

文章编号: 1006-4710(2012)03-0293-05

# 黄河龙门至三门峡河段污染物 降解系数动态特征研究

汪亮<sup>1</sup>, 张海欧<sup>1</sup>, 解建仓<sup>1</sup>, 罗军刚<sup>1</sup>, 闫莉<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 黄河水资源保护科学研究所, 河南 郑州 450004)

**摘要:** 为揭示不同水文条件及污染源的动态变化对污染物降解系数的影响, 本研究以黄河龙门至三门峡河段为研究对象, 对河流污染物降解系数的动态特征进行分析研究。以枯水年为代表水文年, 根据黄河龙门至三门峡区间各河段的实测资料, 用基于 Matlab 回归分析的参数估计方法反算出各河段不同水文条件下的  $\text{COD}_{\text{cr}}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的综合降解系数, 通过实例模拟对计算结果进行检验和验证。研究表明, 不同水文条件下采用不同的污染物综合降解系数更符合河流污染物降解的实际情况。

**关键词:** 黄河; 降解系数; 动态变化; 枯水年

**中图分类号:** TV752, TM614      **文献标志码:** A

## Research on Dynamic Characteristics of River Pollution Degradation Coefficient between Longmen and Sanmenxia on the Yellow River

WANG Liang<sup>1</sup>, ZHANG Haiou<sup>1</sup>, XIE Jiancang<sup>1</sup>, LUO Jungang<sup>1</sup>, YAN Li<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Yellow River Water Resources Protection Institute, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** In order to revealing the effect of different hydrological conditions and dynamic changes of the pollution sources upon the degradation coefficient and at the same time to protect the safety of water resources, the paper analyzes the dynamic characteristics of river degradation coefficient by means of numerical simulation methods. With the dry year as the representative hydrological year, according to the real measure data of river section from Longmen to Sanmenxia section of the Yellow River, based on the parameter estimation method of Matlab Regression analysis, the  $\text{COD}_{\text{cr}}$  and  $\text{NH}_3\text{-N}$  comprehensive degradation coefficient of each river section was retrieved in the different hydrological conditions, and the calculated results are verified by example simulation. The results show that using the different comprehensive degradation coefficient in the different hydrological conditions more accords with actual conditions of the river pollutant degradation.

**Key words:** Yellow River; degradation coefficient; dynamic changes; dry year

污染物综合降解系数反映了污染物在水体中降解的快慢程度, 是纳污能力计算中最为关键的参数

之一, 其取值是否合理直接影响到纳污能力的计算结果和总量控制方案的实施<sup>[1]</sup>。吴纪宏<sup>[2]</sup>利用实

收稿日期: 2012-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109175); 中国博士后科学基金资助项目(20110490170); 陕西省科技攻关计划基金资助项目(2012K06-20); 陕西省教育厅科研计划基金资助项目(12JK0472); 公益性行业科研专项基金资助项目(201001011)。

作者简介: 汪亮(1971-), 男, 陕西安康人, 博士生, 研究方向为应急管理决策支持。E-mail: wangliangmmu@163.com。

测资料反算黄河干流河段污染物降解系数;陶威和刘颖等<sup>[3]</sup>采用实验室模拟的方法,测定了长江宜宾段氨氮的降解系数;李锦秀和廖文根<sup>[4]</sup>深入研究了三峡水库建成前后水流条件的巨大变化对 BOD<sub>5</sub> 生化降解系数的影响,并建立了与水流条件相关的经验关系式。这些方法基本上是对同一水文条件、同一河段和河道条件下的污染物综合降解系数的研究,但是由于河流水文过程具有明显的动态特征,同时污染源也具有时间变化规律,而水文要素和污染源直接影响着污染物综合降解系数的变化。因此随着认识的深入和技术条件的发展,有必要开展河段不同时期不同水文条件下的污染物综合降解系数研究,提高河流纳污量计算精度,为河流水污染控制和水环境管理提供更有效的支持。

近年来,黄河水体污染日益严重,据黄河流域水环境监测中心多年公布的黄河流域地表水环境质量年报, COD<sub>cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N 是黄河干、支流河水的主要污染物<sup>[5]</sup>。黄河龙门至三门峡干流区间是晋、陕、豫三省交界的水环境敏感水域,区间水质优劣对黄河下游用水起着重要制约作用。因此,本研究选取黄河龙门至三门峡区间进行研究,采用大量实测资料推算不同水文条件和不同河段下的 COD<sub>cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N 降解系数,为建立河流水质模型、纳污能力计算和保护黄河下游集中式饮用水水源地等提供重要的基础数据和科学依据。

## 1 计算原理及参数条件设定

### 1.1 污染物降解系数计算原理

在确定环境容量的过程中,污染物的生物降解、沉降和其他物化过程可概括为污染物综合降解系数。其影响因素主要有<sup>[6-7]</sup>:污染物性质及联合作用、初始浓度、水温、污染物浓度梯度、水文特征(包括流量、流速、水深、河宽、含沙量等)以及河道状况等。用实测资料计算污染物降解系数,可以分为三步,即:①选择河段,分析上下断面水质监测资料;②分析确定河段平均流速,利用一维水质模型反算污染物降解系数;③采用临近时段水质监测资料验证计算结果,确定污染物降解系数。

一维水质模型计算公式为:

$$c = c_0 \exp\left(-k \frac{x}{86.4u}\right) \quad (1)$$

式中,  $c$  为下断面污染物浓度的监测值,单位为 mg/L;  $c_0$  为起始断面的污染物浓度,单位为 mg/L;  $k$  为污染物降解系数,单位为 d<sup>-1</sup>;  $x$  为河段长度,单位为 km;  $u$  为河段平均流速,单位为 m/s。起始断面的污染物浓度  $c_0$  可通过式(2)计算为:

$$c_0 = (c_R Q_R + c_E Q_E) (Q_R + Q_E)^{-1} \quad (2)$$

式中,  $Q_R$  为上游来水流量,单位为 m<sup>3</sup>/s;  $c_R$  为上游水质浓度,单位为 mg/L;  $Q_E$  为污水流量,单位为 m<sup>3</sup>/s;  $c_E$  为污水排放浓度,单位为 mg/L。

由于所选取的河段长度  $x$  是确定的,因此,对(1)式两边取对数,可得:

$$\ln c = \ln c_0 - k \frac{x}{86.4u} \quad (3)$$

令:

$$Y = \ln c, a = \ln c_0, X = \frac{x}{86.4u}, b = -k \quad (4)$$

则(3)式可转化为:

$$Y = a + bX \quad (5)$$

在已知河段一系列污染物浓度数据 ( $u_i, c_i$ ) ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 的情况下,可通过(4)式将其转换为  $n$  组 ( $X_i, Y_i$ ) ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),然后,基于 Matlab 对(5)式进行回归分析,求得参数  $a$  和  $b$  的最优估计值,根据(6)式可求得污染物综合降解系数  $k$ ,为:

$$k = -b \quad (6)$$

### 1.2 参数条件设定

河流水文过程和其他自然条件的动态变化是污染物综合降解系数具有动态特征的基础<sup>[8-9]</sup>,影响河流污染物综合降解系数的主要因素都是随时间而变化的,这些因素直接影响着河流污染物综合降解系数的变化,因此污染物的综合降解系数实际上是一个具有时间动态变化特征的量。同时,水体污染源具有明显的时间变化特征<sup>[10]</sup>。由于受到降雨蒸发的影响,河流的流量、水温、水动力等因素在不同时间段具有较大差异,而这些因素都直接或间接地影响着污染物综合降解系数的大小。图1为黄河龙门至潼关段各站点2006年月平均流量,根据历年龙门至潼关段水文站的观测资料,将径流年内分配划分为三个时期,7~10月为丰水期;3~6月为平水期;11、12、1、2月为枯水期。由于各水期流量、平均流速、水温以及水深不同,从而直接影响到河流污染物的综合降解系数。

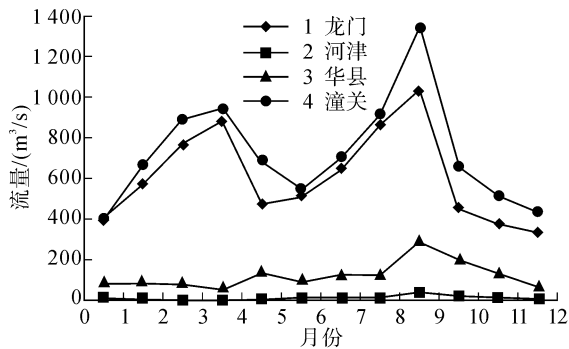


图1 黄河龙门至潼关段各站点2006年月平均流量  
Fig. 1 Average monthly flow in 2006 at each station of the Longmen-Tongguan reach

枯水条件下污染源以点源为主,而非点源污染主要产生在丰水期,为了实现水污染的有效控制应该对点源和非点源进行统一管理<sup>[10-11]</sup>。因此,可以选择某一枯水年型作为代表水文条件,同时对该年型的年内分布特性进行分析,以接近多年平均状况或者对水环境管理比较安全为原则确定年型,这种设计水文条件下计算得到的污染物的综合降解系数能够适用于大部分的水文年型,可以作为环境管理的依据<sup>[10-12]</sup>。

由于不同河段不同水期(丰、平、枯水期)具有不同流量对应于不同流速下的水质综合降解系数。本研究首先对选取的典型年进行逐月计算污染物综合降解系数,然后对不同时段取其均值作为该时段河段污染物综合降解系数,最后,采用临近时段水质监测资料对计算结果进行验证,以确定污染物综合降解系数。

## 2 计算实例分析

根据以上确定的关键技术方法和计算过程,本

研究以黄河龙门至三门峡区间为例进行不同时期污染物综合降解系数的研究,研究指标包括  $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ ,由于各水期水温、流量、平均流速以及水深不同,得到河段不同时期不同水文条件下的污染物综合降解系数,并且对计算结果进行验证分析。

### 2.1 参数条件分析

从《中华人民共和国水文年鉴》和其它有关文献中收集近10年黄河干流主要站点的水质水文监测资料进行统计分析。2006年7~10月(丰水期)黄河流域各区间来水量与历年平均值相比均偏少。其中黄河上游唐乃亥站(龙羊峡水库入库)实测径流量为74.91亿 $\text{m}^3$ ,较历年均值偏少38.8%;兰州站实测径流量为115.9亿 $\text{m}^3$ ,较历年均值偏少35.5%;黄河中游龙门站实测径流量为80.47亿 $\text{m}^3$ ,较历年平均值偏少52.4%;潼关站实测径流量为97.07亿 $\text{m}^3$ ,较历年均值偏少52.2%;黄河下游花园河口站实测径流量为84.13亿 $\text{m}^3$ ,较历年均值偏少63.8%。分析可知该年型属枯水年,并且其丰水期在相应的水文系列中具有较高的保证率,因此,无论是年型还是年内分布,该年都适合作为计算污染物综合降解系数的设计水文年。

### 2.2 污染物降解系数计算

利用龙门至三门峡区间监测资料计算  $\text{COD}_{\text{cr}}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的降解系数。 $\text{COD}_{\text{cr}}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的降解系数计算采用2004~2006年水质监测资料,在2006年枯水年的水文条件下逐月计算污染物降解系数,然后对不同时段取其均值作为该时段河段污染物降解系数,基于matlab回归分析的参数估计相关系数平方接近1.0, $P$ 值接近0,计算结果列于表1。

表1 降解系数计算结果

Tab. 1 Degradation coefficient calculation results

河段名称	水期					
	丰水期(7~10月)		平水期(3~6月)		枯水期(11~2月)	
	$\text{COD}_{\text{cr}}/\text{d}^{-1}$	$\text{NH}_3\text{-N}/\text{d}^{-1}$	$\text{COD}_{\text{cr}}/\text{d}^{-1}$	$\text{NH}_3\text{-N}/\text{d}^{-1}$	$\text{COD}_{\text{cr}}/\text{d}^{-1}$	$\text{NH}_3\text{-N}/\text{d}^{-1}$
汾河河津段	0.273	0.148	0.251	0.131	0.233	0.087
渭河华县段	0.287	0.203	0.262	0.142	0.246	0.098
黄河潼关段	0.320	0.220	0.281	0.168	0.260	0.121

从表1可知,丰水期比平、枯水期的污染物降解系数大,这是由于河流的流量越大,径污比越大,越有利于污染物的混合稀释,自净程度相对较快;夏季(丰水期)水温高,有利于污染物降解,冬季(枯水期),水温低,生物降解和挥发作用下降;近年来流域范围内的城市飞速发展,城市污水排放量大大增加,从而导致河流枯水期污染物降解速率低。黄河

比渭河、汾河两河的污染物降解系数大,这由于黄河含沙量大,泥沙对污染物的吸附能力较大,其自净程度相对清水河流较高,污染物的降解能力相对比普通河流大。

### 2.3 计算结果验证及分析

采用2008年监测资料验证降解系数的准确性,各河段的实测值与反算值对比见图2~7。

从图2、图4和图6的验证结果可以看出,  $COD_{cr}$ 的反算结果与实测值基本吻合, 误差都在20%以内, 降解系数可靠; 而图3、图5和图7中

$NH_3-N$ 的反算结果与实测值则存在较大偏差, 吻合效果不及  $COD_{cr}$ 。但  $COD_{cr}$ 和  $NH_3-N$  两者反算结果与实测值都具有较好的一致性。

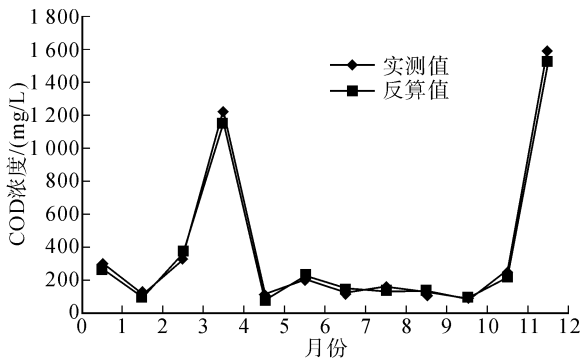


图2 河津段  $COD$  浓度计算结果图  
Fig.2 The chart of  $COD$  concentration the computational results of Hejin reach

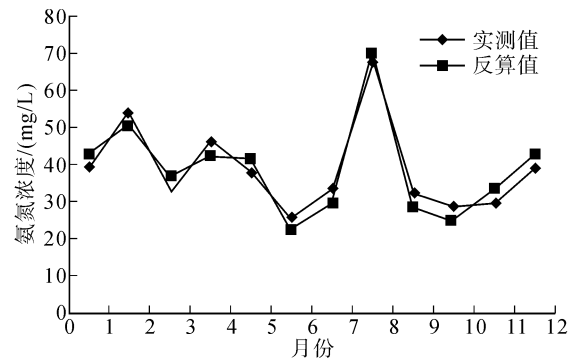


图3 河津段  $NH_3-N$  浓度计算结果图  
Fig.3 The chart of  $NH_3-N$  concentration the computational results

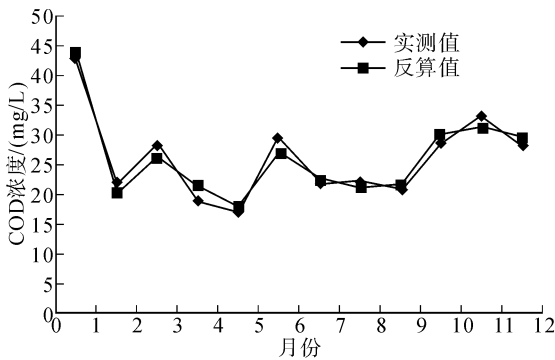


图4 潼关段  $COD$  浓度计算结果图  
Fig.4 The chart of  $COD$  concentration the computational results of Tongguan reach

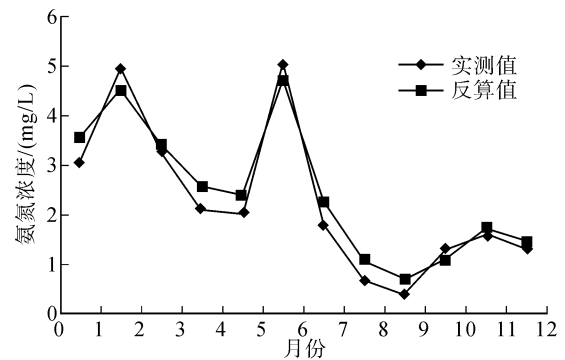


图5 潼关段  $NH_3-N$  浓度计算结果图  
Fig.5 The chart of  $NH_3-N$  concentration the computational results

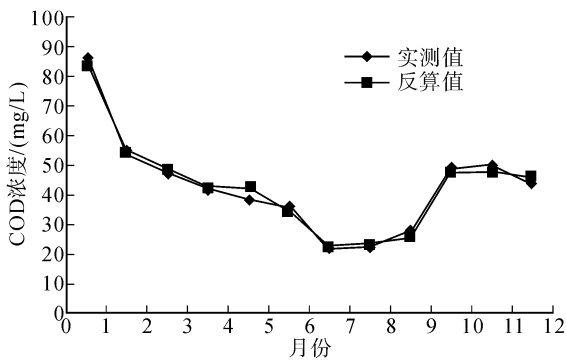


图6 华县段  $COD$  浓度计算结果图  
Fig.6 The chart of  $COD$  concentration the computational results of Huaxian reach

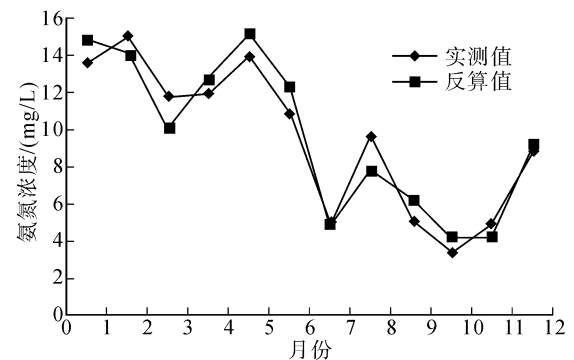


图7 华阴段  $NH_3-N$  浓度计算结果图  
Fig.7 The chart of  $NH_3-N$  concentration the computational results

### 3 结论

黄河龙门至三峡干流区间是晋、陕、豫三省交界的水环境敏感水域, 集中渭河、汾河等重要支流, 区间水质优劣对黄河下游用水起着重要制约作用。本研究对黄河龙门至三门峡段的重要支流汾河、渭河和干流潼关段进行降解系数动态分析计算, 选择具

有代表性并且适合环境管理要求的设计水文年, 采用该方法得到不同水期不同河流及河段的不同污染物降解系数,  $COD_{cr}$ 和  $NH_3-N$  两者反算得出的浓度值与实测值具有较好的一致性, 说明该研究方法得出的  $COD_{cr}$ 和  $NH_3-N$  降解系数较可靠, 更加符合河流的实际情况, 可为河流水质模型的建立和纳污能力分析计算提供重要的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 雷军. 长沙市地表水资源保护及水环境总量控制研究[D]. 南京:河海大学,2005.  
Lei Jun. Surface water resources conservation and water environment total amount research of Changsha city[D]. Nanjing:Hehai University,2005.
- [2] 吴纪宏. 黄河干流河段污染物降解系数分析研究[J]. 人民黄河,2006,28(8):36-38.  
Wu Jihong. Analysis and research of pollution degradation coefficient in the Yellow river mainstream river[J]. Yellow River,2006,28(8):36-38.
- [3] 陶威,刘颖,任怡然. 长江宜宾段氨氮降解系数的实验室研究[J]. 污染防治技术,2009,22(6):8-10.  
Tao Wei,Liu Ying, Ren Yiran. Study on ammonia nitrogen degradation coefficient in Yibin section of Yangtze river[J]. Pollution Control Technology,2009,22(6):8-10.
- [4] 李锦秀,廖文根. 水流条件巨大变化对有机污染物降解速率影响研究[J]. 环境科学研究,2002,15(3):45-48.  
Li Jinxiu,Liao Wengen. The effect of water flow on the biodegradation of organic pollutant[J]. Research of Environmental Sciences,2002,15(3):45-48.
- [5] 夏星辉,王然,孟丽红. 黄河耗氧性有机物污染特征及泥沙对其参数测定的影响[J]. 环境科学学报,2004,24(6):969-974.  
Xia Xinghui,Wang Ran,Meng Lihong. Contamination characteristics of oxygen-consuming organics in the Yellow river and the effects of suspended solids on its monitoring[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2004,24(6):969-974.
- [6] 胡锋平,侯娟,罗健文,等. 赣江南昌段污染负荷及水环境容量分析[J]. 环境科学与技术,2010,33(12):192-205.  
Hu Fengping, Hou Juan, Luo Jianwen, et al. Analysis of pollution loading and water environmental capacity of Gan river in Nanchang[J]. Environmental Science & Technology, 2010,33(12):192-205.
- [7] 王有乐,孙苑菡,周智芳,等. 黄河兰州段 COD<sub>(Cr)</sub>降解系数的实验研究[J]. 甘肃冶金,2006,28(1):27-28.  
Wang Youle,Sun Yuanhan,Zhou Zhifang, et al. Research on COD<sub>(Cr)</sub> degradation coefficient in the Lanzhou channel segment of the Yellow river[J]. Gansu Metallurgy, 2006, 28(1):27-28.
- [8] 宋刚福,沈冰. 基于水功能区划的河流生态环境需水量计算研究[J]. 西安理工大学学报,2012,28(1):49-55.  
Song Gangfu, Shen Bing. Calculation research on river eco-environmental water requirements based on water function regionalization[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(1):49-55.
- [9] 王祎,李静文,邵雪,等. 基于计算智能的流域污染排放优化模式研究[J]. 中国环境科学,2012,32(1):173-180.  
Wang Yi,Li Jingwen,Shao Xue, et al. Computational intelligence based optimization study on the watershed discharge of sewage[J]. China Environmental Science, 2012,32(1):173-180.
- [10] 史晓新,禹雪中,马巍. 湖泊纳污能力动态特征分析及计算[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2008,6(2):105-110.  
Shi Xiaoxin,Yu Xuezhong, Ma Wei. Analysis and calculation of dynamic characteristics of lake environmental capacity[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2008,6(2):105-110.
- [11] 李锦秀,马巍,史晓新,等. 污染物排放总量控制制定额确定方法[J]. 水利学报,2005,36(7):812-817.  
Li Jinxiu, Ma Wei, Shi Xiaoxin, et al. Determination of allowable total discharge amount of pollutant[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7):812-817.
- [12] 马巍,禹雪中,翟淑华,等. 太湖限制排污总量及其管理应用研究[J]. 科技导报,2008,26(18):49-53.  
Ma Wei,Yu Xuezhong,Zhai Shuhua, et al. Control of gross water pollutant discharge in Tai Lake[J]. Science & Technology Review,2008,26(18):49-53.

(责任编辑 李虹燕)