

估算流域非点源污染负荷的降雨量差值法*

蔡明, 李怀恩, 庄咏涛

(西安理工大学 环境科学研究所, 陕西 西安 710048)

[摘要] 结合我国非点源污染监测资料少的实际情况, 利用我国现有的水文站降雨资料和水质资料, 提出了一种简便易用的流域非点源污染负荷估算方法——降雨量差值法。与传统的径流分割法相比, 降雨量差值法能利用现有水文水质资料而无需增加监测项目, 即可对流域非点源污染负荷作出估算, 计算过程简单, 结果合理。

[关键词] 非点源污染; 负荷预测; 降雨量差值法; 径流分割法

[中图分类号] X522

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)04-0102-05

非点源污染(NSP)的危害性随着对点源污染控制能力的提高而逐渐表现出来, 特别是当对点源污染控制达到一定水平后, 非点源污染势必成为水环境污染的主要来源。我国点源污染控制和管理体系经多年努力已逐步完善, 随着污染物总量控制制度的推行, 非点源污染负荷的估算对流域水污染控制显得越来越重要。由于非点源污染的发生与大气、土壤、植被、水文、地质、地貌、地形等环境因素及人类活动密切相关, 具有在不确定时间内, 通过不确定途径, 排放不确定数量污染物的特性, 因此, 对其负荷的定量化估算一直是环境治理工作的重点和难点。

国内外现有NSP负荷预测模型中, 考虑污染物迁移机理的模型由于对资料要求条件高, 参数众多, 率定困难, 很难推广^[1]; 非点源污染负荷估算的径流分割法^[2-4]是先由降雨量推求径流量, 然后将径流量分割为汛期地表径流和枯季径流, 流域非点源污染负荷为流域出口断面的年总负荷量与枯季径流污染负荷量之差, 在此过程中, 由于推求步骤繁琐, 又将枯季径流污染负荷视为点源污染负荷, 导致预测结果误差较大; 输出系数法^[5-7]从流域经济、社会状况和土地利用方式对NSP负荷的影响, 建立流域非点源污染负荷与流域土地利用的相关关系。

非点源污染的产生受降雨量和降雨径流过程的影响, 其负荷量与降雨量的大小密切相关, 如能直接建立降雨量和流域非点源污染负荷之间的相关关系, 同时又不必考虑流域点源污染负荷, 将对流域非点源污染的预测、治理具有重要的现实意义。为此,

本研究尝试建立忽略径流推导和径流分割过程, 直接建立降雨量与非点源污染负荷估算的方法——降雨量差值法, 并以渭河流域1991~1999年流域出口水质监测资料进行实例分析。

1 降雨量差值法原理

在流域水质监测资料中, 其污染物成分既包括点源排放的污染物, 也包括非点源排放的污染物。如何从流域水质监测资料中将点源负荷和非点源负荷区分开来一直是个难点。由于非点源污染的产生受降雨量和降雨径流过程的影响, 其负荷与降雨量的大小密切相关, 可以认为, 晴天或雨天不产生地表径流时流域的污染全部为点源污染; 只有当发生暴雨并产生地表径流时, 两者才会同时发生。又由于点源污染相对稳定, 可以认为年内点源污染负荷为一常数^[8]。由此可以得到任一场洪水产生的污染负荷:

$$\begin{cases} L_n = f(R), \\ L_p = C, \\ L = L_n + L_p = f(R) + C. \end{cases} \quad (1)$$

式中, L_n 为非点源污染负荷; L_p 为点源污染负荷; L 为出口断面年总负荷; R 为降雨量; $f(R)$ 为 L_n 与降雨量 R 的函数关系; C 为常数。那么对于任意两场洪水, 有

$$\text{洪水A: } L_A = L_{n,A} + L_{p,A} = f(R_A) + C, \quad (2)$$

$$\text{洪水B: } L_B = L_{n,B} + L_{p,B} = f(R_B) + C. \quad (3)$$

则

$$L_A - L_B = (f(R_A) + C) - (f(R_B) + C)$$

* [收稿日期] 2004-07-07
[基金项目] 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目(2001-282); 西安理工大学基金项目(210407)
[作者简介] 蔡明(1971-), 男, 江苏建湖人, 讲师, 博士, 主要从事区域水污染控制研究。

$$= f(R_A) - f(R_B)$$

$$= L_{n,A} - L_{n,B} = f(R_A - R_B)。(4)$$

式(4)的物理意义可以解释为: 任意两场洪水(或任意两年)产生的污染负荷(包括点源和非点源)之差应为这两场(或这两年)降雨量之差引起的非点源污染负荷。因此, 可以建立降雨量差值与污染负荷差值(非点源负荷)之间的相关关系, 而不必考虑各年因点源污染产生的负荷。

2 研究流域简介

渭河为黄河的最大支流, 发源于甘肃省渭源县, 全长 818 km, 流域面积 6 25 万 km², 多年平均径流量 59.3 亿 m³。渭河流域属典型的大陆性季风气候, 冬季寒冷而干燥, 春季气温不稳定, 降水较少; 夏季气候炎热多雨; 秋季凉爽较湿润, 多有阴雨天气。渭河在陕西省境内流长 502 km, 流域面积 3 38 万 km²。

流域内人口密集, 农业发达, 是重要的农耕区和粮、棉、油生产基地。流域内分布着宝鸡、咸阳、西安、渭南等大中城市和宝鸡峡、冯家山、石头河等大型灌

区, 总面积约 100 万 hm², 人类活动影响显著, 污染严重。

渭河流域陕西段设有 13 个常年水质监测断面, 监控河长 495 km^[9], 有多年水质常规监测资料。本文以临潼水质监测站和临潼水文站作为流域控制断面, 以 1991~ 1999 年水质和水文监测资料为依据, 建立降雨量与流域 N SP 负荷相关关系的降雨量差值法。总氮(TN)是渭河的主要非点源污染物之一, 本文均以 TN 为例进行分析。

3 降雨量差值法的建立

3.1 降雨量与流域出口断面 TN 实测值的相关关系

非点源污染负荷受降雨量大小的影响, 其间存在相关关系。1991~ 1999 年流域降雨量与 TN 实测值见表 1。对其作相关分析得:

$$L_{TN} = 0.0354P^2 - 15.719P + 24.235,$$

$$R^2 = 0.9637 \quad (5)$$

式中, L_{TN} 为流域出口断面的 TN 实测值(t), P 为流域年降雨量(mm)。

表 1 1991~ 1999 年流域降雨量和 TN 的实测值

Table 1 The rainfall and the measured values of TN of Weihe River watershed during 1991- 1999

年份 Year	降雨量/mm Rainfall	TN 实测值/t Measured TN	年份 Year	降雨量/mm Rainfall	TN 实测值/t Measured TN
1991	610	26.949	1996	749	32.010
1992	939	40.436	1997	364	21.080
1993	487	24.501	1998	639	30.110
1994	298	23.000	1999	580	28.003
1995	271	23.710			

3.2 降雨量与流域非点源污染 TN 的相关关系

在式(5)中, L_{TN} 为流域出口断面的 TN 实测值, 包括点源和非点源两部分污染负荷, 要建立降雨量与流域非点源污染的 TN 相关关系, 就必须从中扣除点源产生的 TN 负荷。为避免复杂的水文推算, 减少误差, 本文运用降雨量差值法进行计算, 其步骤如下。

(1) 计算 1991~ 1999 年 9 年间各年降雨量差值与相应各年流域出口断面的 TN 实测值差值(表 2), 并进行相关分析, 得

$$\Delta L = 0.0157\Delta P^2 + 15.504\Delta P + 1.1568,$$

$$R^2 = 0.7301 \quad (6)$$

式中, ΔL 为流域出口断面各年 TN 实测值的差值(t); ΔP 为流域各年降雨量差值(mm)。此式即可理解为 ΔL 纯粹是由降雨径流过程引起的非点源污染

负荷。

(2) 流域点源污染负荷计算。将流域各年降雨量差值代入式(6), 得流域出口断面非点源污染负荷 L_n 。流域出口断面 TN 实测值 L_{TN} 与 L_n 之差即为流域点源污染负荷(表 3)。由表 3 可见, 流域点源污染负荷年际变化不大, 这正符合点源污染产生的规律, 说明所用方法的正确性。

(3) 降雨量与流域非点源污染 TN 的相关关系。将降雨量与流域出口断面非点源负荷 L_n 作相关分析, 得流域降雨量与流域非点源污染负荷之间的相关关系式为

$$L = 7.4021P^{1.2046}, R^2 = 0.9974 \quad (7)$$

式中, L 为流域 N SP 总氮负荷(t); P 为流域年降雨量(mm)。

表 2 1991~ 1999 年流域降雨量差值和 TN 实测值差值

Table 2 The deduction values of rainfall and TN of Weihe River watershed during 1991- 1999

年份 Year	降雨量 差值/mm Deduction value of rainfall	TN 差值/t Deduction value of TN	年份 Year	降雨量 差值/mm Deduction value of rainfall	TN 差值/t Deduction value of TN	年份 Year	降雨量 差值/mm Deduction value of rainfall	TN 差值/t Deduction value of TN
1991~ 1992	329	13 490	1992~ 1997	575	19 356	1994~ 1998	341	7 109
1991~ 1993	123	2 445	1992~ 1998	300	10 326	1994~ 1999	282	5 002
1991~ 1994	312	3 946	1992~ 1999	359	12 433	1995~ 1996	477	8 300
1991~ 1995	339	3 236	1993~ 1994	189	1 501	1995~ 1997	93	2 630
1991~ 1996	138	5 064	1993~ 1995	216	791	1995~ 1998	368	6 400
1991~ 1997	246	5 866	1993~ 1996	261	7 509	1995~ 1999	309	4 293
1991~ 1998	29	3 164	1993~ 1997	123	3 421	1996~ 1997	384	10 932
1991~ 1999	30	1 057	1993~ 1998	152	5 609	1996~ 1998	109	1 902
1992~ 1993	452	15 935	1993~ 1999	93	3 502	1996~ 1999	168	4 009
1992~ 1994	641	17 436	1994~ 1995	27	709	1997~ 1998	275	9 025
1992~ 1995	668	16 726	1994~ 1996	450	9 009	1997~ 1999	216	6 918
1992~ 1996	190	8 426	1994~ 1997	66	1 921	1998~ 1999	59	2 107

表 3 流域点源和非点源污染负荷计算

Table 3 The point source pollution load and NSP load of Weihe River watershed

年份 Year	TN 实测值 Measured TN	NSP 负荷 NSP load	点源污染负荷 PSP load	年份 Year	TN 实测值 Measured TN	NSP 负荷 NSP load	点源污染负荷 PSP load
1991	26 946	16 456	10 490	1996	32 010	21 577	10 433
1992	40 436	29 558	10 878	1997	21 080	8 880	12 200
1993	24 501	12 431	12 070	1998	30 110	17 475	12 635
1994	23 000	7 171	15 829	1999	28 003	15 431	12 572
1995	23 710	6 511	17 199				

3.3 降雨量差值法与径流分割法的比较

为进一步验证降雨量差值法的合理性,应用径流分割法对上述资料进行分析。径流分割法原理^[2~4]为:年径流过程可以划分为汛期地表径流过程和河川基流(包括汛期河川基流)过程,降雨径流的冲刷是产生非点源污染的原动力,降雨径流又是非点源污染物的载体。如果没有地表径流的产生,非点源污染物就很难进入受纳水体。因此可以认为,非点源污染主要是由汛期地表径流引起的,而枯水季节的水质污染主要是由点源污染所引起。

通过对渭河流域 1951~ 2000 年 50 年长序列水文资料的分析^[5]可以发现,渭河流域降雨的 60%~75% 和径流量的 50%~60% 集中于汛期(6 至 9 月这 4 个月),12 月至来年 2 月为枯水期,降水、径流只占全年的 15% 左右。以 12 月至来年 2 月的平均流量作为河川基流量,平均浓度作为基流浓度,应用径流分割法对 1991~ 1999 流域污染负荷进行分割计算,结果见表 4。降雨量差值法与径流分割法计算结果对比如表 5 所示。

表 4 径流分割法计算结果

Table 4 The results of runoff division method

年份 Year	丰水期 High flow period		平水期 Ordinary flow period		枯水期 Low flow period		分割法计算 负荷/t Load of runoff division
	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) Flow	TN 浓度/ ($mg \cdot L^{-1}$) TN concentration	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) Flow	TN 浓度/ ($mg \cdot L^{-1}$) TN concentration	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) Flow	TN 浓度/ ($mg \cdot L^{-1}$) TN concentration	
1991	215.31	5.917	130.86	5.631	61.69	6.928	10 385
1992	367.21	6.170	167.35	6.830	43.94	7.128	30 998
1993	297.88	2.478	181.26	4.620	71.31	9.752	2 283
1994	161.26	4.770	121.94	5.552	58.18	7.844	6 103
1995	92.76	8.226	45.52	11.121	20.10	19.456	5 351
1996	223.71	4.860	91.48	7.952	32.38	13.404	10 575
1997	50.39	3.169	71.38	5.388	27.57	9.232	703
1998	243.32	2.554	100.65	6.056	17.15	15.174	8 271
1999	204.41	3.769	110.04	6.358	27.94	9.562	10 823

表5 径流分割法及降雨量差值法计算结果比较

Table 5 The comparison between runoff division method and rainfall deduction method

年份 Year	计算方法 Method	非点源 NSP		点源 PSP		总负荷量/t Total load
		负荷量/t Load	比例/% Ratio	负荷量/t Load	比例/% Ratio	
1991	差值法 Rainfall deduction method	16 456	61.1	10 490	38.9	26 946
	分割法 Runoff division method	10 385	43.9	13 292	56.1	23 677
1992	差值法 Rainfall deduction method	29 558	73.1	10 878	26.9	40 436
	分割法 Runoff division method	30 998	76.1	9 742	23.9	40 740
1993	差值法 Rainfall deduction method	12 431	50.7	12 070	49.3	24 501
	分割法 Runoff division method	2 283	9.5	21 630	90.5	23 913
1994	差值法 Rainfall deduction method	7 171	31.2	15 829	68.8	23 000
	分割法 Runoff division method	6 103	30.1	14 195	69.9	20 298
1995	差值法 Rainfall deduction method	6 511	27.5	17 199	72.5	23 710
	分割法 Runoff division method	5 351	30.6	12 161	69.4	17 513
1996	差值法 Rainfall deduction method	21 577	67.4	10 433	32.6	32 010
	分割法 Runoff division method	10 575	43.9	13 500	56.1	24 074
1997	差值法 Rainfall deduction method	8 880	42.1	12 200	57.9	21 080
	分割法 Runoff division method	703	8.2	7 916	91.8	8 619
1998	差值法 Rainfall deduction method	17 475	58.0	12 635	42.0	30 110
	分割法 Runoff division method	8 271	50.5	8 096	49.5	16 367
1999	差值法 Rainfall deduction method	15 431	55.1	12 572	44.9	28 003
	分割法 Runoff division method	10 823	56.6	8 309	43.4	19 132

由表5可知: 1) 两种方法的计算结果不论是污染负荷总量还是点源和非点源负荷的分割都比较接近。

2) 径流分割法与降雨量差值法计算结果较接近, 说明这两种方法都有一定的合理性, 可以相互验证。

3) 1993年为丰水年, 所以由径流分割法确定的枯季流量(基流量)亦较大, 因此导致该年用径流分割法计算的点源污染负荷比重较高, 具有一定的不合理性。

4) 1997年的径流量为渭河干流50年来的最低值, 年径流量只有4.02亿 m^3 , 不及多年平均值的1/5^[5], 流域污染主要由点源污染引起, 这一点径流分割法反映得比较充分。

5) 从总体来看, 降雨量差值法计算的非点源污染负荷比重高于径流分割法, 主要是径流分割法假定枯水期无非点源污染发生, 其污染负荷全部为点源污染负荷。由于大气沉降和人类活动等因素的存在, 枯水期非点源污染仍会发生, 因此这种假定显然是不准确的。正是由于径流分割法忽略了枯水期非点源污染负荷, 从而导致了该方法的预测结果比降雨量

差值法的预测值小。

6) 由于降雨量差值法的依据是流域出口断面的水质监测资料, 因此其总负荷量相对比较接近实际, 分割也相对合理, 而径流分割法有时对污染负荷总量的估算与实测资料之间存在较大差异。

4 结 语

本文提出的降雨量差值法, 克服了我国非点源污染监测资料少, 监测费用高的不足, 充分利用现有水文站和水质监测站的资料而不必增加监测项目, 省略了产汇流和径流分割过程, 同时考虑了大气沉降和人类活动等因素, 直接建立了降雨量与非点源污染负荷之间的相关关系, 既可预测流域年非点源污染负荷, 又可预测单场降雨产生的非点源污染负荷, 是一种简便有效的流域非点源污染负荷估算方法。其计算结果与其他非点源污染负荷估算方法比较接近, 考虑到降雨径流的复杂性, 这种误差在可接受的范围内, 加之流域非点源污染监测资料的不完善, 因此该方法可以作为流域污染负荷预测的方法之一加以应用。

[参考文献]

- [1] 李怀恩, 沈晋. 非点源污染数学模型[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996.
- [2] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 397-400.

- [3] 陈友媛, 惠二青, 金春姬, 等. 非点源污染负荷的水文估算方法[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 10- 13.
- [4] 施为光, 凌文州. 用实测资料计算流域非点源污染负荷[J]. 长江流域资源与环境, 1996, 5(3): 273- 277.
- [5] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183: 323- 349.
- [6] Johnes P J, Heathwaite A L. Modelling the impact of land use change on water quality in agriculture catchments[J]. Hydrological Processes, 1997, (11), 269- 286.
- [7] 蔡 明, 李怀恩, 庄咏涛. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, (7): 40- 45.
- [8] 庄咏涛. 渭河临潼断面以上流域非点源总氮负荷研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2001.
- [9] 钱 易, 汤鸿霄. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究——西北地区水污染防治对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 158- 170.

Rainfall deduction method for estimating non-point source pollution load for watershed

CAI Ming, LI Hua i-en, ZHUANG Yong-tao

(Institute of Environment Science, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The prediction of the non-point source pollution (NPS) load is becoming increasingly important in water pollution controlling and planning in watershed. Considering the monitoring data shortage of NPS in China, a practical estimation method of non-point source pollution load-rainfall deduction method is established based on the rainfall and water quality data existent in China. Compared with runoff division method, the rainfall deduction method is characterized with simple calculation and a reasonable result but without additional NPS monitoring data.

Key words: non-point source pollution; load prediction; rainfall deduction method; runoff division method