

适用于中大尺度流域的非点源污染模型

惠二青¹, 刘贯群², 邱汉学², 陈友媛²

(1.三峡大学机械与材料学院, 湖北 宜昌 443002;2.中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

摘要:从非点源污染发生机理和当前水文水质资料实际情况出发,考虑污染物运移规律,采用广泛应用的降雨径流和土壤侵蚀模型,结合河道断面监测资料推算的非点源污染物平均浓度,提出了一种保守性物质非点源污染负荷估算方法。在山东省小清河流域进行应用的结果表明该模型可行。

关键词:中大尺度流域; 非点源污染; 污染负荷

中图分类号:X143 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)03-0552-05

A Non-point Source Pollution Model Applying to Large-medium Scale Basin

HUI Er-qing¹, LIU Guan-qun², QIU Han-xue², CHEN You-yuan²

(1. College of Mechanical and Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: The non-point source pollutant concentration in the non-point source quantitative model at home and abroad is calculated by weighted mean of the pollutant concentration in several rainfall-runoffs, which doesn't consider the non-point source pollution arising from the non-rainfall-runoff. Based on the occurrence mechanism of non-point source pollution, transferring rule of the non-point source pollutant and the current data of hydrology and water quality in China, through using widely used rainfall-runoff model, the Curve Number model (SCS model) and soil-erosion-predict-model (MULSE), and the average content of the non-point contamination calculated with the routine monitoring data, a practicable non-point source pollution model was established to estimate non-point source pollution loading of conservative matter in large-medium scale basin. The model could not only evaluate the pollution loading in different hydrology year, different period of time and different frequency typical year, but could calculate the pollution loading in simple storm-runoff, and soluble and absorbed pollutant loading in the surface runoff. The model was demonstrated feasible after applied in the Xiaoqing River watershed in Laizhouwan bay.

Keywords: large-medium scale basin; non-point source pollution; pollution loading

流域污染源可分为点源和非点源。非点源污染在水环境中占有较大比重。美国等国家研究发现,即使点源污染全部实现零排放,河流达标率也仅有65%^[1,2]。随着水体污染问题的突出,非点源污染研究越来越受到重视。如何对非点源污染进行量化^[3-5],为污染源解析提供依据是目前研究的热点。

国外已建立的流域非点源污染量化模型大多是参数较多的机理模型,需要很多基本资料(包括气象、

水文、水质、土壤等),将其直接推广应用于国内存在一定难度。国内已建立的模型大多是m、甚至是cm尺度上的研究成果,这些成果外推到流域尺度时,精确度必然会受到影响。目前在流域尺度上进行的非点源定量研究成果,仍限于寻找适当经验公式对观测数据进行拟合的层次上。考虑到我国当前非点源水质水量同步监测资料和流域水文地质基本资料缺乏,从水文学原理出发,考虑非点源污染形成机理,利用河道断面常规监测资料,推算流域断面非点源污染物平均浓度,结合广泛应用的降雨径流和土壤侵蚀模型,对流域进行合理分区,建立适用于保守物质的非点源污染量化模型。

收稿日期:2004-08-10

基金项目:山东省自然科学基金(Z99E01);国家自然科学基金(499760028);教育部重点项目(00080)

作者简介:惠二青(1977—),男,山西运城人,助教。

E-mail:huiierqing@163.com

1 模型结构

非点源污染负荷总量可表示为:

$$W_r = \int_{t_0}^{t_e} [C_u(t)Q_u(t) + C_s(t)Q_s(t)] dt \quad (1)$$

式中: $C_u(t)$ 为地表径流溶解态污染物浓度变化过程, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $C_s(t)$ 为暴雨径流中泥沙吸附污染物质量分数的变化过程, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; $Q_u(t)$ 为地表径流过程, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $Q_s(t)$ 为地表径流携带的悬移质输沙量变化过程, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; t_0 和 t_e 分别为时段初和时段末时间, s 。

中大流域下垫面比较复杂, 将其作为一个研究区估算非点源污染负荷误差较大。因此, 需要对其进行合理分区, 在子研究区域建立模型, 估算其时段非点源污染负荷, 利用质量平衡原理计算整个流域非点源污染负荷。

1.1 流域断面划分

国外常见的农业流域非点源污染量化模型对流域空间特征的处理可分为分散型和集中型。分散型以方形网格进行单元划分, 不仅破坏流域实际产汇流和产汇污过程, 而且增加收集整理模型输入资料的工作量; 而集中型模型则不作细分, 作统一或均一处理, 适用于较小流域面积, 不宜推广^[6-9]。

近年来国内学者建立了很多非点源量化模型, 这些模型多以集中型为主, 仅适合于小面积汇水区域, 不易揭示非点源污染在流域内的空间分异规律, 在较大空间范围内应用尚需进一步完善和验证^[10-12]。要了解非点源污染在流域内的空间分异规律并通过适当模式体现出来, 必须对研究区域进行合理的空间单元划分。划分的结果既要利于计算模拟, 揭示微观上的机理, 也要便于宏观上的规划和管理。另外, 划分方法还要适合于不同空间尺度。本文构建的模型主要是利用河道常规监测断面的水文、水质资料来计算非点源污染负荷, 因此根据降雨范围和研究流域的常规监测断面, 结合流域水文地质和支流汇入情况来划分空间单元。例如流域有 n 个监测断面, 考虑流域降雨覆盖范围和各断面区域水文地质和水质资料情况, 将流域划分为 n 个或少于 n 个子研究区域。在划分研究区域时, 考虑流域水文、地形、下垫面情况, 将其划分成一个近似封闭的区域。

1.2 模型结构

通常非点源模型由水文子模型、土壤侵蚀子模型和污染物迁移转化模型构成。对于保守性物质来说, 迁移过程中因化学反应的消耗相对较少, 因此在径流

汇流和泥沙运移过程中可不考虑其平衡和迁移转化, 利用河流断面常规水文水质资料推算子区域时段溶解态和吸附态非点源污染物平均浓度, 结合水文子模型和土壤侵蚀子模型计算结果, 估算污染物非点源负荷。

1.2.1 水文子模型

水文子模型采用 SCS (Curve Number Method) 水文模型计算流域地表径流量和峰值流量。SCS 模型能够反映土地利用类型、土壤、植被和农业管理措施等对径流量的影响, 这对非点源污染识别非常重要。此外, SCS 模型还能应用于没有水文观测资料的流域, 可以大范围推广。

(1) 降雨径流模型

地表径流计算表达式为:

$$R = \frac{(P - \theta S)}{P + (1 - \theta)S} \quad (P \geq \theta S) \quad R = 0 \quad (2)$$

式中: R 为子区域某一时段地表径流量, mm ; P 为与 R 对应时段的子区域降雨量, mm ; S 为子区域最大雨水滞留量, mm ; θ 为表征子区域土壤最大滞留量的系数。

θ 的取值不是作为一个参数来取值(在 SCS 模型中假设 $\theta = 0.2$), 而是作为一个假设前提条件, 所有 CN 值都是在这个前提下经过实地测量获得。式中的 S 值根据下式进行计算:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

式中 CN 是反映降雨前流域蓄水特征的一个综合参数, 与土地利用类型、土壤植被、农业管理措施以及前期土壤湿润程度有关。

(2) 峰值流量

$$q_p = \frac{\alpha_1 A R}{t_p} \quad (4)$$

式中: q_p 为洪峰流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; A 为子区域面积, km^2 ; t_p 为峰现时间; α_1 为经验系数, 表征子区域汇流时间内降雨量与总降雨量的比值, SCS 模型推荐值为 0.208。

一般峰现时间在汇流时间的 2/3 处出现:

$$t_p = \frac{2}{3} t_e \quad (5)$$

式中: t_p 为汇流时间, h 。汇流时间与迟滞时间有关, 即

$$t_e = \frac{5}{3} L \quad (6)$$

式中: L 为迟滞时间, h 。迟滞时间与子区域坡度和河段长度有关, 即

$$L = \frac{lenth^{\alpha_2} (S+25.4)^{\alpha_3}}{7\ 069.7\sigma^{\alpha_4}} \quad (7)$$

式中: $lenth$ 为子区域河道长度,m; σ 为子区域平均坡度的百分数; α_2 、 α_3 、 α_4 为经验系数,SCS的推荐值分别为0.8、0.7和0.5。

1.2.2 侵蚀子模型

土壤通用流失方程(USLE)是目前应用最广的计算流域土壤侵蚀量的数学模型,但是USLE只能模拟多年平均侵蚀量,无法模拟单次暴雨产沙量,因此近几年许多非点源模型都采用了USLE的一种改进形式—MUSLE^[13]作为侵蚀子模型。MUSLE表达式如下:

$$Y = \beta_1 (Q \cdot q_p)^{\beta_2} (K)(C)(PE)(LS) \quad (8)$$

式中: Y 为子区域单场暴雨产沙总量,t; q_p 为峰值流量, $m^3 \cdot s^{-1}$; Q 为单场降雨总产流量, m^3 ; K 为土壤可蚀性因子; C 为作物覆盖因子; PE 为侵蚀控制措施因子; LS 为地形因子; β_1 、 β_2 为经验系数。

SCS模型计算出的径流量以mm为单位,在侵蚀模型中按下式换算为以 $m^3 \cdot d^{-1}$ 为单位的径流量,即:

$$Q = 1\ 000RA \quad (9)$$

式中: A 为子区域面积, km^2 。

1.2.3 污染物负荷模型

1.2.3.1 污染物浓度推求

国内现有的非点源量化模型大多是利用几场实测的暴雨径流污染物浓度流量加权值作为非点源污染物平均浓度,没有考虑流域非暴雨径流带来的非点源污染,例如不定期排放的水产养殖业和农村生活废水,计算误差较大^[14-16]。从水量平衡原理出发,结合质量平衡模型,利用常规水文、水质资料推求时段非点源污染物溶解态和吸附态平均浓度。

各子研究区域近似为封闭区域,根据水量平衡方程,河道中水量除支流基流和上游来水以外,主要补给源有降雨产生的径流、水产养殖业和农村生活废水的不定期排放量、工业排污、地下水补给以及农田回退水,主要消耗是蒸发、污灌和上游水库蓄水、补给地下水等。水文子模型中径流量是经过还原的径流量,所以污灌和上游水库蓄水消耗不予考虑;水产养殖业和农村生活废水的不定期排放量、农田回退水、地下水对河流补给量和河流对地下水补给量相对于庞大的径流量可以忽略不计;因此研究河段水量可以近似看作断面上游来水量、支流基流量、工业排污以及非点源污染排水量(降雨径流量、水产养殖业和农村生活废水不定期排放量)的总和。假设子研究区域点源

污染物排放浓度在研究期内没有变化,则某一时段污染负荷可以近似认为主要是由非点源污染负荷和点源负荷组成。水产养殖业和农村生活废水不定期排放量相对地表径流量较小,且不易获得,因此非点源污染排水量用地表径流量代替。利用上述原理推求研究区域非点源污染物平均浓度。计算方法如下:

(1)溶解态污染物浓度计算

某一时段污染物总负荷为:

$$C_g Q_g + C_u Q_u + Q_b C_b + Q_f C_f = Q_z C_e \quad (10)$$

该时段非点源污染物的平均浓度为:

$$\frac{Q_z C_e - C_u Q_u - Q_b C_b - Q_f C_f}{Q_g} = C_g \quad (11)$$

式中: C_g 为子区域研究时段非点源污染物平均浓度; Q_g 为子区域研究时段地表径流量; C_u 为子区域研究时段点源污染物平均浓度; Q_u 为子区域研究时段点源排放总量; C_f 为子区域研究时段上游断面总来水量; Q_f 为子区域研究时段上游来水污染物平均浓度; Q_b 为子区域研究时段支流基流量; C_b 为子区域研究时段支流基流污染物平均浓度; Q_z 为子区域研究时段下游断面通过的总径流量; C_e 为子区域研究时段下游断面污染物平均浓度。

(2)吸附态污染物浓度计算

降雨形成的径流汇入河流并到达研究断面需要较长时间,在此期间,河水中吸附态与溶解态污染物在固液相之间达到平衡,且泥沙吸附污染物浓度较低,因此利用亨利吸附定律计算吸附态污染物平均浓度。

$$C_s = k C_u \quad (12)$$

式中: k 为吸附系数,即单位重量泥沙吸附的固态污染物量,可通过实验得到近似值。

1.2.3.2 污染物非点源负荷计算

(1)子区域污染物非点源负荷计算

利用式(10)~(12)得到子区域研究时段非点源污染物溶解态和吸附态近似平均浓度,其污染物非点源总负荷量计算方法为:

子区域非点源溶解态污染物负荷为:

$$W_u = R C_u \quad (13)$$

子区域非点源吸附态污染物负荷为:

$$W_s = Y C_s \quad (14)$$

子区域非点源污染物总负荷为:

$$W = W_u + W_s \quad (15)$$

(2)流域污染物非点源负荷计算

根据质量平衡原理,忽略保守物质在迁移过程中的转化量,研究时段流域非点源污染负荷就为对应时段各子研究区域非点源污染负荷之和。

$$W_T=\sum W$$

(16)

对于一个水文年来说,将一年离散化为 n 个时段,则流域污染物非点源年总负荷就为 n 个时段非点源污染负荷之和。

$$W_T=\sum_{i=1}^n W_T$$

(17)

表 1 小清河流域无机氮(TIN)非点源负荷量组成分析

Table 1 The component analysis of pollution loading from non-point source pollution of TIN in Chahe station of Xiaoqing river

年份	各成分占非点源 TIN 总量比例/%			非点源 TIN 负荷量/t		
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	溶解态	吸附态	总量
1996	53.8	35.1	11.1	1 545.55	13.4	1 558.95
1997	92.7	5.5	1.8	872.14	10.31	882.45
1998	80.6	9.4	10.0	1 815.14	16.84	1 831.98
1999	97.7	2.1	0.2	9 423.45	50.15	9 473.60
平均	90.1	7.1	2.8	3 414.05	22.68	3 414.05

从表中数据可以看出:

(1)1996 年和 1999 年 TIN 非点源负荷量所占比例较高,其汛期降雨分别占到年降雨的 87%和 73%,说明汛期降雨充沛的年份能带来更多的非点源污染,同时暴雨形成的水流冲刷河道的淤泥,使底泥泛起,形成二次污染,引起河道浓度增加,也使非点源所占比例增加。

(2)1999 年 TIN 非点源负荷量远大于其他 3 年,而降雨量在 4 年中最少,主要因为模型中非点源污染物年均浓度是利用污染物河道断面监测浓度进行推求,其能否反映实际污染情况是模型计算的关键。工业废水偷排偷放会对断面浓度造成很大影响,这种浓度变化无法还原,如 1999 年 8 月份监测的污染物断面浓度高于 5 月份的监测值,而在 5~8 月份之间外界对河流补给大于河流自身消耗量,因此 1999 年非点源污染负荷量偏高可能与企业偷排偷放有一定关系。

3 结语

(1)本文提出的非点源污染量化模型,是一种简便、经济、实用的流域非点源污染负荷估算方法,主要用于估算保守性物质(如 TP、TN)或可近似视作保守性物质(如 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N)的非点源负荷;可以估算不同水文年、不同时段非点源污染负荷量和不同频率代表年及某些特殊年份(如实际特丰年)以及次洪水非点源污染负荷量。此外,还可以计算地表径流中溶

2 应用实例

莱州湾海域无机氮浓度等值线以小清河河口为轴心呈舌状分布,可见小清河污染对莱州湾水环境质量影响很大,掌握小清河污染物来源是解决莱州湾海域水环境问题的关键。利用上述模型对小清河流域非点源污染负荷量(包括溶解态和吸附态污染负荷)进行分析,计算结果(如表 1 所示)与前人分析结果^[17]接近,见表 1。

解态污染物负荷和泥沙携带的吸附态污染物负荷量。

(2)对于污染比较严重的水体来说,污染治理刻不容缓。国内外现有的非点源数学模型均需要时间收集所需资料,而本文提出的模型参数和所需资料较少,且所需资料易收集,便于快速估算流域非点源污染负荷,为水体污染治理提供较科学的依据。

(3)国内外非点源量化模型中非点源污染物浓度大多采用几场实测暴雨径流中污染物浓度流量加权值,需要耗费大量人力、物力及财力,且没有考虑非暴雨径流带来的非点源污染。根据水量平衡原理结合污染物质量平衡模型,利用河道断面常规监测资料推算非点源污染物年均浓度,不仅省时省力,而且计算结果包括流域非暴雨径流带来的非点源污染,使计算结果更符合实际。

(4)研究区域时段和断面水质资料匮乏,会使污染物非点源年均浓度出现较大误差,因此需要在研究区域的河流上增加一些常规水文、水质监测断面,并根据流域水文特点,增加水质监测频度,以提高模型模拟精度。

参考文献:

[1] 杨爱玲,朱颜明.地表水环境非点源污染研究[J].环境科学进展, 1999,7(5):60-67.

[2] Arhonditsis G, Tsirtsis G, Angelidis, M O, Karydis M. Quantification of the effects of non-point nutrient sources to coastal marine eutrophication: application to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea [J]. Ecological Modeling, 2000, 129(2):209-227.

[3] 李怀恩.估算非点源负荷的平均浓度法及其应用[J].环境科学学报, 2000,20(4):397-400.

[4] 施为光,凌文州.用实测资料计算流域非点源负荷[J].长江流域资源与环境,1996,5(3):273-277.

[5] 鲍全盛,曹利军.密云水库非点源污染评价研究[J].水资源保护,1997,(1):8-11.

[6] Bouraoue F and Dllaha T A. ANSWER-2000: Runoff and Sediment Transport Model[J]. *Environ Eng*,1996, 122(6):493-502.

[7] USDA. CREAMS, A Field Scale Model For Chemical, Runoff And Erosion From Agricultural Management Systems[M]. Conservation research report. USDA. Washington,D.C.1980.643.

[8] Young R A,Onstad C A,Bosch D D,Anderson W P. AGNPS:A non-point-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. *Soil Water Conserv*,1989,44(2):168-173.

[9] Donigian A A,Jr and Crawford N H.Modeling Pesticides and Nutrients on agricultural lands. Environmental Protection Technology Series, EPA -600/ 2-76-043.Ofc.Of Res. And Development [M]. US EPA, Washington, D.C.1976. 317.

[10] 夏 青,庄大邦,廖庆宜.计算非点源污染负荷的流域模型[J].中国环境科学,1985,5(4):23-30.

[11] 陈西平.计算降雨及农田径流污染负荷的三峡库区模型[J].中国环境科学,1992,12(1):48-52.

[12] 李怀恩.透水性流域非点源产污模型的初步研究[J].水利学报,1998(2):16-19.

[13] Willams. Sediment-yield prediction with Universal Equation, using runoff energy factor[A]. In: Present and Prospective Technology for predicting sediment yield and sources[C].USDA.ARS-S-40.1975. 244-252.

[14] 陈西平.计算降雨及农田径流污染负荷的三峡库区模型[J].中国环境科学,1992,12(1):48-52.

[15] 施为光,凌文州.用实测资料计算流域非点源污染负荷—以四川清平水库为例[J].长江流域资源与环境,1996,5(3):273-277.

[16] 施为光.四川省清平水库非点源污染负荷计算[J].重庆环境科学,2000,22(2):33-36.

[17] 田家怡,慕金波,王安德.山东小清河流域水污染问题与水质管理研究[M].北京:石油大学出版社,1991.