

基于 USLE 的黑河流域非点源污染定量研究

胥彦玲¹, 李怀恩¹, 倪永明², 扬帆³

(1 西安理工大学 环境科学研究所, 陕西 西安 710048; 2 北京自然博物馆, 北京 100050;

3 西安科技大学 地质与环境工程系, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为有效控制黑河流域因土壤侵蚀而产生的氮、磷非点源污染, 改善黑河水库水质, 以流域的行政单元作为估算非点源污染的响应单元, 利用通用土壤流失方程(USLE)并选取合适的方法进行了参数选取和率定, 在 GIS 软件辅助下, 估算了各单元的土壤侵蚀量, 计算了流域吸附态氮磷的污染负荷。结果表明: (1) 文中所用估算方法较为合理, 全流域的平均侵蚀模数为 315.06 t/(km²·年); (2) 流域每年由土壤流失所引起的吸附态氮磷总负荷量分别达到 15.702 和 3.866 t, 对流域水环境造成了严重的污染和破坏; (3) 马召乡、甘浴湾乡、板房子乡、安家岐乡、厚畛子乡以及小王涧乡对流域氮磷污染负荷贡献较高, 是流域非点源污染控制的主要源区; (4) 退耕还林还草, 增加植被覆盖度, 减少农事活动是削减和控制流域非点源污染的主要措施。

[关键词] 水土流失; USLE 方程; 氮磷污染负荷; 黑河流域

[中图分类号] X524

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)03-0138-05

黑河流域引水工程是西安市的主要供水水源, 其水质与水量直接关系着西安市 300 万市民的身体健康与西安市社会经济的可持续发展。该流域内坡耕地较多, 坡度大, 由土壤侵蚀所产生的氮磷非点源污染是流域的主要污染源之一, 因此定量分析流域氮磷污染负荷, 对治理和改善流域水环境具有重要的指导意义。本研究借助于 GIS 软件, 利用通用土壤流失方程(USLE)对流域土壤侵蚀量进行了估算, 并利用 SWAT 模型中颗粒态氮磷污染负荷模型进一步对流域氮、磷污染负荷进行了定量预测和分析, 以为流域氮磷污染削减与控制提供理论依据。

1 流域概况

黑河流域位于秦岭北麓, 面积 1 481 km², 下辖 8 个行政乡和 4 个行政村。该区属暖温带半干旱、半湿润大陆性季风气候区, 受地形地貌、大气环流、太阳辐射等综合因素的制约, 本区降水、蒸发等气象因素在时空分布上有较大差异。流域径流主要由降雨形成, 径流年际变化较大且年内分配不均匀。该区内地貌类型大体可分为: 低山陡坡型, 海拔 600~1 000 m; 中山陡坡型, 海拔 1 000~3 500 m; 高山陡坡型, 海拔 3 500 m 以上。由于流域坡度较大, 坡耕地较

多, 易引起土壤流失发生, 加之土壤中氮磷污染含量较大, 使得由土壤侵蚀引起的非点源污染成为流域水质污染的主要污染源之一。

2 研究方法及资料处理

非点源污染的估算应以相对均一的区块作为估算单元, 即应以地貌类型、植被类型及盖度、土壤类型及土地利用状况相对一致的区域作为响应单元。在流域图文资料不足的情况下, 本研究根据流域的相对均一性和资料的可获得性, 从流域非点源污染控制的角度考虑, 按流域行政区划图将研究区划分为 9 个估算单元, 再根据各个估算单元的相对均一性进行流域非点源污染负荷计算。

2.1 流域土壤侵蚀量估算及参数选取

Wischmeier 等^[1]于 20 世纪 50 年代提出的通用土壤流失方程(USLE), 是估算高地侵蚀造成土壤流失的最普遍的估算式, 本研究采用该方程进行土壤侵蚀计算。该方程全面考虑了影响土壤侵蚀的自然因素, 并通过降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度和坡长、植被覆盖和水土保持措施 5 个因子进行定量计算, 其表达式为:

$$A=R \times K \times LS \times c \times P.$$

[收稿日期] 2005-07-18

[基金项目] 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研计划项目(05JS35)

[作者简介] 胥彦玲(1977-), 女, 陕西汉中, 在读博士, 主要从事生态水文及环境科学研究。E-mail: yanling7722@126.com

[通讯作者] 李怀恩(1960-), 男, 陕西商洛人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文与水资源保护研究。E-mail: L.huaen@mail.xaut.edu.cn

式中, A 为年土壤流失量; R 为降雨径流因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡度坡长因子; c 为经营管理因子; P 为水土保持措施因子。

2.1.1 坡度坡长因子 (LS) 的获取 利用黑河流域 1:5 万的数字高程模型 (DEM), 在 Arc GIS 辅助下进行地形特征分析, 提取坡度坡长图。利用通用土壤流失方程中坡度坡长因子的计算方法进行 LS 的计算^[2,3], 其公式如下:

$$LS = (\lambda/22.13)^m (65.4 \sin^2\theta + 4.56 \sin\theta + 0.065)。 \quad (1)$$

式中, λ 为坡长 (m); θ 为倾斜角; S 为坡度百分比; m 为坡长指数, 根据 m 的经验取值, 其范围如下:

$$m = \begin{cases} 0.5, & S \geq 5\% \\ 0.4, & 3.5\% < S < 4.5\% \\ 0.3, & 1\% < S < 3\% \\ 0.2, & S < 1\% \end{cases}$$

2.1.2 降雨径流因子 R 值的估算 降雨侵蚀因子 R 值与降雨量、降雨强度、降雨历时、雨滴大小及雨滴下降速度有关, 它反映了降雨对土壤的潜在侵蚀能力。降雨侵蚀力难以直接测定, 本研究采用 Wischmeier 等^[2] 提出的直接利用多年各月平均降雨量推求 R 值的经验公式计算, 即

$$R = \sum_{i=1}^{12} \left[1.735 \times 10^{\left(1.5 \times \lg \frac{P_i^2}{T} - 0.8188 \right)} \right], \quad (2)$$

式中, P 和 P_i 分别为年和月平均降雨量。

根据黑河流域各估算单元监测站 1980~1990 年监测资料计算的 R 值, 其结果见表 1。

2.1.3 土壤可蚀性因子 K 的确定 K 值的大小与土壤质地、土壤有机质含量有较高的相关性。Williams 等^[4] 在 EPIC 模型中发展了土壤可蚀性因子 K 的估算方法, 使其使用更为简便, 只要有土壤有机碳和土壤颗粒组成资料, 即可估算 K 值, 其计算公式为:

$$K = 10.2 + 0.3 \exp[-0.0256 S_d (1 - S_f/100)] \left[\frac{S_f}{(C_f + S_f)} \right]^{0.8} \{ 1.0 - 0.25C/[C + \exp(3.72 - 2.95C)] \} \{ 1.0 - 0.7(1 - S_d)/100 [(1 - S_d)/100 + \exp[-5.51 + 22.9(1 - S_d)/100]] \}, \quad (3)$$

式中, S_d 为砂粒含量 (%); S_f 为粉粒含量 (%); C_f 为粘粒含量 (%); C 为有机碳含量 (%).

流域土壤类型有棕壤、暗棕壤以及棕壤-褐土, 根据陕西省第二次土壤普查数据集查得土壤机械组成和有机质含量, 确定各类型土壤的可蚀性因子, 然后根据流域各行政单元的土壤类型所占面积比例加权平均获得各单元土壤可蚀性因子 K 值, 详见表 1。

表 1 研究区域各行政单元土壤侵蚀因子的计算值

Table 1 Soil erosion of the research district

估算单元 Estimate unit	降雨径流因子 R Rainfall and runoff factor	土壤可蚀性因子 K Erosion factor	覆盖度 $C/\%$ Vegetation coverage	经营管理因子 c Management factor
厚畛子乡 Houzhenzi village	158.894	0.409 5	94.54	0.008
板房子乡 Banfangzi village	188.351	0.410 9	95.52	0.01
沙梁子乡 Shaliangzi village	140.206	0.415 1	95.63	0.01
安家岐乡 Anjiaqi village	169.546	0.416 5	93.86	0.01
小王洞乡 Xiaowangjian village	147.395	0.412 3	93.67	0.011
双庙子乡 Shuangmiaozhi village	146.60	0.415 1	93.82	0.01
陈河乡 Chenhe village	145.785	0.414 4	88.55	0.013
甘浴湾乡 Ganyuwan village	124.05	0.419 3	86.61	0.015
马召乡 Mazhao village	124.05	0.406 7	41.8	0.058

2.1.4 经营管理因子 c 的确定 c 因子反映的是所有有关植被覆盖和变化对土壤侵蚀的综合作用, 其值大小取决于具体的作物覆盖、轮作顺序及管理措施的综合作用等。也就是说, c 值的取值主要与植被覆盖和土地利用类型有关。根据黑河流域土地利用现状及植被覆盖度的调查结果, 并参考相关文献^[3,5,6], 可获得不同土地利用类型的 c 值, 即耕地 (小麦种植) 为 0.1, 林地为 0.006, 园地 (果园) 为 0.035, 草地为 0.01, 居民地和交通用地为 0.20, 荒

地为 0.06, 水域为 0。按估算单元土地利用类型的面积加权平均获得各估算单元的 c 值, 如表 1 所示。

2.1.5 水土保持措施因子 P 的确定 水土保持措施因子 P 是采用专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值。根据研究流域土地利用现状, 参考相关文献^[3,5,6] 确定的 P 值见表 2。然后针对各估算单元进行面积加权平均可以获得各估算单元的 P 值。

表 2 黑河流域水土保持措施因子 P 值的确定
Table 2 Adopted value of P factor in Heihe watershed

用地类型 Landuse type	P	用地类型 Landuse type	P
耕地 Plantation	0.35	交通用地 Traffic area	1.00
林地 Woodland	1.00	居民地 Residential area	1.00
灌木林地 Shrubby woodland	0.20	未利用地 Untapped land	1.00
园地 Garden plot	0.4	水体 Water area	0
草地 Grassplot	0.20		

2.2 氮磷污染负荷估算模型及参数处理

有机氮磷通常吸附在土壤颗粒上随径流迁移,这种形式的氮磷负荷和土壤流失量密切相关,在参考 SWAT 模型的基础上,其负荷用下式^[7]计算:

$$Q_{org} = 0.001C_{org} \cdot \frac{Q_{sed}}{A_{hrn}} \cdot \eta, \quad (4)$$

式中, Q_{org} 为有机氮磷流失量, kg/hm^2 ; C_{org} 为有机氮磷在表层(10 mm)土壤中的浓度, g/t ,可根据土壤采样实测结果获得; Q_{sed} 为土壤侵蚀量, t ; A_{hrn} 为水文响应单元的面积, hm^2 ; η 为富积系数,无量纲,可用下式计算:

$$\eta = 0.78 \cdot (\text{conc}_{sed,surf})^{-0.2168}, \quad (5)$$

其中,

$$\text{conc}_{sed,surf} = \frac{Q_{sed}}{10 \cdot A_{hrn} \cdot Q_{surf}}, \quad (6)$$

式中, $\text{conc}_{sed,surf}$ 为地表径流中的泥沙含量, mg/m^3 ; Q_{surf} 为地表径流量, mm 。

根据全流域 1981~1990 年 10 年的年平均实测输沙量,并利用径流分割法将实测的多年平均径流量划分为地表径流量和基流量,再结合流域面积,根据公式(5)和(6)计算出 η 值为 4.129 5。

3 土壤侵蚀量的估算与检验

以估算单元为目标,将上述各侵蚀量因子在 GIS 软件辅助下进行连乘获得各估算单元的土壤侵蚀量,结果见表 3。

表 3 各估算单元土壤侵蚀量估算结果

Table 3 Estimate of soil loss

估算单元 Estimate unit	面积/ km^2 Area	植被覆盖率/% Vegetation coverage	侵蚀模数/ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{年}^{-1})$ Erosion modulus
厚畛子乡 Houzhenzi village	491.18	94.54	262.74
板房子乡 Banfangzi village	231.9	95.52	439.12
沙梁子乡 Shaliangzi village	78.97	95.63	286.28
安家岐乡 Anjiaqi village	142.54	93.86	348.87
小王涧乡 Xiaowangjian village	117.62	93.67	370.45
双庙子乡 Shuangmiaozhi village	176.5	93.82	277.54
陈河乡 Chenhe village	177.61	88.55	268.03
甘浴湾乡 Ganyuwan village	59.88	86.61	295.20
马召乡 Mazhao village	4.8	41.8	1 155.60

把各单元土壤侵蚀模数计算结果按面积加权平均得全流域平均侵蚀模数为 $315.06 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$,与 1981~1990 年实测的多年平均输沙模数($306.02 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)的相对误差为 2.87%,与水保调查结果(坡面侵蚀模数 $298 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)的相对误差为 5.41%,相对误差均较小。从表 3 计算结果可以看出,马召乡 4 村的侵蚀模数最大,其次为板房子乡。这主要是因为马召乡 4 村的植被覆盖率低,坡耕地面积较大,人口密集,耕地扰动大,水土流失易于发生;对于板房子乡而言,主要是因为其坡度较大、坡耕地面积多,从 DEM 中提取的坡度来看,板房子乡的平均坡度为 69.27° ,从土地利用现状来看,板房

子乡的耕地面积较大,耕地为 532.77 hm^2 ,占总耕地面积的 15.28%;其他各单元的侵蚀模数也均在合理范围内^[8]。以上分析表明,该估算结果比较准确,各因子的选取较为合理,估算结果可用于非点源污染负荷的计算。

4 氮磷污染负荷的计算

根据研究区对不同土壤取样获得流域不同土壤类型中氮磷的背景含量,再按各类土壤在估算单元所占面积权重进行加权平均,获得估算单元的氮磷浓度,结合土壤侵蚀量估算值,利用式(4)计算出各估算单元的氮磷污染负荷量,计算结果见表 4 和表 5。

表4 吸附态氮污染负荷估算结果

Table 4 Estimate of adsorbed nitrogen pollution

估算单元 Estimate unit	氮浓度/(g·t ⁻¹) Nitrogen concentration	吸附态氮负荷/ (g·hm ⁻² ·年 ⁻¹) Adsorbent nitrogen loadings	吸附态氮总负荷/t Adsorbent nitrogen total loadings
厚畛子乡 Houzhenzi village	10.508	113.83	5.591
板房子乡 Banfangzi village	6.968	126.35	2.930
沙梁子乡 Shaliangzi village	7.376	87.20	0.689
安家岐乡 Anjiaqi village	7.469	107.60	1.534
小王涧乡 Xiaowangjian village	7.194	110.05	1.294
双庙子乡 Shuangmiaozhi village	7.354	84.28	1.488
陈河乡 Chenhe village	7.283	80.61	1.432
甘浴湾乡 Ganyuwan village	7.747	94.44	0.565
马召乡 Mazhao village	7.821	373.22	0.179
合计 Summation			15.702

表5 吸附态磷污染负荷估算结果

Table 5 Estimate of adsorbed phosphorus pollution

估算单元 Estimate unit	磷浓度/(g·t ⁻¹) Phosphorus concentration	吸附态磷负荷/ (g·hm ⁻² ·年 ⁻¹) Adsorbent phosphorus loadings	吸附态磷总负荷/t Adsorbent phosphorus total loadings
厚畛子乡 Houzhenzi village	3.09	27.14	1.333
板房子乡 Banfangzi village	1.440	26.11	0.606
沙梁子乡 Shaliangzi village	1.989	23.51	0.186
安家岐乡 Anjiaqi village	2.114	30.46	0.434
小王涧乡 Xiaowangjian village	1.745	26.69	0.314
双庙子乡 Shuangmiaozhi village	1.911	21.90	0.387
陈河乡 Chenhe village	1.864	20.63	0.366
甘浴湾乡 Ganyuwan village	2.490	30.35	0.182
马召乡 Mazhao village	2.568	122.55	0.059
合计 Summation			3.866

由表4和表5可以看出,黑河流域每年因土壤流失而引起的非点源氮磷污染总负荷量分别为15.702和3.866 t,其中厚畛子乡氮磷流失量最高,分别占流域总流失量的35.61%和34.48%;其次为板房子乡,分别占流域总流失量的18.66%和15.67%。从单位负荷来讲,以马召乡4村的单位面积负荷最大,氮磷污染负荷分别为373.22和122.55 g/(hm²·年),主要是因为该估算单元植被覆盖度低、耕地面积大和土壤侵蚀量大;其次为厚畛子乡、板房子乡、安家岐乡、甘浴湾乡以及小王涧乡,主要原因是厚畛子乡虽然土壤侵蚀量不高,但区内拥有处于原始森林状态的太白山自然保护区,土壤中氮磷背景含量较高,使得随土壤流失而带走的氮磷负荷量亦较高;板房子乡、安家岐乡、甘浴湾乡以及小王涧乡由于区内坡度大、耕地多、土壤侵蚀量大,使得随土壤侵蚀而流失的氮磷污染负荷较大。总

之,坡度大、坡耕地多、植被覆盖率低、土壤侵蚀量大是导致氮磷随土壤流失的主要原因。

5 结论

1)应用通用土壤流失方程USLE进行了黑河流域土壤侵蚀量估算,所取得的结果和环境因素较为符合,故其可用于流域非点源污染负荷的估算。

2)流域每年由土壤流失所引起的吸附态氮磷总负荷量分别达到15.702和3.866 t,对流域水环境造成了严重的污染和破坏。

3)马召乡、甘浴湾乡、板房子乡、安家岐乡、厚畛子乡以及小王涧乡对流域氮磷污染负荷贡献较高,是流域非点源污染控制的主要源区。

4)封山育林、减少耕地及人类扰动、增加植被覆盖度、合理规划土地利用方式,是削减和控制土壤侵蚀型非点源污染的主要控制措施。

[参考文献]

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains[M]. Washington D C, US-DA: Agric Handbook, 1965: 282.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses—a Guide to Conservation Planning[M]. Washington D C, USDA; US Department of Agriculture, Science and Education Administration, Agricultural Handbook, 1978: 537.
- [3] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 69-70.
- [4] Williams J R, Renard. EPIC—A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38: 381—383.
- [5] 黄金良, 洪华生, 张路平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79.
- [6] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-22.
- [7] Arnold J R, Neitsch S L, Keniry J G, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000[M]. U. S. Texas: Agricultural Research Service, 2002: 94-114.
- [8] “黑河引水工程水源保护研究”课题组. 区域环境现状调查报告[R]. 西安: 西安理工大学, 1998: 14-35.

Estimate on pollution loadings of nitrogen and phosphorus based on USLE in Heihe river watershed

XU Yan-ling¹, LI Huai-en¹, NI Yong-ming², YANG Fan³

¹ Institute of Environment Science of Xi'an University of Technology, Xi'an, Shanxi 710048, China;

² Beijing natural history museum, Beijing 100050, China;

³ Department of Geology and Environment, Xi'an, Shanxi 710054, China)

Abstract: To control effectively non-point source pollution and improve reservoir water quality in Heihe watershed, taking regionalism as estimate unity, this paper estimates soil losses of every unity using USLE and selecting right method to calibrate parameter by GIS software. Then the loadings of absorbed nitrogen and phosphorus are calculated. The results shows: 1) The estimate means is reasonable, and the average erosion modulus is 315.06 t/(km² · a). 2) the adsorptive nitrogen and phosphorus loadings are 15.702 ton and 3.866 ton respectively, which pollute and destroy water environment greatly. 3) Mazhao village, Ganyuwan, Banfangzi, Anjiaqi, Houzhenzi and Xiaowangjian village contribute more nitrogen and phosphorus loadings. They are the key source area of non-point source pollution control. 4) Returning land from farming to forestry and grass, increasing vegetation cover and decreasing farming activity are the main measures of reducing and controlling non-point source phosphorus pollution.

Key words: water and soil loss; USLE; nitrogen and phosphorus loading; Heihe river watershed