

# 基于暴雨径流过程监测的渭河非点源污染特征 及负荷定量研究

李家科, 李怀恩, 刘健, 张涛, 杨涛, 马苏文

(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:** 2006 年 6—12 月, 对渭河临潼水文站断面 5 次暴雨洪水过程和 3 次基流的原状水和上清液进行了监测。结果表明, 洪水期间, SS, 浑水 COD, 浑水 TP,  $\text{NO}_2\text{—N}$ ,  $\text{NO}_3\text{—N}$ , 浑水总氮 (TN) 等指标监测值都远大于基流监测值。浑水中 COD, 总磷 (TP), TN 监测值高与表层土壤中天然腐殖质有关。上清液中 TN 和 TP 分别以水溶性氮和固态磷为主, 浑水中 COD, TP, TN 与 SS 有很好的相关性。采用平均浓度法计算了各指标的非点源污染平均浓度, 运用水质水量相关法建立了各指标非点源污染负荷与地表径流量的相关方程。将以上两种方法所得非点源污染平均浓度和相关方程分别用于 1991—1999 年临潼断面非点源污染负荷预测的结果表明, 基于该监测数据的两种方法计算所得结果具有较好的可靠性。

**关键词:** 渭河; 非点源污染; 暴雨径流监测

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)02—0106—06

中图分类号: X143

## Characteristics of Non-Point Source Pollution and Load of Weihe River Based on Storm Runoff Monitoring Data

LI Jia-ke, LI Huai-en, LIU Jian, ZHANG Tao, YANG Tao, MA Su-wen

(Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of

MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** From June to December of 2006, five storm events and three base-flow events at the Lintong hydrologic station were monitored. The quality of raw and clarified water from the events was analyzed. Results indicate that concentrations of SS,  $\text{NO}_2\text{—N}$  and  $\text{NO}_3\text{—N}$ , as well as COD, total P (TP), and total N (TN) of raw water during flood are higher than those of base flow. High values of COD, TP, and TN of raw water are related to natural humic substances in surface soil. Total N of clarified water is mainly made of dissolved nitrogen and total P is mainly made of particle phosphorus. COD TP and TN of raw water are closely related with SS. The mean concentration method was used to estimate the weighted mean concentration of non-point source pollution (NSP) for each element. The method of water quality and quantity correlation was used to establish the correlation equation between NSP load and surface runoff for each element. The calculated mean NSP concentration and the established correlation equation were then used to estimate NSP load at the Lintong hydrologic station on Weihe River from 1991 to 1999. The results from the two methods prove to be credible.

**Keywords:** Weihe River; non-point source pollution; storm runoff monitoring

渭河是黄河最大的支流, 发源于甘肃省渭源县鸟鼠山, 干流全长 818 km, 流域总面积  $1.35 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 陕西省境内河长 502 km, 流域面积  $6.71 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。渭河流域属大陆性季风气候, 流域多年平均降水量

610.4 mm。渭河林家村以上流域内人类活动较少, 污染小, 水质条件良好; 但其下游关中平原地区沿渭两岸分布着宝鸡、杨凌、咸阳、西安、渭南等 20 多个城镇和总面积约为  $1.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$  的 9 大灌区, 人类活

收稿日期: 2007-09-29

修回日期: 2007-11-16

资助项目: 国家自然科学基金重大研究计划面上项目 (90610030); 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研项目 (O5JS35); 陕西省教育厅科学研究计划项目 (06JK222)

作者简介: 李家科 (1975—), 男 (汉族), 湖北省荆门市人, 讲师, 博士研究生, 主要从事非点源污染与水环境保护研究。Email: xaut\_ljk@163.com。

动影响剧烈,污染问题不可忽视。近年来,关于渭河水污染及其控制问题,有关部门和单位开展了不少研究,特别是国家“九五”科技攻关项目进行了多方面的研究<sup>[1]</sup>。然而,这些研究主要是针对点源污染(集中排放的废污水)进行的,基本上未考虑非点源污染的影响,存在如下主要问题。(1)渭河干流洪水期的水质变化没有进行过系统的监测,现有的定期水质监测资料不能全面反映渭河干流的水污染状况;(2)渭河的水污染控制规划与方案没有考虑非点源污染的影响。其后果是各河段的污染物总量控制方案很难彻底实现,造成规划的河段水质目标落空。因此,渭河的水污染控制必须考虑非点源污染的影响。本文主要研究渭河干流临潼水文站断面洪水期的水质变化特征,分析非点源污染对渭河水质的影响,为考虑非点源污染在内的渭河水污染控制规划方案,渭河水环境质量的恢复与改善提供科学依据。

## 1 监测分析方法

### 1.1 水样采集

2006年6—12月,我们对渭河临潼水文站断面5次洪水过程,包括较大、小洪水各1次,分别为

20060902, 20060724; 一般洪水3次,分别为20060716, 20060816, 20060829(其中20060816退水不完整)进行了水质水量同步监测。我们还在非洪水期进行了3次(20060808, 20061010, 20061221)水质监测。洪水期测流取样尽可能控制洪水涨落过程,至少取样5次以上,且分别位于洪水过程的起涨段、峰顶段和退水段,其中起涨段采2~3次样,峰顶段采1~2次样,退水段采2~3次样。各场洪水流量情况见表1。非洪水期在连续几日水位基本无变化且水位较低(接近于基流)的情况下,每次进行24 h连续采样,每隔3~4 h采样一次。

采样断面采用临潼水文站基本水尺断面。在采样断面上沿河宽方向取左、中、右3条垂线。左、右垂线设在河道中有明显水流处,分别离岸边10 m左右。中垂线设在河道中央左、中、右3条垂线均在水文测深垂线中选取。各采样垂线上的采样点数由水深确定<sup>[2]</sup>。将每次各采样点采集的水样先进行混合,再均匀分装在3个采样桶内,即每次采样对应3个采样桶,其中,第一个采样桶不添加任何保存药剂;第二个采样桶加入H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>酸化至pH=2;第三个采样桶加入NaOH或H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>调pH=7, CHCl<sub>3</sub> 0.5%。

表1 各场洪水洪峰流量和径流量

场次	20060716	20060724	20060816	20060829	20060902
洪峰/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	645.00	313.00	535.00	603.00	1 145.00
径流量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	2 867.85	2 144.09	—	3 763.02	16 237.70
基流量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	370.62	492.07	—	490.83	1 539.65

### 1.2 分析方法

监测项目包括流量、悬浮物SS、浑水(原状水)化学需氧量COD<sub>H</sub>、上清液(澄清水)化学需氧量COD<sub>S</sub>、可溶正磷酸盐(可溶正P)、可溶总磷酸盐(可溶总P)、浑水总磷TPH、上清液总磷TPS、氨氮NH<sub>3</sub>-N、亚硝氮NO<sub>2</sub>-N、硝氮NO<sub>3</sub>-N、浑水总氮TNH和上清液总氮TNS。按照地表水环境质量标准(GB3838—2002) and 环境保护行业标准地表水监测技术规范<sup>[2]</sup>,上清液由原状水静置30 min后,用虹吸法于液面下5 cm处向上吸取澄清水得到。其中,化学需氧量采用微波密封消解法测定;总氮用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定;总磷用过硫酸钾氧化—钼锑抗比色法测定<sup>[2-3]</sup>。

## 2 暴雨径流污染特征分析

### 2.1 暴雨径流污染物浓度

各场洪水各指标的监测值见表2(20060816退水

不完整,未计入)。由表2可见,洪水期间,SS, COD<sub>H</sub>, TPH, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TNH等指标监测值都远大于基流监测值,这些指标的最大值分别为基流值的326.4, 18.5, 32.4, 15.1, 24.7和2.1倍,流量加权平均值分别为基流值的62.8, 7.3, 11.0, 5.3, 19.3和2.0倍。COD<sub>S</sub>, 可溶正P, 可溶总P, TPS, NH<sub>3</sub>-N, 无机氮, TNS等指标流量加权平均浓度分别为基流值的1.2, 0.1, 0.2, 0.7, 0.4, 0.6和0.8倍。

洪水期间SS监测值很高,究其原因,20060716次洪水为渭河支流泾河来水,20060724, 20060829, 20060902次洪水为渭河来水,间杂有泾河来水。泾河流域水土流失严重,水流挟带大量的表层土壤(泥沙)进入渭河。在此过程中,除将土壤中化肥、农药等污染物带入河流中外,还将土壤中大量天然有机质(大部分是腐殖质)带入到河流中。陕西省关中地区耕层土壤有机质含量为1.11%,以西安市为最高,依次为宝鸡、铜川、渭南、咸阳。土壤中天然有机质对

CODH,TPH,TNH 贡献很大,从而造成 CODH,TPH,TNH 监测值很高。陈静生<sup>[4-6]</sup>在研究黄河水的 COD 值时,也发现了同样的问题,他认为未过滤掉泥沙的黄河浑水样品的高 COD 值源于黄河泥沙中的有机质(主体部分是天然腐殖质)。CODS,TPS,TNS 相对较小,是因为进行水质分析时绝大部分泥沙已沉降,泥沙中挟带的天然腐殖质较少反映在其

中。从表 2 中还可看出,无机氮和上清液总氮 TNS 比较接近,说明在上清液中,总氮以水溶性氮为主;相反,可溶性总 P 和上清液总磷 TPS 相差甚远,说明在上清液中,总 P 以固态磷(颗粒态磷)为主。

各场洪水过程中所取的多个水样的 CODH,CODS,TPH,TPS,TNH,TNS 等指标监测值与 SS 监测值的相关性见表 3。

表 2 暴雨径流污染物浓度与基流浓度的比较

指标	SS	CODH	CODS	可溶正 P	可溶总 P	TPS	TPH	NH—N	NO <sub>2</sub> —N	NO <sub>3</sub> —N	无机氮	TNS	TNH
20060716	582.00	2672.81	142.44	0.03	0.05	2.38	113.51	1.00	0.15	0.03	1.18	1.87	15.61
20060724	21.91	309.30	25.63	0.07	0.06	0.38	21.77	3.00	1.06	—	4.06	4.54	11.49
20060829	31.36	1969.55	152.96	0.06	0.14	0.27	17.26	3.06	0.26	0.65	3.97	7.14	17.88
20060902	59.47	650.92	9.26	0.04	0.08	0.14	32.51	2.24	0.34	0.74	3.31	5.00	17.14
平均浓度	111.93	1051.84	47.55	0.04	0.08	0.44	38.59	2.28	0.37	0.58	3.23	4.92	16.59
基流	1.78	144.72	40.90	0.33	0.37	0.63	3.50	5.35	0.07	0.03	5.45	6.04	8.44

注:SS,CODH 单位为 g/L,其它单位为 mg/L。

表 3 各指标与悬浮物指标的相关性

洪水/基流	CODH	CODS	可溶正 P	可溶总 P	TPS	TPH	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	无机氮	TNS	TNH
20060716	0.6523 - 0.8990	- 0.9871 - 0.1932	- 0.8796	0.9019 - 0.9774	0.2438 - 0.2334	- 0.9796 - 0.5886	0.5223					
20060816	0.9185 - 0.8209	- 0.0738	0.0100 - 0.4492	0.9718	0.0848 - 0.7689	0.2254	0.0283 - 0.0050	0.4493				
20060829	0.9360 - 0.2080	- 0.9488	0.0257 - 0.0411	0.9576 - 0.8194	- 0.3129	0.1144 - 0.4466	- 0.1180	0.9408				
20060902	0.5950 - 0.0278	0.1370 - 0.2286	0.3073	0.6845	0.0241 - 0.2906	- 0.0059	0.0046 - 0.1187	0.5543				

注:表中(-)指负相关,相关系数按线性关系给出。

由表 3 各指标与悬浮物指标的相关性可以看出,CODH,TPH,TNH 与 SS 有很好的相关性,CODS,可溶正 P,可溶总 P,TPS,NH<sub>3</sub>—N,NO<sub>2</sub>—N,NO<sub>3</sub>—N,无机氮,TNS 与 SS 相关性较差或负相关。这说明原状水中 CODH,TPH,TNH 主要由泥沙所挟带的有机物引入,浑水中的 TPH,CODH 和 TNH 主要以颗粒态存在;悬浮物对 CODS,可溶正 P,可溶总 P,TPS,NH<sub>3</sub>—N,NO<sub>2</sub>—N,NO<sub>3</sub>—N,无机氮,TNS 和 TNH 的贡献相对较小。

## 2.2 洪水期各指标浓度和总负荷变化特征

经各场洪水统计分析,各指标的总负荷随时间的变化趋势和径流量变化趋势大体相同,即先逐渐增大达到峰值,再逐渐变小。在洪水过程中,各指标浓度随时间的变化规律大致为:SS,CODH,TPS,TPH,NH<sub>3</sub>—N,NO<sub>2</sub>—N,NO<sub>3</sub>—N,无机氮,TNS 浓度先增

大后变小;而 CODS,可溶正 P,可溶总 P,TNH 为先减小后增大。限于篇幅,本文只列举 20060716 场洪水部分指标中 CODH,CODS,TPH,TNH 的负荷和浓度随时间的变化图(如图 1)。

由统计结果可以看出,SS 浓度峰和总负荷峰均基本与流量峰同时到达;CODH 的浓度峰和总负荷峰均接近或滞后于流量峰;CODS 浓度峰和总负荷峰均基本超前于流量峰;可溶性正磷酸盐浓度峰和总负荷峰均基本超前于流量峰;可溶性总磷酸盐浓度峰和总负荷峰均基本滞后于流量峰;TPS 浓度峰和总负荷峰均基本超前于流量峰;TPH 浓度峰和总负荷峰均接近或滞后于流量峰;NH<sub>3</sub>—N,NO<sub>2</sub>—N,NO<sub>3</sub>—N,无机氮以及 TNS 浓度峰和总负荷峰均基本超前于流量峰;TNH 浓度峰和总负荷峰均接近或滞后于流量峰。

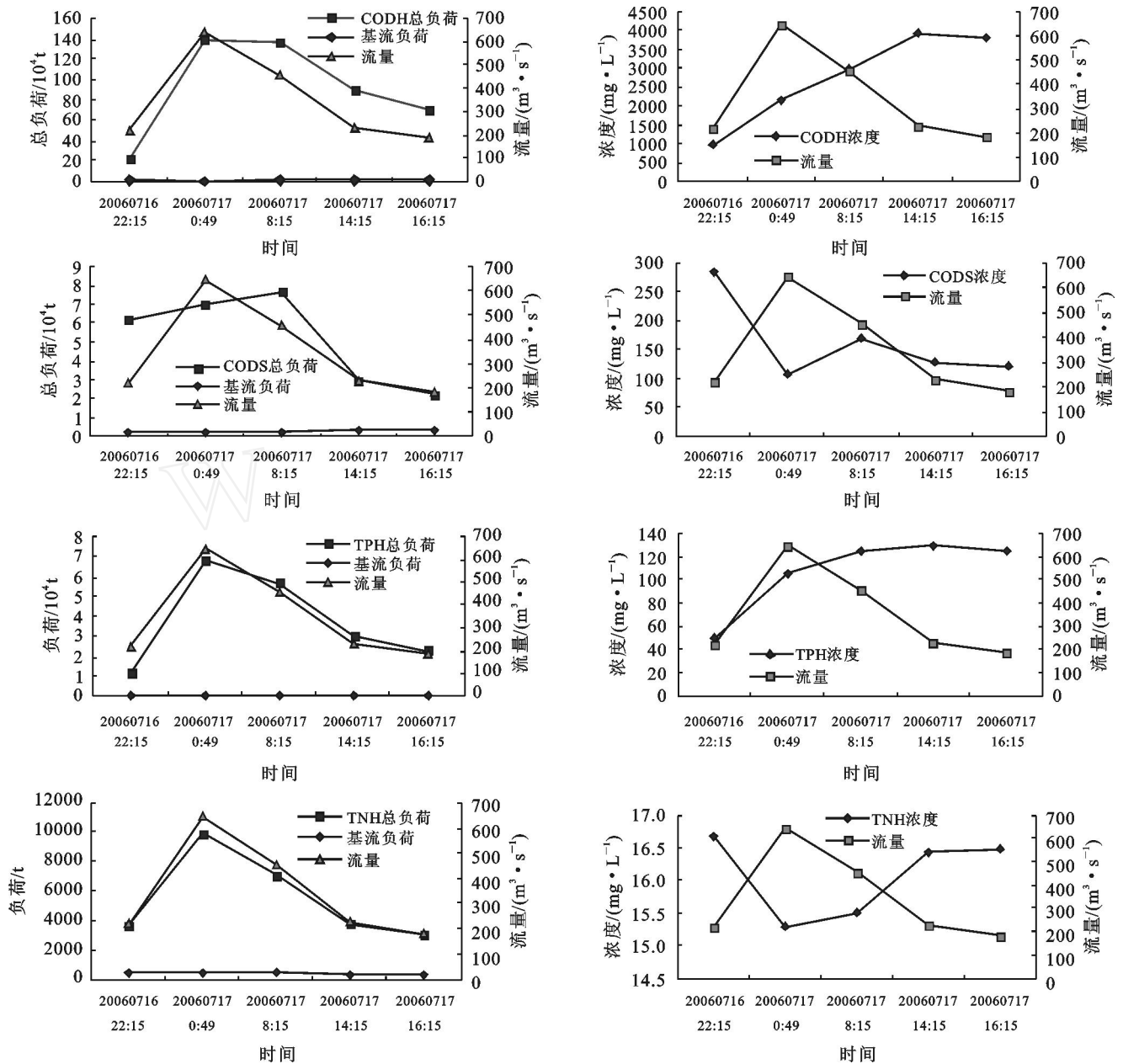


图 1 渭河临潼站 2007 年 7 月暴雨径流总负荷和浓度过程线

### 3 非点源污染负荷计算

采用平均浓度法<sup>[7]</sup>计算年非点源污染负荷。即先求出各次暴雨径流非点源污染负荷和非点源负荷加权平均浓度,再将上述多场暴雨径流的加权平均浓度近似作为渭河临潼站断面年地表径流的平均浓度,则该断面非点源污染年负荷量为此加权平均浓度与年地表径流量之积,再加上枯季径流携带的负荷量,可得到年总负荷量。亦可根据临潼站长系列年径流实测资料进行频率计算,把年径流量分割为地表径流和地下径流,分别求得不同频率代表年的非点源污染负荷量。

各场暴雨径流非点源负荷加权平均浓度的计算方法为:根据各次降雨径流过程的水量、水质同步监测以及枯季流量和枯季浓度监测资料,先计算每次暴雨径流各种污染物非点源污染的平均浓度,再以各次暴雨产生的径流量为权重,求出加权平均浓度。本文中枯季流量和枯季浓度近似采用非洪水期 3 次监测值的平均值。各场洪水非点源污染负荷量和非点源污染平均浓度计算结果见表 4—5 (因为 20060816 次洪水退水不完整,仅计算其余 4 场洪水的非点源污染负荷和平均浓度)。

还可采用水质水量相关法<sup>[8]</sup>计算年非点源污染负荷,即可以根据次暴雨径流污染监测资料建立水质水量相关关系,并将该关系近似应用于年径流的汛期

地表径流量,即可求出降雨径流污染年负荷量。再加上枯季径流污染负荷,就可求出不同代表年的总污染负荷量。利用上述 4 场洪水的非点源污染量和径流量计算结果,可建立相关方程(见表 6)。

为检验本次水质监测工作所得成果的可靠性,将上述两种方法所得无机氮非点源平均浓度和水质水量相关方程用于 1991—1999 年无机氮非点源负荷量预测,并与径流分割法<sup>[9]</sup>结果进行对比,结果见表 7。

表 4 各场洪水非点源污染负荷量计算结果

项目	SS	CODH	CODS	可溶正 P	可溶总 P	TPS	TPH	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	无机氮	TNS	TNH
20060716	1 668.31	7.61	3 911.63	0.00	0.34	66.12	3 237.56	6.50	3.95	0.55	11.00	30.23	418.10
20060724	45.95	0.59	314.07	0.02	0.02	5.30	445.14	35.70	22.42	0.00	57.92	67.91	208.45
20060829	117.06	7.34	5 538.08	0.57	3.60	7.22	629.68	85.22	9.45	24.20	118.87	237.22	631.59
20060902	962.28	10.37	261.77	0.84	7.53	11.95	5 198.72	267.55	53.27	119.24	439.71	756.80	2 718.01

注: SS,CODH 单位为 10<sup>4</sup> t,其它单位为 t。

表 5 各场洪水非点源污染平均浓度计算结果

项目	SS	CODH	CODS	可溶正 P	可溶总 P	TPS	TPH	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	无机氮	TNS	TNH
20060716	668.061	3.046	156.639	0.000	0.013	2.648	129.646	0.260	0.158	0.022	0.441	1.211	16.743
20060724	27.815	0.357	19.011	0.001	0.001	0.321	26.945	2.161	1.357	0.000	3.506	4.111	12.618
20060829	35.775	2.242	169.246	0.017	0.110	0.221	19.243	2.605	0.289	0.739	3.633	7.249	19.302
20060902	65.469	0.705	1.781	0.006	0.051	0.081	35.370	1.820	0.362	0.811	2.992	5.149	18.492
平均浓度	126.296	1.171	45.324	0.006	0.052	0.410	42.999	1.786	0.403	0.651	2.837	4.938	17.976

注: SS,CODH 单位为 g/L,其它单位为 mg/L。

表 6 非点源污染负荷与径流量之间的相关方程和相关系数

指标	相关方程	R <sup>2</sup>
CODH	$y = -0.0032x^2 + 58.814x - 72780$	0.860 7
CODS	$y = -0.0003x^2 + 4.667x - 6409.4$	0.985 1
可溶正 P	$y = -2E-08x^2 + 0.0004x - 0.724$	0.868 8
可溶总 P	$y = -1E-07x^2 + 0.0028x - 4.719$	0.951 2
TPH	$y = 0.306x + 685.62$	0.685 5
NH <sub>3</sub> -N	$y = 0.0185x - 3.786$	0.947 0
NO <sub>2</sub> -N	$y = 0.0032x + 4.320$	0.818 0
NO <sub>3</sub> -N	$y = 0.0091x - 14.574$	0.985 6
无机氮	$y = 0.0309x - 14.063$	0.963 0
TNS	$y = 0.0533x - 21.913$	0.959 1
TNH	$y = 0.1889x - 50.466$	0.998 3

注: y—NSP 负荷(t); x—地表径流量(10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>)。

表 7 1991—1999 年无机氮非点源污染负荷不同方法计算结果对比

年份	丰水期		平水期		枯水期		径流分割法/t	平均浓度法/t	相对误差/%	水质水量相关法/t	相对误差/%
	流量	浓度	流量	浓度	流量	浓度					
1991	215.31	5.917	130.86	5.631	61.69	6.928	12 788	7 062	-44.78	7 677	-39.97
1992	367.21	6.170	167.35	6.830	43.94	7.128	30 998	14 046	-54.69	15 285	-50.69
1993	297.88	2.478	181.26	4.620	71.31	9.752	2 283	10 707	368.89	11 648	410.09
1994	161.26	4.770	121.94	5.552	58.18	7.844	6 103	5 376	-11.91	5 842	-4.28
1995	92.76	8.226	45.52	11.121	20.10	19.456	5 351	3 072	-42.57	3 332	-37.71
1996	223.71	4.860	91.48	7.952	32.38	13.404	10 575	7 801	-26.24	8 482	-19.79
1997	50.39	3.169	71.38	5.388	27.57	9.232	703	2 282	224.89	2 471	251.86
1998	243.32	2.554	100.65	6.056	17.15	15.174	8 271	9 723	17.54	10 576	27.85
1999	204.41	3.769	110.04	6.358	27.94	9.562	10 823	8 209	-24.15	8 927	-17.51
平均	206.25	4.552	113.39	6.195	40.03	9.713	9 766	7 586	-22.32	8 249	-15.53

注: 流量单位为 m<sup>3</sup>/s,浓度单位为 mg/L;丰水期为 6—9 月,平水期为 3—5,10—11 月,枯水期为 12—2 月。

由表 8 可见,除 1993,1997 年外,利用本次监测所得结果与用常规监测数据所得的结果吻合较好,多年平均非点源污染负荷相对误差在 25% 以内。考虑到非点源污染影响因素复杂,由无机氮的验证结果可以初步推断,本次监测所得的各项指标非点源污染平均浓度和水质水量相关方程较为可靠,具有一定的实用价值。不论采用何种计算方法,根据浑水监测值所计算的非点源污染负荷可认为是某次洪水带来的非点源污染总负荷,对于衡量某次洪水所带来的总的污染具有参考价值。

考虑较大颗粒的泥沙在随水流运动的过程中会沉降到河底,从而导致水中实际污染物浓度和污染物负荷的降低,在渭河天然水环境条件下,沉降泥沙本底固有成分及其所吸附的外来污染物不易被解吸出来,不会对环境构成明显危害<sup>[10]</sup>,因此依据上清液监测值所计算的非点源污染负荷可作为某次洪水带来的“有效”非点源污染量,可用作水污染控制规划与方案中非点源污染控制的依据。

## 4 结论

(1) 洪水期间,SS,CODH,TPH,NO<sub>2</sub>-N,NO<sub>3</sub>-N,TNH 等指标监测值都远大于基流监测值,CODH,TPH,TNH 监测值高与表层土壤中天然腐殖质有关。上清液总氮 TNS 以水溶性氮为主;上清液总磷以固态磷为主。CODH,TPH,TNH 与 SS 有较好线性相关性,其它指标与 SS 相关性较差或负相关。

(2) 各指标总负荷随时间的变化趋势和径流量变化趋势大体相同,即先逐渐增大达到峰值,再逐渐变小;各指标浓度随时间变化规律大致为:SS,CODH,TPS,TPH,NH<sub>3</sub>-N,NO<sub>2</sub>-N,NO<sub>3</sub>-N,无机氮、TNS 浓度先增大后变小;而 CODS,可溶正 P,可溶总 P,TNH 为先减小后增大。SS 浓度峰和总负荷峰基本与流量峰同时到达;CODH,TPH,TNH 的浓度峰和总负荷峰接近或滞后于流量峰;CODS,可溶性正磷酸盐,TPS,NH<sub>3</sub>-N,NO<sub>2</sub>-N,NO<sub>3</sub>-N,无机氮及 TNS 浓度峰和总负荷峰基本超前于流量峰;可溶性总磷酸盐浓度峰和总负荷峰基本滞后于流量峰。

(3) 采用平均浓度法和水质水量相关法所得到的各项指标非点源污染平均浓度和相关方程对于渭河非点源污染负荷的估算具有一定的实用价值。原状水水质监测值可作为进入水体的污染物总量和非点源负荷总量的计算依据;上清液水质监测值可作为水体水质评价的依据以及水污染控制规划中水体有效污染物总量和有效非点源负荷总量的计算依据。

(4) 本次监测工作共采集了 5 次暴雨洪水过程的水样,包括了大、中、小洪水。在可能的情况下,监测的洪水过程越多,洪水越典型(包括大、中、小洪水),估算非点源污染年负荷量越准确。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 司全印,冉新权,周孝德.区域水污染控制与生态环境保护研究[M].北京:中国环境科学出版社,2000:35—120.
- [2] 国家环境保护总局.地表水和污水监测技术规范(HJ/T91-2002)[S].北京:中国环境科学出版社,2002:4—8.
- [3] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法(4版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002:210—284.
- [4] 陈静生,何大伟,张宇.黄河水的 COD 值能够真实反映其污染状况吗?[J].环境化学,2003,22(6):611—614.
- [5] 陈静生,张宇,于涛,等.对黄河泥沙有机质的溶解特性和降解特性的研究[J].环境科学学报,2004,24(1):1—5.
- [6] 陈静生,张宇,于涛,等.泥沙对黄河水质参数 COD、高锰酸钾指数和 BOD<sub>5</sub> 的影响[J].环境科学学报,2004,24(3):1—7.
- [7] 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.
- [8] 洪小康,李怀恩.水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J].西安理工大学学报,2000,16(4):384—386.
- [9] 蔡明,李怀恩,庄咏涛.估算流域非点源污染负荷的降雨量差值法[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(4):102—106.
- [10] 胡国华,赵沛伦,肖翔群.黄河泥沙特性及对水环境的影响[J].水利水电技术,2004,35(8):17—20.