

流域土壤流失携带污染物量的计算方法

惠二青¹,黄钰铃^{1,2},刘德富¹

(1.三峡大学,湖北宜昌 443002;2.西北农林科技大学,陕西杨凌 712100)

摘要 根据土壤侵蚀预测模型计算流域土壤侵蚀量,结合河道断面现有的常规监测资料,推算出土壤流失携带的污染物平均浓度,建立流域土壤流失携带的污染物量计算方法。

关键词 流域;土壤流失;亨利吸附定律;计算方法;污染物

中图分类号 :X502 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2006)03-0033-03

Computation of pollutant loading by soil erosion from catchments

HUI Er-qing¹, HUANG Yu-ling^{1,2}, LIU De-fu¹

(1. Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract Soil erosion from catchments was calculated by use of soil erosion prediction model. Based on the averaged concentration of pollutants loading of soil erosion calculated from field data of river cross sections, a computation method of pollutants taken by soil erosion was put forward.

Key words :catchment; soil erosion; the Henry adsorption principle; calculation method; pollutant

土壤流失对土壤及水环境质量的影响越来越严重,其携带的固态污染物也是湖库水体水质恶化的主要原因之一。作为水体非点源污染源的重要组成部分,土壤侵蚀带走的细粒级组分是土壤中营养含量最高的部分,造成土壤中有机质和养分的大量流失^[1-2]。在我国西北黄土高原地区,土壤侵蚀造成的泥沙流失是土壤养分衰减的主要途径,流失泥沙所含的养分不仅高于径流中的养分浓度,而且氮、钾、铜、铁和有机质也较富集^[3]。此外,这些有机质和养分进入水体以后导致水体水质恶化,给工农业带来一定的经济损失。国内外学者已有多种方法可以预测土壤的流失量^[4],但关于定量估算土壤流失携带的污染物的研究较少。现有计算方法多为实测流失土壤表面携带的污染物浓度,结合河道断面泥沙监测资料,来获得流域土壤流失携带的污染物量,但是国内许多流域缺乏河道断面泥沙吸附污染物监测资料。本文根据亨利吸附定律,利用河道断面常规监测资料,推算流失的土壤颗粒携带的污染物平均

浓度,结合已有的土壤侵蚀模型计算土壤流失携带的固态污染物量。

1 计算方法

1.1 土壤流失量

采用土壤流失量计算方法通用方程(USLE)的一种改进形式——MUSLE^[5]作为土壤侵蚀量预测模型,该模型可以模拟年侵蚀量和次暴雨产沙量。MUSLE 的表达式为

$$Y = \beta_1 (Qq_p)^{\beta_2} K C P_E L_S \tag{1}$$

式中: Y 为单场暴雨产沙总量, t ; q_p 为峰值流量, m^3/s ; Q 为单场降雨的总产流量, m^3 ; K 为土壤可蚀性因子; C 为作物覆盖因子; P_E 为侵蚀控制措施因子; L_S 为地形因子; β_1 、 β_2 为经验系数。对于次降雨来说, q_p 和 Q 可以利用SCS降雨径流模型^[6]计算,也可以从径流过程线上直接得出;对于年降雨过程来说,只能利用SCS降雨径流模型计算其值。

基金项目:湖北省科技攻关计划项目(2005AA401C38);湖北省教育厅重大计划项目(2004Z003)
作者简介:惠二青(1977—),男,山西运城人,讲师,主要从事水土流失及污染控制研究。E-mail:huierqing@163.com

1.2 污染物浓度

降雨径流的冲刷是产生土壤流失的原动力。因此可以认为土壤流失主要是由地表径流引起的。地表径流携带的污染负荷主要由两部分组成,一部分是在降雨过程中污染物溶解在径流中并随其汇入水体,另一部分是由径流侵蚀的土壤颗粒表面吸附的固态污染物,它随降雨径流进入到水体中。根据亨利吸附定律,对于极稀的溶液,吸附等温线是线性的,溶质的吸附量与溶液的平衡浓度呈正比。地表径流与其携带的土壤颗粒相当于一个极稀的溶液,在地表径流到达监测断面时,需要一定的时间,土壤颗粒表面吸附的污染物浓度与径流中溶解的污染物浓度基本上可以达到吸附平衡。因此,只要计算出地表径流中溶解态污染物浓度,就可以根据亨利吸附定律得到流失土壤表面所吸附的污染物平均浓度。

首先利用河道断面监测资料进行河流中溶解态污染物平均浓度的估算,然后计算河水中溶解态污染物量 W_{zs} 。

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^m C_i Q_i / \sum_{i=1}^m Q_i \quad (2)$$

$$W_{zs} = \bar{C} \sum_{j=1}^n Q_j \Delta t_j \quad (3)$$

式中: m 为研究时段内污染物的常规监测次数; C_i 为第 i 次监测污染物的浓度; Q_i 为第 i 次监测的流量; $\bar{C}$ 为污染物的流量加权平均浓度; n 为研究时段流量计算子时段数; Q_j 为第 j 时段的平均流量; Δt_j 为第 j 时段的时间。

得到 W_{zs} 后,再计算河川基流携带的点源污染物量:

$$W_u = Q_u C_u \Delta t_j \quad (4)$$

河流枯水季节的水质污染主要由点源污染引起。点源污染量可通过径流的形成进行分析,采用直线斜割法得到河川基流量 Q_u ,并根据水质资料情况,从中选取降雨最少的几个阶段的污染物浓度的流量加权平均,作为点源污染物平均浓度 C_u 。

地表径流中溶解的污染物平均浓度

$$C_g = \frac{W_{zs} - W_u}{Q_g \Delta t_j} = \frac{W_g}{Q_g \Delta t_j} \quad (5)$$

式中: Q_g 为地表径流量; W_g 为得到地表径流中溶解态污染物量。

根据亨利吸附定律可得流失土壤颗粒吸附的污染物平均浓度

$$C_s = k C_g \quad (6)$$

式中: k 为吸附系数,即单位重量流失的土壤吸附的固态污染物量,可通过吸附等温线实验得到近似值。

1.3 污染物量

利用土壤侵蚀方程和浓度计算方程可得土壤流

失携带的吸附态污染物量

$$W_s = C_s Y \quad (7)$$

2 应用实例

小清河发源于泰沂山北麓,西北以黄河为界,东临莱州湾,位于黄河下游南岸入海口处。年均降水量为 646.7 mm,其中 6~9 月份降水量占全年的 73.5%。降水年际、年内分布很不均匀。小清河流域易在 6~9 月发生暴雨及大暴雨,带来突发性水体污染事件^[7],同时农田氮、磷元素在暴雨径流冲刷下汇入小清河水体,导致莱州湾水体富营养化^[8]。莱州湾海域形成的无机氮浓度等值线以小清河河口为轴心呈舌状分布,说明小清河是莱州湾无机氮主要污染源^[9]。随着小清河流域综合整治工程的实施,非点源污染将成为小清河流域无机氮污染的主要原因。因此,通过对小清河流域流失土壤携带无机氮量进行的定量分析,为掌握小清河流域非点源污染组成及其综合治理和污染控制规划提供了科学依据,为控制莱州湾赤潮发生,防止其生态环境恶化提供研究的边界条件。

2.1 研究区域断面划分

利用河流断面常规监测的水文、水质资料计算土壤流失携带的无机氮量,小清河流域无机氮监测断面只有岔河断面,岔河断面以下没有雨量站,因此在计算时,将岔河断面以上作为一个研究区来进行模拟计算。岔河断面以下农田和点源污染源很少,只有一条常年干涸的支流塌河,因此岔河断面流失土壤携带的无机氮量可看作小清河流域流失土壤携带的无机氮总负荷。

2.2 参数确定

2.2.1 MUSLE 方程参数

MUSLE 方程在国内应用较多,其参数可以从模型自带的查算表获得。查算表中数据是在国外流域模拟研究的基础上获得,鉴于国内外流域水文地质状况的差别,利用历史资料,通过数学率定方法获得模型参数,避免直接引用国外参数带来估算误差。MUSLE 模型包括 β_1 、 β_2 、 K 、 C 、 P_E 和 L_S 6 个主要参数。因研究区下垫面比较复杂,可对土地利用类型和流域下垫面进行一定程度概化,从美国农业部研究所提供的标准参数表^[10]中获得 K 、 C 和 P_E 值。地形因子受多种因素影响,不同地域地形因子计算不尽相同。国内外学者根据各自研究,提出许多地形因子计算方法。考虑到研究区域主要是丘陵和山区,跟杨子生研究区域土地利用类型比较接近,因此选用杨子生公式来计算地形因子。

L_S = (L/20)^{0.24} (\frac{\sigma}{0.0875})^{1.32} \tag{8}

经验系数 β_1 和 β_2 利用 1983 ~ 1995 年含沙量资料进行回归分析 ,得到最优值。

对 $Y = \beta_1 (Qq_p)^{\beta_2} KCP_E L_S$ 进行变形得 :
 $\ln Y = \beta_2 \ln(Qq_p) + \ln \beta_1 + \ln(KCP_E L_S)$

设 $\ln Y = y \quad \ln(Qq_p) = x \quad \ln \beta_2 = a$
 $\ln \beta_1 + \ln(KCP_E L_S) = b$

式(2)就转换成 $y = ax + b$ 的形式 ,参数 K 、 C 、 P_E 、 L_S 已知 ,利用年峰值流量(利用 SCS 模型获得)和含沙量资料进行回归分析 ,得到 β_1 和 β_2 的值 ,并用 1996 ~ 1999 年的含沙量资料进行验证 (见表 1) 。土壤流失量的相对误差平均值为 19.15% ,最大相对误差为 29.7% ,最小相对误差为 - 12.6% ,模拟结果接近观测值。MUSLE 方程中各参数值列于表 2 中。

表 1 流域土壤流失量模拟结果

年份	实际产沙量/t	土壤流失量模拟值/t	相对误差/%
1996	170 838.72	204 886.47	- 16.6
1997	75 520.42	64 152.17	17.7
1998	265 083.20	204 440.77	29.7
1999	58 629.31	67 049.57	- 12.6

表 2 MUSLE 方程中各参数取值

参数	取值	说 明
β_1	0.53	利用线性回归获得
β_2	1.12	利用线性回归获得
K	0.28	黏壤土、有机质含量 0.6% ~ 1.0%
C	0.085	乔灌混交 ,覆盖率 40% ~ 60%
P_E	0.53	土壤坡度 1% ~ 15% ,耕作措施包括等高操作和带状操作、隔坡梯田和直行操作 ,坡度和操作措施两两对应 ,计算其算术平均值作为 P_E 取值
L_S	0.000 752	利用杨子生公式计算获得

2.2.2 吸附系数

计算流失土壤颗粒吸附的污染物平均浓度 C_s 需要确定吸附系数 k 。土样有机质含量和土壤粘粒含量不同 ,吸附能力也不同 ,低浓度吸附等温线一般呈直线型。2002 年 5 月份在小清河流域 4 个断面 (吴家堡、黄台、湖滨、大营)附近的蔬菜地、小麦地、河边裸露地各取土样 1 kg ,按土地利用类型分别混合后分成 3 份进行土壤吸附等温线实验 ,得到吸附平衡时土壤颗粒吸附量 ,所得结果为 24.558 mg/kg、23.343 mg/kg、18.994 mg/kg。吸附系数 k 采用 3 种土地利用类型吸附系数的算术平均值 ,即 22.308 mg/kg。

2.3 TIN 负荷量计算

小清河岔河站在 1996 ~ 1999 年的丰、平、枯季节进行了总无机氮 TIN(氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮)溶解态的浓度分析。利用 MUSLE 模型模拟结果和式(2)~(7) ,计算小清河流域 1996 ~ 1999 年土壤

流失携带 TIN 及其各成分负荷量 ,结果见表 3。

表 3 TIN 及其各成分负荷量

年份	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TIN
1996	7.21	1.48	4.71	13.40
1997	9.55	0.19	0.57	10.31
1998	13.58	1.67	1.59	16.84
1999	15.90	0.09	0.35	16.34
平均	11.56	0.86	1.80	22.68

从表 3 可知 :①除 1999 年外 ,其他各年份流失土壤携带的 TIN 量与表 2 中土壤流失量变化趋势接近 ,说明流失土壤携带的污染物质与土壤流失量有一定关系。②1999 年 TIN 负荷量与 1998 年相差不大 ,而 1999 年土壤流失量远小于 1998 年。这主要是因为 1999 年 TIN 溶解态浓度远高于其他年份 ,约为 1998 年的 2.7 倍。这说明计算方法的精确度与溶解态浓度有较大关系。因此 ,提高溶解态污染物监测精度可以在一定程度上提高计算精确度。

3 结 论

a. 利用常规水文水质资料 ,结合应用土壤侵蚀模型进行计算 ,提出土壤流失携带的固态污染物负荷计算方法 ,较为简便、经济、实用 ,主要用于缺乏流失土壤携带污染物监测资料的流域。此方法不仅可以用来估算不同年土壤流失携带的污染物质 ,还能计算次降雨侵蚀的土壤携带的污染物质。该计算方法在山东省莱州湾小清河流域进行了应用 ,计算结果比较符合实际分析。

b. 对于有泥沙量监测资料的研究断面 ,可以将其与侵蚀土壤携带的污染物浓度计算公式结合 ,计算断面土壤流失携带的污染物质。对于没有泥沙量监测资料的河道断面 ,可以利用下垫面相近地区的 MUSLE 模型的参数值 ,结合侵蚀土壤携带的污染物浓度计算公式 ,计算断面流失土壤携带的污染物质。

c. 提高溶解态污染物浓度的监测精度 ,可以在一定程度上提高计算方法的精确度。此外 ,可以将计算方法与“3S”技术结合、细化流域、提高参数精确度 ,更进一步提高计算方法的精确度。

参考文献 :

[1] OLSON T C. Restoring the productivity of glacial till soil after top soil removal[J]. Soil Water Conserv ,1977 ,2 (2) :130-132.
[2] RHOTON F E ,TYLER D D. Erosion induced changes in soil properties of affragipan soil[J]. Soil Sci Soc Am ,1990 ,54 :223-228.
[3] 康玲玲 ,王云璋 ,吴卿 ,等 .暴雨强度对坡地土壤养分流失影响的试验研究[C]//黄土高原土壤侵蚀与旱地农业 .西安 :陕西科学技术出版社 ,1999. (下转第 46 页)

水污染防治法、水土保持法、建设项目水资源论证管理办法等,但还没有涉及生态环境水权相关方面的内容。这使生态水、生活水和生产水发生矛盾,产生冲突,使野生动植物、生物栖息地、景观建设需水就得不到有力保障,使生物多样性受损、生态环境遭受破坏。面对当前的生态环境状况,为缓解其恶化,相关法律法规的研究已变得迫不及待。

参考文献：

[1] GLEIK P H. Water in crisis :paths to sustainable water use[J]. Ecological Application ,1998 ,8(3) 571-579.

[2] FALKENMARK M. Coping with water scarcity under rapid population growth[M]. Pretoria :Conference of SADC Minsters , 1995 23-24.

[3] RASHIN P D ,HANSEN E ,MARGOLIS R M. Water and Sustainability :global patterns and long-range problems[J]. Natural Researches Forum. 1996 20(1) :1-15.

[4] 贺东辰,刘维义.柴达木盆地水资源开发潜力分析[J]. 西北水资源与水工程 ,1998 ,9(2) 53-57.

[5] 王让会,宋郁东,樊自立.塔里木流域“四源一干”生态需水量的估算[J].水土保持学报,2001(3) :19-22.

[6] 贾保全,许英勤.干旱区生态用水的概念和分类[J].干旱区地理,1998 ,21(2) 8-12.

[7] 贾保全,慈龙俊.新疆生态用水量的初步估算[J].生态学报,2000 ,20(2) 243-250.

[8] 邓红星,刘昌明,丰华丽.生态需水的理论内涵探讨[J].水科学进展,2004 ,15(5) 626-633.

[9] 李丽娟,邓红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J].地理学报,2000(7) 495-500.

[10] 王西琴,刘昌明.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究[J].环境科学学报,2001 ,21(5) 543-552.

[11] 石伟,王光谦.黄河下游生态需水量及其估算[J].地理学报,2003(9) 595-602.

[12] 倪晋仁,金玲,赵业安.黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J].水利学报,2003(10) :1-7.

[13] 卞戈亚.南方地区河流系统生态需水量系统组成分析[J].水利与建筑工程学报,2003(12) :18-21.

[14] 卞戈亚,周明耀,朱春光.南方丘陵地区河流系统生态需水量的计算[J].扬州大学学报 :自然科学版,2004 (5) :74-78.

[15] 王根绪.干旱内陆流域生态需水量及其估算[J].中国沙漠,2003(6) :129-131.

[16] 刘小勇.黄河下游河道输沙用水量研究[J].应用基础与工程科学学报,2003(9) 253-262.

[17] 姜德娟,王会肖,李丽娟.生态环境需水量分类及计算方法综述[J].地理科学进展,2003(7) 369-378.

[18] 许新宜,杨志峰.试论生态环境需水量[J].中国水利,2003(3A) :12-15.

[19] 严登华,何岩,邓伟.东辽河流域坡面系统生态需水研究[J].地理学报,2003(11) 685-692.

[20] 张远,杨志峰.黄淮海地区林地最小生态需水量研究[J].水土保持学报,2003(6) :72-75.

[21] 崔树彬.关于生态环境需水量若干问题的探讨[J].中国水利,2001(8) :71-75.

[22] 丰华丽,王超,李剑超.干旱区流域生态需水量估算原则分析[J].环境科学与技术,2003(1) 31-33.

[23] 张远,杨志峰.林地生态需水量计算方法与应用[J].应用生态学报,2003(12) :1566-1570.

[24] 马艳霞,许武德.关于生态环境需水量的探讨[J].东北水利水电,2003(10) 50-52.

[25] 沈文君,沈佐锐,王小艺.生态系统健康理论与评价方法探析[J].中国农业学报,2004(1) :159-161.

[26] 张宏锋,利卫红,陈亚鹏.生态系统健康评价研究方法进展[J].干旱区研究,2003(12) 330-335.

[27] 黄子琛.荒漠植物的水分关系与抗旱性[J].甘肃林业科技,1992 ,14(2) :1-7.

(收稿日期 2004-11-07 编辑 舒建)

(上接第 29 页)

参考文献：

[1] YAGER R R. Fuzzysets ,probabilities and decision[J]. Journal of Cybematics ,1980(10) :1-18.

[2] 贺仲雄.模糊数学及其应用[M].天津 :天津科学技术出版社,1983 :190-215.

[3] KACPRZYK J. Multistage fuzzy control :a model-based approach to fuzzy control and decision making[M]. Wiley :Chichester , 1997.

[4] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].北京 :中国环境科学出版社,1990 286-302.

(收稿日期 2004-10-16 编辑 舒建)

(上接第 35 页)

[4] 白清俊.流域土壤侵蚀预报模型的回顾与展望[J].人民黄河,1999 ,21(4) :18-21.

[5] WILLAMS J R. Sediment-yield prediction with universal equation , using runoff energy factor [C]//Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. Washington :USDA ,ARS-S-40 ,1975 244-252.

[6] 高蕴珏,许有朋.SCS 遥感水文模型在曹娥江流域应用研究[J].南京大学学报 :自然科学,1992 ,28(1) :150-159.

[7] 田家怡,高奎江,龚洪云,等.小清河流域暴雨与渤海莱州湾近海突发性污染风险评价的研究[J].海洋环境科学,1993 ,13(3) 59-68.

[8] 赵章元,孔令辉.渤海海域环境现状及保护对策[J].环境科学研究,2000 ,13(2) 23-27.

[9] 单志欣,郑振虎.渤海莱州湾的富营养化及其研究[J].海洋湖沼通报,2000(2) 41-46.

[10] KIRKBY M J,MORGAN R P C.土壤侵蚀[M].王礼先,吴斌,洪惜英,译.北京 :水利水电出版社,1985.

(收稿日期 2004-11-09 编辑 舒建)