

河流控制断面污染负荷计算方法比较

李怀恩, 李 层

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 为了选择适合我国资料条件的河流控制断面污染物负荷估算方法, 采用渭河下游潼关吊桥断面长期水质监测数据和渭华县断面逐日流量资料, 选择了8种方法分别计算出潼关吊桥断面年污染负荷, 并将各种方法的计算结果与实际负荷对比。结果表明: 方法7, 即用流量加权浓度乘以年流量, 分别计算丰、平、枯各季负荷, 然后相加求和来计算年污染负荷的方法精度较高。最后对部分方法提出了改进措施。

关键词: 河流污染; 污染物负荷; 年负荷估算; 潼关吊桥断面

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)02-0001-04

Comparison of calculation methods of pollution load for control section of river

LI Huaen, LI Ceng

(Key Laboratory of Northwest Water Resource and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to select the estimation methods of pollution load for rivers, the paper choose 8 kinds of methods to calculate the load of Tongguan drawbridge section by using weekly water quality data of Tongguan drawbridge and Huaxian's daily flow, and compared each result with the actual load respectively. The results showed that the precision of method 7 is the highest. In method 7, period flux average concentration is multiplied by the period average flow to calculate the pollution load in wet, flat, dry season and then summed to calculate the annual pollution load. The paper finally proposed the improvement methods.

Key words: river pollution; polluting load; estimation of year load; Tongguan drawbridge section

为了预防和控制环境污染, 首先要快速、准确地确定污染负荷量。当前, 我国多数水文站有长期的水文资料和定期的水质监测数据。但是这些资料均是离散数据, 时间步长大, 基本上是1~2个月监测一次, 同时水质水量数据不同步, 因此很难满足污染负荷估算的需要。目前对污染物负荷的估算方法大致有4种类型^[1]: 分时段负荷之和^[2~3]、时段平均浓度与时段水量之积^[4~5]、负荷频率分布之和、对流-扩散模式^[6~7]等。其中对流-扩散式的推导采用了河口盐度平衡的假设, 仅适用于枝状河口, 对感潮河网地区不适用^[8]; 采用浓度梯度及纵向离散系数的方法更适合于数值模拟而不是实测。因此较为常用的是前2种类型, 这2种类型中后者比前者粗略。当前采用实测断面平均浓度、样品时间平均浓度、断面瞬时流量、采样期间平均流量、采样代表平均流量

等概念构造的负荷计算方法有十余种^[9]。有关研究成果表明, 不同的方法所计算出的污染物总负荷量的结果相差很多, 这对河流水体污染的控制与管理是十分不利的。本文选择了8种方法, 分析比较各自的结构特点, 采用渭河下游潼关吊桥断面详细水质监测资料进行对比分析, 以选择适合我国资料条件的河流控制断面污染物负荷估算方法。

1 材料与方法

1.1 资料及来源

本文采用的资料和数据主要包括: ①渭河下游潼关吊桥断面长期周水质监测资料; ②渭河下游华县断面2003~2008年月水质监测数据和逐日流量资料。

收稿日期: 2012-11-23

基金项目: 全国水资源保护规划相关专题研究项目(QX1210010-2); 国家自然科学基金项目(5090908050979090)

作者简介: 李怀恩(1960-), 男, 陕西商南人, 教授, 博士生导师, 从事水资源保护与环境经济研究。

通讯作者: 李 层(1988-), 女, 湖北孝感人, 在读硕士, 主要从事水资源保护与可持续发展研究。

1.2 研究方法

结合国内外资料,本文对于年负荷的估算选择了 8 种方法来分析比较^[2,5,10],各种方法的公式及特点如表 1 所示。

表 1 使用的负荷估算方法

方法编号	描述	负荷估算方程
方法 1	样本平均浓度乘以样本平均流量	$L_1 = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n}$
方法 2	瞬时通量 $C_i Q_i$ 平均	$L_2 = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i Q_i}{n}$
方法 3	流量加权浓度乘以年流量	$L_3 = K \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_y$
方法 4	瞬时浓度平均与时段平均流量之积	$L_4 = K \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \right) \bar{Q}_y$
方法 5	相邻时间间隔	$L_5 = K \sum_{i=1}^{n-1} (C_i Q_i \frac{t_{i+1} - t_i}{2})$
方法 6	当月计算法	$L_6 = K_d \sum_{i=1}^n (C_i Q_i m_i)$
方法 7	利用方法 3 计算丰、平、枯各季负荷求和	$L_7 = K \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_y$
方法 8	利用方法 4 计算丰平枯各季负荷然后求和	$L_8 = K \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{n} \right) \bar{Q}_y$

注: L 为年负荷; K 为计算时段, s; K_d 为一天 86 400 s; n 为样本数; C_i 为采样瞬时浓度; Q_i 为采样瞬时流量; t_i 为采样时间, ($i = 1, 2, \dots, n$); m_i 为第 i 月的天数; $\bar{Q}_y$ 为年平均流量; 丰水期(6-9 月)、平水期(3-5 月、10-11 月)、枯水期(1-2 月、12 月)^[11]。

首先从环境水力学角度对表 1 中方法 1~8 的差别做一个简单的对比分析。将指定断面的流量及平均浓度表达为时间平均的形式^[12-13]:

$$Q(t) = \frac{1}{T} \int_T Q(t) dt + Q''(t) = Q_a + Q''(t) \quad (1)$$

$$C(t) = \frac{1}{T} \int_T C(t) dt + C''(t) = C_a + C''(t) \quad (2)$$

式中: Q_a 为时段平均流量; C_a 为时段平均浓度; T 为估算时段; Q'', C'' 为流量时均距平值与浓度时均距平值。时段负荷可用式(3)表达:

$$\begin{aligned} L &= \int_T F(t) dt = \int_T Q(t) C(t) dt \\ &= Q_a C_a T + \int_T Q'' C'' dt \approx \sum_{i=1}^n Q_i C_i \Delta t_i \\ &= Q_a C_a T + \sum_{i=1}^n Q_i'' C_i'' \Delta t_i \end{aligned} \quad (3)$$

将表 1 中的前 8 种方法与式(3)进行对比, 可以看到: 方法 1、4、8 实际上只包含了式(3)中的第 1 项对流项, 而忽略了第 2 项时均离散项, 3 者的差别在于方法 1 采用的是离散的实测流量平均, 方法 4、8 采用的是时段的平均流量; 方法 2、3、5、6、7 这两项都包括, 方法 2 与 5、6 的差别和方法 1 与 4、8 的差别类似, 一个采用离散的流量平均, 一个采用连续的流量平均。方法 5、7 采用了与断面通量平均浓度相同的方式表达时段通量平均浓度, 然后与时段平均流量相乘得到时段负荷。显然, 方法 1、4、8 仅适用于推流(断面流速均匀)的近似方法。

要估算年负荷, 在年负荷的估算方法上就要对点源、非点源的处理有一个主观或经验的判断。表 2 为一个考虑时均离散及点源、非点源的简单的取向分析。根据以上分析可以看出, 方法 1、2 较适合点源污染占优时的负荷估算。同时点源污染排放相对稳定, 年内水质水量变化不大, 负荷估算相对容易一点, 问题主要集中在对非点源污染负荷的估计应该采用哪些不同的处理方式。对于国内大多数河流, 其许多指标年数据较少, 选择定量大致准确的时段通量估算方法就显得十分必要。

表 2 年负荷估算方法应用的初步分析

方法	对流 通量	离散 通量	应用范围
1	有	无	对流相远大于时均离散相的情况, 弱化径流量的作用
2	有	有	弱化径流量的作用, 较适合点源占优的情况
3	有	有	强调时段总径流量的作用, 较适合非点源占优的情况
4	有	无	对流相远大于时均离散相的情况, 强调径流量的作用
5	有	有	强调径流量的作用, 较适合非点源占优的情况
6	有	有	强调径流量的作用, 较适合非点源占优的情况
7	有	有	强调时段总径流量的作用, 较适合非点源占优的情况
8	有	无	对流相远大于时均离散相的情况, 强调径流量的作用

本文将首先利用中华人民共和国环境保护部网站刊登的渭河下游潼关吊桥断面 2006-2008 年长期水质监测数据以及黄河流域水文年鉴^[14]上渭河华县站 2006-2008 年逐日流量资料(由于缺乏潼关吊桥断面的逐日流量, 故用离它最近的华县断面

的逐日流量代替),计算出潼关吊桥断面实际年污染负荷,并用表 1 中方法 1~8 分别计算出潼关吊桥断面年污染负荷,将各种方法计算结果与实际负荷对比,最后对部分方法提出改进措施。

2 负荷估算方法的对比分析

2.1 渭河潼关吊桥断面实际年污染负荷的计算

结合上述提及的资料,利用式(4),可算出潼关吊桥断面 2006 年氨氮、高锰酸盐指数周负荷,然后相加求和,可得到年总污染负荷,同理,2007、2008 年也可计算出来,结果见表 3。

$$L = K \times C \times Q \tag{4}$$

式中: K 为时段转换系数; C 、 Q 分别为当日浓度和当日流量。

表 3 潼关吊桥断面 2006-2008 实际污染负荷表 t

年份	氨氮负荷	高锰酸盐指数负荷
2006	17217	63274
2007	14216	67773
2008	13479	45129

2.2 河流断面年污染负荷计算方法的比较

将以上计算的年总负荷作为实际值,通过 2006 年潼关吊桥断面月水质资料(在环保部刊登的 2006

年 52 周水质资料中选取与华县断面采样时间相近的周水质资料作为潼关吊桥断面的月水质资料,流量在逐日流量表里选取与月水质资料时间相对应的当日流量),利用表 1 里的前 8 种方法可以分别计算氨氮、高锰酸盐指数年总负荷,结果见表 4。

表 4 不同方法计算的潼关吊桥断面 2006 年

总污染负荷 t

参数	1	2	3	4	5	6	7	8
COD _{Mn}	69608	55229	55085	69427	49235	55175	56265	69367
NH ₃ -N	21100	19055	19005	21045	17483	18991	19257	21027

将表 4 与表 3 中 2006 年的数值对比,进行误差分析,结果见表 5。

表 5 潼关吊桥断面 2006 年 NH₃-N、COD_{Mn}

总负荷误差分析 t, %

方法	1	2	3	4	5	6	7	8
NH ₃ -N 绝对误差	3937	1928	1878	3918	356	1865	2130	3901
NH ₃ -N 相对误差	23	11	11	23	2	11	12	23
COD _{Mn} 绝对误差	6334	8045	8189	6153	14039	8099	7010	6093
COD _{Mn} 相对误差	10	13	13	10	22	13	11	10

同理,潼关吊桥断面 2007、2008 NH₃-N 及 COD_{Mn}总污染负荷也可以分别用 8 种方法计算出来,计算结果及误差分析见表 6。

表 6 潼关吊桥断面 2007、2008 年计算结果表

t, %

方法	1	2	3	4	5	6	7	8
2007 年 NH ₃ -N 实际值	14216	14216	14216	14216	14216	14216	14216	14216
2007 年 NH ₃ -N 计算值	23519	10162	10261	23750	8682	10242	13842	15192
2007 年 NH ₃ -N 绝对误差	9303	4054	3955	9534	5534	3974	374	976
2007 年 NH ₃ -N 相对误差	65	29	28	67	39	28	3	7
2008 年 NH ₃ -N 实际值	13479	13479	13479	13479	13479	13479	13479	13479
2008 年 NH ₃ -N 计算值	15302	13178	13232	15365	11929	13253	13601	15360
2008 年 NH ₃ -N 绝对误差	1823	301	247	1886	1550	226	122	1881
2008 年 NH ₃ -N 相对误差	14	2	2	14	11	2	1	14
2007 年 COD _{Mn} 实际值	67773	67773	67773	67773	67773	67773	67773	67773
2007 年 COD _{Mn} 计算值	80580	60836	61034	80842	52771	61230	67861	80711
2007 年 COD _{Mn} 绝对误差	12807	6937	6739	13069	15002	6543	88	12938
2007 年 COD _{Mn} 相对误差	19	10	10	19	22	10	0	19
2008 年 COD _{Mn} 实际值	45129	45129	45129	45129	45129	45129	45129	45129
2008 年 COD _{Mn} 计算值	49548	41993	42165	49751	37242	42080	45205	49660
2008 年 COD _{Mn} 绝对误差	4419	3135	2963	4623	7886	3048	77	4532
2008 年 COD _{Mn} 相对误差	10	7	7	10	17	5	0	10

潼关吊桥断面 2006-2008 年的计算结果显示,方法 7 与实测值最相近。方法 1、4、8 比实测值大很多,正如前面分析中提到的,方法 1、4、8 是适用于推

流(断面流速均匀)断面的近似方法。方法 7 是方法 3 的衍生,它是将流量分季节平均,而方法 3 的流量是年平均,显然前者比后者提高了精度,强化了径

流量的作用。此外,方法 7 相对于其他方法而言,计算简便,是为可选之法。

2.3 推荐方法的应用

根据前面的计算与分析,采用表 1 中的方法 7 对渭华县断面的总污染负荷进行计算。根据渭华县断面每月定期采集的水质资料,利用时段通量平均浓度与时段平均流量之积分别计算丰、平、枯各季负荷然后求和来确定其总负荷。华县断面 2003—2008 年年总污染负荷计算结果见表 7。

表 7 华县断面 2003—2008 年年总污染负荷 t

年份	化学需氧量	BOD ₅	氨氮
2003	376877	66322	48799
2004	240620	50767	32915
2005	369402	70298	33482
2006	226201	55647	34318
2007	220701	63972	24119
2008	165153	37000	32192

2.4 讨论

由于定期水质采样次数有限,定期水质采样的流量和水文站记录的逐日流量的平均值之间存在差异,将这两种流量数据代入公式进行计算,同一种负荷估算方法也会产生偏差。由于降雨径流或洪水的天数在一年中只占了很小的一部分,所以采样当天出现降雨径流的几率也很小。因此,很可能导致定期水质采样流量值比逐日流量的平均值小,从而导致直接使用水质采样流量计算出的污染负荷的结果也会偏小很多。从这个角度出发,本文作者提出采用如下方法对负荷估算方法进行校正^[4],以方法 1 为例:

$$L_{1,c} = K_f L_1 \quad (5)$$

$$K_f = \frac{Q_y}{\left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) / n} \quad (6)$$

此处 $L_{1,c}$ 是方法 1 的校正负荷; K_f 是校正系数,其他符号意义同表 1。具体内容参见文献 4。

3 结 语

本文首先应用潼关吊桥断面 2006—2008 年长期周水质监测资料结合渭华县断面逐日流量资料,计算出潼关吊桥断面实际年污染负荷,并用表 1 中方法 1~8 分别计算出潼关吊桥断面年污染负荷,将各种方法计算结果与实际负荷对比,得出结论:

(1) 方法 1、4、8 是仅适用于推流(断面流速均匀)的近似方法。方法 7 是方法 3 的衍生,它是将流量分季节平均,而方法 3 的流量是年平均,显然前者

比后者强化了径流量的作用。

(2) 方法 7,即采用时段通量平均浓度与时段平均流量之积,分别计算丰、平、枯季的污染负荷,然后相加求和来估算年负荷,是各方法中精确度较高的,也是计算比较简便的。

(3) 采用实测逐日流量的均值比直接使用水质采样的流量计算的污染负荷精确度高、且更合理,在不具备逐日流量资料的条件下可以利用合理的年径流量对负荷估算方法进行校正。

参考文献:

- [1] 富国. 河流污染物通量估算方法分析(I)——时段通量估算方法比较分析[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 1—4.
- [2] Phillips J M, Webb B M, Walling and Leeks. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples[J]. Hydrological Processes, 1999 (13): 1035—1050.
- [3] 蒋岳文, 陈淑梅, 关道明, 等. 辽河口营养要素的化学特性及其入海通量估算[J]. 海洋环境科学, 1995, 14(4): 39—45.
- [4] Huaen LI, Joseph Hun-Wei LEE, Ming CAI. Nutrient load estimation methods for rivers[J]. International Journal of Sediment Research, 2003, 8(4): 346—351.
- [5] 刘国华, 傅伯杰, 杨平. 海河水环境质量及污染物入海通量[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 46—50.
- [6] Boyle E, Collier R, Dengler A T, et al. On the chemical mass balance in estuaries[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1974, 38(11): 1719—1728.
- [7] 杨逸萍, 胡明辉, 陈海龙, 等. 九龙河口生物可利用磷的行为与入海通量[J]. 台湾海峡, 1998, 17(3): 270—274.
- [8] 张永良, 刘培哲. 水环境容量综合手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [9] Webb B W, Phillips J M, Walling D E, et al. Load estimation method—ologies for British rivers and their relevance to the Loiracs Programme[J]. The Science of the Total Environment, 1997, 194/195: 379—389.
- [10] 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.
- [11] 陕西省渭河流域综合治理规划编制组. 陕西省渭河流域综合治理规划报告[R]. 西安, 2002. 12.
- [12] 费希尔 H B. 清华大学水力教研组译. 内陆及近海水域中的混合[M]. 北京: 水力电力出版社, 1987: 56—61.
- [13] 吴持恭. 水力学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [14] 黄河水利委员会. 黄河流域水文年鉴—渭河水系 2006—2008[Z]. 2007, 2008, 2009.