

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0114

谭铭欣,李天宏,赵志杰. 山西省御河流域水环境污染负荷估算及来源[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 90-99. TAN M X, LI T H, ZHAO Z J. Pollution load estimation and source analysis in the Yu River basin, Shanxi Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 90-99. (in Chinese)

## 山西省御河流域水环境污染负荷估算及来源

谭铭欣<sup>1</sup>, 李天宏<sup>1,2</sup>, 赵志杰<sup>2</sup>

(1. 北京大学 深圳研究生院环境与能源学院 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055;  
2. 北京大学 环境科学与工程学院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:**流域水污染负荷估算及污染源解析是流域水环境治理的基础性工作。采用监测和统计数据,综合考虑点源和非点源污染,估算2016年御河流域水污染负荷。在地理信息系统支持下,基于流域数字高程模型和监测断面位置将流域划分为6个控制单元,提出了入河系数的估算方法,分析了各控制单元各类污染源的贡献。结果表明:2016年COD、NH<sub>3</sub>-N和TP入河量分别为7 299.52、1 163.56和124.46 t/a,其中分别有70.04%、86.45%和68.00%来源于点源污染。污染物主要来自十里河上游和御河上游,未收集的点源是御河最主要的污染源,对COD、NH<sub>3</sub>-N和TP贡献率分别达到46%、80%和49%。研究结果为山西省御河流域水环境治理提供了科学依据。

**关键词:**污染负荷;输出系数法;入河系数;污染源;御河流域

中图分类号:X522 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Pollution load estimation and source analysis in the Yu River basin, Shanxi Province

TAN Mingxin<sup>1</sup>, LI Tianhong<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhijie<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Energy, Laboratory of Urban Habitat Environmental Science and Technology, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Pollution load estimation and source analysis are fundamental tasks of water environment management. Based on monitoring and statistical data, considering point source and non-point source pollution, water pollution loads and main pollution sources in 2016 were analyzed in the Yu River basin, Shanxi Province. Based on the digital elevation model and positions of monitoring stations, the river basin was divided into six control units with support of Geographical Information System (GIS), an estimating method of pollution loss is proposed to calculate the pollution load from different pollution sources. The results showed that in 2016, 7 299.52 tons of COD, 1 163.56 tons of NH<sub>3</sub>-N, and 124.46 tons of TP were discharged into the Yuhe, of which 70.04%, 86.45% and 68.00% were from point source pollution. The spatial analysis indicated that pollutants mainly came from the upstream of the Shili River and the Yu River, and was mainly ascribed to uncollected point source pollution, and contribution rates of COD, NH<sub>3</sub>-N and TP were 46%, 80% and 49%, respectively. The results provided a scientific basis for water environment management in the Yu River Basin.

**Key words:** pollution load; export coefficient method; loss rate; pollution source; the Yu River basin

收稿日期:2019-03-12 修回日期:2019-05-18 网络出版时间:2019-05-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190523.1618.012.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402505)

作者简介:谭铭欣(1993—),女,广东东莞人,主要从事流域面源污染方向的研究。E-mail:tanmx@pku.edu.cn

通信作者:李天宏(1970—),男,陕西渭南人,副教授,博士,主要从事水沙环境科学与环境信息学研究。E-mail:lth@pku.edu.cn

流域污染负荷估算和污染源解析是当前流域水环境污染研究的一个热点<sup>[1-3]</sup>,其结果将直接服务于流域污染物总量控制策略制定和实施。输出系数法<sup>[4]</sup>是一种常用的污染负荷估算方法,利用的是相对易获取的土地利用和社会经济数据,在环境监测数据稀缺或零散的地区应用具有较大优势<sup>[5]</sup>。

御河是桑干河的一级支流,属海河流域永定河水系。御河属于典型的缺水性河流,流量小,水流缓慢,自净能力低。随着工业和生活用水增大,污水排放成为河水的一大来源。近年来御河流域水环境问题突出,影响着大同市及下游河北省的用水安全,已引起政府和公众的高度关注。目前关于御河流域的研究主要集中在河道水利工程<sup>[6-7]</sup>和生态整治建设<sup>[8]</sup>,大多为宏观的统筹规划和保护对策,缺乏具有数据支撑的水质研究。由于御河流域基础资料相对缺乏,本文综合考虑点源和非点源污染,利用统计资料和输出系数模型估算污染负荷,基于地理信息系统进行控制单元划分,提出入河系数的估算方法,计算各空间单元污染物入河量,识别不同污染源对河流水污染的贡献,以期御河水环境治理和断面水质达标提供科学依据。

## 1 研究区概况与污染特征

### 1.1 研究区概况

御河流域位于山西省和内蒙古自治区交界处,山西大同市境内流域面积 2 475 km<sup>2</sup>,地处东经 112°35′~113°31′,北纬 39°50′~40°24′,主要支流有十里河和淤泥河。流域地处背风的内蒙高原内陆区,属高原温带季风型大陆性气候,降雨年际变化大,多年平均降雨量 416 mm,降雨年内分布不均,主要集中在 7、8 月。流域内土地利用以耕地为主(41%),其次为草地(28%)和林地(21%)。

御河流域涉及县级行政区有大同市左云县、新荣区、平城区、云冈区和云州区。根据大同市统计年鉴,2016 年流域内总人口 132.03 万人,占全市总人口约 30.55%,其中城镇人口 105.32 万人,乡村人口 26.71 万人,城镇化率约 79.77%;产业结构以第二、第三产业为主,GDP 分别占比 49%和 48%。

### 1.2 流域污染特征

根据 2014—2017 年御河流域 6 个水质监测断面的监测数据,计算溶解氧 DO、高锰酸盐指数 COD<sub>MN</sub>、生化需氧量 BOD<sub>5</sub>、氨氮 NH<sub>3</sub>-N、化学需氧量 COD 和总磷 TP 六项指标的年平均值,采用单因子水质标识指数法评价御河流域水环境污染状况,水功能区目标参考《山西省地表水水环境功能区

划》,评价结果见图 2。

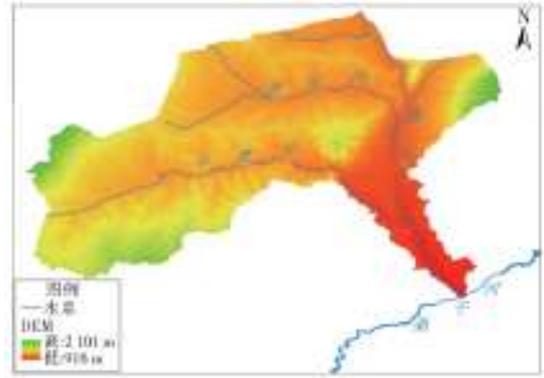


图 1 御河流域地理位置

Fig. 1 Geographic location of the Yu River basin

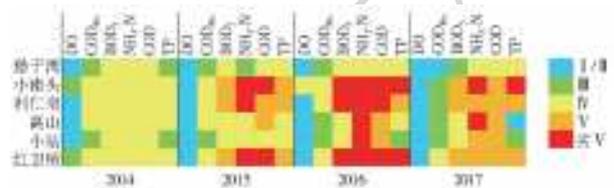


图 2 2014—2017 年各断面单项指标水质评价结果

Fig. 2 Evaluation of the water quality of different sections between 2014-2017

结果表明: BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、COD 和 TP 是御河流域主要污染物, DO 和 COD<sub>Mn</sub> 水质指标达到地表水 IV 类水质标准。

从年际变化来看, BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、COD 和 TP 污染物浓度总体呈逐年上升趋势。2014 年至 2017 年御河流域各监测断面水质年际变化明显。2014 年各断面水质均达到地表水 IV 类水质标准,符合地表水功能区划要求。从 2015 年开始,流域水质急剧下降,小南头、利仁皂和红卫桥断面已到达劣 V 类标准,高山断面为 V 类水质。到了 2016 年,除了堡子湾断面,流域各断面水质均为劣 V 类水质。相较 2016 年,2017 年各断面污染物浓度总体有所下降,但小南头和高山断面仍为劣 V 类水质,利仁皂、小站和红卫桥断面为 V 类水质,均不能达到水功能区划要求。

从空间分布上看,河流水质呈现上游水质优于下游水质的特征。十里河下游(红卫桥断面)水质明显劣于中上游(高山、小站断面)水质;御河上游(堡子湾断面)水质较好,堡子湾断面近 4 a 水质均符合地表水功能区划要求,但御河中下游(小南头、利仁皂断面)水质较差。2016 年起御河中下游 BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、COD 和 TP 污染物均超标,可能沿途接纳废污水污染大。御河中游小南头断面 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 污染程度明显高于流域内其他断面污染程度。

## 2 研究方法

### 2.1 控制单元划分

根据流域内数字高程模型 (DEM) 数据 (栅格大小为 30 m×30 m), 利用 ArcGIS 软件中 Hydrology

模块的算法提取流域范围。根据监测断面分布、水系结构、行政区划等要素将研究区域划分为御河上、中、下游和十里河上、中、下游 6 个控制单元, 各控制单元的空间分布、面积、监测断面和涉及的乡镇见图 3 和表 1。



图 3 御河流域控制单元划分情况

Fig. 3 Division map of control units in the Yu River basin

表 1 御河流域控制单元划分情况

Tab. 1 Division of control units in the Yu River basin

控制单元名称	涉及乡镇	面积/km <sup>2</sup>	监测断面
御河上游	新荣镇、上深涧乡、古店镇、管家堡乡、破鲁堡乡、郭家窑乡、西村乡、花园屯乡、堡子湾乡	908.73	堡子湾断面
御河中游	古店镇、水泊寺乡、马军营乡、新旺乡、西村乡、新荣镇、花园屯乡、新华街街道、北关街道、东街街道、南街街道、西街街道、北街街道、新建南路街道、新建北路街道、南关街道、向阳里街道	294.09	小南头断面
御河下游	西韩岭乡、水泊寺乡、党留庄乡、杜庄乡	98.56	利仁皂断面
十里河上游	高山镇、店湾镇、小京庄乡、张家场乡、鹊儿山镇、上深涧乡、云兴镇、管家堡乡、三屯乡、水窑乡、马道头乡、燕子山街道	770.71	—
十里河中游	高山镇、马军营乡、鸦儿崖乡、云冈镇、西村乡、店湾镇、上深涧乡、马脊梁街道、四台沟街道、姜家湾街道、晋华宫街道、青磁窑街道	316.1	高山断面、小站断面
十里河下游	西韩岭乡、马军营乡、平旺乡、大庆路街道、开源街街道、向阳里街道、新建南路街道、振华南路街道	86.70	红卫桥断面

### 2.2 流域污染排放负荷核算

以水质监测数据和统计资料为基础, 根据流域污染情况, 选取 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 3 种主要污染物, 分别计算其点源和非点源污染负荷。其中: 点源分为工业污染 M<sub>1</sub>、城镇生活污染 M<sub>2</sub> 和规模化畜禽

养殖污染 M<sub>3</sub>; 非点源分为农村生活污染 M<sub>4</sub>、分散畜禽养殖污染 M<sub>5</sub>、农业用地污染 M<sub>6</sub> (包括耕地、林地和草地) 和城市径流污染 M<sub>7</sub>。

由于点源污染一部分进入污水处理设施, 经处理后排入河中, 一部分直接排放到环境中, 因此估算

点源污染负荷时分为污水处理厂尾水负荷和未收集点源两部分。尾水负荷根据流域内污水处理厂出水水质监测数据计算;未收集点源为点源排放量与收集量之差,点源排放量为工业污染、城镇生活污染和规模化畜禽养殖污染之和,收集量根据污水处理厂进水水质监测数据计算。

工业污染根据流域内工业、企业污染源现状统计,数据来源于大同市环境统计和污染源普查资料。其他污染源使用输出系数法,计算公式为

$$L = \sum_{i=1}^n E_i [A_i (I_i)] + p \quad (1)$$

式中:  $L$  为污染物输出量;  $E_i$  为污染源  $i$  的输出系

数;  $A_i$  为土地利用类型  $i$  的面积或畜禽类型  $i$  或人口的数量,人口、畜禽数量来源于大同市及下属各区县统计年鉴,土地利用面积利用 ArcGIS 软件对土地利用分布图提取;  $I_i$  为污染源  $i$  的输入量;  $p$  是有降雨产生的污染物质,鉴于研究区内降雨量较低,  $p$  忽略不计。

前人<sup>[9]</sup>在输出系数上研究提供了不同土地利用类型和人口或畜禽的输出系数的取值范围,在具体选取时,要获得准确的输出系数仍有很大的难度。文献查阅法是目前最常用的输出系数确定方法,本文输出系数采用查阅文献法确定。不同污染源输出系数具体取值见表 2。

表 2 御河流域不同污染源输出系数

Tab. 2 Export coefficients of different pollution sources in Yu River basin

污染源	污染物			来源		
	COD	NH <sub>3</sub> -N	TP			
点源	城镇生活/g·(人·d) <sup>-1</sup>	56.00	7.63	0.78	文献 <sup>[10-11]</sup>	
	猪/kg·(头·a) <sup>-1</sup>	5.87	0.92	0.08	文献 <sup>[12]</sup>	
	规模化畜禽养殖 奶牛/kg·(头·a) <sup>-1</sup>	141.69	20.56	2.74		
	肉牛/kg·(头·a) <sup>-1</sup>	88.90	6.15	0.43		
非点源	农村生活/g·(人·d)	16.40	4.00	0.97	文献 <sup>[13-14]</sup>	
	分散畜禽养殖	猪/kg·(头·a) <sup>-1</sup>	11.73	0.74	0.17	文献 <sup>[13,15]</sup>
		奶牛/kg·(头·a) <sup>-1</sup>	326.22	10.21	1.85	
		肉牛/kg·(头·a) <sup>-1</sup>	168.42	10.21	0.83	
		鸡/kg·(只·a) <sup>-1</sup>	0.64	0.04	0.01	
	土地利用	耕地/kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>	22.80	5.21	0.90	文献 <sup>[16-18]</sup>
		林地/kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>	16.10	0.52	0.10	
草地/kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>		11.50	0.25	0.29		
城市用地/kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>		50.00	1.74	0.25		

### 2.3 入河系数确定

排放到环境中的污染物只有一部分进入河流中,计算入河量时需引入入河系数。入河系数是入河量和排放量的比值。入河系数确定是计算污染物入河量的关键。一般来说,点源污染的排污方式较稳定,一定时期内可视为常数。由于尾水负荷直接从污水处理厂排入河道,入河系数取 1.0;未收集的点源入河系数参考相似流域<sup>[19-20]</sup>,取 0.9。由于城镇不透水下垫面面积大,降雨时雨水携带路面污染物经城市下水管道进入河流,其入河系数应大于农业非点源。本文城镇径流入河系数按照大同市径流系数<sup>[21]</sup>,取 0.55。

农业非点源污染入河系数受到气候、水文、地形、土地覆盖/利用、人类活动等因素影响,不同地区差异较大。由于目前缺乏御河流域入河系数的相关研究,本文建立反演算模型,根据进出口断面实测污

染物浓度和流量以及河流水文参数,计算污染物入河量。

根据研究区域河流特征,御河和十里河长远大于河宽和水深,属宽浅河道,可选用一维水质模型。基于质量守恒定理,考虑旁测流影响,可以建立污染物迁移转化模型为

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} = AE \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KAC + S \frac{A}{h} + \frac{W}{dx} \quad (2)$$

式中:  $A$  为过水面积;  $C$  是污染物浓度;  $Q$  为流量;  $E$  为纵向离散系数;  $K$  为降解系数;  $S$  为底泥释放率;  $h$  为水深;  $W$  为污染物输入量;  $t$  为时间;  $x$  为距离。

假定某河段长  $L$ ,  $Q_0$  和  $Q_L$  分别为进口和出口断面流量,  $C_0$  和  $C_L$  分别为进口和出口断面浓度。不考虑旁侧流污染物的混合过程,假定污染物进入河道瞬间完成与河水的均匀混合,且非点源污染源在河道两侧均匀分布,对公式(3)积分,得到

$$W_L = C_L \frac{\partial V}{\partial t} + (Q_L C_L - Q_0 C_0) + KVC_L - A_L S \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_0 - Q_L + q \quad (4)$$

式中： $W_L$  为该河段入河量； $V$  为水体体积； $q$  为旁测流量； $A_L$  为河底面积。

联立公式(3)和(4)，忽略底泥释放量，污染物入河量的计算公式为

$$W_L = Q_0(C_L - C_0) + qC_L + KVC_L \quad (5)$$

因流域内有上下游实测数据的河段均有排污口或支流汇入，排污口或支流的水质监测数据缺乏，降解系数  $K$  无法用两点法推求。本文降解系数  $K$  通过查阅相邻地区的研究文献<sup>[22-24]</sup>，用类比法确定： $K_{\text{COD}} = 0.08/\text{d}$ ， $K_{\text{NH}_3-\text{N}} = 0.05/\text{d}$ ， $K_{\text{TP}} = 0.013/\text{d}$ 。

由于十里河下游控制单元进出口均有断面监测数据，选取该控制单元计算污染物入河量，根据污染物排放量推算农业非点源入河系数，计算结果见表 3。

表 3 十里河下游农业非点源污染入河系数  
Tab. 3 Loss rate of agricultural nonpoint pollution in downstream Shili River

污染物	COD	NH <sub>3</sub> -N	TP
排放量/t	534.51	45.24	9.57
入河量/t	41.40	2.84	0.78
入河系数	0.077	0.063	0.082

由于流域内不同区域的属性不同，入河系数也应随之有所变化，可以根据十里河下游控制单元的

入河系数对其他控制单元入河系数进行修正。降雨和地形是影响非点源污染的重要因素，本文考虑降雨和地形因子的影响。降雨因子以降雨侵蚀力因子  $R$  表示，利用流域内 19 个气象站/水文站的降雨数据，利用刘秉正公式(公式(6))分别计算各个站点的降雨侵蚀力  $R$ ，利用 ArcGIS 的克里金插值分析  $R$  值的空间分布(见图 4)，统计各控制单元的降雨侵蚀力平均值。地形因子以坡度表示，基于 DEM 统计各控制单元的的平均坡度，流域内坡度分布见图 5。降雨和地形修正方法见式(7)至(8)。通过修正得到六个控制单元农业非点源污染入河系数(见表 4)。该取值与海河流域<sup>[14,25]</sup>相关研究入河系数取值处于同一水平，也间接证明本文入河系数的估算结果是可靠的。

$$R = 105.44 \frac{(P_{6-9})^{1.2}}{P} - 140.96 \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{R_i}{R_0} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{L(\theta_i)}{L(\theta_0)} = \frac{c\theta_i^d}{c\theta_0^d} = \left(\frac{\theta_i}{\theta_0}\right)^d \quad (8)$$

$$\lambda_i = \alpha\beta\lambda_0 \quad (9)$$

式中： $R$  为某年降雨侵蚀力； $P_{6-9}$  为同年 6—9 月降雨量之和； $P$  为同年降雨量。 $\alpha$ 、 $\beta$  分别为降雨、地形校正因子； $R_i$ 、 $R_0$  分别为研究区域和基准区域降雨侵蚀因子； $L$  为污染负荷； $c$ 、 $d$  均为常量； $\theta_i$ 、 $\theta_0$  分别为研究区域和基准区域坡度。 $\lambda_i$ 、 $\lambda_0$  分别为研究区域和基准区域的入河系数。

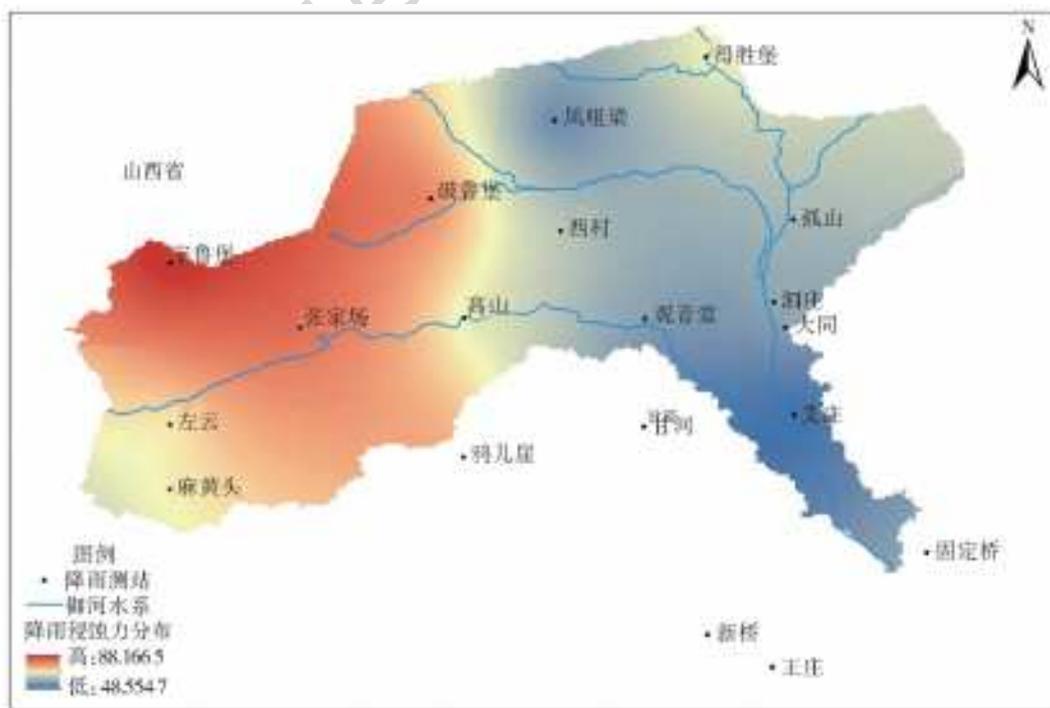


图 4 御河流域降雨侵蚀力分布

Fig. 4 Rainfall erosivity distribution in the Yu River basin

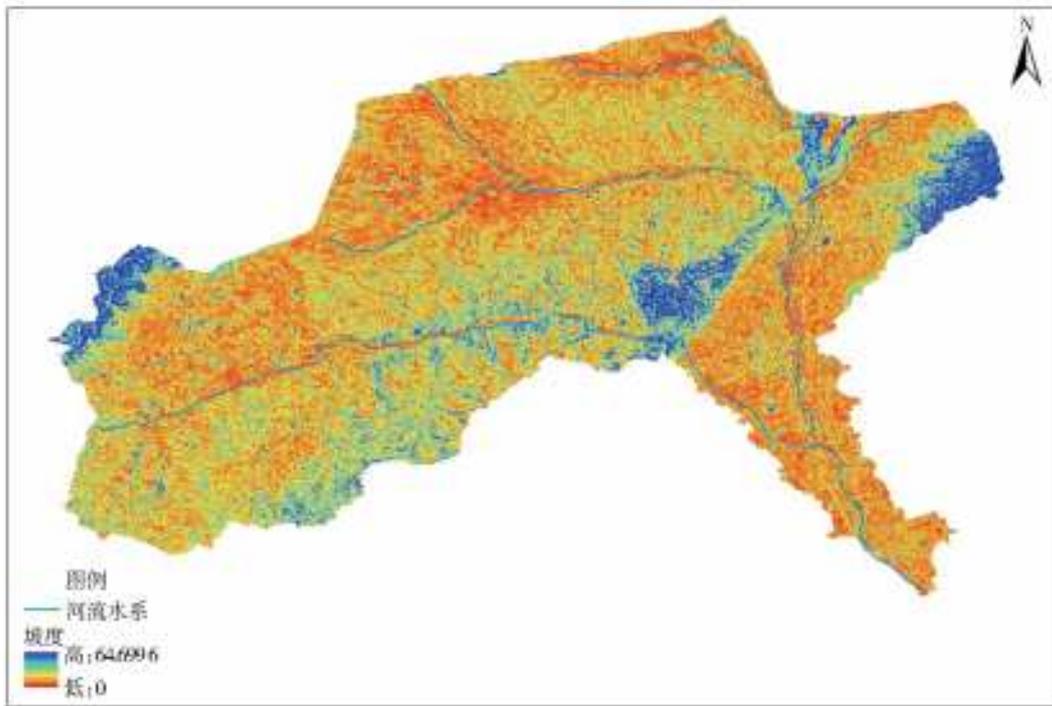


图5 御河流域坡度分布

Fig.5 Slope distribution of the Yu River basin

表4 御河流域非点源污染入河系数

Tab.4 Coefficients of pollutant inflow into river from nonpoint pollution in the Yu River basin

控制单元	坡度修正	降雨修正	入河系数		
			COD	NH <sub>3</sub> -N	TP
御河上游	1.23	1.28	0.12	0.10	0.13
御河中游	1.30	1.13	0.11	0.09	0.12
御河下游	1.02	1.03	0.08	0.07	0.09
十里河上游	1.34	1.49	0.16	0.13	0.16
十里河中游	1.56	1.26	0.15	0.12	0.16
十里河下游	1.00	1.00	0.08	0.06	0.08

### 3 结果分析

#### 3.1 污染物排放量

2016年御河流域各控制单元不同污染源COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 污染物排放量计算结果见图6。其中点源污染以橘红色系表示,非点源污染以绿色系表示。

流域内COD、NH<sub>3</sub>-N和TP 污染物排放量分别为36 723.35 t, 4 497.62 t 和 590.25 t, 其中约62%、70%和53%来源于点源污染。点源污染中有

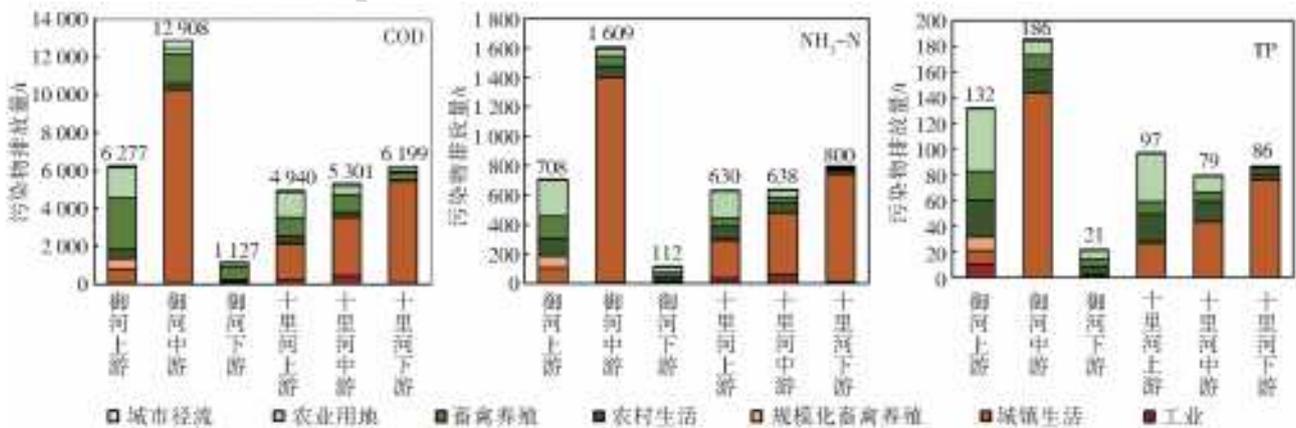


图6 2016年御河流域各控制单元污染物排放量

Fig.6 Pollution emissions from different control units in the Yu River basin in 2016

90%以上的排放量来源于城镇生活污染。御河中游城镇居民数量大,该控制单元排放的污染物明显高于其他控制单元。

由于流域内土地利用以农业用地为主,畜禽养殖量大,非点源污染中60%~80%的污染物来源于农业用地和畜禽养殖。

### 3.2 入河污染负荷

2016 年御河流域各控制单元不同污染源 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 污染物入河污染负荷计算结果图 7。其中点源污染以红色系表示,非点源污染以绿色系表示。

从全流域污染负荷分析,2016 年御河流域各污染源入河贡献率见图 8。污染物 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 入河量分别为 7 299.52、1 163.56 和 124.46 t。不同污染源对 COD 负荷的贡献率为未收集点源 >

尾水负荷 > 畜禽养殖 > 城市径流 > 农业用地 > 农村生活;不同污染源对 NH<sub>3</sub>-N 负荷的贡献率为未收集点源 > 尾水负荷 > 农业用地 > 农村生活 > 畜禽养殖 > 城市径流;不同污染源对 TP 负荷的贡献率为未收集的点源 > 尾水负荷 > 农业用地 > 农村生活 > 畜禽养殖 > 城市径流。未收集点源污染是御河最主要的污染源,其对 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 污染负荷贡献率分别达到了 46%、80%和 49%,其次为尾水负荷。

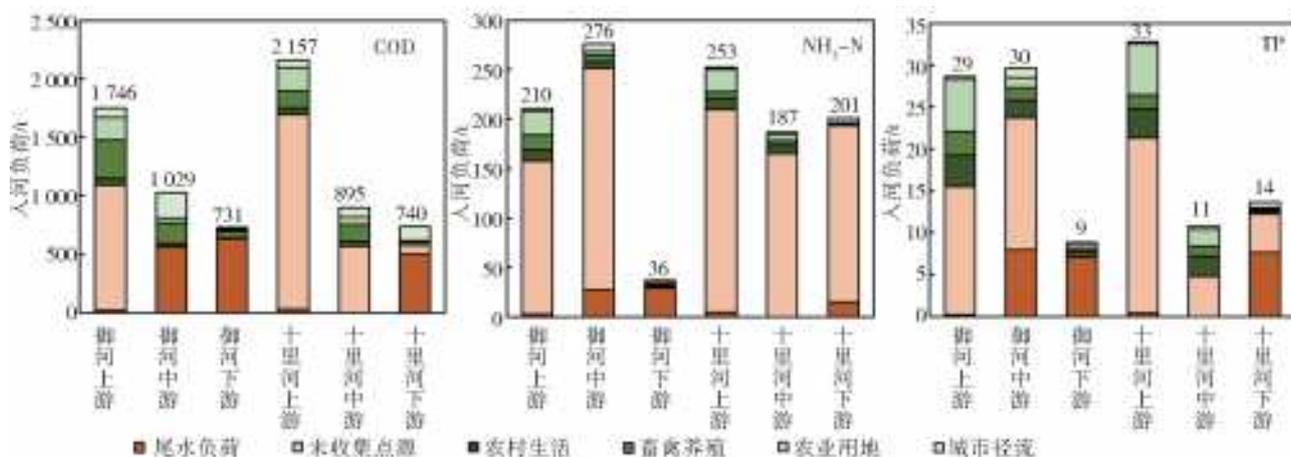


图 7 不同控制单元各污染源入河情况

Fig. 7 Amount of pollutants from different control units and different sources

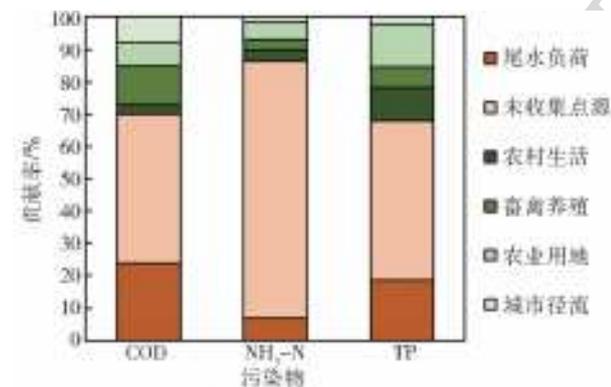


图 8 2016 年御河流域各污染源入河贡献率

Fig. 8 Contribution ratios of different pollution sources in the Yu River basin in 2016

从不同控制单元污染负荷分析,御河和十里河污染物入河量总体呈现上游大,下游小的趋势,御河下游污染物入河量最小。

污染物主要来源于十里河上游和御河上游。主要原因是未收集点源是流域内主要污染源,而御河和十里河上游污水收集率低,大部分污水未经处理直接排放到环境中。御河和十里河下游污水收集率较高,御河下游地区工业和城镇污水均经过污水处理厂处理后排入河道,因此其污染物主要来源于污水处理厂的尾水负荷。虽然河流下游污染物入河量较小,但由于大量尾水负荷以及沿途接纳上游污水,

下游水质仍然劣于中上游水质。

御河中游和十里河下游控制单元面积小,但 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 污染物入河量大。结合水质评价结果,御河中游小南头断面 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 污染物单项水质标识指数分别达到 12.78 和 10.76,十里河下游红卫桥断面 NH<sub>3</sub>-N 污染物水质标识指数达到 11.67,水质超标现象明显高于其他断面。原因是御河中游和十里河下游流经大同市平城区,人口密度高,经济发达,城镇污水排放量大。御河中游控制单元面积仅占御河流域面积的 12%,但 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 入河量约占流域入河总量的 17%,且 50%以上来源于未收集的点源。十里河下游面积仅占流域面积 3.5%,NH<sub>3</sub>-N 入河量却很大(200.94 t),约 90%来源于未收集的点源。因此,可以推测小南头和红卫桥断面水质严重超标的主要原因是大部分污水没有进入污水处理厂进行处理,直接排入河道。

参考流域实际情况,大同市中心城区已建污水管网长度约为 800 余 km,御河流域平均污水收集率仅 83.68%,现有污水处理设施处理现状见表 5。污水管网建设不尽完善,不能满足各区域污水收集的需求,部分存在雨污混流、排污口未与污水收集管相接驳等现象,污水处理厂效益难以正常

发挥,大量污水混接入雨水管网或是直接排入河道,造成河流污染。

表 5 御河流域现有污水处理设施处理现状

Tab. 5 Current status of sewage treatment facilities in the Yu River basin

控制单元	污水排放量/万 t	污水处理量/万 t	污水收集率/%
御河上游	176.81	72.20	40.84
御河中游	2 521.91	2 483.60	98.48
御河下游	1 590.00	1 507.43	94.81
十里河上游	452.86	126.57	27.95
十里河中游	1 074.39	619.04	57.62
十里河下游	1 256.05	1 108.89	88.28
合计	7 072.02	5 917.73	83.68

### 3.3 点源非点源污染入河负荷贡献率

2016年御河流域点源非点源入河贡献率见表6。从总体来看,点源污染是流域内的主要污染源,2016年COD、NH<sub>3</sub>-N和TP污染负荷分别有70.04%、86.45%和68.00%来源于点源污染。流

表 6 2016年御河流域点源非点源入河贡献率

Tab. 6 Contribution ratios of point and nonpoint pollution sources in the Yu River basin in 2016

单位:%

控制单元名称	COD		NH <sub>3</sub> -N		TP	
	点源	非点源	点源	非点源	点源	非点源
御河上游	62.32	37.68	74.64	25.35	54.16	45.84
御河中游	54.15	45.85	90.83	9.17	80.01	19.99
御河下游	86.74	13.26	81.08	18.92	80.66	19.34
十里河上游	78.39	21.61	82.89	17.11	64.73	35.27
十里河中游	63.42	36.58	88.39	11.61	44.04	55.96
十里河下游	77.52	22.48	96.43	3.57	89.65	10.35
合计	70.04	29.96	86.45	13.55	68.00	32.00

## 4 结论

(1)2016年御河流域COD、NH<sub>3</sub>-N和TP污染物排放量分别为36 723.35 t,4 497.62 t和590.25 t,50%以上来源于点源。点源污染中有90%以上的排放量来源于城镇生活污染,非点源污染中60%~80%来源于农业用地和畜禽养殖。

(2)流域内COD、NH<sub>3</sub>-N、TP入河量分别为7 299.52 t/a,1 163.56 t/a和124.46 t/a,其中分别有70.04%、86.45%和68.00%来源于点源污染。

(3)不同污染源产生的污染物负荷有所差异。总体来说,未收集的点源污染是流域内最主要的污染源,其产生的污染物负荷量占流域COD、NH<sub>3</sub>-N和TP入河负荷的46%、80%和49%。为了改善御河水质,应加快完善配套管网建设,提高污水收集率。

域内城镇居民生活污水排放量大,现有污水设施并不能满足流域内居民污水的处理需求,许多生活污水没有进入污水处理设施直接排入河道。虽然流域内非点源污染排放量也很大,但因为其入河系数小,大部分污染物没有进入河流,入河量小。

相较于NH<sub>3</sub>-N,非点源污染对COD和TP的影响更大。御河上游非点源污染COD、TP负荷分别占37.68%和45.84%,御河中游非点源污染COD负荷达到45.85%,十里河中游非点源TP负荷占55.96%,已超过点源污染负荷。主要原因是御河上游位于大同市新荣区,城镇化率低,农村人口、畜禽养殖和农业种植量大,其产生的农业非点源污染相对较大,由于御河流域以中、轻度水土侵蚀为主,洪水期洪水来势迅猛,挟沙能力强<sup>[6]</sup>,污染物容易被洪水携带进入河道。另外,随着大同市城镇化发展,流域不透水面积增加,在城镇化发展水平较高的平城区涉及的控制单元(御河中游和十里河下游),产生的城市径流污染也达到较高水平。

(4)从入河污染负荷空间分布看,污染物主要来源于十里河上游和御河上游。御河中游和十里河下游控制单元虽然面积占比小,但由于城镇化率高,污水排放量大,NH<sub>3</sub>-N和TP污染物入河量大。

### 参考文献(References):

- [1] NIRAULA R, KALIN L, SRIVASTAVA P, et al. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF[J]. Ecological Modelling, 2013, 268: 123-133. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.08.007.
- [2] MOCKLER E M, DEAKIN J, ARCHBOLD M, et al. Sources of nitrogen and phosphorus emissions to Irish rivers and coastal waters: Estimates from a nutrient load apportionment framework[J]. Science of The Total Environment, 2017, 601-602: 326-339. DOI: 10.

- 1016/j. scitotenv. 2017. 05. 186.
- [3] 张睿昊,朱龙基,王佰梅. 柳河流域特征污染物负荷模拟及污染源解析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4):120-127. (ZHANG R H, ZHU L J, WANG B M. Simulation of characteristic pollutant load and analysis of pollution source in Liuhe River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 120-127. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0105.
- [4] JOHNESE 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 modelling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3):323-349. DOI:10. 1016/0022-1694(95)02951-6
- [5] LIU X, LI D L, ZHANG H B, et al. Research on nonpoint source pollution assessment method in data sparse regions: A case study of Xichong River Basin, China [J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 1-10. DOI: 10. 1155/2015/519671.
- [6] 王飞. 大同市御河河道治理工程洪水计算分析[J]. 水科学与工程技术, 2017(4):26-29. (WANG F. Analysis of flood calculation of river course treatment project in Datong Yuhe River [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2017(4): 26-29. (in Chinese)) DOI: 10. 19733/j. cnki. 1672-9900. 2017. 04. 010.
- [7] 邸国平. 大同御河城区段河道治理工程动床模型试验研究[J]. 科技情报开发与经济, 2010(15):143-145. (DI G P. Experimental studies on mobile bed model for river training works of Yuhe River's urban reach in Datong city [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010(15): 143-145. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-6033. 2010. 15. 071.
- [8] 孙娟绒. 御河流域山西段生态修复与保护对策[J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版), 2016(5):20-23. (SUN J R. Ecological restoration and protection measures of Yuhe basin in Shanxi province [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Social Science Edition), 2016(5): 20-23. (in Chinese)) DOI: 10. 13790/j. cnki. issn1008-4444. 20160909. 001.
- [9] 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, 2002. (ZHUANG Y T. Non-point source TN load research in Weihe Basin above Lintong section [D]. Xi'an; Xi'an University of Technology, 2002. (in Chinese))
- [10] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册[EB/OL]. <http://www. inepb. gov. cn/hbj/web/html>, 2008-03. (Office of The Leading Group of The First National Pollution Source Census of The State Council. Handbook for the first national pollution source census on urban domestic source production and discharge coefficient [EB/OL]. <https://wenku. baidu. com/view/037e4723f01dc281e43af01f. html>, 2008-03. (in Chinese))
- [11] 孙静,宋兵魁,王子林,等. 北方缺水城市城镇居民生活排污系数调查研究:以天津市为例[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(1):112-117. (SUN J, SONG B K, WANG Z L, et al. Research on pollution discharge coefficient of urban residents in northern water shortage city: a case study of Tianjin [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(1): 112-117. (in Chinese)) DOI: 10. 15985/j. cnki. 1001-3865. 2018. 01. 023.
- [12] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册[EB/OL]. <https://wenku. baidu. com/view/9f82b6740342a8956bec0975f46527d3250ca66c. html>, 2009-02. (Office of The Leading Group of The First National Pollution Source Census of The State Council. Handbook for the first national pollution source census on livestock and poultry breeding industry source production and discharge coefficient [EB/OL]. <https://wenku. baidu. com/view/9f82b6740342a8956bec0975f46527d3250ca66c. html>, 2009-02. (in Chinese))
- [13] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[EB/OL]. <https://wenku. baidu. com/view/b601b07b27284b73f242502a. html>, 2003-09. (The Chinese Academy for Environmental Planning. The technical guidelines of national water environmental capacity [EB/OL]. <https://wenku. baidu. com/view/b601b07b27284b73f242502a. html>, 2003-09. (in Chinese))
- [14] 项翠云. 海河中游非点源污染研究[D]. 天津: 天津大学, 2017. (XIANG C Y. Study on nonpoint source pollution of the middle area of the Haihe River [D]. Tianjin; Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [15] 张彩玲,刘增进,张关超. 基于输出系数法的河南省农业非点源氨氮负荷研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(10):35-39. (ZHANG C L, LIU Z J, ZHANG G C. A study of the agricultural non-point sources of ammonia nitrogen load in Henan Province based on the export coefficient method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(10): 35-39. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZNSD. 0. 2017-10-008.
- [16] 杜娟,李怀恩,李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西沔河流域非点源负荷来源探讨[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4):827-837. (DU J, LI H E, LI J K. Analysis on export coefficient based on measured

- data and study on the source of non-point load for Fenghe River watershed in Shaanxi Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 827-837. (in Chinese) DOI: 10. 11654/jaes. 2013. 04. 025.
- [17] WU L, LI P C, MA X Y. Estimating nonpoint source pollution load using four modified export coefficient models in a large easily eroded watershed of the loess hilly-gully region, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(13): 1056. DOI: 10. 1007/s12665-016-5857-1
- [18] 刘永锋. 流溪河流域非点源污染负荷变化分析[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2012, 12(3): 54-55. (LIU Y F. Assessment of non-point source pollution in Liuxi River watershed [J]. *Journal of Langfang Teachers College (Natural Science Edition)*, 2012, 12(3): 54-55. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-3229-B. 2012. 03. 018.
- [19] 张倩, 苏保林, 罗运祥, 等. 城市水环境控制单元污染物入河量估算方法[J]. 环境科学学报, 2013(3): 877-884. (ZHANG Q, SU B L, LUO Y X, et al. Estimation of pollutant loads into the water environmental control units in urban areas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013(3): 877-884. (in Chinese) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2013. 03. 032.
- [20] 乔飞, 孟伟, 郑丙辉, 等. 长江流域污染负荷核算及来源分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 80-87. (QIAO F, MENG W, ZHENG B H, et al. Pollutant accounting and source analyses in the Yangtze River basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(1): 80-87. (in Chinese) DOI: 10. 13198/j. res. 2013. 01. 84. qiaof. 013.
- [21] 路广英, 刘慧敏. 专项规划阶段的年径流总量控制率指标分解研究: 以大同市中心城区为例[J]. 建设科技, 2018(1): 48-50. (LU G Y, LIU H M. Study on Decomposition of indicators of annual total runoff control rate in special planning stage: a case study of Datong central district [J]. *Construction Science and Technology*, 2018(1): 48-50. (in Chinese) DOI: 10. 16116/j. cnki. jskj. 2018. 01. 013.
- [22] 张培培, 王晓燕, 吴亦帆, 等. 北京市北运河 COD 降解系数影响因素试验研究[A]. 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(2017)[C]. 厦门, 2017. (ZHANG P P, WANG X Y, WU Y F, et al. Experimental study on the influencing factors of COD degradation coefficient of Beijing North Canal [A]. *Papers Collection of the Annual Conference on Science and Technology of Chinese Society for Environmental Sciences(2017)*[C]. Xiamen, 2017. (in Chinese))
- [23] 穆小玲, 席献军, 朱洪生, 等. 郑州市贾鲁河水环境容量及污染调控研究[J]. 人民黄河, 2018(9): 78-82. (MU X L, XI X J, ZHU H S, et al. Research on water environmental capacity and containments control in Jialu River of Zhengzhou City [J]. *Yellow River*, 2018(9): 78-82. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2018. 09. 018.
- [24] 李夏, 王刚, 齐珺, 等. 考虑水温变化的变降解系数在北京市北运河水质模拟中的应用[J]. 中国环境监测, 2016, 32(5): 67-72. (LI X, WANG G, QI J, et al. The application of variable degradation coefficient considering water temperature variation in water quality simulation taking Beijing North Canal River as an example [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(5): 67-72. (in Chinese) DOI: 10. 19316/j. issn. 1002-6002. 2016. 05. 13.
- [25] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011. (ZHU M. Study on agricultural NPS loads of Haihe basin and assessment on its environmental impact [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2011. (in Chinese))