

ANSWERS 模型及其应用

张玉斌<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>

( 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. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: ANSWERS 模型主要是针对欧洲平原地区研发的分散型物理模型。介绍了模型的研发历史、结构、输入和输出信息以及模型的应用。ANSWERS 主要适用于缓坡地形区的径流模拟、侵蚀模拟和农业污染物运移模拟。如何根据中国的实际合理确定模型参数, 使模型在我国复杂地形区应用, 尚有许多问题需要研究。  
关键词: ANSWERS 模型; 研发历史; 应用; 污染物运移  
中图分类号: S 157. 1: X 53 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409( 2004) 04-0165-04

ANSWERS Model and Its Application

ZHANG Yu-bin<sup>1,2</sup>, ZHENG Fen-li<sup>1,2</sup>

(1. 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:** ANSWERS model is a distributed, physically based, computer model, used at different scales from farm to watershed according to European plain areas. The ANSWERS model's development history, structure, input and output components and its application were introduced. The ANSWERS model is used to simulate runoff, erosion and pollutant transportation. How to rationally determine the ANSWERS model's parameters base on China's conditions needs to be researched in order to apply the ANSWERS model's to complex terrain regions of China.  
**Key words:** ANSWERS model; development history; application; pollutant transport

20 世纪 70 年代以来, 农业非点源污染研究受到国际社会的广泛关注, 并取得了重要进展, 研发了估算农业非点源污染的一系列模型。本文主要对 ANSWERS 模型及其应用做了介绍, 期望对研发适用于我国侵蚀环境的土壤流失预报模型及其非点源污染模型有一定促进作用。

1 ANSWERS 模型概述

ANSWERS ( Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation, 流域非点源环境响应模型) 模型是由 Beasley 和 Huggins<sup>[1~5, 19, 31, 32]</sup> 在基于 20 世纪 70 年代的原有 ANSWERS 模型基础上建立的。随后又对模型进行了改进和完善, 使模型用以次降雨条件下的表面径流模拟和土壤侵蚀量的测算, 并能模拟分析农业地区雨后及降雨期间流域水文特征的分布式模型。ANSWERS 模型涉及的物理

过程包括地表水文过程、侵蚀和泥沙运动过程以及 N、P 营养元素的运移过程。该模型主要是针对欧洲平原地区研发的, 用于预报农业典型小流域中次降雨条件下的地表径流和土壤侵蚀量以及污染物流失量。在土壤侵蚀研究中该模型用于 BMPs 最佳管理措施对流域泥沙及水文过程的影响。  
ANSWERS 最初的模型只研究地表水文过程<sup>[2]</sup>, Beasley 等人又把侵蚀和泥沙运动等过程加入模型中<sup>[1, 3~5]</sup>, Dillaha 等人将模型中的泥沙输移计算进一步改进为不同粒径泥沙颗粒的产沙和输沙过程<sup>[10]</sup>。由于流域中农田营养元素的流失对水质的影响受到重视, 一些研究人员又把流域中 N、P 等营养元素的运移过程也加入到模型中<sup>[12]</sup>, 其中以 Bouraoui<sup>[14, 16]</sup> 研究的最为深入, 并对模型的源程序做了较大修改。近几年, 美国 Georgia 大学的 Wes Byne 与 Virginia 大学的 Dillaha 等人, 又进一步对模型进行了不断改进<sup>[27]</sup>。

① 收稿日期: 2004-07-10  
基金项目: 国家自然科学基金重点项目“黄土高原小流域分布式水蚀预报模型研究”(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。

ANSWERS 模型的最新版本是 ANSWERS- 2000, 它是于 20 世纪 90 年代中期开发的连续性模拟模型<sup>[14, 30]</sup>。在这个版本中, 养分模块对入渗<sup>[15]</sup>进行了校正与改进, 并加入了土壤湿度与植物生长部分, 以允许进行长期而连续的模拟。ANSWERS- 2000 模拟了稳定性有机态氮、活性有机态氮、硝态氮和氨态氮等 4 个氮源的转化与相互作用。养分的转化包括模拟的氮化作用与硝化作用、化合物的矿化、反硝化作用、植物对铵与硝酸盐的吸收。模型保持了稳定性有机态氮源与活性有机态氮源的动态平衡。模型模拟了四个磷源: 稳定性矿化磷、活性矿化磷、土壤有机态磷与活性磷。在稳定性矿化磷与活性矿化磷之间以及土壤有机态磷与活性磷之间保持着动态平衡。模型对植物活性 P 的吸收与有机 P 的矿化也进行了模拟。

为促进模型的利用, 开发了 ANSWERS- 2000 NPS (Nonpoint Source) 决策支持系统<sup>[17]</sup>。这一以 ArcInfo 为基础的决策支持系统建议使用者拥有参数选择与数据库生成方面的知识基础系统。用户界面也保持追踪 BMP 情景评价并控制模型输出。用户界面链接 ANSWERS- 2000 的组分与函数模拟系统, 在某种意义上对于用户来说是相当透明的。一系列菜单、提示、帮助和以标准为基础的函数引导用户, 但不能消除与系统有关的交互作用。当系统限制被妨碍并提供适当的校正措施时, 程序和与错误资料与报告相关的标记问题合为一体。用户界面由一个主菜单和子菜单组成。菜单允许用户对 ANSWERS- 2000 模型的输入参数提供专门设计的为某特殊地方提供的信息。由界面提供方便的模型相关任务包括下列部分: 自 GIS 覆盖的感兴趣的土地区域(流域, 农田或田地)的选择, 自动进入获得一个土壤参数文件选项以替代专门设计的为某特殊地方提供的信息的大体的参数值、开发流域网格覆盖图, 地形特征的计算, 综合天气资料的生成, 对作物与耕作参数进行赋值, ANSWERS- 2000 输入资料文件的生成, 模型的运行, 模型输出的展示, 用户指定的土地区域的可选择性措施的应用, 以及对于可选择性情景的预报输出值的比较。另外, 在界面中的帮助函数包含关于用户如何继续进行不同的菜单选择的详尽信息。在近期的开发中, 地下水组分被加入进 ANSWERS- 2000<sup>[18]</sup>。模型的这一版本在局部、田间与流域尺度得到了验证。在局部与田间, 模型正确的预报了根区际水流和不同植被覆盖下蒸发。

2 ANSWERS 模型结构<sup>[5, 14, 19]</sup>

ANSWERS 模型的结构化程度较高, 主要包括 3 大模块: 径流和入渗、泥沙以及蒸发散模块。ANSWERS 模型采用概念模型模拟水文, 用泥沙连续性方程模拟侵蚀, 用方形网格划分研究区域, 可供水质规划者或其他用户模拟土地利用方式对水文和侵蚀响应的影响, 对控制非点源污染进行规划。

其中现有模型中的径流和入渗模块以 Green- Ampt 入渗

方程代替了原模型中的 Holtan 方程进行计算; 地表径流与沟道径流利用连续方程和 Manning's uniform velocity 方程进行计算; 泥沙模块中, 产沙计算采用了 WEPP 模型中的土壤可蚀性指标以及单位水流动力理论和临界切应力原理。输沙过程计算把 Foster 和 Meyer 方法引入 Yalin 公式, 并以此建立了泥沙输移模块; 蒸发散模块主要用于设定下场降雨开始时的土壤湿度初始条件, 是连续模型得以运行的必要环节。模型运行时, 需把研究流域的空间属性数据(坡度、坡长、坡向、地表覆被物状况、土壤等)栅格化, 同时输入流域模拟时段内的气象资料, 包括降雨强度、历时、气温、地温和地表辐射等。

模型采用降雨期间和降雨后的农业用地现状作为初始值, 同时对农业区域种植制度的布局和水保措施做出评估。模型的一个基本假设是: “在流域的任一点, 径流量与影响径流量的有关水文参数(降雨强度、入渗、地形、土壤类型等)之间存在函数关系。以此作为基础来模拟其他搬运现象, 如流域内的土壤侵蚀和化学元素迁移等<sup>[4]</sup>”。以上假设的一个重要特点是该模型能模拟于流域内任一点的径流、泥沙和污染物运移。但在实际应用时, 这些点变换成一个个方格单元, 每个方格单元面积一般为 1 ~ 4 hm<sup>2</sup>, 单元内的土地利用、坡度、土壤特性、养分、作物和管理措施都是均衡的。在每一单元内, ANSWERS 模型利用 Holtan 法<sup>[7]</sup>进行模拟截留、地表吸持/截留、入渗、地表径流、通过入渗控制区域的浸透、泥沙剥离与泥沙迁移, 该模型能模拟诸如保持耕作、水塘草地排水沟、管道排水等 BMPs<sup>[8]</sup>以及其它能影响基于物理模型输入参数所能描述的措施。在应用 ANSWERS 进行模拟时, 次降雨的时间步长为 1 min。

ANSWERS 模型的一个最基本的弱点是其侵蚀模块, 该模块在很大程度上是经验性的而且仅模拟了总泥沙迁移过程。

3 ANSWERS 模型资料输入与输出<sup>[5, 14, 19]</sup>

ANSWERS 模型所使用的资料文件提供对流域地形、排水网络、土壤、土地利用和最佳管理措施(BMPs)的详尽描述。大多数信息可自 USDA- SCS(美国农业部土壤保持局)的土壤调查和土地利用与耕作调查或总结中轻易收集。而且, 该地区的航空照片、USGS(美国地质调查局)地形图、BMPs 结构与执行资料在详细描述目前的流域面积时是非常有用的。ANSWERS 模型的输入信息包括 6 种基本资料形式: (1) 模拟必要条件(度量单位与输出控制); (2) 降雨信息(降雨量与强度); (3) 土壤信息(前期含水量, 入渗, 排水响应- 特性曲线与潜在侵蚀); (4) 土地利用与地表信息(作物种类, 地表糙率与蓄水特性); (5) 沟道说明(宽与糙度); (6) 单个元素信息(位置, 地形, 排水, 土壤, 土地利用与最佳管理措施)。

通过利用一个恰好的描述性资料文件与分布式参数概念, ANSWERS 模型可以生成一个流域对突然事件产生的

侵蚀与水文响应方面详细的统计。模型的输出目录包括 5 个基本部分: (1) 输入资料的重复( 可通过移走输入资料第 2 行中的 'PRINT' 参数来限制), (2) 流域特征( 来自基础资料的计算), (3) 流域出口的水流与泥沙信息 以及有组织的 BMPs 的效果, (4) 每一单元的网格迁移泥沙量或沉积, (5) 沟道沉积。各种表格式 ANSWERS 模型输出部分可与几个标定程序用于生成流域的水文与侵蚀响应的绘图式描述。另外, 输出部分的绘图式表示法( 提供空间的重要性) 也将提出。

4 ANSWERS 模型的验证与应用

关于 ANSWERS 模型的验证, 最早于美国 Indiana 的 Black Creek 流域<sup>[1, 3]</sup>。这些研究把模型模拟结果, 包括径流量和泥沙量与实测值进行了对比。后来 M. L. Griffin<sup>[20]</sup>等人通过研究发现在地形条件不同的地块中, 用 USLE 模拟的土壤流失量与用 ANSWERS 模拟的不同。许多研究都表明, ANSWERS 模型预测及模拟径流和泥沙的结果与实测值都能够很好地吻合。

在 Watkinsville 和 Georgia 的两个流域对模型的连续性版本 ANSWERS- 2000 进行了检验, 结果表明模型在预报流域中径流、泥沙、NO<sub>3</sub>-N、溶解性 NH<sub>4</sub>-N、泥沙结合态 TKN 以及溶解性 P 的流失运行良好。模型不能在任一流域预报泥沙结合态 NH<sub>4</sub>-N 的流失。该模型也在 Virginia 的 1 153 hm<sup>2</sup> 的 Owl Run 流域进行了检验。对于大暴雨条件下模型运行良好, 以及累积预报径流量、泥沙量、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、泥沙结合态 TKN 与溶解性 P 是实测值的 40% 以内。在 ANSWERS- 2000 的实际应用中, 模型在 Virginia 的 Nomini Creek 流域的 225 hm<sup>2</sup> 子流域运行了 8 年。选择了潜在的临界源区域, 然后在流域内选择了 10%、20%、30% 与 100% 农田的 BMPs( 保持耕作) 进行了检验。结果发现应用于水质的 BMPs 效率明显增长。每公顷中养分的主要成分氮与磷分别减少了 240% 与 210%, 当 BMPs 应用于 10% 农田时比全部农田产生了最大的泥沙流失。模型也表明在流域水平具有很高泥沙与养分量并不总是对产量有很大的影响。

Thomas 等人<sup>[21]</sup>曾把修改后的 ANSWERS 模型用作森

参考文献:

[ 1 ] Beasley D B, Huggins, L F, Monke, E J. ANSWERS: A model for watershed planning[ J ]. Trans. of the ASAE, 1980, 23 (4): 938- 944.

[ 2 ] Huggins L F, E J Monke. The mathematical solution of the hydrology of small watersheds[ R ]. Technical Report No. 1, West Lafayette: Water Resources Research Center, Purdue University, 1996. 130.

[ 3 ] Beasley D B. A mathematical model for simulating the effects of land use and management water quality [ D ]. West Lafayette: Purdue University, 1977.

[ 4 ] Beasley D B, Huggins, L F, Monke, E J. Modeling sediment yield from agricultural watersheds[ J ]. J. Soil and Water Cons. 1982, 37(2): 113- 117.

[ 5 ] Beasley D B, Huggins, L F. ANSWERS Users Manual [ M ]. EPA 905982001. Washington, DC: USEPA, 1981.

[ 6 ] Dillaha T A, Mary L W, A Shirmohmmadi, et al. Florida: ASAE ANSWERS- 2000[ A ]. International ASAE Meeting in Orlando[ C ]. FL as Paper No. 1998, 2198- 2199.

林水文模拟, 并在美国的 Mississippi 和 North Carolina 的一些林地流域进行了成功的验证。不过, 在流域基流量(base flow) 较高时, 模型模拟结果误差较大。模型也被用于较大流域中 BMPs 对水文过程的影响研究, 流域面积为 2 046 hm<sup>2</sup>, 进一步划分为 1 135 个基本计算单元。模型用一场降雨进行了校验, 并利用另外的两场降雨进行了模型验证。在澳大利亚, Connlly 等<sup>[22, 23]</sup>用下渗模型取代了径流预测中的概念模型, 精确地预测了奎恩斯兰德 96 hm<sup>2</sup> 的草原集水区在不同的土壤和覆盖条件下的径流。不过, 由于土壤条件的不同, 在利用模型模拟时, 对模型作了一些必要的修改。在荷兰, 也有人用模型评价入渗参数的空间差异性对径流和侵蚀模拟值的影响<sup>[24]</sup>。而 Bouraoui<sup>[14, 16]</sup>则发现, ANSWERS 模型在模拟低强度降雨时要比模拟高强度降雨难的多。

Rewerts 等<sup>[25]</sup>将地理信息系统( GIS) 应用到 ANSWERS 模型中, 首先项目管理器从用户收集信息, 然后利用 GIS 提取数据, 产生一个输入文件, 并将 ANSWERS 模型的输出读入新的 GIS 层, 项目管理器的应用使输入数据赋值时间减少了 7~10 倍。Engel<sup>[26]</sup>发展了 GRASS 模型和 AGNPS 模型及 ANSWERS 模型的界面, 模拟了土壤侵蚀及营养元素在农业流域中的损失。

我国学者陈一兵<sup>[28, 29]</sup>对于该模型应用到中国的可能性进行了研究, 采用 ARC/ INFO 建立流域数据库, 通过数字高程模型(DEM)、土地利用图以及实地观测的土壤数据确定了 ANSWERS 所需的部分参数, 其它的参数通过直接应用 Beasley 和 Huggins 估算表格, 预测了大、中、小三场降雨的土壤侵蚀量。

牛志明等人<sup>[30]</sup>的研究结果表明, ANSWERS2000 模型在应用于我国三峡库区小流域土壤侵蚀模拟时, 其模拟结果与实测结果具有较高的吻合度, 模拟结果基本可信。但是, 对于一些陡坡林地等特殊地类, 模型的模拟误差较大, 其模拟精度还有待于进一步提高。由于 ANSWERS 主要适用于缓坡条件黄土区的侵蚀产沙模拟, 因此如何合理地确定 ANSWERS 模型参数, 使 ANSWERS 模型在我国尤其是山区的应用还有许多尚未解决的问题。

- [ 7 ] Holtan H N. A concept for infiltration estimates in watershed engineering [ Z ]. USDA - ARS Bulletin 41 - 51, Washington, DC. 1961, 25.
- [ 8 ] Bottcher A B, E J Monke, L F Huggins. Nutrient and sediment loadings from a subsurface drainage system [ J ]. Trans. ASAE, 1981, 24(5): 1221- 1226.
- [ 9 ] Yalin Y S. An expression of bed- load transportation [ J ]. J. Hydr. Div., ASAE, 1983, 89(3): 221- 250.
- [ 10 ] Dillaha T A, D B Beasley. Sediment transport from disturbed upland watersheds [ J ]. Trans. ASAE, 1983, 26( 6 ): 1766- 1772, 1777.
- [ 11 ] Rewerts C C, B A Engel. ANSWERS on GRASS: Integrating a watershed simulation with a GIS [ R ]. ASAE Paper No. 91- 2621, St. Joseph, MI, ASAE, 1991.
- [ 12 ] Storm D E, T A Dillaha<sup>2</sup>, S Mostaghimi, et al. Modeling phosphorus transport in surface runoff [ J ]. Transactions ASAE, 1988, 31(1): 117- 127.
- [ 13 ] Dillaha, T A, D B Beasley, L F Huggins. Using the ANSWERS model to estimate sediment yields on construction sites [ J ]. J. Soil and Water Conservation, 1982, 37(2): 117- 120.
- [ 14 ] Bouraoui F, T A Dillaha. ANSWERS- 2000: Runoff and sediment transport model [ J ]. J. Envir. Engin. ASCE. 1996, 122 ( 6 ): 493- 502.
- [ 15 ] Green W H, Ampt G. Studies of soil physics, part : the flow of air and water through soils [ J ]. J. Agri. Sci. 1911, 4: 1- 24.
- [ 16 ] Bouraoui F. Development of a continuous, physically based, distributed parameter, nonpoint source model [ D ]. Blacksburg: Biological Systems Engineering Dept., Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1994, 1- 35.
- [ 17 ] Wolfe M L, W D Batchelor, T A Dillaha<sup>2</sup>, et al. Modeling the effects of farm management practices on off-site water quality [ A ]. Proceedings of the International Symposium on Water Quality Modeling [ C ]. Florida Kissimmee. 1995,
- [ 18 ] Bouraoui F, G Vach<sup>2</sup>ud, R Haverkamp et al. A distributed physical approach for surface- subsurface water transport modeling in agricultural watersheds [ J ]. J. Hydrology, 1997, 203( 1997 ): 79- 92.
- [ 19 ] Montas H J, C A Madramootoo. Using the ANSWERS model to predict runoff and soil loss in southwestern Quebec [ J ]. Trans. ASAE, 1991, 34( 4 ): 1754- 1762.
- [ 20 ] Griffin M L, Beasley D B, Fletcher J J, et al. Estimating soil loss on topographically nonuniform field and farm units [ J ]. J. Soil and Water Conser., 1988, 43(2): 326- 331.
- [ 21 ] Thomas D J, D B Beasley. A physically based forest hydrology model, . evaluation under natural conditions [ J ]. Trans. ASAE, 1986, 29(4): 973- 981.
- [ 22 ] Connolly R D, Silburn D M, Ciesiolka C A A., et al. Modeling hydrology of agricultural catchments using parameters derived from rainfall simulator data [ J ]. Soil and Tillage Research, 1991, 20: 33- 44.
- [ 23 ] Connolly R D, Silburn D M. Distributed parameter hydrology model (ANSWERS) applied to a range of catchments scales using rainfall simulator data : Application to spatially uniform catchments [ J ]. J. Hydrology, 1995, 172: 105- 125.
- [ 24 ] De Roo A P J, Hazelhoff L Heuvelink G B M. Estimating the effects of spatial variability of infiltration on the output of a distributed runoff and soil erosion model using Monte Carlo methods [ J ]. Hydrological Processes, 1992, 6: 127- 143.
- [ 25 ] Srinivasan R, Engel B A. A spatial decision support system for assessing agricultural nonpoint source pollution [ J ]. Water Resource Bulletin, 1994, 30( 3 ): 441- 452.
- [ 26 ] Engel B A, et al. Non-point source pollution modeling using models integrated with geographic information systems [ J ]. Water Sci. Technol., 1993, 28: 685.
- [ 27 ] 牛志明, 解明曙, 孙阁, 等. 非点源污染模型在土壤侵蚀模拟中的应用及发展动态 [ J ]. 北京林业大学学报, 2001, 23( 2 ): 78- 84.
- [ 28 ] 陈一兵, K O Trouwborst. 土壤侵蚀建模中 ANSWERS 及地理信息系统 ARC/INFO 的应用研究 [ J ]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 1- 13.
- [ 29 ] 唐政洪, 蔡强国. 侵蚀产沙模型研究进展和 GIS 应用 [ J ]. 泥沙研究, 2002, 5: 59- 66.
- [ 30 ] 牛志明, 解明曙, 孙阁, 等. ANSWER2000 在小流域土壤侵蚀过程模拟中的应用研究 [ J ]. 水土保持学报, 2001, 15( 3 ): 56 - 60.