开发模型过程中, 先后采集 1 800 个土样, 基础数据采用近 30 年的气候资料^[7, 12~20]。

1 WEPP 模型介绍

WEPP 模型是新一代的用于土壤侵蚀预测预报的计算机模型, 它可以预测土壤侵蚀以及农田、林地、牧场、山地、建筑工地和城区等不同区域的产沙和输沙状况。WEPP 模型是对细沟侵蚀和细沟间侵蚀及泥沙运动机理的物理描述, 是一种基于侵蚀过程的模型。适合于研究环境系统变化对水文及侵蚀过程的影响, 包括气候变化、水文过程及产沙之间的相

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-422); 国家自然科学基金重点项目(40335050); 农业部 948 项目(2003-Z57)
作者简介: 张玉斌(1977-), 男, 山东莒南人, 在读博士生, 研究方向为土壤侵蚀与环境效应评价。

互作用。WEPP 属于一种连续的物理模拟模型,根据每次降雨确定地表状况的最新系统参数,可以对一天时间内的降雨及侵蚀过程进行模拟。该模型不考虑风蚀和崩塌等重力侵蚀,其应用范围从 1 m^2 到大约 1 km^2 的末端小流域。

WEPP 是以 1 d 为步长的模拟模型,运行过程中输入每一天对土壤侵蚀过程有重要影响的植物和土壤特征。当降雨发生时,这些植物和土壤特征被用于决定是否将会有径流产生。如果预测有径流产生,则模型将计算出沿纵剖面上一定空间位置的土壤侵蚀量、河道的输沙量和水库的泥沙淤积量。

1.1 WEPP 基本理论

WEPP 模型中,土壤侵蚀过程包括侵蚀、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(rill)侵蚀和细沟间(interrill)侵蚀。

WEPP 模型的基本理论为:(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;即, $E = \sigma((T_c - q_s)$ 或 $E/D + q_s/T_c = 1$ 。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。

1.2 WEPP 模型参数

WEPP 模型参数包括气候(降雨、温度、太阳辐射和风)、冬季因素(冻融、降雪量、融雪量)、灌溉、水文(入渗、填洼和径流)、水量平衡、土壤、作物生长、残渣管理与分解、耕作对入渗和土壤可蚀性的影响、侵蚀(片蚀、细沟侵蚀)、沉积、泥沙搬运、颗粒分选与富集等。

1.3 WEPP 模型的版本

WEPP 模型目前有 3 种版本,即坡面版、流域版和网格版。(1)坡面版是对 USLE 与 RUSLE 的直接代换,增加了估算坡面泥沙淤积的功能,比 USLE 的功能更强。(2)流域版包括用以估算坡面侵蚀量的坡面版,适用于对一定面积流域的产沙预测,能计算河道泥沙的输移、淤积和土壤冲刷量,还可计算小型蓄水工程中泥沙的淤积量。(3)网格版适用于与流域边界不相吻合的任意地理区域。这些区域可被划分为若干个单元,在每个单元内应用坡面版计算侵蚀量。网格版还可用于估算泥沙从一个单元到另一个单元的输移和某个出口断面处泥沙的输出量问题。

1.4 WEPP 模型的特点

与传统的侵蚀模型相比,WEPP 模型具有很多优点:(1)可模拟土壤侵蚀过程及流域的某些自然过程,如气候、入渗、植物蒸腾、土壤蒸发、土壤结构变化和泥沙沉积等;(2)可模拟非规则坡形的陡坡、土壤、耕作、作物及管理措施对侵蚀的影响等;(3)可以模拟土壤侵蚀的时空变异规律,模型的外延

性好,易于在其他区域应用;(4)预测泥沙在坡地以及流域中的运移状态,能很好地反映侵蚀产沙的时空分布。

1.5 WEPP 模型的发展——GeoWEPP

美国科学家除了对 WEPP 坡面和小流域版的用户界面进行不断改进之外,还进一步将 WEPP 模型与 GIS 相结合,开发研制了 GeoWEPP(Geo-spatial interface for WEPP)模型,其界面是基于 Arc View 开发而成的。该模型研发的目的是给具有不同层次 GIS 知识的用户提供系列界面,应用多种数据,实现全国资料的免费共享。模型与 GIS 有机结合,可直接利用数字化数据对侵蚀量进行估算;同时,模型允许直接输入各种地理数据,如数字高程模型、地形图等,便于评价流域水土保持规划的可行性;不同地区的模型参数易于确定,从而使 WEPP 的应用更加广泛。

2 WEPP 模型结构

2.1 输入文件

WEPP 的输入文件主要有气象数据文件、坡面数据文件、土壤数据文件和作物与管理数据文件。每一类型的文件都有各自规定的格式和不同的内容项。若进行灌溉模拟,还需要其他相关的输入数据。在应用 WEPP 的流域版时,还需要流域沟道系统和汇水区数据文件。气象数据文件可通过 CLIGEN 生成。用户可利用 WEPP 提供的界面进行气象数据输入,也可从外部输入。模型提供了美国 7 000 个气象站的气象资料,用户可从中获取所需的气象数据。坡面数据文件可通过模型提供的界面或人工两种方式生成。土壤数据文件可通过模型界面或文本编辑器生成。作物与管理数据文件包含的数据量最多也最为复杂,其参数类型也较多,可通过模型界面或文本编辑器生成。

2.2 用户界面

WEPP 通过计算机运行,与所有的计算机软件一样,它向用户提供了各种运行程序的界面。通过用户界面,用户可以很方便地生成和修改输入数据,进行模拟、快速浏览输出结果等。界面采用下拉式菜单设计,通过菜单命令,用户可建立输入文件、编辑运行方式和定义输出数据格式,此外也可修改界面的颜色等。

2.3 输出成果

根据用户的不同需要,WEPP 可生成不同种类和不同精度的输出结果。最基本的输出结果包括径流和侵蚀的主要信息,并且可输出每场降雨、月际降雨以及年际降雨的基础数据。输出结果包括坡面土壤流失量和平均泥沙沉积量,非本位结果包括泥沙输移量、受冲刷和被搬运泥沙颗粒的粒径分布以及特殊地段的泥沙沉积量。

WEPP 也可以生成某一坡面的输出结果,其最基本的输出结果包括整个流域径流和侵蚀的主要信息。整个流域以及

流域的每一个单元,其泥沙输移比、泥沙沉积量、不同地表状况指标和泥沙颗粒粒径分布均可在输出模块中生成。若汇水区在流域内部,汇水区的输入和输出水量以及泥沙量也可生成。另外,每一粒径泥沙还可以生成某一降雨过程的输出结果(包括降雨、径流和土壤流失等),其基本输出结果与坡面的输出结果相似。本模块还可输出与降雨过程相关的图表、曲线等,并输出土壤、植被、水分平衡、作物、冬季过程等相关数据。

3 WEPP 模型的功能模块

WEPP 是一个基于侵蚀过程的计算机模型,可以预报和模拟每天或每次的降雨、入渗、地面径流过程产生的侵蚀和泥沙运移等,还可以计算日、月、年平均径流和泥沙运移状况等。其优点一是可以模拟引起水土流失的自然过程,如气候、入渗、植物蒸腾、土壤蒸发、土壤结构变化和泥沙沉积等,二是可以模拟非规则坡地、土壤、耕作、作物及管理措施等,三是可以计算土壤侵蚀随时间和空间的变化,四是可预测泥沙在坡地以及流域中的运移状态。WEPP 模型有 9 个功能模块,包括天气随机生成模块、冬季过程模块、灌溉模块、水文过程模块、土壤模块、植物生长模块、残留物分解模块、地表径流模块、侵蚀模块。

3.1 天气随机生成模块^[1]

WEPP 模型所需要的气候数据可由用户直接输入或由 CLIGEN 模型生成。CLIGEN 模型可生成日降雨量、日最高和最低气温、日太阳辐射量。日降雨量由 4 个变量来描述,即降雨深度、雨强峰值、降雨过程中达到雨强峰值的时间、降雨历时。

WEPP 模型分解 CLIGEN 模型或用户的降雨输入数据,从而求得降雨历时—雨强(转折点)数据。给定降雨量和降雨历时,分解模型可导出降雨强度类型。渗透因于可利用转折点降雨数据计算入渗率及径流量。BPCDG(Breakpoint Climate Data Generator)是一个独立的程序,可以把气象站观测到的降雨量及其它一些气象数据生成 WEPP 所需的气象数据,这种直接观测到数据比任何其它程序所生成的数据更有实际意义。因此,如何应用 BPCDG 把采集到气象数据转换成 WEPP 气候数据就是问题的关键。

3.2 冬季过程模块

WEPP 模型的冬季过程包括土壤冻融、降雨和融雪。土壤与外界环境之间的热量流动受每日温度、太阳辐射、残留物覆盖、植被以及雪的影响,太阳辐射、气温和风则共同作用于融雪过程。

3.3 灌溉模块

WEPP 模型的灌溉模块模拟灌溉类型、灌溉量、径流量和侵蚀量等,可模拟喷灌和明渠灌溉两种灌溉方式。喷灌模拟可看作是一场标准雨强的降雨,而明渠灌溉则可模拟壤中

流、明流和异重流的完整过程。

3.4 水文过程模块

WEPP 模型中的水文过程包括入渗、产流、地表蒸发、植物蒸腾、土壤水饱和浸透、植被和残茬截流、截持水量、土壤亚表层瓦管排水等。入渗过程采用修正后的 Green—Ampt 方程进行计算,产流采用运动波理论公式进行计算,水量平衡方程是修正后的 SWRRB 水量平衡方程。

3.5 土壤模块

本模块主要分析土地耕作对不同土壤特性以及模型参数的影响,也可模拟降雨过程以及对土壤参数的影响等。在模块中,仍然采用每日跟踪的方法反映土壤及其地面特征的动态变化,所涉及的变量包括地面的自然糙度、人为糙度(耕作田垄高度)、土壤容重和饱和导水性能、土壤可蚀性和临界水流剪切力等。此外,土坡模块还考虑了耕作、风化、团聚体和降雨等对土壤及地面特征的影响,通过模拟分析计算,可向水文模块提供许多用以估算地表径流量、径流速度和渗透量等的必要资料。

3.6 植物生长和残留物分解模块

WEPP 模型中的植物生长模块可模拟农田及分布区内的植物生长和残茬物分解,并可模拟影响径流及侵蚀过程的植物变量的时间变化。用于农田模拟的植物生长模型与 EPIC 模型很相似。残留物及根部分解模型模拟的是地表残留物、覆盖残留物和残根的分解,植物生长模型以 ERYHM 一和 SPUR 模型为基础,可估计植被、地表残留物、覆盖残留物、茬与叶面指数、活根及死根、活生物量和作物产量数据等。

3.7 地表径流模块

该模块主要计算地表径流过程的水力学机制,其中包括土壤糙率、残茬覆盖和活地被物对于流速、水流切应力以及径流挟沙力的影响。由于降雨和入渗量有差异,地表径流可以计算出来。WEPP 模型中的入渗计算采用 Chu 于 1978 年提出的用于不稳定降雨的单层 Green—Ampt 方程。

3.8 侵蚀模块

WEPP 将土壤侵蚀过程分为剥离、输移和沉积 3 个阶段,认为土壤剥离(即侵蚀)分为细沟间和细沟侵蚀两种情况,细沟间侵蚀是在雨滴击溅和薄层水流作用下发生的,坡面上经常发生这种侵蚀;细沟侵蚀是由径流冲刷而引起的土壤剥离现象。WEPP 模型使用处于稳定状态下的泥沙连续方程,该方程可计算坡向纵断面和流域泥沙冲刷及沉积的净值。模型把土壤的冲刷过程看作是雨强与流速的共同作用过程,把泥沙的输移过程看作是坡面与地表糙率共同作用的过程。WEPP 以 Yalin 提出的泥沙输移方程来估算沟道中的泥沙输移量,并根据径流中泥沙含量、径流输沙能力和泥沙的沉降速度来推算释流中泥沙的沉积量。

4 WEPP 模型的局限性及其应用前景

WEPP 模型中仍有一些土壤侵蚀机理问题尚需进一步研究, 比如在表土结皮与土壤侵蚀的关系等。从 WEPP 模型的应用范围看, 在农地适用最大范围约 260 hm²、在林地约为 800 hm² 的地块。模型不能应用于切沟和河道侵蚀, 只能用于对农田临时性切沟草皮水路侵蚀的模拟。目前坡地版已开始应用, 模拟预测的结果较好, 而流域版仍局限于较末级集水区, 多级流域的组合尚在研究中。

由于 WEPP 模型涉及众多的子模型和参数, 因此模型的实用性受到限制。目前研究人员正在寻求 WEPP 模型与 GIS 之间的联系界面, 以减少工作量, 使不同地区不同项目

参考文献:

[1] Foster G R, Lane L J. User requirements, USDA- Water Erosion Prediction Project (WEPP)[R]. NSERL Report No. 1, West Lafayette: USDA- ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1987.

[2] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for U SDA- Water Erosion Prediction Project technology[J]. T rans. ASAE, 1989, 32(5): 1587- 1593.

[3] Nearing M A, Lane L J, Alberts E E, et al. Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990, 54(6): 1702- 1711

[4] Laflen J M, Lwonard J L, Foster G R. WEPP a new generation of erosion prediction technology[J]. J of Soil and Water Cons., 1991, 46(1): 34- 38.

[5] Foster G R, Nearing M A, Laflen J M. et al. Hillslope Erosion Component, ch11. U SDA- Water Erosion Prediction Project, Hillslope Profile and Watershed Model Documentation[R]. W Lafayette: Ind: NSERL Report No. 10. USDA- ARS. Purdue Univ., 1995.

[6] 牛志明, 解明曙. 新一代土壤水蚀预测模型- WEPP[J]. 中国水土保持, 2001, (1): 20- 23.

[7] 刘宝元, 史培军. WEPP 水蚀预报流域模型[J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 6- 12.

[8] 刘增文. 美国水力侵蚀预测模型 WEPP 介绍[J]. 中国水土保持, 1997, (12): 26- 27.

[9] 郑粉莉, 刘峰, 杨勤科, 等. 土壤侵蚀预报模型研究进展[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 16- 18, 32.

[10] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(3): 274- 282.

[11] 刘益军, 王昭艳. 水力侵蚀预测模型 WEPP 气象数据的输入方法[J]. 水土保持科技情报, 2003, (4): 4- 5.

[12] Savabi M R, Flanagan D C, et al. WEPP 和 GIS- GRASS 在小流域中的应用 [J]. 水土保持科技情报, 1995, (3): 28- 30.

[13] Savabi M R. 用 WEPP 模型模拟地下排水和地表径流[J]. 黑龙江水利科技, 1996, (2): 119- 124.

[14] Baffaut C, Nearing M A, Ascough II J C, et al. The WEPP watershed model : II. Sensitivity and discremination on small watersheds[J]. T rans. ASAE, 1996, 40(4): 935- 944.

[15] Liu B Y, Nearing M A, Baffaut C, The WEPP watershed model: III. Com-parisons to measured data from small watersheds[J]. T rans. ASAE, 1997, 40(4): 945- 952.

[16] Williams J, Nearing M, Nicks A, et al. 利用土壤侵蚀模型研究全球变化[J]. 水土保持科技情报, 1998, (2): 14- 19.

[17] Laflen J M, et al. 用编程的 WEPP 软件预测水蚀[J]. 水土保持科技情报, 1998, (3): 42- 46.

[18] Cochrane T A, Flanagan D C. 基于 GIS 和 DEM 下的 WEPP 模型对水蚀的评价[J]. 水土保持科技情报, 2001, (4): 20- 25.

[19] Joan Q Wu, Xu Arthur C, Elliot William J. 改进 WEPP 研究森林小区的土壤侵蚀 [J]. 中国水土保持, 2002, (2): 40.

[20] 谢春燕, 陈晓燕, 何炳辉, 等. 土壤可蚀性在 WEPP 模型中的应用[J]. 水土保持科技情报, 2003, (4): 6- 9.

的 WEPP 应用参数易于确定, 从而使 WEPP 的应用更加广泛。要将 WEPP 模型实际应用于亚洲和欧洲等其它地区, 需要建立和完善相应的数据库文件, 并进行参数的修正、模型的调试。因此可以预计 WEPP 模型在北美以外其它地区的实际应用仍有一段相当长的过程。在中国大部分地区, 沟蚀和重力侵蚀对侵蚀产沙有重要贡献, 再加上中国水土保持措施的复杂性。因此, WEPP 模型在中国的应用与修正是中美土壤侵蚀和水土保持科学家共同面临的任务和挑战。如何根据我国土壤侵蚀特点, 借鉴 WEPP 模型的研究思路, 建立适用我国侵蚀环境的水蚀预报过程模型是我国土壤侵蚀研究迫切需要解决的重要议题。