

# WaTEM/SEDEM模型及其应用研究进展与展望

盛美玲,方海燕

(中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101)

**摘 要:**土壤侵蚀产沙模型是开展水土保持研究的重要工具。土壤侵蚀物理模型除能够模拟和预测土壤侵蚀沉积的空间分布外,其可移植性功能较强,因此得到了很多研究者的青睐,但大多数物理模型运行时需要的参数较多,因而限制了模型应用和推广。本文介绍了比利时鲁汶大学研发的分布式土壤侵蚀模型 WaTEM/SEDEM(Water and Tillage Erosion Model and Sediment Delivery Model)模型,分别从 WaTEM/SEDEM 模型的产生、结构、国内外应用进行了系统阐述,并在已有的应用研究基础上,总结了该模型的优缺点,展望其应用前景。

**关 键 词:**土壤侵蚀模型;WaTEM/SEDEM;应用前景

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.01.010

中图分类号:S157

文献标识码:A

## 1 引言

土壤侵蚀是危及人类生存与发展的主要环境问题之一(王红兵等, 2011),侵蚀产生的泥沙淤积在河流、水库和池塘中,严重影响水库容量和航运安全,甚至危及两岸人民生命财产;同时,来自农业用地的侵蚀泥沙往往含有某些营养元素或农药残留,严重影响水质。

土壤侵蚀预报是监测水土流失和评估水保措施效益的有效手段,侵蚀模型则是进行水土流失监测和开展预报的重要工具(蔡强国等, 2003),是制订土地利用和土壤侵蚀防治规划,以及进行相关工程设计的基础。世界各国在土壤侵蚀模型研发方面都投入了大量的人力物力,并取得了丰硕的研究成果。

土壤侵蚀模型一般分为经验模型和物理模型,目前应用较为广泛的模型有 USLE、RUSLE、WEPP、SWAT、LISEM 等。由于土壤侵蚀产沙过程的复杂性,这些模型都存在一定的局限性:经验模型在不同地区间的应用难度大,且不能模拟流域内侵蚀变异特征;物理模型对于数据要求比较严格,对资料稀缺的地区不是很适用。

比利时鲁汶大学区域自然地理研究小组(Physical and Regional Geography Research Group)提出的 WaTEM/SEDEM 模型结构简单,校正参数少,同时又能反映土壤侵蚀产沙过程及其分布特征,在一定程度上解决了以上问题,具有很好的应用前景。基于此,本文首先对 WaTEM/SEDEM 模型的由来、结构和数据输入输出情况进行了重点介绍;然后结合该模型在国内外的应用现状,总结其优缺点,并对其应用前景进行展望。

## 2 WaTEM/SEDEM模型的由来

空间分布式土壤侵蚀模型—WaTEM/SEDEM 模型是在 USLE、RUSLE、WaTEM 和 SEDEM 模型基础上发展建立起来的。

### 2.1 (R)USLE模型的建立

1965 年, Wischmeier 等(1965)对美国 30 个州近 30 年的观测资料进行了系统分析,根据近万个径流小区的试验资料,提出著名的经验模型—通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE),它考虑了降雨、土壤可蚀性、作物管理、坡长、坡度和水土保持措施 6 大因子,公式为:

收稿日期:2013-10; 修订日期:2013-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(41271305, 41101261);中国科学院黑土区农业生态重点实验室基金项目(2011ZKHT-15)。

作者简介:盛美玲(1990-),女,山东曲阜人,硕士生,主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持,E-mail: shengml.12s@igsnr.ac.cn。

通讯作者:方海燕(1977-),男,山东金乡人,副研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: fanghy@igsnr.ac.cn。

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

式中: $A$ 为土壤侵蚀强度( $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ); $R$ 为降雨侵蚀力因子( $\text{MJ mm m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ ); $K$ 为土壤可蚀性因子( $\text{kg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ); $L$ 为坡长因子; $S$ 为坡度因子; $C$ 为覆盖管理因子; $P$ 为水土保持措施因子。

USLE 可用来计算年均土壤流失量,且模型结构简洁,参数物理意义明确,涉及区域广泛,实用性较强,能够指导制定正确的耕作和经营管理措施。然而USLE 仅适用于年水平的土壤侵蚀预测,无法预报每次降雨的土壤侵蚀;且USLE 不太适用于垄作、等高耕作以及使泥沙就地沉积的带状耕作措施等(Renard et al, 1994)。此外,该模型也无法模拟和预测沉积特征(李凤等, 1997)。

为此,美国农业局和土壤保持局联合其他单位,以水力侵蚀理论为基础,提出了修正通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)。RUSLE 模型与USLE 结构基本相同,但对各因子的含义和算法进行了必要修正,引入了土壤侵蚀过程的概念。RUSLE 可以使用的数据来源更广,资料的需求量随之大幅提高;同时,增强了模型的灵活性,增加了对次降雨土壤侵蚀的预报功能,因而适用范围更广(Toy et al, 1995)。但RUSLE 模型仍存在不足之处,如计算侵蚀量时忽略了泥沙的沉积和空间的变异性(Verstraeten et al, 2006)等。

## 2.2 WaTEM/SEDEM 模型

为解决以上问题,比利时鲁汶大学在(R)USLE 模型的基础上,将 WaTEM 和 SEDEM 模型整合在一起,构建了 WaTEM/SEDEM 模型。

WaTEM(Water and Tillage Erosion Model)是一个空间分布模型(Van Oost et al, 2000a),可以模拟水蚀和耕作侵蚀及其对景观结构的响应。该模型侧重于土壤重新分配的二维空间预测,模拟过程简单(Van Oost et al, 2000b)。

SEDEM(Sediment DELivery Model)模型也是空间分布模型,可用于泥沙运移至河道的相关计算(Van Rompaey et al, 2001)。该模型由以下两部分组成:①使用RUSLE方法计算流域内年均土壤侵蚀;②考虑空间单元泥沙的运移能力,模拟被侵蚀的泥沙到达河网的路径。

WaTEM 和 SEDEM 模型均建立在 RUSLE 模型

的基础之上,且两者有相似的模型结构;两者集成为 WaTEM/SEDEM 模型,同时考虑了土地利用格局对土壤流失的拦截作用和泥沙的运移过程,可用于模拟年均土壤侵蚀率和沉积强度(De Vente et al, 2008)。

### 2.2.1 模型结构与算法

WaTEM/SEDEM 模型基本结构包括3个部分,即栅格单元的年均土壤侵蚀模块、栅格单元的年均输沙能力模块和模型泥沙流动算法模块。

#### (1) 土壤侵蚀模块

年均土壤侵蚀率的评价以 RUSLE 模型(Renard et al, 1994)为依据,其公式为:

$$A=R \cdot K \cdot L S_{2D} \cdot C \cdot P \quad (2)$$

式中: $A$ 、 $R$ 、 $K$ 、 $C$ 、 $P$  含义同前; $LS_{2D}$  是二维地形因子。该模型在计算坡长时将RUSLE 修正到二维景观上,用单位贡献面积代替坡长(Desmet et al, 1996), $L$  计算公式为:

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij} + d^2)^{m+1} - A_{ij}^{m+1}}{d^{m+2} x_{ij}^m (22.13)^m} \quad (3)$$

$$x_{ij} = \sin \alpha_{ij} + \cos \alpha_{ij} \quad (4)$$

式中: $L_{ij}$  是坐标为 $(i, j)$  的栅格单元坡长因子; $A_{ij}$  是该栅格单元的输入贡献面积( $\text{m}^2$ ); $d$  是栅格边长( $\text{m}$ ); $\alpha_{ij}$  是栅格单元的坡向; $m$  是坡长指数。

经过二维修正, WaTEM/SEDEM 不仅可以解释细沟间侵蚀和细沟侵蚀,在一定程度上也可以解释沟道侵蚀(Desmet et al, 1997)。

#### (2) 预测年平均输沙能力( $TC$ )

输沙能力是指能够通过某一单元格的最大泥沙量, WaTEM/SEDEM 模型在计算地表水输沙量时考虑了泥沙沉积。输沙能力控制泥沙的沉积,对于一个栅格单元,如果其产沙量低于输沙能力,泥沙将进入下一个栅格单元;反之泥沙将会在该栅格内沉积。WaTEM/SEDEM 模型有两种方式计算  $TC$ , 一种是输沙能力与浅沟侵蚀成比例的计算方法,另一种是不成比例的计算方法。

Desmet 等(1995)和 Van Oost 等(2000b)认为,年平均输沙能力直接与潜在的细沟侵蚀成比例,公式为:

$$TC = K_{TC} \cdot E_{PR} \quad (5)$$

式中: $TC$  是年均输沙能力( $\text{kg m}^{-1} \text{a}^{-1}$ ); $K_{TC}$  是输沙能力系数( $\text{m}$ ); $E_{PR}$  是潜在细沟侵蚀量( $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )。公式

(5)经过推导得到最终的计算公式:

$$TC=K_{TC}\cdot R\cdot K\cdot (LS-4.1s^{0.8})$$
 (6)

式中: $R$ 、 $K$ 和 $LS$ 分别为降雨侵蚀力、土壤可蚀性因子和坡度坡长因子; $s$ 为坡度。

然而,Verstraeten等(2007)指出,方程(2)与方程(6)相结合仍存在很大的缺点,即侵蚀量与输沙能力都与相同的地形参数成比例。因此,Verstraeten等(2007)认为,当侵蚀速率与输沙能力单独计算时可预测沟蚀,也就是说,输沙能力不应当与侵蚀量成比例。当研究地区以沟蚀为主时,建议采用以下算法:

$$T_c=K_{TC}\cdot R\cdot K\cdot A^{1.4}\cdot S^{1.4}$$
 (7)

式中: $A$ 是指上坡的面积( $m^2$ ); $S$ 指坡度( $m\ m^{-1}$ )。

方程(6)通常用于沟道侵蚀较轻地区,方程(7)主要用于沟蚀明显地区。在模型的具体应用中, $K_{TC}$ 用来反映地表植被覆盖对于输沙能力的影响,地表植被覆盖较好, $K_{TC}$ 值会比较低;地表植被覆盖较差,则 $K_{TC}$ 会较高。

(3) 泥沙流动算法

在已知栅格单元土壤侵蚀与输沙能力基础上,可采用一定的算法来表征侵蚀泥沙从源头流向河网的传递过程。流程网络需要与地形保持一致,流动路径在河道内结束且没有循环流程网络存在。为了解决这一问题,Desmet等(1995)和 Van Oost等(2000b)使用多重流算法,根据汇流方向变化实现了泥沙从高到低汇入河流的过程。

2.2.2 模型输入输出数据

WaTEM/SEDEM模型输入的数据格式为Idrisi数据格式,输入的数据有数字高程模型(DEM)、河流水系、土壤可蚀性图(或数据)、作物覆盖与管理因子分布图(或数据)、降雨侵蚀力分布图(或数据)、土地利用图等。

WaTEM/SEDEM模型输出数据类型包括数据、图件和文本文件3种类型。输出数据有总侵蚀量、总沉积量、总输沙量和总河流输沙量等。如果研究区内有湖泊和水库等水体,还可以计算拦截在其内的产沙量。主要图件有栅格的贡献区域图、 $LS$ 因子图、泥沙流入分布图、泥沙流出分布图和净水蚀量分布图等。

2.2.3 模型的校正与检验

模型中土壤侵蚀因子是以RUSLE为基础的,

土壤侵蚀强度的校正可参照RUSLE模型中的参数校正。WaTEM/SEDEM模型中唯一需要校正的参数是输沙能力系数 $K_{TC}$ 。

在WaTEM/SEDEM模型运行中,输沙能力系数 $K_{TC}$ 有一定的范围。地面植被覆盖较好时, $K_{TC}$ 值较小;反之则 $K_{TC}$ 值较高。对于每一个 $K_{TC}$ 高低值组合,相应计算出研究区产沙量(Boix-Fayos et al, 2008),并通过Nash等(1970)提出的效率系数 $NS$ 确定最佳 $K_{TC}$ 组合。 $NS$ 值越接近于1,模型模拟的效果就越好;如果 $NS$ 值很低,校正效果很差。

3 WaTEM/SEDEM模型应用

3.1 已有研究成果

WaTEM/SEDEM自提出以来在不同国家和地区得到了很好的应用,并取得了丰硕的成果(表1),特别是在欧洲地区。

在比利时,Verstraeten等(2003)应用WaTEM/SEDEM模型对不同的流域治理情景进行模拟,探讨流域治理对泥沙运移的影响。

在意大利, Van Rompaey等(2005)利用40个水库淤积数据对此模型进行验证和校正,指出无山地的流域模拟效果要比有山地的流域效果好。

表1 WaTEM/SEDEM模型应用的国家/地区  
Tab.1 Countries or regions of WaTEM/SEDEM model's application research

国家/地区	研究者及文献
比利时中部	Verstraeten等(2003)
意大利	Van Rompaey等(2005)
匈牙利	Jordan等(2005)
匈牙利	Szilassi等(2006)
澳大利亚	Verstraeten等(2007)
捷克	Van Rompaey等(2007)
捷克	Krasa等(2010)
西班牙	Boix-Fayos等(2008)
西班牙	Alatorre等(2010)
西班牙	Alatorre等(2012)
西欧斯凯尔特河流域	Verstraeten等(2007)
斯洛文尼亚西南部	Keesstra等(2009)
中国黄土高原地区	Feng等(2010)
中国三峡地区	Shi等(2012)
中国山东沂河流域	Liu等(2010)



在匈牙利, Jordan等(2005)和 Szilassi等(2006)用该模型模拟了巴拉顿湖凯利盆地不同土地利用条件下的侵蚀产沙。

在捷克共和国, Van Rompaey等(2007)应用该模型评估土地覆被的改变对土壤侵蚀和泥沙运移的影响; Krasa等(2010)通过模型模拟, 在捷克某一水库控制流域泥沙运移的空间格局及对土地利用方式的响应。

在西班牙, Boix-Fayos(2008)设置了6种不同的情景, 通过模型模拟侵蚀产沙量比较土地利用改变和拦沙坝对流域产沙量的影响; Alatorre等(2012)将模型应用于西班牙北部某一水库控制流域, 并且用该水库的历史沉积数据和其流域内一支流出口处三年记录的产沙量对模型进行校正和验证; Alatorre等(2010)在西班牙中部面积为2.84 km<sup>2</sup>的小流域, 使用该模型研究土地利用改变对土壤侵蚀和泥沙输移的影响。

Keesstra等(2009)运用该模型对斯洛文尼亚西南部流域侵蚀产沙进行模拟, 研究造林对泥沙动态沉积变化的影响; Verstraeten(2006)则使用SRTM高程数据, 应用该模型对西欧斯凯尔特河流域进行侵蚀产沙模拟, 并指出流域尺度使用SRTM高程数据时, WaTEM/SEDEM模型对坡面泥沙运移至河道的预测有很大的潜能。

在澳大利亚东南部, Verstraeten等(2007)利用26个大坝内泥沙淤积量校正 WaTEM/SEDEM模型, 指出该模型能很好的模拟沟道侵蚀, 并将其应用于30000 km<sup>2</sup>的马兰比吉河流域。

WaTEM/SEDEM模型在中国国内已有一定应用。例如, Feng等(2010)将 WaTEM/SEDEM模型应用于中国黄土高原丘陵沟壑区, 发现该模型预测每个栅格侵蚀量时效果不佳, 但对于预测侵蚀空间分布格局是可靠的; Shi等(2012)应用 WaTEM/SEDEM模型评估三峡地区小流域综合治理效益; Liu等(2010)在山东沂河流域, 用模型模拟了沂河流域2000年的平均土壤流失量和年输沙能力。但总的来看, 尚未引起研究者足够的重视。

3.2 WaTEM/SEDEM模型在双枫潭流域的应用案例

为深入研究该模型在中国的应用前景, 作者采用 WaTEM/SEDEM模型, 以湖南省3个流域为研究

对象, 利用莲花堰和石门坎水文站控制流域产沙数据校正和验证模型, 并使用校验后的模型模拟双枫潭流域侵蚀产沙(方海燕等, 2014)。

该研究中, 土地利用数据(1:10万)、土壤类型空间分布及属性数据(1:100万)均来自中科院资源环境科学数据中心; 空间分辨率为30 m的DEM数据来自国际科学数据服务平台; 降雨量数据则来自中国气象科学数据共享网。

经过模型校正,  $K_c$ 的最高值和最低值的最佳组合为10 m和16 m。利用莲花堰和石门坎流域的校正和验证产沙数据绘制的散点图发现, 模拟结果与实测结果相关系数 $r$ 在0.99以上, 由此可见模型模拟效果很好(图1)。

WaTEM/SEDEM模型模拟得到的双枫潭流域多年产沙模数为631 t/km<sup>2</sup>, 其模拟值大于湖南省已有发表文章的流域产沙模数, 这可能与该模型不考虑永久性沟道、河道侵蚀和沉积有关。但结合周边流域产沙模数研究发现, 这一模拟结果符合传统产沙模数与流域面积的关系, 即产沙模数随流域面积的增加而减小(方海燕等, 2008)。

利用 WaTEM/SEDEM 模拟得到不同侵蚀强度空间分布和面积比例(图2)。研究发现, 在0~10°坡度范围内以沉积为主, 而在20~30°、30~40°、40~50°、50~60°和大于60°的坡度上, 土壤侵蚀强度随坡度的增加而增加。该研究与已有研究进行了对比, 证实 WaTEM/SEDEM 模型模拟流域侵蚀沉积特征也得到了理想的结果

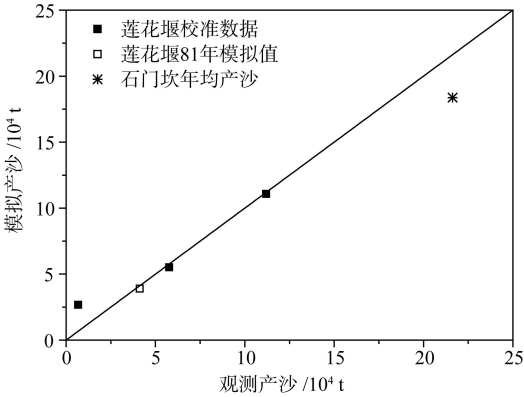


图1 模拟与观测的3个流域产沙比较  
Fig.1 Comparison of the modeled sediment yields to the measured ones for the three studied basins

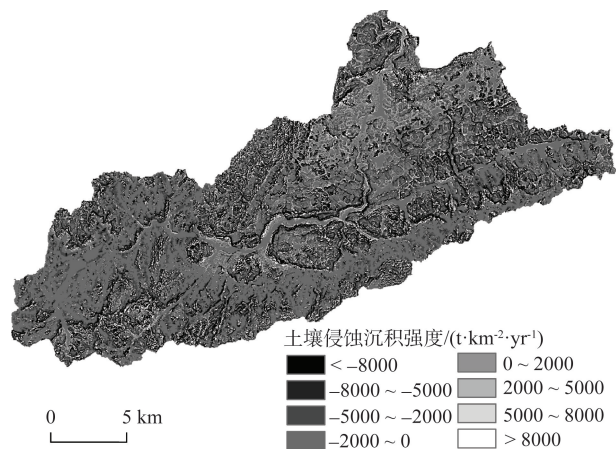


图2 WaTEM/SEDEM 模拟的双枫潭流域土壤侵蚀沉积强度空间分布

Fig.2 Soil erosion and sediment deposition rates for Shuangfengtan Basin modeled by WaTEM/SEDEM

## 4 总结和展望

### 4.1 WaTEM/SEDEM模型的优缺点

基于 WaTEM/SEDEM 模型在国内外的应用,发现该模型具有以下优点:①它是一个结构相对简单,但却能够分析土壤侵蚀各因素对土壤侵蚀作用的空间分布式模型;②可评价各因子对土壤侵蚀沉积的影响与贡献;③能够模拟不同河段产沙量及水库、塘坝等水体对泥沙的拦截作用;④模型校正比较简单,仅有一个参数需要校正;⑤模型运行需求参数不多,也适合于水沙资料监测稀缺地区,适用范围广。

WaTEM/SEDEM 模型主要不足之处在于不能模拟径流;模型假设进入河道的泥沙能够全部输出流域,没有考虑河道侵蚀以及重力侵蚀等因素。

### 4.2 WaTEM/SEDEM模型的应用前景

自然界是一个空间变异和干扰机制普遍存在的复杂系统(Pickett et al, 1995),结构复杂、参数繁多的土壤侵蚀模型并不一定具有更高的精度。当模型的复杂程度超过数据的提供能力时,模型越复杂,其精度反而降低。而相对简单的模型,在同等的条件下,反而有可能具有较高的模拟精度(Merritt et al, 2003)。WaTEM/SEDEM 模型就是一个模型结构相对简单,却能够反映多因素对土壤侵蚀作用的空间分布式模型。

这一模型在国外不同流域已经得到了十分广

泛的应用。同 USLE 一样,该模型适用范围相对较广,结构相对简单,非常值得在流域类型复杂的中国进行推广,但目前在国内还没有引起足够的重视。在未来的土壤侵蚀与水土保持研究中,可将该模型重点应用于国内水沙监测资料稀少的区域,深入探讨这类区域的土壤侵蚀机理。

## 参考文献(References)

- 蔡强国, 刘纪根. 2003. 关于中国土壤侵蚀模型研究进展. 地理科学进展, 22(3): 242-250. [Cai Q G, Liu J G. 2003. Evolution of soil erosion model in China. Progress in Geography, 22(3): 242-250.]
- 方海燕, 蔡强国, 李秋艳. 2008. 产沙模数与流域面积关系研究进展. 地理科学进展, 27(6): 63-69. [Fang H Y, Cai Q G, Li Q Y. 2008. A review of the relationship between specific sediment yield and drainage area. Progress in Geography, 27(6): 63-69.]
- 方海燕, 孙莉英, 聂彬彬, 等. 2014. 基于 WaTEM/SEDEM 模型的双枫潭流域侵蚀产沙模拟. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 42(1): 92-97. [Fang H Y, Sun L Y, Nie B B, et al. 2014. Modeling soil erosion and sediment yield using WaTEM/SEDEM for the Shuangfengtan basin. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 42(1): 92-97.]
- 李凤, 吴长文. 1997. RUSLE 侵蚀模型及其应用综述. 水土保持研究, 4(1): 109-112. [Li F, Wu C W. 1997. The evaluation on the erosion model of RUSLE and its application. Research of Soil and Water Conservation, 4(1): 109-112.]
- 王红兵, 许炯心, 颜明. 2011. 影响土壤侵蚀的社会经济因素研究进展. 地理科学进展, 30(3): 268-274. [Wang H B, Xu J X, Yan M. 2011. Effect of socio-economic factors on soil erosion: a literature review. Progress in Geography, 30(3): 268-274.]
- Alatorre L C, Beguería S, García-Ruiz J M. 2010. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: a case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. Journal of Hydrology, 391(1-2): 109-123.
- Alatorre L C, Beguería S. 2012. Soil erosion and sediment delivery in a mountain catchment under scenarios of land use change using a spatially distributed numerical model. Hydrology and Earth System Sciences, 16: 1321-1334.
- Boix-Fayos C, De V J, María M M, et al. 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment

- yield. *Hydrological Process*, 22(25): 4922-4935.
- De Vente J, Poesen J, Verstraeten G, et al. 2008. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change*, 60(3-4): 393-415.
- Desmet P J J, Govers G. 1995. GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information. *CATENA* 25(1-4): 389-401.
- Desmet P J J, Govers G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5): 427-433.
- Desmet P J J, Govers G. 1997. Two-dimensional modeling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography. *CATENA*, 29(3-4): 283-306.
- Feng X M, Wang Y F, Chen L D, et al. 2010. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 118(3-4): 239-248.
- Jordan G, van R A, Szilassi P, et al. 2005. Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton basin (Hungary). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 108(2): 119-133.
- Keesstra S D, van D O, Verstraeten G, et al. 2009. Changing sediment dynamics due to natural reforestation in the Dragonja catchment, SW Slovenia. *CATENA*, 78(1): 60-71.
- Krasa J, Dostal T, Vrana K, et al. 2010. Predicting spatial patterns of sediment delivery and impacts of land-use scenarios on Sediment transport in Czech Catchment. *Land Degradation and Development*, 21(4): 367-375.
- Liu Z J, Yu X X, Liu Q J. 2010. The study of Yihe Basin on soil erosion simulation using WaTEM/SEDEM model. Symposium from Cross-strait Environment & Resources and 2nd Representative Conference of Chinese Environmental Resources & Ecological Conservation Society. Linyi, China: July 6-8.
- Merritt W S, Letcher R A, Jakeman A J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling&Software*, 18(8-9): 761-799.
- Nash J E, Sutcliffe J V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.
- Pickett S T A, Cadanasso M L. 1995. Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems. *Science*, 269: 331-334.
- Renard K G, Foster G R, Yoder D C. 1994. Rusle, revised: status, question, answers, and the future. *Soil and Water Conservation*, 49(1): 213-220.
- Shi Z H, Ai L, Fang N F, et al. 2012. Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: a case study in the Three Gorges Area, China. *Journal of Hydrology*, 438-439: 156-167.
- Szilassi P, Jordan G, Van Rompaey A, et al. 2006. Impacts of historical land use changes on erosion and agricultural soil properties in the Kali Basin at Lake Balaton, Hungary. *CATENA*, 68(2-3): 96-108.
- Toy T J, Osterkamp W R. 1995. The applicability of RUSLE to geomorphic studies. *Soil and Water Conservation*, 50(5): 498-503.
- Van Oost K, Govers G. 2000a. WaTEM: introduction. Leuven, Belgium: University of Leuven.
- Van Oost K, Govers G, Desmet P J J, 2000b. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, 15(6): 579-591.
- Van R A, Paolo B, Robert J, et al. 2005. Modeling sediment yields in Italian catchments. *Geomorphology*, 65(1-2): 157-169.
- Van R A, Verstraeten G, Govers G, et al. 2001. Modeling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1221-1236.
- Van R, Krasa J, Dostal T. 2007. Modelling the impact of land cover changes in the Czech Republic on sediment delivery. *Land Use Policy*, 24(3): 576-583.
- Verstraeten G, Prosserlan P, Fogarty P, et al. 2007. Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee Catchment, Australia. *Journal of Hydrology*, 334(3-4): 440-454.
- Verstraeten G, Van R A, Poesen J, et al. 2003. Evaluating the impact of watershed management scenarios on changes in sediment delivery to rivers. *Hydrobiologia*, 494(1-3): 153-158.
- Verstraeten G. 2006. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. *Geomorphology*, 81(1-2): 128-140.
- Wischmeier W H, Smith D D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.

## Research progress in WaTEM/SEDEM model and its application prospect

SHENG Meiling, FANG Haiyan

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Currently, many different erosion and sediment transport models are available. They are important tools to predict soil erosion and sediment yield under different conditions. The most commonly used models include Universal Soil Loss Equation (USLE), Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Water Erosion Predict Project (WEPP), Soil and Water Assessment Tool (SWAT), and the Limburg Soil Erosion Model (LISEM), et al. The physical distributed soil models can be well used in other regions once they were built in a given region. Therefore, physical soil erosion model has received more attention over the decades. However, the structures of the physical erosion models are usually complex and a lot of parameters are required to run them, which to some extent limits their applications. The Water and Tillage Erosion Model and Sediment Delivery Model (WaTEM/SEDEM) developed at the Physical and Regional Geography Research Group, KU Leuven University, Belgium, is a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model. Unlike other more sophisticated dynamic models, this model requires minimal basis data input and the model structure is simple, similar to RUSLE model. Although WaTEM/SEDEM has data requirement almost similar to RUSLE model, it can assess both water and tillage erosion simultaneously. Mostly importantly, WaTEM/SEDEM can spatially model soil erosion and sediment deposition rates as well as the soil redistribution patterns. This model also allows incorporation of landscape structure or the spatial organization of different land units and the connectivity, and can then be used to delineate sediment source areas in an agricultural landscape, and to simulate the impact of various scenarios of an integrated catchment management on the rates and patterns of soil loss and sediment delivery. Therefore, WaTEM/SEDEM can provide useful information for land managers to implement rational management to control soil loss. Up to date, the model has been successfully used in Europe and other regions around the world. However, few studies have been conducted in China using this model. In this paper, the model structure, the algorithms used to calculate soil erosion and sediment transport, the model input and output, and its applications were systematically introduced. A case study in Shuangfengtang catchment, Hunan Province was also reported in this paper to verify its usefulness. Besides the advantages mentioned above, the disadvantages of this model were also pointed out. For example, WaTEM/SEDEM does not predict sediment transport within a river, bank erosion or floodplain sediment deposition. At the end of this paper, the prospect of the application of WaTEM/SEDEM in the data-limited regions was discussed.

**Key words:** soil erosion model; WaTEM/SEDEM; application prospect