

区域尺度侵蚀产沙估算方法研究

姚志宏^{1,2}, 杨勤科^{1†}, 吴喆³, 崔琰¹

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 2. 中国科学院研究生院, 100039, 北京;
3. 西北大学城市与资源学系, 710069, 西安)

摘要 区域土壤侵蚀模型是大区域土壤侵蚀普查和水土保持宏观决策的支持工具, 土壤侵蚀模型的研发是土壤侵蚀学科的前沿领域。基于 DEM 将区域划分为规则网格, 设计产流、产沙过程的单元模型, 包括植被截留、入渗、填洼、流速、携沙能力、径流剥蚀量、泥沙沉积等算法。将月降水当作 1 次降雨事件, 并划分若干时段进行迭代计算, 利用 GIS 空间分析功能完成水沙汇集运算, 并在 ArcGIS 支持下进行计算机程序设计, 有效地完成了区域侵蚀产沙量的计算。将模型应用于延河流域得到: 1995 年 7 月份平均径流深为 35.6 mm, 径流系数为 0.237, 流域出口径流量为 2.72 亿 m³, 流域出口输沙量为 0.38 亿 t, 流域平均侵蚀模数为 4 575 t/(km²·月); 输出图形空间格局和结构符合实际情况, 初步模拟结果令人较满意。

关键词 区域尺度; 土壤侵蚀模型; 侵蚀产沙; 程序设计

Calculation of soil erosion and sediment yield at the regional scale

Yao Zhihong^{1,2}, Yang Qinke¹, Wu Zhe³, Cui Yan¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 100039, Beijing;
3. Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University, 710069, Xi'an: China)

Abstract Regional soil erosion model is a effective tool for regional soil erosion survey and policy-making of soil and water conservation. The development of soil erosion model is one of the hot issues in soil erosion prediction. Based on DEM the study region was divided into regular cells and models for runoff and sediment processes were designed. The sub-processes of interception, infiltration, surface storage, flow velocity, transport capacity, detachment, and deposition were considered in the regional soil erosion model. The monthly precipitation was assumed as one single rainfall event and divided into several periods, which were input for model operation. Accumulation of runoff and sediment among units was calculated by means of spatial analytic function of GIS. The regional runoff and sediment yield were calculated under the help of the computer program which developed on the tools of ArcGIS. The model was applied in Yanhe River watershed and the results showed that the simulated average runoff depth, runoff coefficient, and runoff volume were 35.6 mm, 0.237, and 272 million m³ respectively. The simulated sediment amount was 38 million tons and the average erosion modulus was 4 574 t/(km²·month). The spatial distribution of soil erosion was close to the real situation. In general, the simulated results were satisfied and can be used for regional soil erosion prediction.

收稿日期: 2007-01-11 修回日期: 2007-04-03

项目名称: 国家 973 研究项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB407204); 黄河水利委员会治黄专项“黄土高原水土保持遥感监测关键技术研究”(2004SZ-01)

第一作者简介: 姚志宏(1970—), 女, 在读硕士生。主要研究方向: 基于 GIS 的区域水土流失定量评价。E-mail: yaozhih04@mails.gucas.ac.cn

† 责任作者简介: 杨勤科(1962—), 男, 研究员, 博士。主要研究方向: 区域水土流失定量评价和 GIS 应用。E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn

Key words regional scale; soil erosion model; erosion and sediment yield; programming

土壤侵蚀模型是定量评价土壤侵蚀强度,进行土地资源合理利用和水土保持规划的科学工具。长期以来,侵蚀模型的研究主要集中在小区、坡面、小流域尺度上^[1-4],注重侵蚀机制与过程的研究,而对基于土壤侵蚀过程的(产流、产沙、水沙物质的传输与汇集)的区域土壤侵蚀模型的研究较薄弱。我国目前对区域土壤侵蚀模型的研究仅是基于统计方法的初步探索^[5-6],尚未建立适用于全国的能直接应用于水土保持执法、水土保持规划和水土流失治理效益评价的侵蚀预报模型。笔者在前面区域尺度降水径流估算研究^[7]的基础上,完成产沙、水沙物质的传输和汇集计算,反映土壤侵蚀的“剥蚀—搬运—沉积”这一完整过程和复杂关系,以期为区域尺度土壤侵蚀模型研究奠定基础,用于区域月降雨产流产沙的预报,为区域水土保持和环境问题的宏观决策提供支持。

1 资料与方法

1.1 基础资料与处理

研究应用的主要资料有:1)数据高程模型 DEM,从 1:5 万地形图生成,分辨率 25 m,从陕西省基础地理信息中心购买。2)降水,为延河流域各水文观测站点的 1995 年实测数据通过处理而成的逐月降水总量(表面),栅格 100 m。利用 CliGen 模型求取日降水量和降水历时,用以得到降水强度及其衰减特征(技术衰减系数初步计算结果为 0.4)。3)实测土壤入渗过程和稳定入渗速率,并在 GIS 支持下插值得到稳定入渗速率表面,分辨率 100 m。4)土地利用图(1:10 万),该图基于 30 m 分辨率的 TM 遥感影像经计算机辅助分类而来。5)叶面积指数,土壤侵蚀的发生在很大程度上取决于植被的好坏,叶面积指数是常用于描述植被覆盖情况的指数,降雨过程中植被对降水的最大截留量与植被的叶面积指数相关,而叶面积指数与近红外光和红光的比率相关^[8-10],利用遥感影像图提取近红外光和红光的比率,根据不同土地利用类型的叶面积指数与提取的近红外光和红光的比率的关系,得到研究区域叶面积指数,用于计算植被截流量。6)抗冲系数,利用原状土抗冲槽法野外试验测定,并在 GIS 支持下插值得到抗冲系数表面,分辨率 100 m^[11]。

1.2 研究方法

基于区域水土流失过程,以 DEM 的栅格为基

础,将研究区域划分为规则单网格,并以此为基本计算单元。单元格大小的确定以 DEM 和遥感影像的分辨率为参照,并兼顾实际运算的方便。在时间尺度上将每月的降水作为 1 场降雨来考虑,将各月降雨过程分时段(分钟)加以描述。基于坡面水文过程对每个单元分时段计算其径流和侵蚀产沙过程的各个环节,包括降雨过程、植被截留、入渗、微洼地存储、地表径流量、径流流速及其相应的携沙能力、径流的剥蚀,泥沙沉积等。然后根据水沙平衡原理,计算出任一单元格任一时段末的径流泥沙量,并在 GIS 支持下,通过对单元之间径流泥沙汇集进行计算,完成区域(或流域)土壤侵蚀的估算。模型是在 ARC/INFO 环境下,将 ArcObjects 组件嵌入到 Microsoft Visual C# 语言中进行开发,形成基于“.net”框架下的应用程序。输入必要的参数,将月降水作为 1 个降雨事件,通过分步迭代计算,模拟区域任一单元格、任何时间段径流和泥沙量及其动态过程。运用 ArcObjects 中所提供的命令(flowaccumulation)来实现径流、泥沙汇流计算。

2 计算过程

2.1 径流计算

采用文献[7]中的方法,计算各单元格每计算时段内的降雨径流深 h_{sj} 和径流量 W_{pj} ,时段内流出单元格的径流量 W_{ij} ,时段末的总径流深 h_{xj} 和径流量 W_j ,在此基础上计算时段末的流速和相应的携沙能力。

2.1.1 流速计算 由曼宁公式计算时段末径流出流速度 v_j 。

$$v_j = \frac{1}{n} J^{1/2} h_{xj}^{2/3}$$

式中: h_{xj} 为 j 时段末单元格的径流深, m; n 为曼宁系数(量纲为 1),根据单元土地利用类型的不同选取值(表 1)^[12]; J 为坡度比降, $J = \tan \alpha$, α 为坡度, ($^\circ$)。

2.1.2 携沙能力计算 时段末携沙能力的计算公式^[13]为:

$$T_{ej} = 2650c(v_j \alpha \times 100 - 0.4)^d$$

$$c = [(D_{50} + 5)/0.32]^{-0.6}$$

$$d = [(D_{50} + 5)/300]^{0.25}$$

式中: T_{ej} 为水流携沙能力, kg/m^3 ; α 为坡度, %; D_{50} 为泥沙中值粒径, μm ; c 、 d 为系数。

表 1 曼宁糙率系数
Tab.1 Roughness coefficient (Manning's n)

土地利用	n
居民地及交通用地	0.01
果园	0.12
低覆盖度草地	0.15
高覆盖度草地	0.24
荒草坡	0.13
灌木林	0.40
乔木林	0.80
坡耕地	0.17
休耕地(没有残茬)	0.05

2.2 侵蚀产沙过程计算

在降雨过程中,区域内任意单元格中的径流、侵蚀产沙是一个动态的过程,时段内单元格由于降雨会产生新的径流和剥蚀,要向它的下一级单元流出一部分,还会接收它上一级单元流入的部分,对于泥沙来说还可能发生沉积。

2.2.1 径流剥蚀 对于区域水土流失模型来说,其计算单元较大,同时其功能重在宏观特征的反映,所以忽略雨滴贱蚀,侵蚀产沙只考虑径流的剥蚀作用。同时考虑到区域土壤侵蚀过程的空间分异性明显,存在侵蚀—输移—产沙的复杂组合,选择具有宏观性的侵蚀因子抗冲系数计算侵蚀产沙,能够宏观地反映区域内某一空间单元的侵蚀特性。时段内降雨径流剥蚀量为

$$E_{fj} = (W_{pj} / K_s) t$$

式中: E_{fj} 为j时段内降雨径流剥蚀量,kg; W_{pj} 为j时段单元产流量, m^3 ; K_s 为抗冲系数, $m^3 \cdot min/kg$; t 为时间步长,min。

2.2.2 时段内流出的泥沙量 时段内从当前单元格向它相邻的下一单元格流出的物质质量,在文献[7]径流计算中已经计算出时段内单元格流出的径流量 W_{lj} 。

当 $C_{j-1} \geq T_{c(j-1)}$ 时(C_{j-1} 、 $T_{c(j-1)}$ 分别为上一时段末单元格中的泥沙含量和携沙能力),以 $T_{c(j-1)}$ 的含沙量流出水沙,则 j 时段内流出单元格的泥沙量为

$$E_{lj} = \left(W_{lj} + \frac{E_{fj}}{2650} \right) T_{c(j-1)}$$

可得到 $E_{lj} = T_{c(j-1)} W_{lj} \frac{2650}{2650 - T_{c(j-1)}}$

式中: E_{lj} 为j时段内流出单元格的泥沙量,kg;

$T_{c(j-1)}$ 为上一时段末单元格的携沙能力, kg/m^3 ; W_{lj} 为j时段内单元格流出的径流量, m^3 。

同理,当 $C_{j-1} < T_{c(j-1)}$ 时,以 C_{j-1} 的含沙量流出,j时段内流出单元格的泥沙量为

$$E_{lj} = C_{j-1} W_{lj} \frac{2650}{2650 - C_{j-1}}$$

2.2.3 时段汇入的泥沙量 每个单元格时段内汇入的泥沙量(E_{hj})就是它上一级单元格流出泥沙量,为此,先确定水沙汇集流向。根据 DEM,先用 Fill 命令进行填洼,再用 Flow direction 命令提取流向。

时段内汇入的泥沙量是仅限于单元格周围一定范围内其他单元格对其贡献的泥沙,程序中采用栅格格网遍历运算。格网遍历是指在运算时读取每一张栅格图像,然后运用游标遍历栅格图像的每一个基本单元格,得到该单元格的值后经过运算求得新图层相应单元格的值,从而生成结果图像。计算时使用游标遍历栅格图像,通过读取每一个单元格的流向和流出量,判断流向所指向的单元格,并把流出量的值赋给这个单元格,用同样的方法处理每一个单元格,如果有多个单元格指向同一处,那么该处的值就是多个单元格流出量的累加。遍历完整张栅格后所产生的新图层就是所求的从相邻单元格汇入当前单元格的泥沙量(计算时段内汇入的径流量方法相同)。如图 1 所示,wl 是时段内单元格流出量,dir 是流向数据,wh 是由流向数据和流出量计算得出的汇入量。

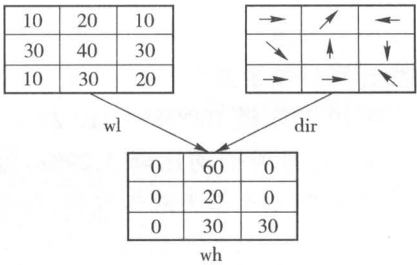


图 1 时段内汇流示意图

Fig.1 Sketch map of flow collection in the time interval

2.2.4 泥沙沉积 时段内泥沙沉积可用以下公式[14]计算:

$$E_{pj} = (C_{j-1} - T_{c(j-1)}) v_s w l$$

式中: E_{pj} 为j时段内泥沙沉积量,kg; v_s 为泥沙沉降速度,m/s,用 Stocks 理论公式[15]计算; w 为径流宽,等于单元格尺寸; l 为单元格内的流程长,等于单元格尺寸。

$$v_s = \frac{gd^2(r_s - r)}{18\mu}$$

式中: g 为重力加速度; d 为泥沙粒径, 取中值粒径 D_{50} ; μ 为水动力黏滞系数; r_s 为泥沙密度; r 为流体密度。

2.2.5 时段末单元格径流中的泥沙总量 设上一时段末单元格中滞留的泥沙量为 E_{j-1} , 利用以上计算结果, 基于泥沙平衡原理, 得到时段末单元格径流中的泥沙总量

$$E_j = E_{j-1} + E_{tj} + E_{hj} - E_{lj} - E_{pj}$$

式中: E_j 为 j 时段末单元格中的泥沙总量, kg; E_{j-1} 为上一时段末单元格中滞留的泥沙量, kg。

由此得到, 时段末单元格径流中泥沙含量为

$$C_j = E_j / [(E_j / 2650) + W_j]$$

式中 C_j 为 j 时段末单元格径流中泥沙含量, kg/m³。

利用参考文献[7]中径流过程和以上泥沙过程的算法对区域内任意单元格按时段进行迭代计算,

可以计算出任意时段末单元格的径流、泥沙总量及径流泥沙过程。

2.3 径流泥沙汇集

降雨时段末的径流泥沙总是要汇集到流域出口, 这可通过 ArcObjects 中所提供的命令 (flowaccumulation) 来实现, 该命令是在考虑汇流时间无限长的前提下进行的, 最后的结果是整个流域的径流泥沙都汇集到出口。其基本原理如图 2 所示, 其中 S_1 为表面的初始值, S_2 为根据 DEM 确定的径流流向表面, S_3 是流水线上方各单元汇集到每个栅格中的单元数, S_4 是 S_1 与 S_3 的和^[16]。用作汇流的初始表面为降雨时间末单元格的径流、泥沙总量, 通过汇流计算可得到流域出口径流量、输沙量, 进而计算出流域的径流模数和输沙模数。

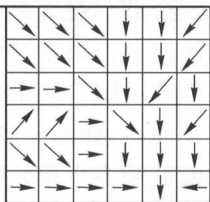
输入径流表面 (S_1)	水流方向 (图) (S_2)	汇流计算输出表面 (S_3)	总径流量表面 (S_4)																																																																																																												
<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>3</td><td>7</td><td>5</td><td>4</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>20</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>24</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>2</td><td>4</td><td>7</td><td>35</td><td>1</td></tr></table>	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	0	0	3	7	5	4	0	0	0	0	0	20	1	0	0	0	1	24	1	0	2	4	7	35	1	<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>4</td><td>8</td><td>6</td><td>5</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>21</td><td>2</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>25</td><td>2</td></tr><tr><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>8</td><td>36</td><td>2</td></tr></table>	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	1	1	4	8	6	5	1	1	1	1	1	21	2	1	1	1	2	25	2	1	3	5	8	36	2
1	1	1	1	1	1																																																																																																										
1	1	1	1	1	1																																																																																																										
1	1	1	1	1	1																																																																																																										
1	1	1	1	1	1																																																																																																										
1	1	1	1	1	1																																																																																																										
1	1	1	1	1	1																																																																																																										
0	0	0	0	0	0																																																																																																										
0	1	1	2	2	0																																																																																																										
0	3	7	5	4	0																																																																																																										
0	0	0	0	20	1																																																																																																										
0	0	0	1	24	1																																																																																																										
0	2	4	7	35	1																																																																																																										
1	1	1	1	1	1																																																																																																										
1	2	2	3	3	1																																																																																																										
1	4	8	6	5	1																																																																																																										
1	1	1	1	21	2																																																																																																										
1	1	1	2	25	2																																																																																																										
1	3	5	8	36	2																																																																																																										

图 2 汇流原理

Fig.2 Principle of collection

3 模型的应用

3.1 应用区域概况

选择延河流域为研究区域。延河是黄河右岸、中游区上段的河口镇至龙门段的一级支流, 位于北纬 36°21' ~ 37°19' 和东经 108°38' ~ 110°29' 之间, 延河干流全长 284 km, 河道平均比降 3.29‰, 流域面积 7 725 km², 属于温暖半干旱大陆性气候, 年平均气温 9.3 ℃, 无霜期 180 d。多年平均降雨量 511 mm, 年降雨量主要集中在 6—9 月份, 降雨在流域上的分布从南到北有所增加; 径流随降雨而形成, 基本与降雨同步。流域内黄土丘陵沟壑面积占全流域面积的 90%, 地形破碎。植被多为草地和灌木丛, 中下游地区分布有油松林和阔叶林; 土地利用类型主要有坡耕地、川台地、林地、果园、草地和水域。

3.2 模拟的结果与分析

以延河流域 1995 年 7 月 (月降水量 151 mm, 占全年降水总量 42%) 为例, 在 DEM (25 m 分辨率) 基础上, 考虑计算的方便重新采样为 50 m × 50 m 网格, 将各月降雨过程分时段 (60 min) 进行模拟计算,

模拟得到 1995 年 7 月份径流和侵蚀的动态过程, 其中流域平均径流深为 35.6 mm, 径流系数为 0.237, 流域出口径流量为 2.72 亿 m³, 流域出口输沙量为 0.38 亿 t, 流域平均侵蚀模数为 4 575 t/(km²·月)。结果表明, 模型可以大体反映流域侵蚀特征, 输出的图形空间格局和结构符合实际情况, 宏观上主要受土地利用和气候特征影响, 微观上主要受地形起伏影响。根据中华人民共和国水利部 2000 年发布的《中国河流泥沙公报》显示, 延河流域甘谷驿站多年平均径流量为 2.14 亿 m³, 多年平均输沙量为 0.465 6 亿 t, 因此, 初步计算结果令人较满意。

4 结论与讨论

在区域尺度上, 虽然土壤侵蚀过程的空间分异性明显, 存在侵蚀—输移—产沙的复杂组合, 但是, 将土壤侵蚀过程概化为产流产沙过程, 水沙物质汇集、传输过程和水土流失治理过程, 对相关的降水、植被截留、入渗、地表径流、径流剥蚀、沉积和径流、泥沙汇集等进行描述, 开发区域尺度土壤侵蚀模型是可能的。本研究就是基于区域土壤侵蚀过程, 对

相关的产流产沙过程,水沙物质的汇集过程进行计算,为区域尺度土壤侵蚀模型的建立奠定了基础;充分利用GIS的功能,不仅能够反映区域尺度径流泥沙的动态过程,而且对时段内水沙物质传输和汇集的计算进行了新的尝试,有效地完成区域土壤侵蚀过程的估算。

着眼区域土壤侵蚀模型的开发,下列问题有待进一步研究。1)单元的时空不均性处理:给定计算单元下降水过程“变形”和坡度不均一,即坡度和降水强度的同时衰减,需要进行专门的研究;2)模型的算法有待后续的敏感性分析和检验进行优化和改进;3)资料的局限性问题:基础资料中土壤入渗和抗冲系数资料主要来源于缓坡耕地条件下的实测数据,对于林地、果园、草地等,尚需做出相应的处理。

5 参考文献

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. U S Department of Agriculture. Washington D C, 1978
- [2] Renard K G, Foster G R, Weesies, et al. Predicting rainfall erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U S Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703. Washington D C: Government Print Office, 1992: 145-181
- [3] Flanagan D C, Nearing M A, Laflen J M. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, 1995
- [4] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide, version 3.6 [Z]. Silsoe College, Cranfield University, 1998
- [5] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于GIS的区域水土流失评价研究. 土壤学报, 2001, 38(2): 167-175
- [6] Yang Qinke, Li Rui, Zhang Xiaoping, et al. Regional Evaluation of Soil Erosion by Water: A case Study in the Loess Plateau of China // Jiao Juren. Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference (Vol. 4). Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 143-149
- [7] 姚志宏,杨勤科,吴喆,等. 区域尺度降雨径流估算方法研究 I: 算法设计. 水土保持研究, 2006, 13(5): 306-308
- [8] Lu Hua, Raupach M R, McVicar T R, et al. Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 1-18
- [9] McVicar T R, Jupp D L B, Williams N A. Relating AVHRR vegetation indices to LANDSAT TM leaf area index estimates. Canberra: CSIRO Division of Water Resources, 1996: 33
- [10] McVicar T R, Walker J, Jupp D L B, et al. Relating AVHRR vegetation indices to in situ leaf area index. Canberra: CSIRO Division of Water Resources, 1996: 54
- [11] 雷俊山. 基于GIS的黄土高原土壤抗侵蚀性因子研究 [D]. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2004
- [12] USDA. Urban Hydrology for Small Watersheds (Technical Release 55) USDA Natural Resources Conservation Service June 1986: 195-231
- [13] Govers G. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow. International Association of Hydrological Sciences Publication, 1990, 189: 45-63
- [14] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields and Small Catchments. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 527-544
- [15] Stokes G G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. Trans Cam Phil Soc, 1851, 9(2): 8-106
- [16] Van Deursen W P. Geogphic information system and dynamic models: development and application of a prototype spatial modelling language. Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genntschap, 1995

(责任编辑:程云)