

# 基于TETIS模型的黑土区乌裕尔河流域径流与侵蚀产沙模拟研究

李致颖<sup>1,2</sup>, 方海燕<sup>1,2\*</sup>

(1. 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;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:**为科学地认识中国东北黑土区流域土壤侵蚀特征,探讨TETIS模型在该区的适用性,本文以乌裕尔河流域为例,利用1971-1987年日径流与泥沙实测数据对TETIS模型进行了校正与验证,进而分析了流域土壤侵蚀强度特征及其与坡度、土地利用方式的关系。研究结果表明:TETIS模型在乌裕尔河流域适用性好,日径流与日输沙量的纳什效率系数在0.52~0.70之间,决定系数在0.60~0.71之间,体积误差均不超过15%。流域平均侵蚀模数为397.2 t/(km<sup>2</sup>·a),流域以微度和轻度侵蚀为主,约90%的产沙来自于坡面。平均土壤侵蚀模数随坡度的增大而增大,流域侵蚀量主要来自于0°~5°坡面。不同土地利用方式具不同的土壤侵蚀模数,耕地土壤侵蚀模数最大,达556.3 t/(km<sup>2</sup>·a)。坡度较大的耕地和植被覆盖度较低的区域是水土流失治理的重点。研究表明,TETIS模型在黑土区模拟土壤侵蚀产沙应用前景好,可为研究区制定水土保持措施提供科学依据。

**关键词:**TETIS模型;东北黑土区;乌裕尔河流域;土壤侵蚀模拟

## 1 引言

土壤侵蚀是世界性的环境问题之一(唐克丽, 2004),可引起土地资源退化、土壤养分流失、泥沙淤积、洪涝灾害等问题,严重影响着生态环境和人类的可持续发展(吴发启等, 2012)。东北黑土区是中国的粮食主产区,然而,由于长期不合理的开垦与耕作,加之东北黑土区独特的土壤地理环境(崔明等, 2008),该区土壤侵蚀问题日趋剧烈,威胁到中国的粮食安全。

土壤侵蚀模型是定量评价水土流失及指导水土保持规划的有效工具(雷廷武等, 2012)。东北黑土区土壤侵蚀研究开展较晚,模型模拟研究也不足。截至目前,东北黑土区土壤侵蚀模型模拟研究多采用(R)USLE((Revised) Universal Soil Loss Equation)模型(李浩, 2012; 胡刚等, 2015; 李百安, 2015),但运用(R)USLE模型计算年均土壤侵蚀量,

对特定年份或场次降雨计算误差较大(陈云明等, 2004)。盛美玲等(2015)采用WaTEM/SEDEM(Water and Tillage Erosion Model and Sediment Delivery Model)分布式模型开展小流域土壤侵蚀研究,但该模型仅能模拟流域多年平均侵蚀产沙情况,难以获取年及以下更小时间尺度上产流产沙过程(盛美玲等, 2014)。此外,WEPP (Water Erosion Prediction Project)模型在东北黑土区也仅在坡面尺度(刘远利, 2010)和小流域(魏守才, 2015)开展研究。汤洁等(2014)应用SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型在辽河支流招苏台河流域进行土壤侵蚀研究,尽管SWAT模型能较为准确地模拟流域产流产沙,但由于该模型是基于水文响应单元模拟产流产沙,缺少沟道侵蚀模块,致使SWAT模型难以模拟流域内各点及沟道的侵蚀特征。因此,十分有必要探讨其他模型在东北黑土区的适用性,以期为进一步准确地预报侵蚀产沙,进而为有效地实施水土保持

收稿日期:2016-08;修订日期:2017-06。

基金项目:国家自然科学基金项目(41571271) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571271]。

作者简介:李致颖(1992-),女,广西南宁人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究, E-mail: lizy.14s@igsrr.ac.cn。

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

引用格式:李致颖, 方海燕. 2017. 基于TETIS模型的黑土区乌裕尔河流域径流与侵蚀产沙模拟研究[J]. 地理科学进展, 36(7): 873-885. [Li Z Y, Fang H Y. 2017. Simulation of runoff, soil erosion, and sediment yield using the TETIS model in the Wuyuer River Basin of the black soil region, Northeast China[J]. Progress in Geography, 36(7): 873-885.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.07.009

措施提供依据。

西班牙瓦伦西亚科技大学开发的TETIS模型(Francés et al, 2007)是一个能模拟径流、土壤侵蚀与泥沙沉积及其空间特征的分布式模型,可模拟坡面和沟道侵蚀,且结构简单灵活,数据要求不高,校正参数较少。因而,自1994年提出以来,该模型在西班牙(Salazar et al, 2012; Bussi, Francés, Horel, et al, 2014; Rodriguez-Lloveras et al, 2016)、美国(Bussi, Francés, Montoya, et al, 2014)、意大利(Coccia et al, 2011)、瑞士和法国(Ruiz-Villanueva et al, 2015)等得到了成功应用,研究涉及径流模拟、土壤侵蚀模拟、水土保持措施效应评价、气候变化下的水沙效应等方面。TETIS模型的有效性、适用性与灵活性在国际应用研究中已得到了有效验证,但在国内仍未见报道。

因此,本文拟以乌裕尔河流域为研究区域,将TETIS模型引进东北黑土区,利用该模型模拟流域侵蚀产沙特征,探讨该模型在黑土区的适用性,分析不同土地利用方式与不同坡度下的土壤侵蚀规律。本文可为丰富黑土区土壤侵蚀模拟研究,深入揭示黑土区土壤侵蚀规律,为中国东北黑土区有效实施水土保持提供科学支撑。

## 2 研究区域概况

乌裕尔河属嫩江水系一级支流,发源于小兴安岭西麓山区(127°30'E, 47°54'N),为黑龙江省内最大的内陆河(图1)。流域内坡度较缓,多为低山丘陵、坡状台地和漫川漫岗。乌裕尔河上游区域具备基本的河流特征,下游河水排泄不畅,形成沼泽与湿地。将乌裕尔河依安水文站(125°29'E, 47°52'N)控制流域作为研究区域,流域面积为7366 km<sup>2</sup>。

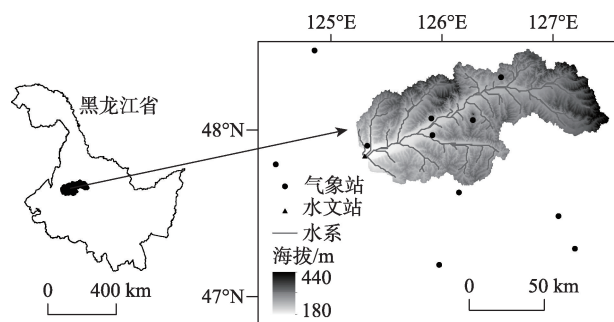


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

研究区域属温带大陆性季风气候,年均温2.1℃,年降水量460 mm左右,蒸发强烈。降雨年内分布不均,约80%集中在6-9月。流域内主要土壤有黑土、暗棕壤、黑钙土、草甸土、沼泽土5个土类。其中,黑土是该区分布最广的土壤类型,自然肥力较高,非常有利于农作物机耕作业。流域内主要土地类型为耕地,占全区面积66%(图2)。据文献记载,研究区存在沟壑纵横、切割耕地的现象,流域内共有侵蚀沟24678条,较大的2600条侵蚀沟占地10 km<sup>2</sup>,90%的侵蚀沟仍在发展(方海燕等, 2009; 王文娟等, 2012)。

## 3 研究方法与数据来源

### 3.1 TETIS模型

TETIS是一个基于概念的分布式水文/泥沙模型,包括水文模块和泥沙模块两部分。水文模块基于水箱结构模拟产流过程,每个栅格有七层水箱,各代表不同的水文过程,包括融雪、植被截留、土壤毛管水层、地表水层、壤中流水层、蓄水层和河网水层。融雪过程根据经典的度日模型(Degree-day Method)建立。度日模型根据某一时段内的正积温和度日因子的乘积来计算该时段内的雪水当量。产流过程为:降水或融雪经植被截留后,首先进入土壤毛管水层,此水层中的水量仅能由蒸发流失,其余水流根据土壤下渗能力,分为地表径流、壤中流和基流,壤中流和基流量与不同层次土壤的水平渗流能力有关,三部分水量共同参与河网汇流。深层地下水流由于水量较小,且在深层土壤中散失,不参与汇流,但计入水量平衡中。水量平衡关系为流域收入水量(降雨量)与支出水量(蒸发量、地表径流量、壤中流量、基流量和深层地下水渗漏量)之差

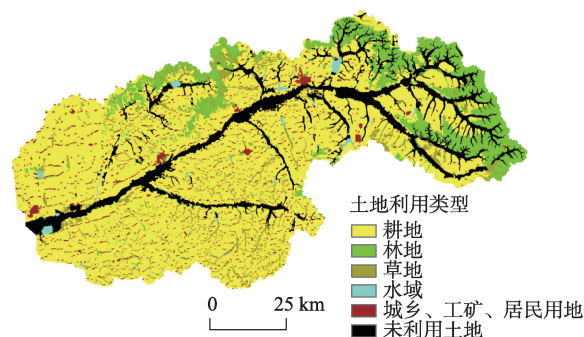


图2 研究区土地利用图(1985年)

Fig.2 Land use map of study area in 1985

额等于各层水箱蓄水变化总量。汇流过程基于地貌动力波理论(Francés et al, 2007)与河网水力几何形态关系(Leopold et al, 1953)进行模拟。该过程将流域分为若干段河道,在一段时间内停留在某段河道的水量等于进入该河道的水量与汇入下一级河道水量之差,产汇流交错循环模拟。模型水箱结构简单,灵活性强,可根据流域地理环境,如是否存在融雪、植被截留及深层下渗等,调整水箱数量,以达到简化校正过程目的(Bussi et al, 2013)。

TETIS模型的泥沙模块基于CASC2D-SED模型(Sánchez, 2002)构建。CASC2D-SED是一个能够模拟坡面与沟/河道侵蚀的模型,该模块分为坡面输沙过程和沟/河道输沙过程。流域出口的产沙量取决于流域内泥沙量和径流输沙能力两大因素。TETIS模型将泥沙颗粒分为三种粒级,即砂粒、粉粒和粘粒,其中值粒径分别为0.35、0.016和0.001 mm,沉降速度分别为36、0.22和 $8.6 \times 10^{-4}$  mm/s。坡面输沙过程中,对于一个边长为 $W$ 的栅格,在单位时间内,栅格能产生的泥沙体积 $Q_h$ 由式(1)计算,式(1)的原型为Kilinc-Richardson方程(Kilinc et al, 1973),原方程仅考虑径流、坡度、土壤类型和土地利用类型的影响,修正后的公式考虑了土壤侵蚀因子的影响。坡面输沙能力 $Q_h$ ( $m^3/s$ )为:

$$Q_h = \frac{1}{\gamma_s} W \alpha S_0^{1.66} \left( \frac{Q}{W} \right)^{2.035} \frac{K}{0.15} CP \quad (1)$$

式中:  $\gamma_s$  为泥沙容重( $t/m^3$ );  $W$  为栅格边长(m);  $\alpha$  为坡面输沙能力系数,用于反映下垫面情况对输沙能力的影响,土壤抗冲性强,植被覆盖好,则 $\alpha$ 较低,反之则高;  $S_0$  为坡度(m/m);  $Q$  为坡面径流量( $m^3/s$ );  $K$  为USLE方程中的土壤可蚀性因子 [ $t \cdot hm^2 \cdot h / (hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$ ];  $C$  为作物/植被管理因子;  $P$  为治理措施因子。

坡面输沙能力根据土壤/泥沙质地组成,即砂粒、粉粒和粘粒的百分比含量,相应地也分为三部分粒级输沙能力。各部分输沙能力运移对应粒级的泥沙。泥沙颗粒根据各级颗粒沉降速度、河道水深和给定的时间间隔,分为悬浮泥沙和沉积泥沙。各级颗粒独立沉降,互不影响。输沙过程中,悬浮泥沙首先被搬运,若还有输移能力剩余,则继续带动沉积泥沙,最后侵蚀土壤母质,给定时间间隔内的悬浮泥沙的沉积量加入到沉积泥沙量中。坡面输沙过程的这种假定不仅解决了流域产沙和产流输沙能力有限情况下的泥沙输移量计算,也考虑了

回水区域悬浮泥沙的连续沉降。

河道输沙过程与坡面输沙过程类似,但河道部分只考虑悬浮质和床沙质的搬运。悬浮质仍优先被搬运,剩余运移能力搬运床沙质,如若还有运移能力剩余,这部分运移能力将不再使用。河道输沙过程由Engelund-Hansen方程(Engelund et al, 1967)计算,输沙能力与水力半径、径流流速、粒径特征等有关。单位时间内,河道能够输移的粒级 $i$ 泥沙颗粒的体积 $Q_{s,i}$ ( $m^3/s$ )为:

$$Q_{s,i} = \frac{QC_{wi}}{\gamma_s} \quad (2)$$

$$C_{wi} = \beta \left( \frac{G}{G-1} \right) \frac{VS_f}{\sqrt{(G-1)gd_i}} \sqrt{\frac{R_h S_f}{(G-1)d_i}} \quad (3)$$

式中:  $Q_{s,i}$  为粒级 $i$ 所对应的河道输沙量( $m^3/s$ );  $Q$  为河道径流量( $m^3/s$ );  $C_{wi}$  为粒级 $i$ 泥沙的最大浓度( $t/m^3$ );  $\beta$  为沟/河道输沙能力系数,原Engelund-Hansen方程没有该校正系数,TETIS模型新增这一参数,为调整沟/河道输沙能力提供了可能;  $G$  为泥沙与水的比重之比;  $V$  为径流流速( $m/s$ );  $S_f$  为能坡;  $g$  为重力加速度( $m/s^2$ );  $d_i$  为粒级 $i$ 的直径(m);  $R_h$  为水力半径(m)。

TETIS模型根据汇水面积临界值划分坡面与沟/河道。汇水面积大小表示沟谷中来水量的多少。当上游栅格产流汇入汇水面积大于定义临界值的栅格时,则认为沟道开始发育,水流汇入沟/河道。本文根据黑土区相关研究(胡刚等, 2006; 盛美玲等, 2014; Fang, 2016),分别取0.4 km<sup>2</sup>和1 km<sup>2</sup>为沟道和河道的汇水面积临界值。除坡面与沟/河道输沙能力外,流域出水口产沙量还与河网中含沙量密切相关。因此,TETIS模型泥沙模块对河网中初始泥沙沉积量较为敏感。初始泥沙沉积量多,产沙量则可能增大。模型模拟过程中可通过模型预热或校正初始泥沙沉积量两种方式获取较为准确的初始值。本文采用预热的方式获得初始值。预热是指在初始状态空白的情况下,使用一段时间的数据进行模拟,获取模拟结束后的泥沙沉积量,这一段时间的模拟称为预热期,获取的泥沙沉积量则作为校正期的初始状态。预热的目的是为了降低初值条件不确定性的影响。预热期长度取决于模型的复杂程度,对于概念模型,预热期一般为一年(Le Lay et al, 2005; Seibert et al, 2012; Kim et al, 2016)。TETIS模型既可作为场次洪水事件模拟模



型,也可作为连续时段模拟模型。作为连续时段模拟时,基本模拟步长为日步长。

### 3.2 模型输入数据

TETIS 模型输入数据包括气象数据(txt 格式)、水沙数据(txt 格式)以及其他反映流域地理特征的空间分布图(asc 格式)。气象数据包括逐日平均气温、最高最低气温和雪水当量。其中气温数据来自中国气象数据网;雪水当量指积雪完全融化后得到的水层的垂直深度,等于雪密度与积雪深度的乘积。逐日积雪深度数据来自寒区旱区科学数据中心,雪密度数据来自马丽娟等(2012)。气象数据为站点数据,模型利用反距离权重法,插值得到流域的气象数据空间分布图。1970-1987 年为依安站较长时间的具连续水沙数据序列的年份,因此选择该时间段序列的逐日水沙数据率定和验证模型。水沙数据来自中华人民共和国水文年鉴。其他空间分布图包括 DEM、土壤图、土壤质地图、土地类型图、地质图、USLE-K、USLE-C、USLE-P 分布图等。其中,DEM 从 1:5 万地形图数字化而得,初始分辨率为 20 m×20 m,但该分辨率已超出模型计算能力,需重采样至合适的分辨率。Shrestha 等(2006)研究表明,当 IC 比,即输入栅格面积(Input Grid Area)和流域面积(Catchment Area)之比不高于 1:10 时,分布式水文模型模拟效果较好。代表单元面积(REA)也是确定栅格尺寸的一种方法(Wood et al, 1988)。Woods 等(1995)研究表明,REA 阈值尺度为 5~10 km<sup>2</sup> 的量级。最终本文将 DEM 重采样为 200 m×200 m,IC 比小于 1:10,栅格面积(0.04 km<sup>2</sup>)也小于 REA,且模型计算效率在使用者可接受范围内。

土壤图与土地利用类型图(1985 年,图 2)分辨率分别为 1:100 万和 1:10 万,均来自中国科学院资源环境科学数据中心。土地利用图年份根据水沙数据序列(1970-1987 年)选择,该时间序列内有两期土地利用图(1975 年和 1985 年),但 1975 年土地利用图精度较低,且流域内有部分缺失,将 1975 年与 1985 年土地利用图重叠部分对比发现且两期土地利用类型变化不大,整体变化趋势为草地略有减少,建筑面积略有增加,且两期土地利用图中,耕地均为流域内主要土地利用类型。考虑到模型输入数据的完整性和精度问题,最终选择 1985 年作为土地利用图输入。

土壤质地,即每种土壤类型各级颗粒的百分含量,可通过查阅中国土种数据库得到。地质图由

1:100 万黑龙江省地质图数字化得到。USLE-K 因子根据 Sharpley 等(1990)在 EPIC 模型中提出的公式(式(4)),利用土壤有机碳及颗粒组成资料计算。USLE-C 因子与 USLE-P 因子根据研究区土地利用图,并参考乌裕尔河流域及东北黑土区已发表文献(魏建兵等, 2006; 王文娟等, 2012; 鄂立思等, 2015; 盛美玲等, 2015)获取(表 1)。由于 TETIS 模型泥沙模块输入输出均为体积单位(m<sup>3</sup>/s),需将泥沙监测站监测重量单位(kg/s)进行转换,根据黑土区研究成果(Xie et al, 2007; Wang et al, 2011),同时参考研究区内各土壤类型容重值,最终取泥沙容重为 1.2 g/cm<sup>3</sup>。

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[0.0256SAN(1 - SIL/100)]\} \times \left( \frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \times \left( 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \times \left[ 1 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)} \right] \quad (4)$$

式中:  $K$  为 USLE 方程中的土壤可蚀性因子,  $SN_1 = 1 - SAN/100$ ,  $SAN$  为砂粒含量(%),  $SIL$  为粉粒含量(%),  $CLA$  为粘粒含量(%),  $C$  为土壤有机碳含量(%)。

模拟开始前,需要将各个图层,如 DEM、坡度图、土地利用类型图等,集成为一个地形土壤文件(sds 格式),这一集成文件反映了流域内地理情况的空间异质性。TETIS 模型为分布式模型,理论上需要针对每一栅格进行各个水箱的校正,但集成地形土壤文件可减少校正参数数量。假设流域内有  $n$  个栅格,每一栅格有  $p$  个校正系数,集成文件可使校正参数由原来的  $np$  个降为  $p$  个,提高了模型校正效率。

表 1 研究区作物管理因子  $C$  值和治理措施因子  $P$  值

Tab.1 Values of crop management factor ( $C$ ) and conservation practice factor ( $P$ ) in the study area

土地利用类型	$C$ 值	$P$ 值
有林地	0.005	1
灌木林	0.07	1
疏林和其他林地	0.05	1
高覆盖草地	0.04	1
中覆盖草地	0.08	1
水域	0	0
城镇用地、其他建设用地、沼泽地	0	1
农村居民点	0.03	1
裸土地、裸岩石砾地	1	1
水田	0.18	0.03
旱地	1	0.352

注:引自魏建兵等, 2006; 王文娟等, 2012; 鄂立思等, 2015; 盛美玲等, 2015。

### 3.3 模型率定及验证

根据式(1)、(3)可知, TETIS模型泥沙模块校正参数有3个, 分别为坡面校正参数 $\alpha$ 、沟道校正参数 $\beta_1$ 以及河道校正参数 $\beta_2$ , 根据Buendia等(2016)给出的参数范围进行调参。泥沙模块校正参数少, 无需进行敏感性分析择参调整, 可按照“先调整总输沙量平衡, 再调整过程匹配”的原则进行调参。调参发现, 在参数范围内, 若增加 $\beta_1$ , 总输沙量增加不明显, 说明流域大部分为坡面, 故调整 $\alpha$ 至合适的值后, 保持 $\alpha$ 不变; 调整 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ , 使泥沙输移比符合实际, 最终取值见表2。

模型模拟精度根据3个指标来评价, 分别为体积误差(VE)、决定系数( $R^2$ )和纳什效率系数(NSE)。

$$VE = \frac{V_o - V_s}{V_o} \times 100\% \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (7)$$

式中:  $V_o$ 为实测水量/泥沙总体积( $m^3$ ),  $V_s$ 为模拟水量/泥沙总体积( $m^3$ ),  $Q_{o,i}$ 为实测径流/泥沙量( $m^3/s$ ),  $\bar{Q}_o$ 为平均实测径流/泥沙量( $m^3/s$ ),  $Q_{s,i}$ 为模拟径流/泥沙量( $m^3/s$ ),  $\bar{Q}_s$ 为平均模拟径流/泥沙量( $m^3/s$ )。

## 4 结果与分析

以1970年作为预热期, 首先估计了径流与泥沙的初始变量, 进而分别选用1971-1977年和1978-1987年作为校正和验证期, 通过人工试错与计算机自动率定相结合的方法, 对模型径流和泥沙模拟进行校准和验证。

### 4.1 模型校正与验证

研究发现, 日径流模拟值与实测值吻合很好。率定期日径流NSE为0.69,  $R^2$ 为0.69, VE为9.53%; 验证期NSE为0.70,  $R^2$ 为0.71, VE为1.19%。TETIS

模型模拟的径流流量过程线与实测结果整体非常吻合, 相关性也较高(图3)。将日模拟结果分别处理为月步长和年步长, 月步长率定期和验证期的效率系数分别为0.80和0.78, 年步长率定期和验证期的NSE分别为0.84和0.82。研究表明, 对径流模拟而言, 若 $NSE \geq 0.5$ ,  $R^2 \geq 0.6$ ,  $VE \leq 10\%$ , 则认为模型模拟效果满意(Moriasi et al, 2007), 因此, TETIS模型的模拟结果令人满意。相比于黑土区其他研究, TETIS模型的精度也较高。如张爱静(2013)在黑龙江省汤旺河流域应用SWAT模型进行流域产流模拟时, 年步长上模拟NSE为0.85, 月步长上为0.74。仕玉治(2011)将SWAT模型应用于松花江支流辉发河流域, 年步长上NSE为0.89, 月步长仅为0.62。TETIS模型在日、月、年步长上, 率定期和验证期的NSE和 $R^2$ 约为0.7, VE均小于10%, 表明TETIS模型在模拟流域出口产流时模拟精度较高, 适用性好。

然而, 模型对年内部分径流模拟效果不够理想, 高估和低估现象均有存在。受融雪影响, 流域实测径流在3-5月出现小峰值, 但模型低估了流域的融雪径流。这可能是因为模型融雪模块度日模型较为简单, 并未考虑风速、风向、空气湿度和雪颗粒生长等影响因素。另外, 部分年份, 如1973和1982年, 洪峰出现高估现象, 原因可能是前一年为丰水年, 降雨突增, 进而影响到次年的模拟精度。

流域1971-1987年日产沙模拟发现, 率定期NSE为0.60,  $R^2$ 为0.69, 验证期NSE为0.52,  $R^2$ 为0.60, 率定期和验证期的体积误差均小于15%(表3), 满足模型泥沙模拟 $VE \leq 15\%$ 、 $NSE \geq 0.5$ 、 $R^2 \geq 0.6$ 的标准(Moriasi et al, 2007), TETIS模型对流域产沙的模拟精度较高。图4显示, 泥沙模拟值与实测值过程线吻合较好。然而, 泥沙的模拟精度不如径流模拟精度高, VE值较径流模拟时偏低, 高低估现象出现时期基本与径流模拟相符。究其原因, 一是因为泥沙和径流间存在非线性关系, 校正/验证时段内径流量估计的误差会带入泥沙模块中, 进而形成误差(Rodriguez-Lloveras et al, 2015); 二是TETIS模型泥沙模块尚未考虑重力侵蚀(Bussi, Francés, Horel, et al, 2014), 而东北黑土区水力侵蚀和重力侵蚀具叠加作用也是造成土壤侵蚀严重的原因之一(张晓平等, 2006)。同时, 重采样DEM可能导致高程变化趋于不明显, 使得提取的河道总长度发生变化, 源头区的支流趋于减少, 进而导致产流产沙量进一步降低(高玉芳等, 2015)。但总体来看, 模型整体的低估现象在可接受范围内。

表2 泥沙模块参数及取值

Tab.2 Parameters for sedimentological sub-model and their values

参数名称	参数范围	最终值
坡面输沙校正参数 $\alpha$	$(1 \times 10^{-8}) \sim 10$	4.700
沟道输沙校正参数 $\beta_1$	$(1 \times 10^{-8}) \sim 10$	0.070
河道输沙校正参数 $\beta_2$	$(1 \times 10^{-8}) \sim 10$	0.004

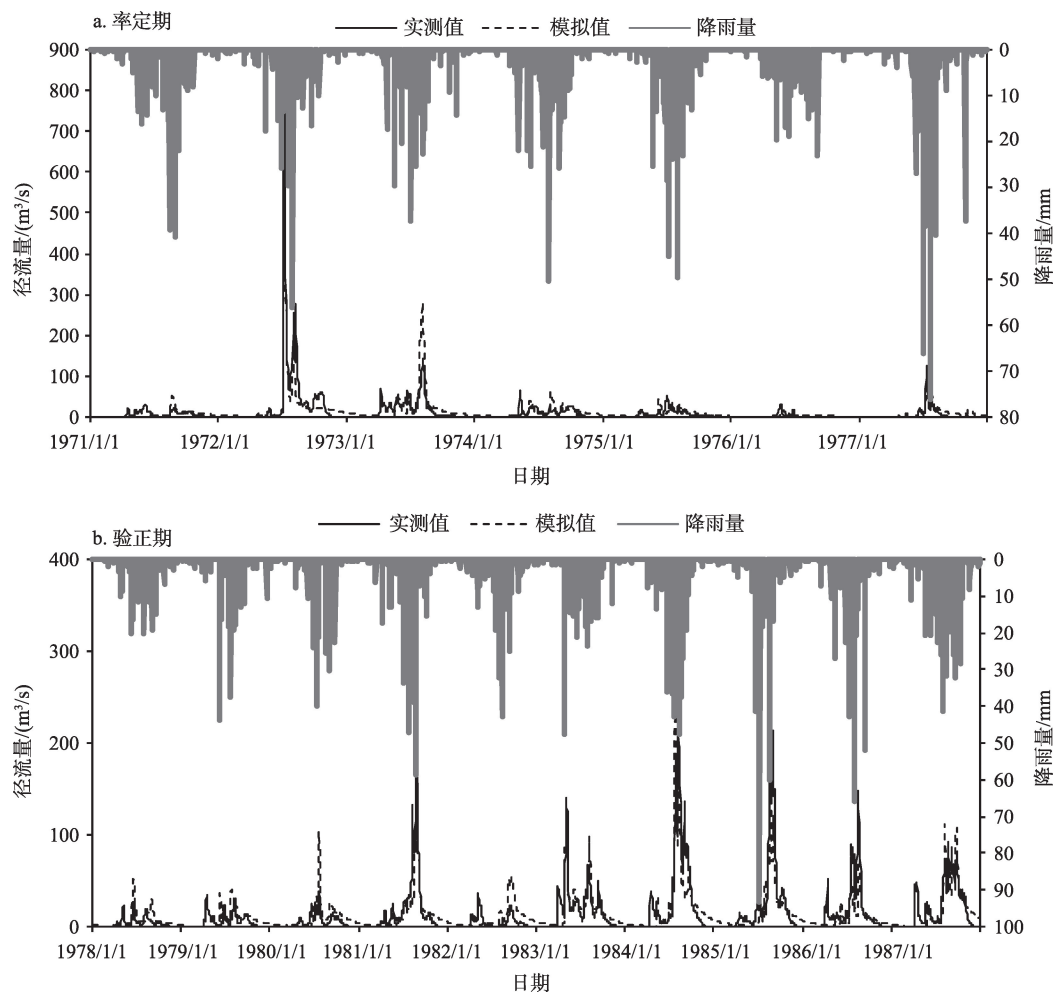


图3 率定期(a)与验证期(b)径流模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison of the simulated and observed water discharges in the calibration (a) and validation (b) periods

表3 乌裕尔河依安站控制流域泥沙模拟结果

Tab.3 Results of sediment simulation of Yi'an Station in the Wuyuer River Basin

模拟时期	NSE			R <sup>2</sup>			VE/%		
	日值	月值	年值	日值	月值	年值	日值	月值	年值
率定期(1971-1977)	0.60	0.77	0.92	0.69	0.88	0.97	-6.93	-7.19	-5.65
验证期(1978-1987)	0.52	0.74	0.82	0.60	0.73	0.90	-14.41	-14.62	-14.40

将流域日模拟结果分别处理为月步长与年步长,发现月步长上泥沙模拟率定期和验证期的NSE分别为0.77和0.74,年步长上率定期和验证期的NSE分别为0.92和0.82,同样符合精度要求。盛美玲等(2015)应用WATEM/SEDEM模型对东北黑土区14个水库控制流域进行了产沙的校正和验证,发现年尺度上NSE达0.91。汤洁等(2014)将SWAT模型应用于辽河支流招苏台河流域的月步长模拟,泥沙模拟NSE在率定期和验证期分别为0.54和0.67。然而,这2个模型均没有实现日步长的模拟,

文中TETIS模型在日步长上NSE可达0.52,月步长上达0.74。因此,与黑土区流域尺度上其他模型模拟对比表明,TETIS模型模拟精度更高。

此外,模型模拟发现,依安水文站控制流域泥沙输移比(SDR)为0.056,说明大量的侵蚀颗粒在到达流域出水口前已经沉积,这与研究区尺度较大及坡度较缓有关。简金世(2011)利用RUSLE模型计算得到依安站控制流域多年平均SDR为0.08;高燕等(2016)利用CSLE模型得到松花江流域SDR与流域面积(A)计算模型为 $SDR=1.25A^{-0.41}$ ,代入本研究区

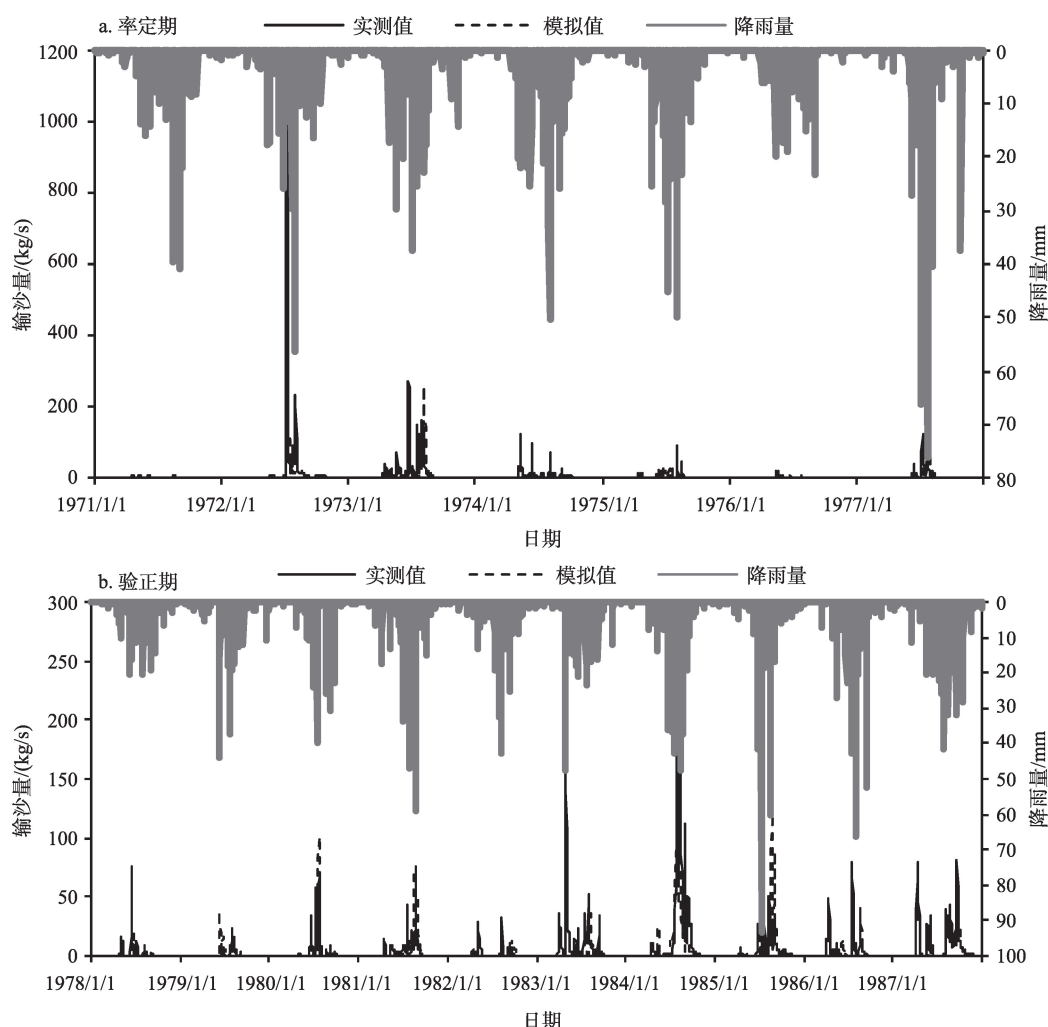


图4 率定期(a)与验证期(b)输沙模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison of the simulated and observed sediment discharges in the calibration (a) and validation (b) periods

流域面积( $7366 \text{ km}^2$ ), 结果为  $0.032$ , 均与本文模型估算结果类似, 再次验证了TETIS模型在东北黑土区泥沙模拟的适用性。

#### 4.2 土壤侵蚀空间特征

TETIS模型可获取各栅格单元上的土壤侵蚀量, 利用软件matlab 8.3将其转换为asc码栅格文件, 在Arcmap中可视化, 并根据1997年水利部颁发的土壤侵蚀强度分布标准, 获取乌裕尔河流域土壤侵蚀强度分布特征(图5a)。结果发现, 乌裕尔河流域平均土壤侵蚀模数为  $397.2 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 已超过东北黑土区允许土壤流失量  $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。盛美玲等(2015)以乌裕尔河流域东南部拜泉县齐心水库控制流域为研究对象, 利用WATEM/SEDAM模型模拟得到该流域侵蚀模数为  $351.2 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ; 在乌裕尔河流域克山县古城小流域, 孟凡影等(2015)基于

GIS技术与RUSLE模型得到流域平均土壤侵蚀模数为  $344.3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 均与本文结果类似。从表4可见, 乌裕尔河流域微度侵蚀和轻度侵蚀所占比例最大。其中微度侵蚀面积为  $4657.92 \text{ km}^2$ , 占流域面积的  $63.23\%$ , 主要分布在流域上中游及下游河道。这是因为流域上游土地利用类型多为林地, 水土保持效应较好, 下游河道主要表现为淤积, 侵蚀强度不高。轻度侵蚀面积为  $2478.96 \text{ km}^2$ , 占流域面积的  $33.65\%$ , 主要分布在河流流经的两侧, 地貌类型多为丘陵及平原区, 适合耕地利用, 土地利用开发程度高, 土壤侵蚀潜力较大。土壤侵蚀面积随着土壤侵蚀强度增大而减小, 中度侵蚀强度以上面积总和为  $229.52 \text{ km}^2$ , 占流域面积不足  $10\%$ , 主要分布在坡度较大的耕地, 这些地区在夏季降雨集中的时期极易发生水土流失。



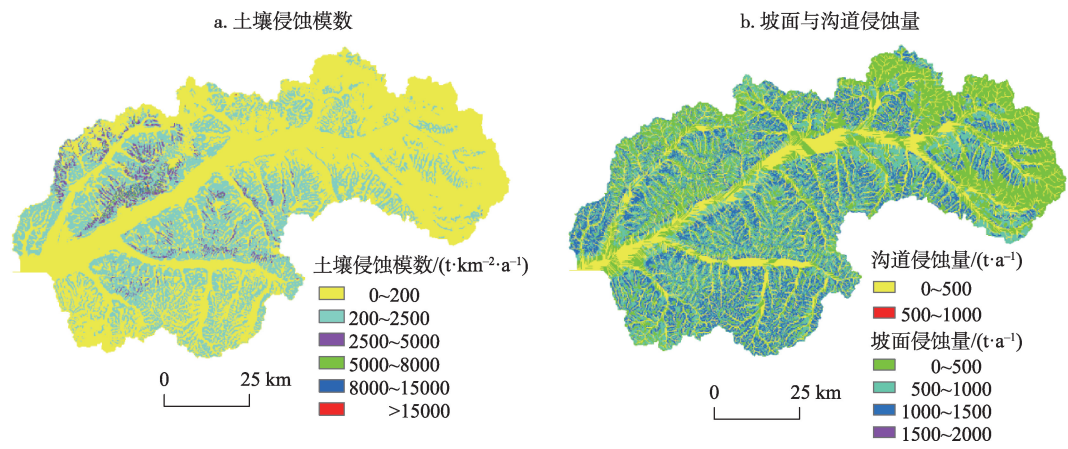


图5 乌裕尔河流域土壤侵蚀模数(a)和坡面与沟道侵蚀量(b)空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution characteristics of soil erosion intensity (a) and hillslope and gully soil erosion amount (b) in the Wuyuer River Basin

图5b显示,乌裕尔河流域以坡面侵蚀为主,坡面侵蚀量占流域总侵蚀量的93.1%,沟道侵蚀仅占流域总侵蚀量的6.9%,这可能是因为沟道侵蚀面积占整个流域面积占比较小。实际上流域内侵蚀沟发育潜力很大,但大尺度上较难反映,小尺度流域能更好地反映沟蚀的分布特征。如王文娟等(2012)在高精度遥感影像和野外调查工作基础上,分析得出乌纳流域侵蚀沟主要是微度和轻度侵蚀,但发展程度剧烈。在研究区齐心水库小流域,沟道产沙量可占流域总产沙的43.9%(Fang, 2015)。本文使用的重采样的DEM可能导致模型对坡面和沟道的判别产生一定影响,例如一个栅格(0.04 km<sup>2</sup>)内可能同时存在坡面和沟道,但模型无法反映单个栅格内的异质性。但总体来看,模型对乌裕尔河流域坡面侵蚀占主导地位的现象把握较好,考虑的沟道侵蚀也有利于提高总侵蚀量的模拟精度。

4.3 土壤侵蚀与坡度的关系

研究区内坡度范围为0°~56°,利用SPSS 22.0对各坡度及对应的土壤侵蚀模数进行相关性分析,

结果表明:该区土壤侵蚀与坡度关系较为密切,相关系数为0.63( $P<0.01$ ),说明坡度是影响土壤侵蚀的重要因素。利用ArcGIS 10.2,参考水利部发布的土壤侵蚀分级标准,将坡度分为5级,获取每一级坡度的平均土壤侵蚀模数(表5)。结果表明,流域侵蚀主要来自占流域总面积85%的0°~5°坡面上,且平均土壤侵蚀模数随坡度的增大而增大。这是因为坡度越大,入渗减少,地表径流增加,径流冲刷能力越为剧烈,土壤流失量越大。然而,5°~8°与8°~15°坡面的土壤侵蚀强度却大于15°~25°坡面上的侵蚀强度,这可能与15°~25°坡面中80%的土地利用类型为林地有关。东北黑土区地形特点是坡缓坡长,在0°~5°坡面上,出现较多沉积,而非侵蚀,因此整个0°~5°坡面的平均土壤侵蚀强度仍小于15°~25°坡面的侵蚀强度。

4.4 土壤侵蚀与土地利用的关系

利用ArcGIS 10.2将乌裕尔河流域土地利用图与土壤侵蚀模数图叠加,得到不同土地利用类型下

表4 乌裕尔河流域土壤侵蚀强度分级

Tab.4 Classification of soil erosion intensity in the Wuyuer River Basin

土壤侵蚀级别	土壤侵蚀强度/[t/(km <sup>2</sup> ·a)]	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
微度	0~200	4657.92	63.23
轻度	200~2500	2478.96	33.65
中度	2500~5000	189.60	2.57
强烈	5000~8000	30.64	0.42
极强烈	8000~15000	8.48	0.12
剧烈	>15000	0.80	0.01

表5 乌裕尔河流域不同坡度的土壤侵蚀特征

Tab.5 Characteristics of soil erosion for different slopes in the Wuyuer River Basin

坡度分级/°	面积 /km <sup>2</sup>	百分比 /%	侵蚀量 /(10 <sup>4</sup> t/a)	平均侵蚀模数 /[t/(km <sup>2</sup> ·a)]
0~5	6262.12	85.01	210.40	335.98
5~8	748.36	10.16	56.35	752.93
8~15	316.20	4.29	23.33	738.05
15~25	38.04	0.52	2.28	599.76
25~35	1.44	0.02	0.15	1054.17
>35	0.28	/	0.09	3307.14
合计	7366.44	/	292.60	397.21



的土壤侵蚀状况(表6)。结果表明,流域内主要土地利用类型为耕地,占流域总面积的63.86%。不同土地利用类型的侵蚀模数差异较大,其大小关系为:耕地>草地>居民用地>林地>未利用土地>水域。其中流域内耕地的土壤侵蚀模数为556.25 t/(km<sup>2</sup>·a)。鄂立思(2015)利用RUSLE模型,得到乌裕尔河流域耕地的平均侵蚀模数为594 t/(km<sup>2</sup>·a);盛美玲等(2015)研究表明,拜泉县齐心水库控制流域0°~3°农田侵蚀模数为592.8 t/(km<sup>2</sup>·a),与表6计算结果差异较小。进一步将耕地与坡度图叠加,发现耕地主要集中在0°~5°的坡度,该坡度范围是坡耕地土壤侵蚀量的主要来源(表7)。然而,平均土壤侵蚀模数随坡度增大而增大,坡度为15°~25°的耕地土壤侵蚀模数高达2508 t/(km<sup>2</sup>·a),属中度侵蚀,是流域治理的重点,应加强水土保持措施的实施。

草地土壤侵蚀模数为241.38 t/(km<sup>2</sup>·a),次于耕地,略高于居民用地,分布于流域中部的少量草地土壤侵蚀模数甚至高于5000 t/(km<sup>2</sup>·a)。利用Arc-GIS提取坡向后,发现此类草地坡面多向阳,植被覆盖度略低于阴坡,导致土壤侵蚀量增大。简金世(2011)研究表明,依安控制站草地平均侵蚀模数为232.95 t/(km<sup>2</sup>·a),再次验证了本文结果的合理性。居民用地由于人类活动较为剧烈,对地表造成扰

动,也导致了一定的水土流失。

林地土壤侵蚀模数较低,为115.62 t/(km<sup>2</sup>·a),说明林地水土保持功能较好,具削减降雨冲刷力、调节地表径流、控制水土流失的作用。王志杰等(2013)利用RUSLE模型得到松花江流域漫川漫岗区农新站控制流域林地土壤侵蚀模数为145.94 t/(km<sup>2</sup>·a),可与本文结果进行参考。但本文研究区林地的土壤侵蚀模数相较东北地区其他研究(张素梅等, 2008; 李雪莹等, 2015)仍有些偏大,这可能是因为部分林地分布在坡度较大的地方,甚至有相当数量的疏林地集中在坡度大于15°的区域。于书霞等(2001)在东北松花湖流域,基于GIS与USLE模型发现,分布在坡度0°~7.5°的林地,土壤侵蚀模数可达155.82 t/(km<sup>2</sup>·a);坡度大于17.5°时,甚至可达1619.66 t/(km<sup>2</sup>·a)。可见,林地的水土保持功能也受地形条件的制约。

模型计算水域仍有部分土壤侵蚀量,这是因为土地利用图中,水域由面状湖泊/塘坝和线状沟道组成,面状水域侵蚀强度为0,线状侵蚀强度较大。子流域尺度上沟道侵蚀可占较大比例(Fang, 2015)。因而,水域总侵蚀强度为44.41 t/(km<sup>2</sup>·a)。总的来看,乌裕尔河流域各土地利用类型中,耕地对应的土壤侵蚀模数最大,尤其是坡度较大的耕地,应作为土壤侵蚀治理的重点。同时,植被覆盖度较低的区域,也应加强水土保持林草措施的推广,降低土壤侵蚀强度。

5 结论与讨论

本文以乌裕尔河流域为研究对象,利用TETIS模型对1971-1987年实测日径流与泥沙数据进行了率定和验证,成功模拟了流域产流产沙特征,得到以下结论:

- (1) TETIS模型在乌裕尔河流域适用性较高,能较好地模拟径流、侵蚀与产沙,与该区其他模型相比,精度更高。
- (2) 乌裕尔河流域的平均侵蚀模数为397.2 t/(km<sup>2</sup>·a),大于东北黑土区允许土壤流失量200 t/(km<sup>2</sup>·a),主要表现为微度与轻度侵蚀,侵蚀类型以面蚀为主。
- (3) 流域内土壤侵蚀与坡度关系密切,土壤侵蚀模数基本上随坡度的增大而增大,0°~5°坡度是流域内侵蚀量的主要来源。

表6 乌裕尔河流域不同土地利用类型的土壤侵蚀特征  
Tab.6 Characteristics of soil erosion for different land use types in the Wuyuer River Basin

土地利用类型	面积 /km <sup>2</sup>	百分比 /%	侵蚀量 /(10 <sup>4</sup> t/a)	平均侵蚀模数 /[t/(km <sup>2</sup> ·a)]
耕地	4704.32	63.86	261.68	556.25
林地	1007.00	13.67	11.64	115.62
草地	352.36	4.78	8.50	241.38
水域	76.56	0.7	0.34	44.41
城乡、工矿、 居民用地	271.20	3.68	5.31	195.73
未利用土地	955.00	12.96	5.13	53.75
总计	7366.44	/	292.60	397.21

表7 乌裕尔河流域不同坡度耕地的土壤侵蚀特征  
Tab.7 Characteristics of soil erosion for arable land of different slopes in the Wuyuer River Basin

坡耕地 坡度/°	面积/km <sup>2</sup>	占耕地面积 百分比/%	侵蚀量/ 10 <sup>4</sup> t	平均侵蚀模数 /(t/(km <sup>2</sup> ·a))
0~5	4207.80	89.52	191.68	455.54
5~8	401.72	8.55	50.09	1247.00
8~15	87.80	1.97	18.31	2085.52
15~24	3.00	0.06	0.75	2508.67

(4) 不同土地类型土壤侵蚀模数大小顺序为:耕地>草地>居民用地>林地>未利用土地>水域。应将坡度较大的耕地和植被覆盖度较低的区域作为流域土壤侵蚀治理的重点。

本文将 TETIS 模型应用于东北黑土区的大尺度流域(>2000 km<sup>2</sup>),模型总体模拟效果令人满意,但模型也存在一些不足。一方面,模型集成的地形土壤文件提高了模型校正过程的效率,但针对大尺度流域,需要适当降低 DEM 分辨率,才能使模型计算时间在可接受范围内。降低 DEM 分辨率的过程可能使部分地形信息丢失,导致使沟道估计的误差增大等。因此,如要更好地区分坡面/沟道侵蚀, TETIS 模型可能更适用于具有典型沟蚀特征的中小尺度(<2000 km<sup>2</sup>,甚至<100 km<sup>2</sup>)流域;针对大尺度流域, TETIS 模型在整体上模拟效果好,但可能不能完全准确地反映坡沟侵蚀关系,且需要在 DEM 分辨率和模型运算时间之间找到平衡点。另一方面,模型根据集水面积临界值划分坡面和沟道,但沟道形成还与坡度有关,这一点在未来模型版本中也应有待改进。本文初步探讨了 TETIS 模型在黑土区的应用,既可为揭示黑土区土壤侵蚀机理提供参考,也可为该模型在黑土区其他流域的应用提供依据,并为水土保持治理及效益评价提供模型工具。

#### 参考文献(References)

- 陈云明, 刘国彬, 郑粉莉, 等. 2004. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持研究, 11(4): 80-83. [Chen Y M, Liu G B, Zheng F L, et al. 2004. Proceeding and application on soil erosion model of RUSLE[J]. Research of Soil and Water Conservation, 11(4): 80-83.]
- 崔明, 张旭东, 蔡强国, 等. 2008. 东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J]. 地理研究, 27(3): 527-535. [Cui M, Zhang X D, Cai Q G, et al. 2008. Relationship between black soil development and climate change and geomorphological evolution in Northeast China[J]. Geographical Research, 27(3): 527-535.]
- 鄂立思. 2015. 乌裕尔河流域土壤侵蚀时空分布特征及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学. [E L S. 2015. Study on spatial temporal patterns and contributory factors of soil erosion in Wuyur River basin[D]. Harbin, China: Harbin Normal University.]
- 鄂立思, 孙丽, 李苗, 等. 2015. 基于 GIS 和 RUSLE 乌裕尔河流域土壤侵蚀定量评价[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学

- 报, 31(2): 154-158. [E L S, Sun L, Li M, et al. 2015. Quantitative assessment of soil erosion in Wuyuer River basin based on GIS and RUSLE[J]. Natural Sciences Journal of Harbin Normal University, 31(2): 154-158.]
- 方海燕, 蔡强国, 李秋艳. 2009. 东北典型黑土区乌裕尔河中游泥沙输移月年时间尺度特征[J]. 泥沙研究, (2): 16-21. [Fang H Y, Cai Q G, Li Q Y. 2009. Sediment transport characteristics at the monthly and yearly scales in mid-stream of Wuyuer River in the typical black soil region of Northeastern China[J]. Journal of Sediment Research, (2): 16-21.]
- 高燕, 张延玲, 焦剑, 等. 2016. 松花江流域不同空间尺度典型流域泥沙输移比及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 14(1): 21-27. [Gao Y, Zhang Y L, Jiao J, et al. 2016. Sediment delivery ratios of typical watersheds on different spatial scales in Songhua River basin and its affecting factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 14(1): 21-27.]
- 高玉芳, 陈耀登, 蒋义芳, 等. 2015. DEM 数据源及分辨率对 HEC-HMS 水文模拟的影响[J]. 水科学进展, 26(5): 624-630. [Gao Y F, Chen Y D, Jiang Y F, et al. 2015. Effects of DEM source and resolution on the HEC-HMS hydrological simulation[J]. Advances in Water Science, 26(5): 624-630.]
- 胡刚, 宋慧, 刘宝元, 等. 2015. 黑土区基准坡长和 LS 算法对地形因子的影响[J]. 农业工程学报, 31(3): 166-173. [Hu G, Song H, Liu B Y, et al. 2015. Effects of both slope length of standard plot and algorithms of LS on calculated values of topography factor (LS) in black soil areas in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(3): 166-173.]
- 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 2006. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. 地理科学, 26(4): 449-454. [Hu G, Wu Y Q, Liu B Y, et al. 2006. Geomorphic threshold model for ephemeral gully incision in rolling hills with black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 26(4): 449-454.]
- 简金世. 2011. 松花江流域不同侵蚀类型区泥沙输移比的估算[D]. 杨凌: 西北农林科技大学. [Jian J S. 2011. Estimation of sediment delivery ratio in different soil erosion regions in the Songhua River Basin[D]. Yangling, China: Northwest A&F University.]
- 雷廷武, 李法虎. 2012. 水土保持学[M]. 北京: 中国农业大学出版社. [Lei T W, Li F H. 2012. Soil and water conservation[M]. Beijing, China: China Agricultural University Press.]

- 李百安. 2015. 基于USLE模型的吉林梨树县土壤侵蚀现状初步分析[D]. 长春: 东北师范大学. [Li B A. 2015. A preliminary analysis of the current situation of soil erosion in Lishu County of Jilin based on USLE model[D]. Changchun, China: Northeast Normal University.]
- 李浩. 2012. 黑土区典型小流域水土流失演变与输移特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学. [Li H. 2012. Evolvement of soil erosion and sediment transport in typical black soil small watershed[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 李雪莹, 杨俊, 温海明, 等. 2015. 基于RUSLE模型的土壤侵蚀量估算: 以辽宁省阜新市为例[J]. 水土保持通报, 35(1): 199-204. [Li X Y, Yang J, Wen H M, et al. 2015. Estimation of soil erosion amount based on RUSLE model: A case study in Fuxin City of Liaoning Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 35(1): 199-204.]
- 刘远利. 2010. 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. [Liu Y L. 2010. Assessment on WEPP Model (hillslope version) applicability to the black soil region in Northeast China[D]. Yangling, China: Northwest A&F University.]
- 马丽娟, 秦大河. 2012. 1957-2009年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土, 34(1): 1-11. [Ma L J, Qin D H. 2012. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957-2009[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 34(1): 1-11.]
- 孟凡影, 付伟涛, 杨欢, 等. 2015. 基于GIS技术的古城小流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 22(5): 9-13. [Meng F Y, Fu W T, Yang H, et al. 2015. GIS-based research of soil erosion in Gucheng small watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 22(5): 9-13.]
- 盛美玲, 方海燕. 2014. WaTEM/SEDEM模型及其应用研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 33(1): 85-91. [Sheng M L, Fang H Y. 2014. Research progress in WaTEM/SEDEM model and its application prospect[J]. Progress in Geography, 33(1): 85-91.]
- 盛美玲, 方海燕, 郭敏. 2015. 东北黑土区小流域侵蚀产沙WaTEM/SEDEM模型模拟[J]. 资源科学, 37(4): 815-822. [Sheng M L, Fang H Y, Guo M. 2015. Modeling soil erosion and sediment yield using WaTEM/SEDEM model for the black soil region of Northeast China[J]. Resources Science, 37(4): 815-822.]
- 仕玉治. 2011. 气候变化及人类活动对流域水资源的影响及实例研究[D]. 大连: 大连理工大学. [Shi Y Z. 2011. The influence of climate change and human activities on basin water resources and cases study[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology.]
- 汤洁, 张爱丽, 侯克怡, 等. 2014. 辽河重污染支流招苏台河径流和泥沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 21(2): 111-115. [Tang J, Zhang A L, Hou K Y, et al. 2014. The simulation of runoff and sediment in heavy polluted tributary in Liaohe-Zhaosutai River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 21(2): 111-115.]
- 唐克丽. 2004. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社. [Tang K L. 2004. Zhongguo shuitu baochi[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 王文娟, 张树文, 方海燕. 2012. 东北典型黑土区坡沟侵蚀耦合关系[J]. 自然资源学报, 27(12): 2113-2122. [Wang W J, Zhang S W, Fang H Y. 2012. Coupling mechanism of slope-gully erosion in typical black soil area of Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 27(12): 2113-2122.]
- 王志杰, 简金世, 焦菊英, 等. 2013. 基于RUSLE的松花江流域不同侵蚀类型区泥沙输移比估算[J]. 水土保持研究, 20(5): 50-56. [Wang Z J, Jian J S, Jiao J Y, et al. 2013. Estimation of sediment delivery ratio in different soil erosion regions in the Songhua River basin based on RUSLE[J]. Research of Soil and Water Conservation, 20(5): 50-56.]
- 魏建兵, 肖笃宁, 李秀珍, 等. 2006. 东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系[J]. 生态学报, 26(8): 2608-2615. [Wei J B, Xiao D N, Li X Z, et al. 2006. Relationship between landscape pattern and soil erosion of an agricultural watershed in the mollisols region of Northeastern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 26(8): 2608-2615.]
- 魏守才. 2015. 水土流失对黑土坡耕地土壤有机碳的影响[D]. 北京: 中国科学院大学. [Wei S C. 2015. Effect of soil erosion on soil organic carbon on sloping field of Black Soil area in Northeast China[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 吴发启, 张洪江. 2012. 土壤侵蚀学[M]. 北京: 科学出版社. [Wu F Q, Zhang H J. 2012. Turang qinshi xue[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 于书霞, 王宁, 朱颜明, 等. 2001. 基于地理信息系统的土壤侵蚀研究[J]. 水土保持通报, 21(3): 20-23. [Yu S X, Wang N, Zhu Y M, et al. 2001. Applications of GIS in soil erosion research[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 21(3): 20-23.]
- 张爱静. 2013. 东北地区流域径流对气候变化与人类活动的响应特征研究[D]. 大连: 大连理工大学. [Zhang A J. 2013. Research on the streamflow responses to climate



- variability and human activities in Northeast China[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology.]
- 张素梅, 王宗明, 闫百兴, 等. 2008. 辉发河流域景观格局与土壤侵蚀的关系研究[J]. 水土保持学报, 22(3): 29-35. [Zhang S M, Wang Z M, Yan B X, et al. 2008. Relationship between landscape pattern and soil erosion of Huifa River watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 22(3): 29-35.]
- 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 2006. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理科学, 26(6): 687-692. [Zhang X P, Liang A Z, Shen Y, et al. 2006. Erosion characteristics of black soils in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 26(6): 687-692.]
- Buendia C, Bussi G, Tuset J, et al. 2016. Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment[J]. Science of the Total Environment, 540: 144-157.
- Bussi G, Francés F, Horel E, et al. 2014. Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment[J]. Journal of Soils and Sediments, 14(12): 1921-1937.
- Bussi G, Francés F, Montoya J J, et al. 2014. Distributed sediment yield modelling: Importance of initial sediment conditions[J]. Environmental Modelling & Software, 58: 58-70.
- Bussi G, Rodríguez-Lloveras X, Francés F, et al. 2013. Sediment yield model implementation based on check dam infill stratigraphy in a semiarid Mediterranean catchment [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 17(8): 3339-3354.
- Coccia G, Todini E. 2011. Recent developments in predictive uncertainty assessment based on the model conditional processor approach[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 15(10): 3253-3274.
- Engelund F, Hansen E. 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams[R]. Hydraulic Engineering Reports. Copenhagen, Denmark: TEKNISKFORLAG: 699-703.
- Fang H Y. 2015. Temporal variations of sediment source from a reservoir catchment in the black soil region, Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 153: 59-65.
- Fang H Y. 2016. Impact of land use change and dam construction on soil erosion and sediment yield in the black soil region, Northeastern China[J]. Land Degradation & Development, doi: 10.1002/ldr.2677.
- Francés F, Vélez J I, Vélez J J. 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models[J]. Journal of Hydrology, 332(1-2): 226-240.
- Kilinc M, Richardson E V. 1973. Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall[R]. Hydrology Paper No. 63. Fort Collins, CO: Colorado State University.
- Kim K B, Han D W. 2016. Exploration of sub-annual calibration schemes of hydrological models[J]. Hydrology Research, 47(6): doi: 10.2166/nh.2016.296.
- Le Lay M, Galle S. 2005. How changing rainfall regimes may affect the water balance: A modelling approach in West Africa[C]//Franks S, Wagener T, Bogh E, et al. Regional hydrological impacts of climatic change: Hydroclimatic variability: Proceedings. Wallingford: AISH: 203-210.
- Leopold L B, Maddock Jr T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications[R]. Geological Survey Professional Paper 252. Washington, DC: United States Government Printing Office.
- Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 50(3): 885-900.
- Rodríguez-Lloveras X, Bussi G, Francés F, et al. 2015. Patterns of runoff and sediment production in response to land-use changes in an ungauged Mediterranean catchment [J]. Journal of Hydrology, 531: 1054-1066.
- Rodríguez-Lloveras X, Buytaert W, Benito G. 2016. Land use can offset climate change induced increases in erosion in Mediterranean watersheds[J]. Catena, 143: 244-255.
- Ruiz-Villanueva V, Stoffel M, Bussi G, et al. 2015. Climate change impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century: Model results and implications[J]. Regional Environmental Change, 15(3): 505-515.
- Sánchez R R. 2002. GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED[D]. Fort Collins, US: Colorado State University.
- Salazar S, Francés F, Komma J, et al. 2012. A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of "retaining water in the landscape" in different European hydro-climatic regions[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 12(11): 3287-3306.
- Seibert J, Vis M J P. 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software

- package[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 16(9): 3315-3325.
- Sharply A N, Williams J R. 1990. EPIC-erosion/productivity impact calculator: Model documentation[M]. Beltsville, MD: US Department of Agriculture Technical Bulletin: 1768.
- Shrestha R, Tachikawa Y, Takara K. 2006. Input data resolution analysis for distributed hydrological modeling[J]. Journal of Hydrology, 319(1-4): 36-50.
- Wang W J, Qiu L, Zu Y G, et al. 2011. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China. Global Change Biology, 17(8): 2657-2676.
- Wood E F, Sivapalan M, Beven K, et al. 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling[J]. Journal of Hydrology, 102(1-4): 29-47.
- Woods R, Sivapalan M, Duncan M. 1995. Investigating the representative elementary area concept: An approach based on field data[J]. Hydrological Processes, 9(3-4): 291-312.
- Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. 2007. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s[J]. Global Change Biology, 13(9): 1989-2007.

## Simulation of runoff, soil erosion, and sediment yield using the TETIS model in the Wuyuer River Basin of the black soil region, Northeast China

LI Zhiying<sup>1,2</sup>, FANG Haiyan<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics of soil erosion in a basin and explore the applicability of the TETIS model for simulating runoff and sediment yield in the black soil region of Northeast China, the Wuyuer River Basin was taken as an example in this study. Daily runoff and sediment discharge data series from 1971 to 1987 were used to calibrate and validate the TETIS model. On this basis, characteristics of soil erosion intensity and their relationships with slope and land use types in the basin were analyzed. The results show that the TETIS model has good applicability in the Wuyuer River Basin. Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of daily discharge and sediment ranged from 0.52 to 0.70, coefficients of determination ranged from 0.60 to 0.71, and volume errors were no more than 15%. Average soil erosion intensity was 397.2 t/(km<sup>2</sup>·a) in the basin. Slight erosion and light erosion were the dominant soil erosion types and about 90% of sediment yield was from hillslope. Average erosion intensity increased with increasing slope gradients. Slopes of 0°~5° were the main erosion area in the basin. Different land use types have different soil erosion intensities and arable land has the highest value (556.3 t/(km<sup>2</sup>·a)). Priority of erosion control should focus on the arable lands with steep slopes and low vegetation covered regions. Comparison of these simulation results with other study results in the black soil region of Northeast China demonstrates a promising future of the TETIS model for simulating runoff and sediment yields in the region. This study may provide a scientific basis for the implementation of soil and water conservation measures in the study area.

**Key words:** TETIS model; black soil region of Northeast China; Wuyuer River Basin; soil erosion simulation