

非点源污染模型研究

张建云

(水利部水文局, 北京 100053)

摘要: 描述了土壤侵蚀的物理过程, 分析了影响土壤侵蚀过程的主要因素, 提出包括降雨径流模型、土壤侵蚀模型和畜禽污染模型的非点源污染模拟模型 (NPSP), 并介绍了该模型在爱尔兰 Dodder 流域的应用。

关键词: 非点源污染; 土壤侵蚀; 非点源污染模型; 地理信息系统

中图分类号: X 522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2002)05-547-05

水体的污染源可分为点源污染和非点源污染。点源污染是指工厂和城市污水通过下水道将污物直接排入水体或化学物品直接泄漏到水体等, 其特点是污染源是集中的。非点源污染主要是由于雨滴对土壤的撞击和剥蚀作用, 被侵蚀土壤颗粒将土壤中的化学物质、农药等有毒物质以及流域面上的牲畜和家禽排泄物等输送到水体中, 其特点是污染源散布在较大的面积上, 而非集中于数点。非点源污染问题主要研究流域面上污染物的来源、数量及其运动, 提出流域水土保持等综合治理方案。由于土壤侵蚀模型需要大量的地理信息资料和土壤特性数据, 因此关于面污染问题的研究一直比较薄弱。近年来地理信息系统的应用, 促进了这方面的研究。

1 水对土壤的侵蚀过程

由于被侵蚀的土壤是进入水体的化学物质的载体, 所以在面污染的模拟计算中, 水对土壤的侵蚀过程是一个重要的研究内容。

水对流域土壤的侵蚀分为两类: 表面侵蚀和细沟侵蚀。表面侵蚀是指雨滴在重力的作用下, 撞击和剥蚀表层土壤, 剥蚀后的土壤被表面径流带走的物理过程。细沟侵蚀是指地表径流在汇流过程中沿细沟等微型地貌对土壤的冲刷作用。因此, 流域上的土壤侵蚀量等于雨滴的表面侵蚀量、地表径流的冲刷量和上游地区的泥沙输送量之和。

水对流域土壤的侵蚀过程如图 1 所示。

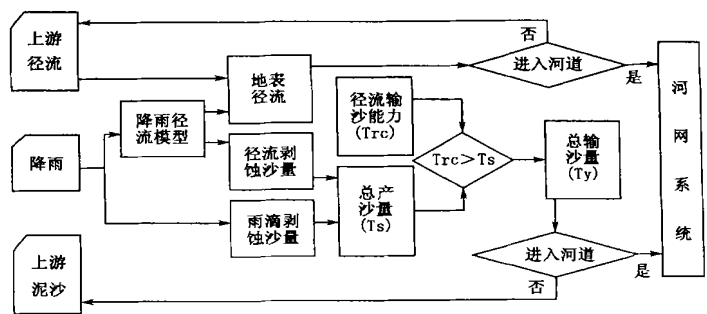


图 1 水对土壤的侵蚀过程

Fig. 1 Process of soil erosion by water

收稿日期: 2001-07-09; 修订日期: 2002-02-28

作者简介: 张建云(1957-), 男, 江苏沛县人, 水利部水文局教授级高级工程师, 博士, 主要从事流域水文模型、水资源管理等研究。

2 模型及有关计算方法

非点源污染模型一般由三部分组成：降雨径流模型 即由降雨量计算地表径流量，可以选择常用的新安江^[1]、SMAR^[2]或其它模型；土壤侵蚀模型 根据降雨强度、流域植被、土壤特性、地形坡度等计算土壤的侵蚀量。土壤侵蚀污染包括土壤本身和有机物对水体的污染，以及冲刷土壤中的农药及其它化学成分等有毒化学物质对水体的污染；对畜牧区为主的研究流域，则需考虑牲畜和家禽对水体的污染。非点源污染模拟模型结构见图2。

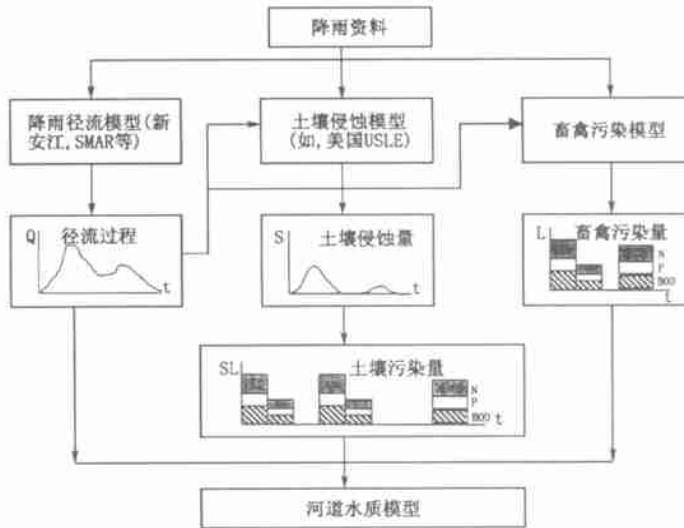


图2 非点源污染模型结构

Fig.2 Flow chart of nonpoint source pollution (NPS) model

2.1 土壤侵蚀模型

选用美国农业部的‘通用土壤流失方程’ (the Universal Soil Loss Equation, USLE)^[3]作为土壤侵蚀计算模型。

Musgrave 分析了不同流域的 4 万余场次暴雨洪水对流域面上土壤侵蚀的情况，认为单位面积的土壤流失量 (SL) 的计算取决于 5 个要素：降雨强度因子 R_S ；土壤侵蚀度 K ，是土壤特性的函数；流域的坡度因子，由坡度-长度系数 LS 表示；作物管理系数 C ；水土保持系数 U 等。对于一次降雨过程，土壤的流失量由式(1)计算：

$$SL = R_S \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot U \quad (1)$$

式(1)即常用的土壤损失方程，在美国农业部《农业手册》中被指定为计算降雨产生土壤流失的通用方程。

(1) 雨强因子 R_S 代表不同雨强的侵蚀能力，反映雨滴动能的大小，通常计算式为

$$R_S = 0.01 \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (2)$$

式中 I_i 为第 i 时段雨强 (mm/h)；降雨动能 $E_i = 916 + 331 \log(I_i/25.4)$ (3)

(2) 土壤侵蚀因子 K 描述土壤的内在侵蚀特性， K 值的大小与土壤颗粒大小及分布、土

壤的结构、透水性和有机物含量等土壤特性有关。美国农业部在大量的试验和分析的基础上，给出了各类土壤的 K 值，如表 1。

表 1 土壤侵蚀因子 K 值一览

Table 1 Soil erodibility factor K t/km²

土壤结构	有机物含量	
	0.5/ %	2.0/ %
细沙	39.54	34.59
粉沙	103.78	88.98
壤质沙	29.65	24.71
壤质细沙	108.73	93.90
沙质壤土	66.72	59.31
细沙壤土	116.14	101.31
粉沙壤土	118.61	103.78
粘性壤土	69.19	61.78
淤泥粘性壤土	91.43	79.07
淤泥粘土	61.78	56.83

(3) 流域坡度-长度系数 LS 该系数是影响土壤侵蚀的地形因子，在式 (1) 中是一个非常敏感的参数^[4]，其物理意义是，从开始产生地表径流处到其下游泥沙开始淤积(由于坡度变缓或汇入河口)处的距离。常用 Brown^[5]的经验公式计算：

$$LS = \left(\frac{L}{22.1} \right)^m (0.065 + 0.046S + 0.0065S^2) \quad (4)$$

式中 L 为坡长(m)； S 为坡度(%)；指数 m 对于坡度 $S > 5.0$ 、 $3.5 < S < 5.0$ 、 $1.0 < S < 3.5$ 和 $S < 1.0$ 分别取值 0.5、0.4、0.3 和 0.2。

对于非均匀坡度可分段计算，最后取加权平均：

$$LS = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i ls_i \quad (5)$$

(4) 作物管理系数 C 该系数是流域植被影响土壤侵蚀的综合因子，取决于作物类型及其各个不同生长期的覆盖比例及叶冠高度等^[6,7]。

(5) 水土保持系数 U 该系数与水土保持措施有关，反映水流所流经的路径及其水力学特性。各种水土保持措施条件下系数 U 的建议取值见表 2。

有关研究表明^[6]，对于坡度小于 12% 的流域，等高线带状耕作对减少侵蚀作用突出。但当流域坡度大于 24% 时，等高线耕作方式对土壤侵蚀的减少作用则不明显。

表 2 水土保持系数 U 值

Table 2 Conservation practice factor U

流域坡度 / %	U 建议取值	
	等高线带状耕作	梯田并带状耕作
2~7	0.50	0.25
8~12	0.60	0.30
13~18	0.80	0.40
19~24	0.90	0.45

2.2 畜禽污染模型

对有畜牧场和家禽养殖场的流域，畜禽排泄物是土壤侵蚀之外的另一种污染源。要计算畜禽

污染量，首先要进行流域内畜禽种类和数量调查，然后应用畜禽污染模型计算。

地表径流是面污染物的运载体。当降雨径流模型输出的地表径流为零时，对于水体的污染物加载量 (PAL) 则为零，但污染物仍会在流域面上累积^[7]，即

$$PAL(i) = 0 \quad (6)$$

$$SAL(i) = SAL(i-1)e^{-1/ck} + AL(i) \quad (7)$$

式中 $PAL(i)$ 为第 i 时段畜禽污染量； $SAL(i)$ 为第 i 时段污染物累积量； $AL(i)$ 为第 i 时段内畜禽的排泄量； ck 是累积污染物的衰减指数，在本文中取 15。

当产流量大于零时，污染量可由下式计算：

$$PAL(i) = SAL(i-1)(Ri) \quad (8)$$

$$SAL(i) = SAL(i-1)e^{-1/ck} + AL(i) - PAL(i) \quad (9)$$

式中 (R_i) 是给定时段径流深 R_i 条件下的径流携带污物的能力,其值除与径流深有关外,还与流域坡度等有关,所以一般用实验方法确定。

由畜禽排泄污染而需考虑的水质化学物质一般包括氮(N)、磷(P)和生物化学需氧量(BOD)等。Young^[8]在大量统计分析的基础上,于1982年提出各种动物、家畜、家禽等日平均排泄量,以及N、P、BOD等的含量。

3 模型的应用与结论

上述模型和方法是一个分布式系统,需要较详细的土壤、植被(类型及分布)、地形(数字高程及流域坡度)、土地利用、水土保持措施、畜禽种类及单位面积上的畜禽数量以及降雨、径流等方面的资料。模型参数也需要借助地理信息系统的空间分析模块来确定。

笔者曾在爱尔兰的Dodder流域(面积113 km²,各种信息齐全,为欧共体多项研究的试验流域)应用本文提出的NPSP模型进行非点源污染模拟分析。流域内有农场、畜禽场、绿地,还有半城市化的居民地。参数分析应用ARC/INFO地理信息系统。从模拟分析结果中可得到以下主要经验或结论^[7]:

(1) 土壤侵蚀和畜禽污染是影响Dodder流域水质的主要污染源,农业污染相对很小(农药严格限制使用)。

(2) 由于该流域植被较好(据欧共体CORINE土地利用数据库统计,绿地、树林等覆盖率为45%,半城市化居民区为30%),加上流域坡度小(2%~7%),流域土壤侵蚀仅在雨季的暴雨期间发生。平时的污染主要来源于畜禽的排泄污染。

(3) 进一步的数字试验表明,雨强在USLE模型中是一个敏感的变量。当采用日降雨量时,仅在1~2月份发生强降雨过程时才产生土壤侵蚀。若应用1h的时段雨量,则产生土壤侵蚀的频次大大提高。图3给出的是1994年的例子,图3(a)为日雨量产生的土壤侵蚀及氮的负荷量,图3(b)为1h雨量产生的土壤侵蚀及氮的负荷量。

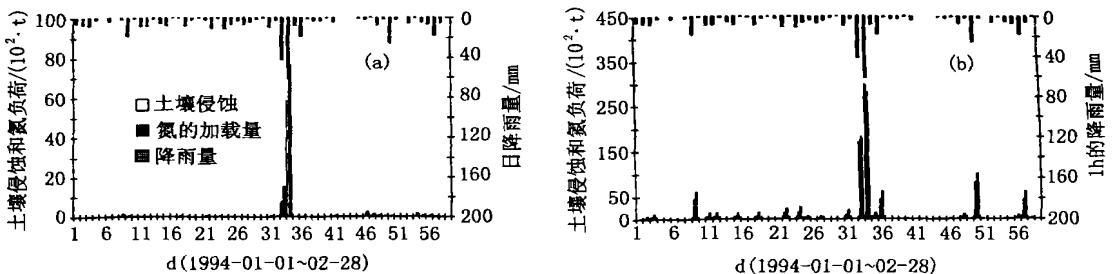


图3 非点源污染(NPSP)模型不同雨强计算结果对比(土壤损失/t,氮/kg)

Fig. 3 NPSP model results using different rainfall intensities(soil loss in tons, nitrogen in kg)

(4) 非点源污染模拟和预测是一个复杂的问题,对资料的要求也较高。此外,在应用地理信息系统进行模型参数分析时,尚有不少问题需要进一步研究。

参考文献：

- [1] 赵人俊. 流域水文模拟[M]北京:水利电力出版社, 1984.
- [2] Zhang J Y, O Connor K.M. A software package for river flow forecasting based on the SMAR model[J]. Hydraulic Engineering Software V, 1994, 163 - 170.
- [3] Wismerier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses —A guide to conservation planning[M]. USDA, Agriculture Handbook, 1987, 537.
- [4] Renard K G, *et al.* RUSLE: Revised universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, (1 - 2) :30 - 33.
- [5] Brown R H. CRC handbook of engineering in agriculture, Volume II: Soil and Water Engineering[M]. Florida, CRC Press Inc, 1988.
- [6] Shen H W, Julien P Y. Chapter 12: Erosion and sediment transport[A]. In Maidment, Handbook of Hydrology[C]. McGraw-Hill Inc, 1992.
- [7] Zhang J Y. A decision support system for water management at catchment scale based on a geographical information system [D]. Chapter 8 in Ph. D Thesis of the National University of Ireland, 1996.
- [8] Young R A, *et al.* A technique for evaluating feedlot pollution potential[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1982, 37(1) :21 - 23.

A study on the non-point source pollution model

ZHANG Jian-yun

(Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract : Non-point source pollution, also called diffuse source pollution, mainly caused from the soil erosion and sedimentation, livestock wastes, and agricultural land (pesticide and other poisonous chemical components). In this article, the physical process of soil erosion was described, the main factors which would affect the soil erosion process were discussed, and the non-point source pollution (NPSP) model, which consists of the rainfall-runoff sub-model, the soil erosion sub-model (American USLE), and the livestock wastes sub-model, was constructed. Finally, the experiences and conclusions of the NPSP application in the Dodder Basin of Ireland was introduced.

Key words : non-point source pollution; soil erosion; non-point source pollution model; geographical information system