

# 水力侵蚀预测模型 GeoWEPP 研究进展

郝 韵, 于瑞宏, 郝瑞英, 杨 欢, 张宇瑾, 张笑欣

(内蒙古大学环境与资源学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

**摘要:**总结了水力侵蚀预测模型 GeoWEPP 的发展历程、技术框架、适用性和局限性,从 DEM 数据、土地利用/覆被变化、管理因子和土壤要素等 4 个角度详细论述了 GeoWEPP 模型的研究进展,针对模型的优势及存在的问题,结合当前水文和侵蚀模型研究形势,对 GeoWEPP 模型未来发展的趋势与走向作了展望,指出该模型在 DEM 精度阈值的确定、空间尺度的转换、人类活动集中区的应用、与生态过程的结合以及 WEPP 与 GIS 集成开发 5 个方面有较大的拓展空间。

**关键词:**水力侵蚀预测模型;GeoWEPP;水土保持;模型适用性;模拟精度;综述

**中图分类号:**S157.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2015)03-0099-07

**Research development on geo-spatial interface for water erosion prediction project** //HAO Yun, YU Ruihong, HAO Ruiying, YANG Huan, ZHANG Yujin, ZHANG Xiaoxin (College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

**Abstract:** This paper summarized geo-spatial interface for water erosion prediction project (GeoWEPP) model's development process, technical framework, applicability and limitations, and then respectively described current research development of GeoWEPP from the standpoints of dynamic effect model (DEM) data, land use/cover change, management factors and soil factors. For the advantages and disadvantages combining with the research status of water erosion prediction model, this paper proposed development directions of the model and pointed out possibilities of development about GeoWEPP in five aspects: definition of the accuracy of DEM, transform of spatial scale, application in human activities center, combination with ecological process, and integrated development of WEPP and geographic information system (GIS).

**Key words:** water erosion prediction model; geo-spatial interface for water erosion prediction project (GeoWEPP); soil and water conservation; model applicability; simulation accuracy; summary

随着人口增长、资源缺乏、能源危机、粮食不足等问题的出现,人们为了满足人类社会之需,对土地资源的破坏越来越严重,不仅破坏了生态环境的平衡,导致干旱、洪涝等自然灾害,更会直接影响社会经济的可持续发展<sup>[1-2]</sup>,因此及时有效地进行土壤侵蚀研究与评价显得尤为迫切与重要。土壤侵蚀研究初期仅对土壤侵蚀进行了表面观察和定性研究,20 世纪 20 年代逐渐有学者进行定量研究。1965 年, Wischmeier 等<sup>[3]</sup>提出了通用土壤流失方程 (universal soil loss equation, USLE), 该方程虽然具有普遍性,但属于经验模型,需要依靠大量的观测值和实验进行率定验证,外延性较差,不能模拟泥沙的侵蚀产沙和输移过程,无法展现侵蚀产沙的时空分布。20 世纪 90 年代末,针对水资源管理、水文过程和土壤侵蚀过程研究的模型研究日益增多,出现了

一系列的土壤侵蚀模型,如 CREAMS (chemicals runoff and erosion from agricultural management system)、ANSWERS (area nonpoint source watershed environment response simulation)、AGNPS (agricultural nonpoint pollution source)、EPIC (erosion productivity impact calculator)、SWAT (soil and water assessment tool) 和 WEPP (water erosion prediction project) 等模型,同时 GIS 技术在土壤侵蚀模型中得到广泛应用,可完成影像的处理、解译,实现数据的集成分析及应用等。当前分布式侵蚀产沙模型已成为土壤侵蚀预报研究的主要模型之一<sup>[4-5]</sup>,其中水力侵蚀预测模型 WEPP 模型是一个由美国农业部研发的基于物理过程且可以连续模拟的土壤侵蚀模型,它是以随机天气生成过程、入渗理论、水文学、土壤物理、作物科学、水力学和侵蚀力学等为

基金项目:国家自然科学基金(51469018);内蒙古自然科学基金(2014MS0403);内蒙古科技厅应用与研究开发计划(20130428)

作者简介:郝韵(1989—),女,内蒙古包头人,硕士研究生,主要从事流域水文模拟研究。E-mail:haoyunann@163.com

通信作者:于瑞宏(1978—),女,内蒙古包头人,副教授,博士,主要从事流域水文模拟研究。E-mail:yrh0108@163.com

基础开发的,有坡面版、流域版和网格版3个版本,目前较成熟的是坡面版和流域版<sup>[6]</sup>。相对经验模型,WEPP模型具有考虑水文和侵蚀过程空间异质性的分布式水文模型特点,相对于其他分布式水文模型还具有基于物理过程和连续模拟的优势,不仅可以反映自然界中下垫面的复杂性、降水和侵蚀产沙的时空不均匀性,还能描述侵蚀的动态变化和泥沙输移、沉降过程的时空变化,而基于地理信息系统(geographic information system, GIS)的WEPP模型——GeoWEPP模型的产生和发展为流域径流模拟、土壤侵蚀产沙和水土保持措施优化等提供了一个强大工具。本文对GeoWEPP模型的发展历程、技术框架、适用性、研究进展作一综述,并结合当前水文和侵蚀模型研究形势,对GeoWEPP模型未来发展的可能趋势进行展望,为GeoWEPP模型的有效利用提供参考。

## 1 GeoWEPP模型的发展历程

土壤侵蚀研究经历了由经验模型、基于物理机制的土壤侵蚀模型,向具有灵活可视化地理用户(GUI)界面的新一代物理模型发展的过程,模型的发展为流域水土保持措施优化提供了更为有效的评估工具。

土壤侵蚀模型在GIS的支持下,能够反映和模拟出流域的侵蚀过程和空间分布,建立适合不同地区的流域侵蚀产沙模型,提高模型对所研究区域侵蚀预报的精度,同时使模型具有更好的开放性、动态性和可移植性<sup>[7]</sup>。随着WEPP模型的应用与发展,数据处理量大及参数识别主观性强等问题逐步突显,如人工识别坡道与沟道、划分流域等预处理过程工作量大,不同建模者对流域的划分不尽相同等,因此,将具有对海量数据进行有效储存、管理和预处理功能的ArcGIS与WEPP模型紧密结合,不仅能够大幅度提高运行效率,同时也能够增强WEPP模型的适用性。Savabi等<sup>[8]</sup>运用GRASS-GIS获取WEPP模型所需的输入参数,发现GRASS-GIS技术可以用于参数化复杂的水文模型,绘制可识别的流域配置图,从而改善模型暴雨径流的预测能力。2001年,Renschler等<sup>[9]</sup>将GIS和基于物理过程的WEPP模型相结合,发布了新的GUI评估工具——基于Arcview3.X平台的GeoWEPP模型,该模型需用户通过DEM数据输入、沟道和流域划分、模型参数输入、模拟结果制图等4个基本步骤,来提取流域模拟所需的地形输入参数,而参数的质量和不确定性对模型模拟效果的影响则需要验证和校准。随后,经过多个部门和组织的联合研发,美国农业部又推出了

基于ArcGIS9.X版本的GeoWEPP模型。2006年,Baigorria等<sup>[10]</sup>又将GIS和WEPP模型整合为一个新的工具GEMSE(geospatial modelling of soil erosion)来评价Andean流域的侵蚀热点地区,但由于该模型不能给出流域总的径流和土壤侵蚀产沙量,导致无法对流域土壤侵蚀进行定量预测。2013年10月,基于ArcGIS10.X的最新版GeoWEPP模型也在其官网发布(<http://geowepp.geog.buffalo.edu/>)。

## 2 GeoWEPP模型技术框架

GeoWEPP模型主要依靠TOPAZ(topographic parameterization tool)、TOPWEPP和CLIGEN(climate generator)工具完成模块的运行。TOPAZ利用DEM数据提取地形数据,实现地形数据参数化,从而创建山坡剖面文件,DEM数据的精度、分辨率与来源对GeoWEPP的应用模拟效果具有一定影响。CLIGEN天气生成器是GeoWEPP处理气象数据的附带软件,可以生成模型所需的气象文件。TOPWEPP是能够从土壤图、土地利用图和管理因子中提取WEPP所需信息的一个重要工具,包括土壤性质、土地利用类型、植被等信息。这些信息与水文数据相结合,共同构建了研究区侵蚀模型的数据库,并在TOPWEPP中运行,可获得径流、产沙、甚至输移量等数据图。GeoWEPP模型技术框图如图1所示。

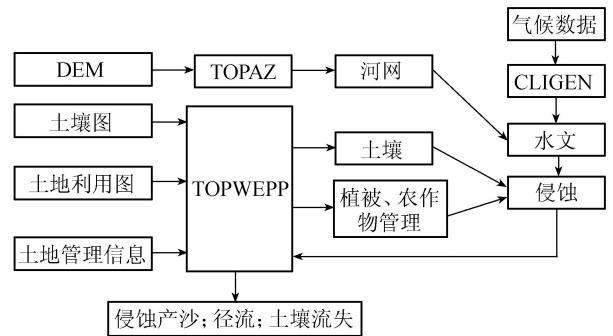


图1 GeoWEPP模型技术框架

## 3 GeoWEPP模型的适用性研究

### 3.1 GeoWEPP模型适用范围

GeoWEPP模型下渗、径流及产沙过程基本理论均采用针对细沟及沟间侵蚀的公式,因此模型主要适用于小尺度空间范围,如模拟梯形沟渠、暂时性冲沟等渠道及拦蓄设施上的径流、侵蚀和产沙过程。

已有很多学者对GeoWEPP模型在不同自然条件下的适用性进行了有益探索。张晓明等<sup>[11]</sup>针对黄土高原地区的两个小流域——桥子东沟和桥子西沟,开展了GeoWEPP模型的适用性研究,结果表明GeoWEPP模型对黄土高原流域径流和输沙模拟值

与实测值绝对误差小于 30%，相关系数大于 0.98，且纳什效率系数(Nash-sutcliffe)大于 0.8，模拟值可以较好地反映实测值，模型适用性较好；Meghdadi<sup>[12]</sup>也利用 GeoWEPP 模型对森林部分覆盖的 Kasilian 小流域的径流和侵蚀产沙进行了模拟，并与实测数据进行比较，再用相关系数( $R^2$ )、标准误差(RMSE)和纳什效率系数等参数来评估模拟精度，结果表明模拟值与实测值有较好的一致性，GeoWEPP 模型可以很好地反映该流域的侵蚀现状。

GeoWEPP 模型在受一定程度人类活动干扰地区的适用性也得到了研究。莫放等<sup>[13]</sup>将 WEPP 模型与 GIS 有机结合开展高原小流域侵蚀模拟，同时对应用不同管理设施来降低侵蚀量和径流量的效果作出定量评价，得出向阳沟小流域的径流量从大到小依次为裸地、荒坡、坡耕地、人工草地、林地，侵蚀量从大到小依次为裸地、坡耕地、人工草地、荒坡和林地。Gaffer 等<sup>[14]</sup>应用 GeoWEPP 模型模拟和评价了美国印第安纳州军队训练基地的公路和铁路的土壤侵蚀，表明该模型对军队训练地周边的未修缮公路和铁路的土壤侵蚀评价较为可靠，因此可将模型拓展至类似条件下公路和铁路的土壤侵蚀评价中。

综上所述，GeoWEPP 模型在不同自然环境和适度人类活动干扰下的小流域地区适用性较好，对径流和侵蚀产沙的模拟预测也较为可靠，具有一定的普适性。

### 3.2 GeoWEPP 模型的局限性

GeoWEPP 模型适用范围局限于坡面和小流域，由于不同尺度侵蚀产沙过程机理不同，影响侵蚀产沙过程的因素在时空上具有很大的不均匀性和变异性，这就增加了不同尺度侵蚀产沙模拟的复杂性，模型应用于大流域尺度上需解决跨尺度研究和尺度转化等问题。倪九派等<sup>[15]</sup>基于水系改进的高分辨率 DEM 和 GeoWEPP 模型，采用坡面、子流域和流域 3 种空间尺度对五桥河流域产沙量进行了估算。从坡面尺度到子流域尺度和流域尺度，114.6 km<sup>2</sup> 的研究区年产沙总量从 37.9 万 t 减少至 12.5 万 t 和 8.4 万 t，单位面积年产沙量从 33 109 t/hm<sup>2</sup> 减少至 10 194 t/hm<sup>2</sup> 和 7 129 t/hm<sup>2</sup>，年均泥沙输移比从 1.00 减小至 0.33 和 0.22。这可能是由于流域划分尺度越大，对坡道和沟渠的描绘越粗糙，表明从不同的空间尺度考察，流域的水土流失特征存在较大差异，从小尺度到大尺度的转化不能依靠简单叠加。

GeoWEPP 模型对人类活动集中地区的径流和侵蚀产沙的模拟能力十分有限。徐贵新等<sup>[16]</sup>在将 GeoWEPP 模型应用于济源市土壤侵蚀时空分布特征研究时发现，受较强人类活动影响，济源市城区的

水文响应能力较弱，进而影响了土壤侵蚀和径流模拟的精度；Maalim 等<sup>[17]</sup>在研究土地利用类型变化对 GeoWEPP 模型的精度影响时，同样发现模型在城镇化区域的模拟效果有限。原因可能在于城镇化地区的下垫面条件变化较大，地表硬化等人类改造活动改变了自然条件下的水文循环过程和地表土壤性质，仍用原始参数值或算法不符合实际情况，导致 GeoWEPP 模型在城区的模拟效果不佳。因此增强 GeoWEPP 模型在城镇化区域的适用性还需更多研究。

GeoWEPP 模型在自然条件下的干旱和半干旱地区土壤侵蚀模拟效果较差。Raclot 等<sup>[18]</sup>评估了 GeoWEPP 模型在地中海流域的径流和侵蚀产沙模拟预测能力，该地区属于半干旱地区，年平均降雨量为 600 mm，蒸发量为 1 500 mm，模型对径流的预测效果很好，而受季节性干旱导致的岩石破碎影响，对侵蚀产沙的预测结果偏高。Mahmoodabadi 等<sup>[19]</sup>利用 GeoWEPP 模型对属于干旱半干旱地区的伊朗科尔曼流域进行了土壤侵蚀研究，尝试利用研究区的含沙量、有机物含量以及体积含水率来校正沟间基准可蚀性系数和沟间可蚀性系数，从而达到改善 WEPP 模型在干旱半干旱区的侵蚀模拟效果，然而模型在该区域的适用性有限，校正后的模型总是对低产沙量估计过高，高产沙量估计过低，即便提出一个基于过程的方程来改进模型，模拟的效果仍然不佳，这很可能是因为在预测子模块中选用了土壤经验参数。因此，找到合理且恰当的科学方法才能真正有助于模型在干旱半干旱区适用性的提高。

### 3.3 GeoWEPP 模型的改进

尽管 GeoWEPP 模型适用范围有限，但对于适用性较差地区亦可采用调整和校准参数、灵敏度分析等方法，在一定程度上改善其适用性。Moore 等<sup>[20]</sup>通过校正 GeoWEPP 模型管理设施参数和土壤参数使其适用于工地的侵蚀预测，将模型中表层土壤特性参数替换为亚表层土壤特性参数，就可以成功预测工地侵蚀，当工地施工完成后将临界剪切力参数值增加到 10 Pa，则径流和产沙量的预测与实际相符。Pandey 等<sup>[21]</sup>也将经过调整参数后的 WEPP 模型应用于印度的一个农业小流域的侵蚀产沙建模之中，并利用 GIS、实地监测、实验室试验和遥感等手段代替模型经验公式获取校准模型的参数，大大提高了模型预测的准确性。Singh 等<sup>[22]</sup>在将 GeoWEPP 模型应用于印度喜马拉雅山东部经过治理的山地小流域时，发现将周边未经治理的土壤参数用于土壤侵蚀预测效果欠佳，经过对土壤参数的重新校准和灵敏度分析后，模型可基本满足土壤侵

蚀预测需要,且模型对土壤的沟间侵蚀、细沟侵蚀、渗透系数、临界剪应力和曼宁系数等参数十分敏感。

GeoWEPP 模型还可以通过改进算法等技术手段来扩大其适用范围。Covert 等<sup>[23]</sup>将 GeoWEPP 模型和改进版 WEPPv98.4 应用于森林土壤的径流预测,结果表明 WEPP v98.4 用于年径流预测比 GeoWEPP 模型更为准确,而在季径流预测中 WEPP v98.4 对高径流量季度的预测最为准确,对径流量较小的季度预测值过大。Zhang 等<sup>[24]</sup>利用 GeoWEPP 模型对森林流域的径流和产沙进行模拟,通过改进沟道侵蚀算法不仅改善了 WEPP 模型的积雪水文过程,还将地下水基流定量化的能力融入模型,使得模型更适用于陡坡森林流域产流模拟。

## 4 GeoWEPP 模型研究进展

DEM 数据、土地利用、土壤分布及土地管理措施是 GeoWEPP 模型的重要影响因素,多年来国内外学者就以上各因素对 GeoWEPP 模型模拟效果的影响进行了广泛的研究,研究重点集中于 DEM 数据精度对流域水力侵蚀过程模拟的影响、土地利用对水土流失状况评价的影响、不同管理措施对土壤侵蚀量估测的影响以及土壤条件变化对侵蚀预测的影响等方面。

### 4.1 DEM 数据精度对流域水力侵蚀过程模拟的影响

随着 GIS 的应用与计算机能力的提高,利用 DEM 数字化流域和提取流域地貌特征的技术已得到了广泛研究<sup>[25]</sup>,DEM 数据也成为 GeoWEPP 模型 TOPAZ 模块提取地形参数的主要数据来源,其精度对径流和土壤流失预测的效果起到举足轻重的作用,相关研究也应运而生。Cochrane 等<sup>[26]</sup>研究发现选用不同的坡剖面方法,WEPP 模型受 DEM 精度影响不同;如果模型用一个典型坡剖面的特征代表流域山坡特征来作为 WEPP 模型的输入参数,那么模型受 DEM 精度影响不大,如果分别输入各个坡剖面的特征来作为 WEPP 模型的参数,那么模型受 DEM 精度影响明显。Zhang 等<sup>[24]</sup>分别采用 30 m、10 m、4 m 的 LIDAR (light detection and ranging) DEM 数据,30 m、10 m 的 NED (usgs national elevation dataset) DEM 数据和 30 m 的 STRM (shuttle radar topography mission) DEM 数据,对森林小流域的径流和侵蚀产沙进行模拟,结果表明 3 种类型的 30 m DEM 数据由于分辨率低,导致模型模拟出过高侵蚀产沙量;对于 LIDAR DEM 数据,利用 10 m DEM 数据模拟出的水文侵蚀过程最接近于野外试验,而 4 m DEM 数据的模拟效果并没有明显优于 10 m 的模拟效果,还因

为分辨率过高导致计算烦琐和耗时;对于 10 m 的 NED DEM 数据,其模拟结果与实测数据不相符。因此,选择适宜的 DEM 数据源和分辨率更有利于 WEPP 模型对土壤侵蚀的模拟。

### 4.2 土地利用/覆被变化对水土流失状况评价的影响

土地利用/覆被变化 (land use/cover change, LUCC) 对不同时间和空间尺度的水文循环都会产生一定的影响。土地覆被变化能够引起近地表的蒸散发、截留、填洼、下渗等因素的改变而导致产汇流的变化,从而也将引起产输沙、水质、洪水过程等发生改变。WEPP 模型的参数和输出结果容易与 GIS 结合,可以灵活模拟土地利用变化情景和不同土地利用变化情景下的水文响应,因此,GeoWEPP 模型成为研究 LUCC 水文响应和产输沙变化的重要工具。Yüksel 等<sup>[27]</sup>将 GeoWEPP 模型应用于土耳其卡赫拉曼马拉什 Orcan Creek 流域,该流域总面积为 490 hm<sup>2</sup>,按照林地、牧场和农用地等土地利用类型进行划分,结果显示 GeoWEPP 模型对该流域产沙量预测值略微偏高,径流预测值略微偏低,但两者都大于 90% 的置信水平,模型适于在高泥沙输移的流域为管理者提供参考,可为水土流失的预防与管理提供科学依据。Yu 等<sup>[28]</sup>对 GeoWEPP 模型在桥子东沟、桥子西沟等流域的径流和侵蚀产沙模拟过程进行了校准和验证,结果显示 GeoWEPP 模型可以满足该流域径流和侵蚀产沙模拟,同时在森林生长的不同时期,土壤侵蚀状况不断发生变化,当森林处于幼年时期,土壤侵蚀仍然严重,森林树木长成时,土壤侵蚀最小,随着森林慢慢衰老,土壤侵蚀又逐渐增大,这不仅模拟了 LUCC 生态环境变化的水文响应,同时也反映了土壤水文、土壤性质等与植被生长之间的作用与反馈。

Defersha 等<sup>[29-30]</sup>利用 GeoWEPP 模型在肯尼亚马拉河流域的田间小区开展试验,研究土地利用变化对该流域的径流和侵蚀产沙的影响,在流域尺度上的结果表明,土地利用、坡度及土壤类型的变化会导致侵蚀产沙的较大改变,而侵蚀敏感区的识别可为水土保持措施确定明确目标,有效预防水土流失的发展。Maalim 等<sup>[17]</sup>使用 GeoWEPP 模型研究了明尼苏达河流域土地利用变化对径流和产沙量的影响,结果表明土地利用变化改变了区域的历史水文过程和土壤输移机制,径流量、产沙量和土壤流失都随土地利用或土地覆盖改变而发生重大变化,由于该流域沉积物负荷包含了 GeoWEPP 模型不能反映的山地、峡谷和河床沉积物等,导致了模型在该地区的应用受到限制。

综上所述,GeoWEPP 模型不仅可以用于多种土地利用类型的水土流失评价,还能模拟土地覆被变化对流域径流产沙的影响,是土壤侵蚀预测的一个重要工具。

#### 4.3 不同管理措施对土壤侵蚀量估测的影响

WEPP 模型中的管理设施因子和农田模式可以表示水土保持措施,结合 DEM、GIS 和 RS 技术可以有效获取土壤、地形及土地利用数据,对土壤侵蚀的产沙过程进行时空模拟<sup>[31]</sup>。Pandey 等<sup>[32]</sup>利用 GIS 将研究区划分为 7 个子流域并提取了地形参数,基于 RS 进行土地利用类型的划分,其后在划分好的流域上种植利于水土保持的作物,并装配不同的治理设施,结果表明 GeoWEPP 模型可以在实施植被保持和耕地等管理措施下很好地模拟土壤侵蚀量,评估易受侵蚀的子流域,提出适宜的保持水土方法。在考虑用植被措施保持水土的同时,人为建造的结构化水土保持设施,如拦蓄设施等,也是预防土壤侵蚀和治理水土流失的一种重要手段。Singh 等<sup>[22]</sup>发现在高坡和强降雨条件下,喜马拉雅区域依靠增加植被覆盖措施不足以控制水土流失,GeoWEPP 模型经过验证后可以很好地模拟高位栽培床耕作区域的径流量和产沙量。

#### 4.4 土壤条件变化对侵蚀预测的影响

不同的土壤类型具有不同的土壤特征,表现为土壤质地、各组分含量、阳离子交换量(CEC)、含水量、土壤反射率、土壤临界剪切力、有效水传导率等方面的差异,这些参数是 GeoWEPP 模型预测土壤侵蚀状况的重要影响因子,决定着径流和产沙模拟的效果。严冬春等<sup>[33]</sup>在川中紫色土地区研究中,选择 5 个径流小区开展土壤侵蚀量模拟及其空间分布研究,结果发现 WEPP 模型对年降雨造成的土壤侵蚀预测误差较稳定,在 15% 内,表明模型对长时间尺度的土壤侵蚀预测更准确;刘远利等<sup>[34]</sup>采用敏感性分析方法探讨了东北黑土地地区土壤和气候参数对模型模拟结果的影响,表明土壤的初始饱和度、细沟间土壤可蚀性、细沟土壤可蚀性、临界剪切力和有效水力传导系数对次降雨造成的土壤侵蚀量的模拟结果有重要影响;叶俊道等<sup>[35]</sup>对内蒙古砒砂岩地区进行了研究,该研究区表层土壤主要为沙土和黄土,土层厚度较薄,有机质含量低,土壤持水性差,极易造成水土流失,通过趋势性分析和纳什模型效率分析可知模型在砒砂岩区土壤侵蚀模拟总体效果较好。

综上所述,完善不同土壤类型的土壤特征参数数据库,加强模型在不同土壤环境下的验证和率定,有利于增强 GeoWEPP 模型的适用性。

## 5 GeoWEPP 模型的研究展望

GeoWEPP 模型是 GIS 与 WEPP 模型的有机结合,其不仅提高了模型的模拟效率,同时为水资源管理、水土保持决策提供了一个强大的工具。然而,模型在应用研究中也呈现出数据精度选择、尺度空间转换、区域适用性等方面的不足,因此,GeoWEPP 模型的改进方向和发展趋势将主要在以下几方面:

### 5.1 DEM 数据来源与精度选择

合理选择 DEM 数据的来源与精度是 GeoWEPP 模型模拟效果的重要保障。GeoWEPP 模型中的 TOPAZ 工具利用不同来源与精度的 DEM 数据,获取模型所需的河网、流域、流向等地形参数,来生成山坡剖面。DEM 数据来源和精度的差异对侵蚀产沙的影响较大,不同的 DEM 数据提取出不同的山坡、沟道和地形特征,会共同影响 WEPP 模型在出口处、沟道和山坡间侵蚀产沙量的模拟。低精度的 DEM 数据无法精确描绘流域的山坡和沟道,模拟的侵蚀产沙量偏高,而高精度的 DEM 数据则对十分平缓的坡脚描绘过度,模拟的侵蚀产沙量会偏低。因此,选取适宜精度的 DEM 数据能有效提高 GeoWEPP 模型在产沙输沙方面的模拟效果,DEM 精度阈值的确定则成为 GEOWEPP 模型数据准备中有待研究的课题之一。

### 5.2 GeoWEPP 模型空间尺度的转换

GeoWEPP 模型对于空间尺度有较大限制,虽然有学者提出利用 GIS 的外插法扩大其应用的空间尺度,但由于区域下垫面条件、侵蚀方式、土地类型以及气候条件都大不相同,若只是简单通过外插法来扩大其空间尺度,模拟效果难以保障。因此,分析不同尺度间水文特征与侵蚀特征差异,以及地理地貌因素对模型的影响,探索尺度转换的方法,才可能改善 GeoWEPP 模型在特定区域径流和产沙的模拟效果,增强模型的空间适用性,从而实现模型从小尺度向大尺度应用的转换。

### 5.3 侵蚀过程与生态过程的结合

流域尺度生态水文过程主要是研究植被对水文过程的影响和相互作用,植被的生长过程、植被的空间分布以及植被的不同类型都会对水文过程的产汇流、产输沙、截留、蒸散发以及气候响应等方面有重要影响。考虑生态过程对径流和产输沙的作用,能更准确地理解实际环境中径流和土壤侵蚀过程,因此,探索生态过程与 GeoWEPP 模型的有机结合,有助于 GeoWEPP 模型提高对土壤侵蚀预测的模拟,也是该模型的一个重要研究方向。

## 5.4 人类活动集中区的应用

改善灌溉、城区等受人类活动影响集中地区的径流和产沙的模拟是 GeoWEPP 模型的一个重要发展方向。随着人类活动对自然环境干扰的加剧,自然条件下的水文特性和土壤输移机制发生改变,流域水文和侵蚀过程也越来越复杂,特别是在人类活动集中的城区,使 GeoWEPP 模型在模拟径流、产沙和输移过程中效果不佳。通过深入研究受人类活动干扰集中地区的水文特征和侵蚀机理,采用调整参数、模型验证、探索新方法等手段,有助于完善 GeoWEPP 模型在人类活动密集地区的土壤侵蚀过程模拟。

## 5.5 WEPP 模型与 GIS 的集成开发

尽管新版 GeoWEPP 模型建立了与 PRISM 的联系来修正模拟地区的气候数据,但在全球气候变化条件下的干旱半干旱区、资料缺乏地区等的模拟过程中存在较大的不确定性。因此,强化 GIS 与 WEPP 水文模型的耦合程度,在集成开发环境下采用 COMGIS 开发 GIS 功能和水文模块,实现 GIS 与 WEPP 的完全集成,同时加强与能够为 GeoWEPP 模型提供土地利用/覆被变化、雪盖、管理因子等信息的 RS 技术的联系,将会大幅度提升 GeoWEPP 模型的适用性、高效性和模拟结果的准确性。

### 参考文献:

[1] 赵其国,史学正,张甘霖,等. 土壤资源概论 [M]. 北京:科学出版社,2007.

[2] 彭珂珊. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 水利水电科技进展,2000,20(4):15-18 (PENG Keshan. Analysis of factors affecting soil erosion in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000,20(4):15-18. (in Chinese))

[3] WHISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains (Agricultural Handbook No. 282.) [M]. Washington D. C.:USDA Agricultural Research Service, 1965.

[4] 姚文艺,肖培青. 黄土高原土壤侵蚀规律研究方向与途径[J]. 水利水电科技进展,2012,32(2):73-78. (YAO Wenyi,XIAO Peiqing. Research direction of the study of soil erosion in the loess plateau [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(2):73-78. (in Chinese))

[5] 王冬梅,赵钢,钱惠康,等. 利用 3S 技术实现小流域水土保持的动态监测[J]. 水利水电科技进展,2004,24(1):62-63. (WANG Dongmei, ZHAO Gang, QIAN Huikang, et al. Using 3S technology to realize the dynamic monitoring of soil and water conservation of small watershed [J]. Advances in Science and Technology of

Water Resources,2004,24(1):62-63. (in Chinese))

[6] 史婉丽,杨勤科,张光辉. WEPP 模型的最新研究进展 [J]. 干旱地区农业研究,2006,24(6):173-177. (SHI Wanli,YANG Qinke,ZHANG Guanghui. Current progress in water erosion prediction project [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2006,24(6):173-177. (in Chinese))

[7] 唐政洪,蔡国强. 侵蚀产沙模型研究进展和 GIS 应用 [J]. 泥沙研究,2002(5):59-66. (TANG Zhenghong, CAI Guoqiang. Study progress of the GIS-based soil erosion and sediment yield models [J]. Journal of Sediment Research,2002(5):59-66. (in Chinese))

[8] SAVABI M R, SAVAB D C, FLANAGAN D C, et al. Application of WEPP and GIS-GRASS to a small watershed in Indiana [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1995,50(5):477-483.

[9] RENSCHLER C S. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach [J]. Hydrological Processes,2003,17(5):1005-1017.

[10] BAIGORRIA G A, ROMERO C C. Assessment of erosion hotspots in a watershed: Integrating the WEPP model and GIS in a case study in the Peruvian Andes [J]. Environmental Modelling & Software,2006,22(2007):1175-1183.

[11] 张晓明,曹文洪,余新晓,等. GeoWEPP 在黄土高原地区应用的适用性评价 [J]. 泥沙研究,2011(6):50-54. (ZHANG Xiaoming, CAO Wenhong, YU Xinxiao, et al. Evaluation of applicability of GeoWEPP model on Loess Plateau in China [J]. Journal of Sediment Research,2011(6):50-54. (in Chinese))

[12] MEGHDADI A R. Identification of effective best management practices in sediment yield diminution using GeoWEPP: the Kasilian watershed case study [J]. Environ Monit Assess,2013,185(12):9803-9817.

[13] 莫放,贾忠华,罗纨,等. 基于水蚀模型 WEPP 和 GIS 的高原小流域侵蚀模拟 [J]. 水资源与工程学报,2005,16(4):41-45. (MO Fang, JIA Zhonghua, LUO Wan, et al. Simulation of water erosion by jointly application of WEPP and GIS [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2005,16(4):41-45. (in Chinese))

[14] GAFFER R L, FLANAGAN D C, DENIGHT M L, et al. Geographical information system erosion assessment at a military training site [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2008,63(1):1-10.

[15] 倪九派,高明,魏朝富,等. 基于水系改进的高分辨率 DEM 和 GEOWEPP 的流域产沙量估算及其空间尺度效应研究 [J]. 土壤学报,2010,47(1):1-6. (NI Jiupai, GAO Ming, WEI Chaofu, et al. Watershed sediment yield and effect of spatial scale based on high resolution digital elevation model and GeoWEPP [J]. Acta Pedologica

- Simica,2010,47(1):1-6. (in Chinese))
- [16] 徐贵新,曾贵,张泽中. 基于 GeoWEPP 的济源市土壤侵蚀研究[J]. 人民黄河,2012,34(12):100-105. (XU Guixin, ZENG Gui, ZHANG Zezhong. Jiyuan city soil erosion assessment based on GeoWEPP model[J]. Yellow River,2012,34(12):100-105. (in Chinese))
- [17] MAALIM F K, MELESSE A M, BELMONT P, et al. Modeling the impact of land use changes on runoff and sediment yield in the Le Sueur watershed, Minnesota using GeoWEPP[J]. Catena,2013,107:35-45.
- [18] RACLOT D, ALBEGEL J. Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2006,31:1038-1047.
- [19] MAHMOODABADI M, CERDAERDÀ A. WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments[J]. Geoderma,2013,204-205:75-83.
- [20] MOORE A D, MCLAUGHLIN R A, MITASOVA H, et al. Calibrating WEPP model parameters for erosion prediction on construction Sites[J]. Transactions of the ASABE,2007,50(2):507-516.
- [21] PANDEY A, CHOWDARY V M, MAL B C, et al. Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model[J]. Journal of Hydrology,2008,348(3/4):305-319.
- [22] SINGH R K, PANDA R K, SATAPATHY K K, et al. Runoff and sediment yield modelling for a treated hilly watershed in eastern Himalaya using the water erosion prediction project model[J]. Water Resour Manage,2012,26:643-665.
- [23] COVERT S A, ROBICHAUD P R, ELLIOT W J, et al. Evaluation of runoff prediction from WEPP-based erosion models for harvested and burned forest watersheds[J]. Transactions of the ASAE,2005,48(3):1091-1010.
- [24] ZHANG J X, WU J Q, CHANG K, et al. Effects of DEM source and resolution on WEPP hydrologic and erosion simulation: a case study of two forest watersheds in northern Idaho[J]. Transactions of the ASABE,2009,52(2):447-457.
- [25] 姚成,李致家,章玉霞. DEM 分辨率对分布式水文模拟的影响[J]. 水利水电科技进展. 2013,33(5):11-14. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Yuxia. Effects of DEM resolution on distributed hydrologic simulation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013,33(5):11-14. (in Chinese))
- [26] COCHRANE T A, FLANAGAN D C. Representative hillslope methods for applying the WEPP model with DEMs and GIS[J]. Transactions of the ASAE,2003,46(4):1041-1049.
- [27] YÜKSEL A, AKAY A E, GUDOGAN R, et al. Application of GeoWEPP for determining sediment yield and runoff in the Orcan Creek watershed in Kahramanmaraş, Turkey [J]. Sensors,2008(8):1222-1236.
- [28] YU Xinxiao, ZHANG Xiaoming, NIU Lili. Simulated multi-scale watershed runoff and sediment production based on GeoWEPP model [J]. International Journal of Sediment Research,2009,24(4):465-478.
- [29] DEFERSHA M B, MELESSE A M. Field-scale investigation of the effect of land use on sediment yield and runoff using runoff plot data and models in the Mara River basin, Kenya[J]. Catena,2012,89(1):54-64.
- [30] DEFERSHA M B, MELESSE A M, MCCLAIN M E. Watershed scale application of WEPP and EROSION 3D models for assessment of potential sediment source areas and runoff flux in the Mara River Basin, Kenya [J]. Catena,2012,95:63-72.
- [31] 王京民,马浩,王蕊. 水蚀预报模型 WEPP 在水土保持评估中的应用[J]. 西北林学院学报,2012,27(6):52-59. (WANG Jingming, MA Hao, WANG Rui. A literature review on the application of water erosion prediction project in the evaluation of soil and water conservation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6):52-59. (in Chinese))
- [32] PANDEY A, CHOWDAY V M, MAL B C, et al. Application of the WEPP model for prioritization and evaluation of best management practices in an Indian watershed [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(21):2997-3005.
- [33] 严冬春,文安邦,张忠启,等. 坡面版 WEPP 模型在川中丘陵区的应用研究[J]. 水土保持学报,2007,21(5):42-63. (YAN Dongchun, WAN Anbang, ZHANG Zhongqi, et al. Using study of sloping WEPP model in Sichuan hilly basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(5):42-63. (in Chinese))
- [34] 刘远利. WEPP 模型(坡面版)在东北黑土区的适用性评价 [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [35] 叶俊道,秦富仓,岳永杰,等. WEPP 模型在砭砂岩地区土壤侵蚀模拟的适用性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012,26(7):132-135. (YE Jundao, QIN Fucang, YUE Yongjie, et al. The applicability of WEPP in simulating the soil erosion in soft rock region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7):132-135. (in Chinese))

(收稿日期:2014-02-20 编辑:熊水斌)