

黄土丘陵沟壑区小流域水蚀预报模型构建

贾媛媛^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}, 杨勤科², 王占礼^{1,2}

(1. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 根据黄土丘陵沟壑区侵蚀产沙垂直分带性规律, 提出小流域土壤侵蚀方式发生部位界定方法。基于黄土丘陵沟壑区侵蚀环境特点, 设计了 GIS 支持下的小流域分布式水蚀预报模型结构, 模型考虑的侵蚀过程包括雨滴击溅侵蚀、片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀以及沟道侵蚀。同时, 提出模型各模块的计算方法, 根据动态物质平衡原理, 完成了流域侵蚀产沙过程演算。

关键词: 土壤侵蚀; 分布式预报模型; 小流域; 黄土丘陵沟壑区; 地理信息系统

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2004)02—0005—08

中图分类号: S157.1

Construction of Water Erosion Prediction Model at Small Watershed in the Loess Hilly and Gully Region

JIA Yuan-yuan^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}, YANG Qin-ke², WANG Zhan-li^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

2. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: According to erosion vertical zone distribution in the loess hilly and gully region, the methods for demarcating distribution slope location of soil erosion patterns at small watershed are put forward. Based on erosion environmental characters in the loess hilly and gully region, the framework of the distributed water erosion prediction model at small watershed supported by GIS is designed. The fundamental erosion processes in this model included splash detachment, sheet flow detachment and deposition, rill flow detachment and deposition, ephemeral gully flow detachment and deposition, gully flow detachment and deposition, and channel flow detachment and deposition. Meanwhile, the calculation processes of this model are discussed in detail. In term of the principle of dynamic balance of mass, the calculation of sediment yield in the whole watershed is accomplished.

Keywords: soil erosion; distributing prediction model; small watershed loess hilly and gully region;

随着水蚀过程及其机理研究的不断深入, 近 50 年来国外小流域水蚀预报模型研究取得了重要进展, 先后开发了水蚀预报模型(WEPP)^[1]流域版、欧洲土壤侵蚀模型(EUROSEM)^[2]、荷兰侵蚀模型(LISEM)^[3]等。但由于黄土丘陵沟壑区地面切割破碎、地形陡峭, 导致小流域产流产沙具有汇流时间短、径流含沙量高、侵蚀产沙量大以及沟蚀和重力侵蚀对泥沙贡献大等特点, 使国外模型在该地区的应用受到严重限制。在我国, 从 20 世纪 80 年代以来, 江忠善^[4]、蔡强国^[5]、汤立群^[6]等对小流域水蚀预报模型的研究进行了有益的探索, 并取得了一定进展, 但至今尚未建立实用的能预报小流域侵蚀产沙过程时空分布的侵蚀

预报模型。本文根据国内外水蚀预报模型的研究成果, 立足黄土高原侵蚀环境特点, 初步建立了黄土丘陵沟壑区小流域分布式水蚀预报模型, 以期对小流域侵蚀产沙过程的动态模拟提供技术工具, 为水土保持措施优化配置提供科学依据。

1 不同侵蚀方式分布部位的界定

黄土丘陵沟壑区小流域土壤侵蚀具有明显的垂直分带性规律, 即沿流水线方向土壤侵蚀方式依次为片蚀为主区、细沟侵蚀为主区、浅沟侵蚀为主区以及切沟侵蚀为主区。正确划分不同侵蚀方式的分布部位, 是分布式水蚀预报模型侵蚀过程计算的基础。根

收稿日期: 2003-05-09

资助项目: 中国科学院知识创新重要方向项目“水蚀预报模型研究”(KZCX3-SW-422); 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“土壤侵蚀及其环境效应评价模型”(2003-Z57)

作者简介: 贾媛媛(1979—), 女(汉族), 河南人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀过程与预报。电话(029) 87011469, E-mail: yyuanjia@163.com

据陈永宗^[7]对流域侵蚀方式垂直分带模式的定性描述,结合不同侵蚀方式发生的地形临界和动力临界,将小流域土壤侵蚀划分为分水岭及其邻近溅蚀—片蚀带、梁坡上部细沟侵蚀带、梁坡中下部细沟—浅沟侵蚀带、谷坡切沟侵蚀带和坡脚线以下沟道侵蚀带。

1.1 细沟侵蚀带界定

细沟侵蚀带是满足细沟发生临界条件区域的集合,该侵蚀带内土壤侵蚀以细沟侵蚀方式为主,同时伴有溅蚀及片蚀发生。细沟侵蚀带的界定采用细沟发生临界流量这一指标进行。研究表明^[8],细沟发生的临界流量 Q_c 主要随坡度变化而有所不同,通过实验率定不同土壤在各种地形条件下的土壤因子值 c 后,可用(1)式计算各种立地条件下细沟侵蚀发生的临界流量。同时,细沟侵蚀带也可采用细沟发生临界坡长与坡度进行界定^[9]。

$$Q_c = c(\sin\alpha)^{-7/6} \quad (1)$$

式中: Q_c —— 细沟发生临界流量(m^3/s); c —— 由土壤性质决定的影响因子,对同一种土壤,可认为 c 是定值; α —— 坡度角($^\circ$)。

1.2 细沟—浅沟侵蚀带界定

细沟—浅沟侵蚀带以浅沟侵蚀为主,细沟侵蚀次之,同时存在溅蚀及片蚀。细沟—浅沟侵蚀带的界定主要通过浅沟侵蚀发生临界条件来确定该区分布部位。LISEM 模型^[10]研究中发现,使用 Desmet 和 Govers(1997 年)提出的浅沟发生临界值确定浅沟发生区,与实际浅沟发生位置较为吻合:

$$S^* A_c^{0.4} > 0.72 \quad (2)$$

式中: S —— 坡度($^\circ$); A_c —— 汇水面积(m^2)。

张科利^[11]根据梁峁丘陵区典型流域统计资料,建立了浅沟侵蚀发生临界汇水面积与坡度的关系:

$$A_c = 2874 - 17.538S + 3.44S^2 \quad (3)$$

式中: S —— 坡面平均坡度($^\circ$); A_c —— 临界汇水面积(m^2)。

选取安塞县纸坊沟流域为实验样区,以该区数字高程模型(DEM)数据为基础,在地理信息系统(GIS)支持下,通过地图代数运算分别提取满足(2)式和(3)式的区域,将分析结果与高精度遥感影像对比,发现按照方程(2)的方法确定细沟—浅沟侵蚀带范围较为满意,且该算法简单易行。因而,本文采用方程(2)确定细沟—浅沟侵蚀带。

1.3 切沟侵蚀带界定

切沟分布于沟缘线以下,有关其发生临界条件的研究较少,故将小流域沟缘线以下至坡脚线之间区域划归为切沟侵蚀带。这里切沟广泛分布,重力侵蚀时有发生,同时也存在细沟侵蚀和片蚀。

2 模型结构

黄土丘陵沟壑区小流域分布式土壤侵蚀预报模型以数字高程模型(DEM)数据栅格单元为基础,将流域划分为若干单元,同时,利用地理信息系统空间分析功能,按照上述不同侵蚀方式垂直分带界定方法将流域划分为 5 个带,各带在侵蚀过程计算中对应不同侵蚀方式,从而在时空尺度上对流域侵蚀过程进行模拟。模型考虑的土壤侵蚀过程包括雨滴击溅分离、坡面薄层水流剥离与沉积及集中股流(细沟水流、浅沟水流和切沟水流)剥离与沉积等基本过程,其总体结构如图 1 所示。

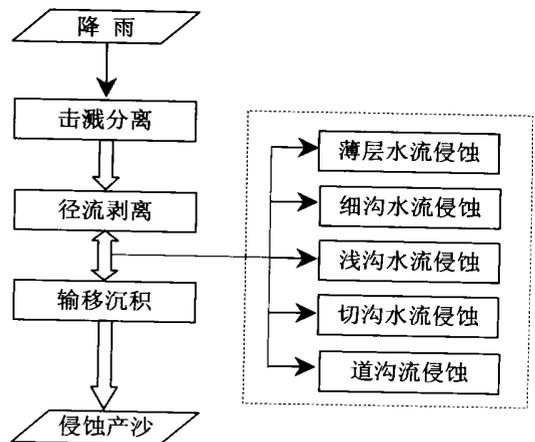


图 1 黄土丘陵沟壑区的小流域分布式水土侵蚀预报模型总体结构

根据我国黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀垂直分带特征,全面考虑小流域内各种土壤侵蚀过程,得到侵蚀量计算方程:

$$e = D_s + D_i + D_r + D_e + D_g + D_{ef} \quad (4)$$

式中: e —— 净侵蚀量; D_s —— 雨滴击溅侵蚀量; D_i —— 薄层水流侵蚀量; D_r —— 细沟股流侵蚀量; D_e —— 浅沟股流侵蚀量; D_g —— 切沟水流侵蚀量; D_{ef} —— 沟道流侵蚀量。

由于目前尚缺乏对浅沟水流和切沟水流剥离能力的定量表达式,因此本模型暂采用浅沟侵蚀系数 G_e 方式计算浅沟发生区土壤侵蚀量,使用沟蚀系数 G 估算切沟及重力侵蚀对小流域侵蚀产沙的贡献,则方程(4)可简化为:

$$e = (D_s + D_i + D_r + D_{ef}) G_e G \quad (5)$$

根据黄土高原小流域不同侵蚀方式带划分,对方程(5)分情况进行讨论:

(1) 溅蚀—片蚀带: $D_r = 0$, $D_{ef} = 0$, $G_e = 1$, $G = 1$;

- (2) 细沟侵蚀带: $D_{ef} = 0, G_e = 1, G = 1$;
 (3) 细沟—浅沟侵蚀带: 即 $D_{ef} = 0, G = 1$;
 (4) 切沟侵蚀带: $D_s = 0, D_{ef} = 0, G_e = 1$;
 (5) 沟道侵蚀带: $D_s = 0, D_i = 0, D_r = 0, G_e = 1, G = 1$ 。

3 模块计算

3.1 雨滴击溅分离

降雨过程中每个栅格单元不同时间步长内裸地产生的雨滴击溅侵蚀量用文献[12]溅蚀模型计算:

$$D_s = 5.985(E_{kp})^{0.544}\alpha^{0.471} \quad (6)$$

式中: D_s ——雨滴击溅侵蚀量(kg/m^2); E_k ——雨滴动能(J/m^2); p ——雨强(mm/min); α ——栅格单元地表坡度($^\circ$)。

3.2 薄层水流径流分离和沉积

根据概化侵蚀沉积理论,参考 EUROSEM 模型^[21]算法,地表径流分离和沉积模拟方程为:

$$D = Y(Tc - C)V_s w \quad (7)$$

式中: D ——径流分离或沉积量 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); Y ——有效系数,与饱和土壤黏结力有关; Tc ——径流输移力(kg/m^3); C ——径流中泥沙含量(kg/m^3); V_s ——泥沙沉降速度(m/s); w ——径流宽(m)。

3.3 细沟水流侵蚀

在各侵蚀方式带内,根据细沟所占面积比例,采用 Foster 等^[13]提出的算法计算各单元细沟侵蚀量:

$$D_r = D_c(1 - \frac{C_s}{T_c}) \quad (8)$$

式中: D_r ——细沟冲刷分散率 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); D_c ——细沟径流侵蚀力 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); C_s ——细沟输沙率(kg/s); T_c ——细沟径流输沙能力(kg/s)。

3.4 浅沟水流侵蚀

研究认为,在无植被覆盖且坡度大于 15 的黄土坡面条件下,浅沟侵蚀系数主要受降雨因素和地面坡度 α 的影响,其估算公式^[4]为:

$$G_e = 1 + (\frac{\alpha - 15}{30 - 15}) [0.003(RI_{30})^{0.103} - 1] \quad (9)$$

式中: α ——地面坡度($^\circ$); R ——次降雨量(mm); RI_{30} ——次降雨最大 30 min 雨强(mm/min)。

3.5 切沟水流侵蚀

受切沟侵蚀过程定量化研究限制,基于文献[4],计算沟蚀系数,从而估算切沟侵蚀带土壤侵蚀量:

$$G = 1 + (\frac{\alpha - 20}{42 - 20}) [0.137(RI_{30})^{0.140} - 1] \quad (10)$$

式中: α ——地面坡度($^\circ$); R ——次降雨量(mm); RI_{30} ——次降雨最大 30 min 雨强(mm/min)。

3.6 沟道流分离与沉积

目前国内外对沟道侵蚀研究较少,通常采用统计回归方法估算特定区域甚至是个别沟道的土壤侵蚀量,还没有成熟的基于物理过程的计算方程式。本文在忽略沟壁崩塌情况下,采用上述(7)式来近似模拟沟道流泥沙输移过程。

3.7 流域土壤侵蚀量计算

将各栅格单元间净泥沙传输演算至流域出口,即得流域总侵蚀产沙量:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad (11)$$

式中: A ——径流横截面的面积(m^2); Q ——径流量(m^3/s); C ——径流泥沙的含量(kg/m^3); e ——净侵蚀率 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$); q_s ——外部输入的泥沙量 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); x ——沿坡向上的距离(m); t ——时间(s)。

4 结 论

将小流域地貌特征线与不同侵蚀方式发生的临界条件相结合,提出小流域不同土壤侵蚀方式发生部位的界定方法,并将该方法应用于小流域分布式土壤侵蚀预报模型中,很好地反映了土壤侵蚀空间分布特征,提高了模型的模拟精度。

在集成国内外已有研究成果的基础上,根据黄土高原土壤侵蚀特征,以 GIS 技术为支撑,初步构建黄土丘陵沟壑区小流域分布式水蚀预报模型。该模型从侵蚀过程出发,考虑溅蚀、片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀(包括重力侵蚀)等侵蚀过程,根据动态物质平衡原理实现流域侵蚀产沙过程演算。模型可同步模拟流域内空间任一点的土壤侵蚀过程,反映流域侵蚀过程时空变化,具有较广应用前景。但模型将浅沟侵蚀、切沟侵蚀和重力侵蚀对流域产沙的贡献以修正系数的方式进行处理,影响了模型的预报精度。今后应强化浅沟和切沟侵蚀过程定量研究,为小流域水蚀物理模型细化与完善提供理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] Flanagan D C, Nearing M A. Water erosion prediction project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10 [R]. West Lafayette: USDA-ARS NSERL, 1995.
- [2] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): Documentation and User Guide [R]. Bedford, United Kingdom: Silsoe College, Cranfield University, 1998.

其它各点的风险值均低于 150, 说明目前的污染对生态系统影响不大, 只存在轻微的生态危害, 特别是小河咀和横岭湖二点, 风险指数较低, 但主要源于这两点磷指数偏低所致, 其它污染风险值也偏高, 因此对这两点的污染控制仍十分必要。

4 小 结

(1) 对比 1989 年, 1997 年, 1999 年数据, 得出洞庭湖流域水体污染现象严重, 特别是磷污染严重, 除 Cu 外其它重金属多年最高浓度均低于国家地表水环境质量标准 II 类标准。点源污染对洞庭湖流域水污染贡献较大, 枯水期各污染物浓度均较丰、平水期高。污染物浓度有急剧增大的趋势, 除全氮外其余各污染物的增长速度都非常大。

(2) 由于目前国内外对除重金属外的其它污染物毒性危害系数研究不多, 因此本文在对洞庭湖流域进行风险评价是采用外推法确定了 N, P 的毒性危害系数, 并为今后其它类污染物的毒性危害系数的确定提供了一条新途径。

(3) 根据 10 个监测点的风险分析结果可知, 全磷风险仍是对洞庭湖流域风险贡献率最大的污染物, 而全氮, Zn 的污染风险较小; 君山处的污染风险较大, 已对其周边生态系统产生了潜在的生态风险, 而流域内其它各监测点的风险指数偏低, 只存在轻微的生态危害。

[参 考 文 献]

- [1] 赵沛伦, 申献辰, 夏军, 等. 泥沙对黄河水质影响及重点河段水污染控制[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [2] Migo. Effect of PH and calcium ions on the destabilization of melanoidin [J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1993, 76(1): 29—32.
- [3] 汪晶, 和德科, 汪尧衢编译. 环境评价数据手册——有毒物质鉴定值[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- [4] 甘居利, 贾小平, 林钦, 等. 近岸海域底质重金属生态风险评价初步研究[J]. 水产学报, 2000, 24(6): 533—538.
- [5] Hanson Mark L, Solomon Keith R. New technique for estimating thresholds of toxicity in ecological risk assessment [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(15): 3257—3254.
- [6] Muir W M, Howard R D, Otto Sarah P. Fitness components and ecological risk of transgenic release: A Model Using Japanese Medaka[J]. American Naturalist, 2001, 158(1): 1—16.
- [7] Angela M. Obery, Wayne G. Landis. A regional multiple stressor risk assessment of the codorus creek watershed applying the relative risk model [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2002, 8(2): 405—428.
- [8] McCarty Lynn S, Mackay Donald. Enhancing ecotoxicological modeling and assessment[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(9): 1719—1728.
- [9] Power M, McCarthy L S. Fallacies in ecological risk assessment practices [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(8): 370—375.
- [10] 贾振邦, 梁涛, 林健枝, 等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 485—492.
- [11] 廖自基. 环境中微量重金属元素的污染危害与迁移转化[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [3] De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output [J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1107—1118.
- [4] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1—9.
- [5] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模拟[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 108—117.
- [6] 汤立群, 陈国祥, 蔡名扬. 黄土丘陵区小流域产沙数学模型[J]. 河海大学学报, 1990, 18(6): 10—16.
- [7] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [8] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 41—46.
- [9] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000. 59—62.
- [10] Jetten V. LISEM: Limburg Soil Erosion Model user manual, version 2. x[R]. Netherlands: Utrecht University, 2002.
- [11] 张科利. 陕北黄土丘陵沟壑区坡耕地浅沟侵蚀及其防治途径[D]. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1988. 20—23.
- [12] 吴普特. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J]. 水土保持通报, 1991, 11(3): 8—13, 28.
- [13] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. velocity relationship[J]. Trans of ASAE, 1984, 27(3): 790—796.

(上接第 7 页)