

张芮,汪林,贾玲,等. 区域污染负荷特征与控制分析: 以宁夏沿黄经济带为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(3): 83-93.

ZHANG Rui, WANG Lin, JIA Ling, et al. Analysis on regional pollution load characteristics and control: A case of Ningxia Economic Belt Along Yellow River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(3): 83-93.

# 区域污染负荷特征与控制分析: 以宁夏沿黄经济带为例

张芮,汪林,贾玲,杨贵羽

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 2017年以来宁夏13条主要入黄排水沟水质基本为劣V类,迫切需要推进宁夏沿黄经济带污染防治,保障沿黄城市群高质量绿色发展乃至黄河流域生态安全。针对宁夏沿黄经济带现状污染分析中未考虑污染物入河过程中的减少和点面源污染总体分析不足的问题,以TN、TP、COD、氨氮为污染负荷指标,采用统计数据 and 考虑入河系数的输出系数法,分析区域污染负荷特征,诊断主要污染源,计算分析点面源污染物排放量和入河量,进行污染物入河量控制分析,提出污染防治的重点和策略。研究表明:2017年研究区TN、TP、COD、氨氮排放量分别为2.23万t、0.15万t、6.16万t、1.00万t,入河量分别为1.03万t、0.03万t、3.31万t、0.44万t,城镇生活污水、农田化肥污染、工业污染物入河量分别占入河总量的55.9%、26.6%和14.7%。污染防治主要策略是城镇污水处理厂出水水质提标至准IV类,可削减污染物至现状的60.8%;农田亩均化肥折纯量控制在15kg以下,可削减污染物入河量至现状的32%;宁东能源化工基地和工业园区实行近零排放。研究结果为宁夏沿黄经济带生态保护和污染防治治理提供技术支持。

**关键词:** 水污染防治; 入河量; 输出系数法; 面源污染; 点源污染; 宁夏沿黄经济带; 水质; 人类活动

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.03.010

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)03-0083-11



## Analysis on regional pollution load characteristics and control:

### A case of Ningxia Economic Belt Along Yellow River

ZHANG Rui, WANG Lin, JIA Ling, YANG Guiyu

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Since 2017, the water qualities of 13 main drainage ditches flowing into the Yellow River in Ningxia basically belong to inferior water quality of the class V, thus the pollution prevention and control of Ningxia Economic Belt along the Yellow River are urgent to be pushed forward for guaranteeing the high-quality green development of the city group along the Yellow River as

收稿日期: 2020-11-03

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC0408101); 中国工程科技发展宁夏战略研究院重大咨询研究项目(2018ZLZX0008)

作者简介: 张芮(1996—),女,硕士研究生,主要从事水文与水资源研究。E-mail: zhangrui1085@qq.com

通信作者: 汪林(1962—),女,正高级工程师,硕士,主要从事水资源综合利用与调控、环境水文地质等研究。E-mail: wanglin@iwhr.com

well as the ecological safety of the Yellow River Basin. Aiming at the problem that both the reduction of pollutant during the process of flowing into the river and the insufficient overall analysis on the point and non-point source pollutions are not considered in the analysis of the current pollution of Ningxia Economic Belt along the Yellow River, the regional pollution load characteristics is analyzed herein by means of the relevant statistical data and the river load ratio-considered export coefficient method through taking total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) as the pollution load indexes, and then the main pollution sources are diagnosed, the discharging amounts of the point and non-point source pollutants and their inflowing amounts into the river are analyzed and calculated, while the analysis on the control of the inflowing amount of pollutant into the river is carried out, from which the key point and strategy for the pollution prevention and control are put forward as well. The study shows that in 2017, the discharging amounts of TN, TP, COD and  $\text{NH}_3\text{-N}$  within the study area are 22 310.2 tons, 1 455.9 tons, 61 601.5 tons, and 10 022.1 tons with the inflowing amounts into the river of about 10 300.0 tons, 300.0 tons, 33, 100.0 tons, and 4 400.0 tons respectively, while the inflowing amounts of urban domestic sewage, farmland fertilizer pollution, industrial pollutants into the river account for 55.9%, 26.6% and 14.7% of the total. The main strategy of pollution prevention and control is to upgrade the effluent quality of urban sewage treatment plant to the quasi-class IV for reducing the amounts of pollutants to 60.8% of the current ones, control the net amount of fertilizer per mu below 15 kg for reducing the inflowing amount of the pollutant to 32% of the current one and implement the near-zero emissions of pollutants within Ningdong Energy and Chemical Industrial Base and Industrial Park. The study results can provide the relevant technical supports for the ecological protection and pollution control of Ningxia Economic Belt along the Yellow River.

**Keywords:** water pollution prevention; inflowing amount into river; export coefficient method; non-point source pollution; point source pollution; Ningxia Economic Belt along Yellow River; water quality; human activity

## 0 引言

2019年黄河流域生态环境保护已上升为国家战略,控制和减少污染物入黄量是沿黄两岸政府义不容辞的责任。近年来宁夏全面实施水体环境污染防治,2017年以来黄河宁夏段4个国控监测断面水质保持在Ⅱ类,但13条主要入黄排水沟水质监测断面76.9%为劣Ⅴ类,主要超标污染物为总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )等<sup>[1]</sup>。排水沟既是农田灌溉排水的通道,也是企业生产废水、居民生活污水等点源污染物迁移的主要途径。厘清污染物来源及入河量、辨识关键致污因子是制定污染防控战略的基础,对宁夏引黄经济带污染防治、改善区域水环境质量、维护黄河流域生境有重要作用。前人针对研究区污染问题开展了多项研究,张爱平等<sup>[2]</sup>利用改进的输出系数法估算2009年宁夏灌区农业TN、TP污染负荷;邱小琮<sup>[3]</sup>基于宁夏第一次污染源报告研究宁夏农业面源污染物COD、TN、TP负荷量,运用等标污染负荷法、主成分分析法和灰关联法分析农业面源污染的主要影响因子;杨丽慧等<sup>[4]</sup>基于水文统计分析方法分析银新沟、第五排水沟灌溉期氨氮和总磷演变及污染负荷年际变化;邱晨<sup>[5]</sup>以青铜峡第一排水沟干沟和一支沟为例,监测排水沟水质,分析农业面源污染物排放特征,利用输出系数模型分析排水沟氮磷污染物量值结构;魏艳芳<sup>[6]</sup>以青

铜峡灌区为例,构建典型污染物迁移模型,运用MIKE11AD水质模型对青铜峡灌区典型排水沟农业面源污染物进行模拟计算,分析COD、氨氮、TP对排水沟的贡献率。以上研究主要关注区域或典型灌区排水沟的农业面源污染,且污染物指标集中在TN、TP,缺乏对宁夏沿黄经济带点面源污染整体性研究和深入分析,主要污染来源不明确,因此系统分析计算宁夏沿黄经济带点面源入河量和明确主要污染来源对区域污染防治具有重要意义。

面源污染具有随机性、难监测的特点,导致其负荷计算较点源困难。国内外针对面源污染负荷研发了一系列模型,主要有输出系数模型、经验统计模型、机理模型<sup>[7-9]</sup>。机理模型应用较多的有ANNAGNPS模型、SWAT模型、HSPF模型等,这些模型模拟流域尺度营养物质输移转化过程,对数据资料要求高,变量多,参数较难率定。经验统计模型基于长系列的水文水质数据建立降雨、径流量和污染负荷之间的经验公式来计算污染负荷。输出系数模型通过测算计算单元的污染物产生量估算流域或行政区的污染量,对实测数据要求较低且数据获取容易,在国内应用广泛,尤其是对监测数据缺乏或零散的地区。宁夏缺乏长期连续的监测资料,资料收集困难,故本文选择输出系数法计算面源污染。

本文以宁夏沿黄经济带为靶区,结合当地水环境污染情况选取TN、TP、COD、氨氮四项主要污染物

指标, 基于统计资料和文献分析, 采用输出系数法, 引入反映污染物削减过程的入河系数, 计算点面源污染物排放量和入河量, 重点分析四项污染物指标入河量及地区分布特征、对入(黄)河量的贡献, 辨识主要污染源, 在此基础上提出针对性主要污染防治对策, 以期为宁夏沿黄经济带生态保护和污染防控治理提供技术支撑。

## 1 研究区域概况

宁夏引黄经济带位于黄河干流下河沿、石嘴山两水文站之间带状分布地区, 涉及银川市、石嘴山市、利通区、青铜峡市、沙坡头区、中宁县等 11 个县市, 宁夏引黄灌区是我国农业“七区二十三带”的组成部分, 宁夏沿黄城市群发展和宁东能源化工基地建设是国家西部大开发和能源安全战略的重要组成部分。地处中温带干旱区, 属大陆性气候, 年均蒸发量 1 100~1 600 mm, 年均降水量 180~200 mm, 7—9 月的雨量占全年雨量的 60%~70%。研究区范围如图 1 所示。

借助黄河水资源的优势, 宁夏沿黄经济带人口分布密度大、新型工业发达, 是宁夏经济社会发展的黄金地段和核心区域。据《宁夏统计年鉴》, 2014—2017 年宁夏沿黄经济带人口由 432.6 万人增加到 449.9 万人, 城镇化率由 66% 达到 69.4%, 生活污染物排放量不断增加, COD 排放量由 1.2 万 t 增加到 2.9 万 t, 增加了 2.4 倍。2017 年亩均耕地施肥量(折纯)达到 47.1 kg, 远高于全区 21.4 kg 和全国 29 kg 的施肥水平。2017 年 13 条主要入黄排水沟水质基本为劣 V 类<sup>[10]</sup>, 迫切需要推进沿黄生态廊道污染防控, 保障沿黄城市群高质量绿色发展, 保障黄河流域生态安全。

## 2 研究方法

### 2.1 考虑入河系数的输出系数法

受土地利用、地形等多种因素影响, 污染物从排放到入河过程中减少, 只有部分进入水体。2017 年度点源污染包括工业和城镇生活污染, 通过《宁夏统



图 1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

计年鉴 2018》<sup>[11]</sup> 和 2017 年《宁夏环境统计年报》<sup>[12]</sup> 得到。面源污染主要包括种植业、养殖业和农村生活污染, 因排放分散、随机性大、隐蔽性强, 不易监测, 需通过分析估算得到。

本文采用输出系数法估算农业面源污染排放量和入河量。20 世纪 70 年代初期, 美国、加拿大在研究土地利用-营养负荷-湖泊营养化的关系中提出了输出系数模型<sup>[13]</sup>。之后经过长期的研究、实践和完善<sup>[14-15]</sup>, 现在应用广泛的是 Johnes 开发的输出系数模型<sup>[16]</sup>, 通过土地利用状况等统计资料建立土地利用与接纳水体面源污染负荷关系, 适用于基础数据相对缺乏的地区。传统输出系数法计算的是非点源污染的产生量, 本文在考虑迁移损失后进一步计算了排入水体的污染量, 污染物模型方程如下

$$L = \gamma \left( \sum_{i=1}^n E_i A_i + p \right) \quad (1)$$

式中,  $L$  为流域内各污染源输出的面源污染物总量

(kg);  $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型的面积或第  $i$  类畜禽数量、人口数量;  $E_i$  是第  $i$  类污染源的输出系数;  $\gamma$  为入河系数, 用来表征污染物入河迁移损失;  $p$  为降雨输入的污染物数量。由于研究区干旱少雨(降水量小于 200 mm), 加上地势平坦, 降雨量绝大部分消耗于蒸腾蒸发, 因此本文忽略了因降雨产生的输入型污染量  $p$ 。

## 2.2 参数选取与数据来源

### 2.2.1 输出系数

分析各项污染源输出系数的常用方法有查阅文献值、野外监测和数学统计, 因水质监测成本较高、研究成果较少, 本文采用文献法, 结合宁夏灌区实际情况确定输出系数。

农田种植污染的输出系数指农用地因化肥农药施用产生的单位面积污染量。研究区农用地主要为耕地和草地, 污染主要来源于耕地。在已有研究中, 杨淑静等<sup>[17]</sup>通过田间小区实验得到耕地 TN、TP 输出系数, 但未考虑污染物在区域迁移过程中的损失; 黄仲冬等<sup>[18]</sup>通过宁夏灌区排水沟水质监测, 计算出耕地

TN、TP 输出系数, 反映的是污染物经迁移之后的综合结果, 准确度较高, 但研究范围小; 李强坤等<sup>[19]</sup>研究了青铜峡灌区第一排水沟水田和旱田 TN、TP 输出系数, 结果表明输出系数水田明显高于旱田, 故本文耕地 TN、TP 输出系数采用宁夏地区耕地输出系数实验平均值。考虑到 COD、氨氮输出系数在宁夏地区研究较少, 故取相近环境下不同地区输出系数的平均值, 结果如表 1 所列。

畜禽养殖输出系数根据个体日产粪(尿)量、畜禽粪(尿)中污染物含量、饲养期、流失系数估算。畜禽粪尿排泄量与动物种类、品种、生长期、饲养等因素有关, 本文参考杨世琦<sup>[29]</sup>和许风冉<sup>[30]</sup>研究成果, 确定各类畜禽日平均粪尿排泄量、粪尿污染物含量。牛、羊、猪、家禽的饲养期分别为 365 d、365 d、150 d 和 210 d, 牛、羊的饲养量为年末存栏数, 猪、家禽的饲养量为出栏数。考虑到研究区干旱少雨、蒸发量大, 畜禽粪尿流失率分别按 3%、40% 估算<sup>[31]</sup>。各类畜禽污染物输出系数如表 2 所列。

表 1 不同研究区农业用地输出系数值

Table 1 Export coefficient values of agricultural land in different study areas

参考文献	研究区域	TN	TP	COD	氨 氮	备 注
张爱平 <sup>[20]</sup>	吴忠国家农业科技园区	12.84	0.17			水 田
杨淑静等 <sup>[17]</sup>	宁夏北部沿黄灌区	19.05	0.75			耕 地
张学军等 <sup>[21]</sup>	银川市灵武良种繁育场	15	6.8			水 田
黄仲冬等 <sup>[18]</sup>	西排水沟	17.8	0.08			耕 地
李强坤 <sup>[19]</sup>	青铜峡灌区第一排水沟	48.82	1.77		6.84	水 田
		7.63	0.05		0.33	旱 田
刘增进等 <sup>[22]</sup>	河南省	27.74	1.92			耕 地
谭铭欣等 <sup>[23]</sup>	山西省御河流域		0.9	22.8	5.21	耕 地
杨维等 <sup>[24]</sup>	辽宁省盘锦市双台子河流域			20	1.67	水 田
				18	1.88	旱 田
彭兆弟等 <sup>[25]</sup>	太湖流域	18.32	2.56			耕 地
杨晓东 <sup>[26]</sup>	安徽省阜阳市			19.8		耕 地
黄永刚等 <sup>[27]</sup>	辽河干流铁岭段			15	2.19	水 田
				18	2.19	旱 田
李泽琪等 <sup>[28]</sup>	铁岭凡河流域				2.19	水 田
					2.19	旱 田
本研究取值		18.1	0.43	22.6	2.8	耕 地

表 2 畜禽养殖输出系数

Table 2 Livestock breeding export coefficient

项 目	日产粪(尿)量/ kg·头 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	畜禽粪便污染物含量/kg·t <sup>-1</sup>				污染物输出系数/kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>				
		TN	TP	COD	氨 氮	TN	TP	COD	氨 氮	
牛	粪	20.00	4.37	1.18	31.00	1.71				
	尿	10.00	8.00	0.40	6.00	3.47	12.64	0.84	15.55	5.44
猪	粪	3.50	5.88	3.41	52.00	3.08				
	尿	3.50	3.30	0.52	9.00	5.00	0.79	0.16	2.71	1.10
羊	粪	2.60	10.10	4.90	4.63	0.80				
	尿	0.40	6.00	0.50	4.63	0.80	0.64	0.17	0.40	0.07
家禽	粪	0.125	10.40	5.80	45.70	2.80	0.008	0.005	0.036	0.002

表3 农村生活污水输出系数

Table 3 Rural domestic sewage output coefficient

行政区	人均用水定额 /L·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	产污系数	污染物排放浓度/mg·L <sup>-1</sup>				输出系数/kg·人 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>			
			COD	氨 氮	TN	TP	COD	氨 氮	TN	TP
银川市	60	60%	350	60	70	15	4.60	0.79	0.92	0.20
石嘴山、吴忠市、 中卫市	55	60%	350	60	70	15	4.22	0.72	0.84	0.18

农村生活污染物输出系数根据人均用水定额、产污系数、污染物排放浓度、流失系数估算。参考宁夏农村生活污水处理技术规范<sup>[32]</sup>, 宁夏沿黄灌溉农业区污水排放系数为40%~80%, 考虑研究区农村基本用水和卫生设施情况, 产污系数取60%。农村生活污水大部分直接排入环境中, 生活污水流失率接近100%<sup>[2]</sup>。农村生活污水污染物输出系数如表3所列。

### 2.2.2 入河系数

入河系数为入河量与流失量之比。目前, 国内只有少部分研究应用输出系数模型时考虑了入河系数<sup>[33-37]</sup>。

本次点源污染入河系数根据污水排放口到入河排污口的距离确定, 具体取值参考《全国水环境容量核定技术指南》<sup>[38]</sup>:  $L \leq 1$  km 取 1.0;  $1 \text{ km} < L \leq 10$  km 取 0.9;  $10 \text{ km} < L \leq 20$  km 取 0.8;  $20 \text{ km} < L \leq 40$  km 取 0.7;  $L > 40$  km 取 0.6。研究区13条主要入黄排水沟长度绝大部分在20 km以上, 点源污染入河系数取0.7。

面源污染物迁移路径经过农、斗、支、干排水系统, 更为复杂。现有的农田输出系数研究成果主要通过TN、TP输入输出计算得到。李强坤<sup>[19]</sup>以青铜峡灌区第一排水沟排水系统为典型, 通过监测试验, 应用污染物在排水沟渠中的输移模型推算出青铜峡灌区面源污染物从田间产生到排入外界水体的比例, TN、TP、氨氮的排污系数分别为0.63、0.65、0.69。本文借鉴李强坤的研究成果, 农田污染物入河系数取0.66。

农村生活和畜禽养殖污染分散, 受地形地貌、水文、土壤、排放方式等影响, 入河系数差异较大。辛志伟<sup>[39]</sup>通过在蓟县于桥水库监测降雨径流, 得出农村生活源污染物入河系数为0.09~0.15; 乔飞等<sup>[36]</sup>利用面源入河系数与降雨量之间的关系建立公式, 估算出长江干流寸滩断面以上区域的面源入河系数为0~0.1; 苏保林等<sup>[40]</sup>对赣江下游平原圩区农村生活污染入河过程进行问卷调查, 统计分析出污染物入河系数, COD为9.6%~11.9%, TN为14.1%~14.3%, TP为12.9%~13.7%; 任宪韶<sup>[41]</sup>得出海河流域的农

村生活源入河系数为0.15, 畜禽养殖源为0.007。黄河流域水资源保护局对黄河流域非点源污染调查表明农村生活和分散畜禽养殖的入河系数为0~10%, 结合相关文献成果, 本文畜禽养殖源和农村生活源污染物入河系数取平均值5%。

### 2.2.3 其他参数

研究区2017年土地利用数据、农村人口引自2018年宁夏统计年鉴, 散养畜禽数根据2018年宁夏统计年鉴、2018年经济要情手册以及2017年宁夏环境统计年报中的大型畜禽养殖场调查数据估算得到, 具体数据如表4所列。

表4 研究区农村人口、畜禽养殖及耕地面积

Table 4 Rural population, livestock and poultry breeding and cultivated land area in the study area

县(市)区	农村人口 /万人	畜禽养殖/万只				耕地/ hm <sup>2</sup>
		牛	羊	猪	家 禽	
银川市	16.10	3.25	9.44	5.75	64.30	39 039
永宁县	10.72	1.14	9.24	2.22	78.11	34 740
贺兰县	11.51	2.25	9.00	2.95	70.22	43 286
灵武市	12.66	1.39	42.71	11.14	78.68	23 951
大武口区	3.06	0.21	1.30	0.61	23.52	5 370
惠农区	3.31	1.70	25.31	1.14	64.08	22 199
平罗县	13.51	2.74	29.00	4.69	120.28	62 739
利通区	14.94	11.29	22.49	3.86	73.21	30 217
青铜峡市	14.71	4.75	16.70	11.59	68.13	38 723
沙坡头区	18.20	3.88	24.74	15.59	134.59	72 982
中宁县	19.00	3.23	24.97	16.01	40.84	67 283
总 计	13.77	35.83	214.9	75.54	815.95	440 529

## 3 主要结果

### 3.1 污染物排放量

采用输出系数法估算, 2017年研究区污染物TN、TP、COD、氨氮排放量分别为2.23万t、0.15万t、6.16万t、1.00万t, 其中面源污染分别约占70.5%、87.3%、40.1%、52%, 如表5所列。在农业面源污染中, 农业用地、畜禽养殖、农村生活污染物排放量分别占总排放量20.3%、20.0%、8.9%, TN、COD污染物排放量以农田化肥施用贡献为主, TP、氨氮排放量以畜禽养殖贡献为主。城镇生活污

表 5 2017 年研究区污染物排放量  
Table 5 Pollutant emissions in the study area in 2017

污染源		排放量/t					贡献率/%				
		TN	TP	COD	氨 氮	合 计	TN	TP	COD	氨 氮	合 计
面 源	农业用地	7 973.6	189.4	9 956.0	1 233.5	19 352.4	35.7	13.0	16.2	12.3	20.3
	畜禽养殖	6 559.1	824.7	8 775.6	2 946.6	19 105.9	29.4	56.6	14.2	29.4	20.0
	农村生活	1 200.2	257.2	6 000.8	1 028.7	8 486.9	5.4	17.7	9.7	10.3	8.9
	小 计	15 732.8	1 271.3	24 732.3	5 208.7	46 945.2	70.5	87.3	40.1	52.0	49.2
点 源	工 业	1 454.7	6.6	7 774.4	852.5	10 088.1	6.5	0.5	12.6	8.5	10.6
	城镇生活	5 122.8	178.0	29 094.8	3 960.9	38 356.4	23.0	12.2	47.2	39.5	40.2
	小 计	6 577.4	184.6	36 869.2	4 813.3	48 444.5	29.5	12.7	59.9	48.0	50.8
合 计		22 310.2	1 455.9	61 601.5	10 022.1	95 389.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 6 2017 年研究区点源污染物入河量  
Table 6 Point source pollutants entering the river in the study area in 2017

宁夏引黄灌区	工业源				城镇生活源				总 计			
	TN	TP	COD	氨 氮	TN	TP	COD	氨 氮	TN	TP	COD	氨 氮
银川市	48.2	0.7	371.5	28.2	1 351.4	1.0	6 636.8	1 192.5	1 399.7	1.7	7 008.3	1 220.7
永宁县	223.0	1.1	822.1	188.1	143.5	0.1	704.7	126.6	366.5	1.2	1 526.9	314.8
贺兰县	39.2	0.9	262.7	7.7	155.4	0.1	763.4	137.2	194.6	1.0	1 026.1	144.9
灵武市	32.6	1.3	264.0	6.2	124.6	0.1	611.7	109.9	157.1	1.4	875.7	116.1
大武口区	6.0	0.1	79.4	5.7	169.3	2.8	1 143.4	22.8	175.4	3.0	1 222.8	28.5
惠农区	79.8		262.1	66.4	260.8	16.1	1 995.5	210.6	340.6	16.1	2 257.5	276.9
平罗县	84.9	0.1	853.3	62.5	198.0	5.6	1 436.6	138.7	282.9	5.7	2 289.9	201.2
利通区	44.0	0.0	414.8	43.5	200.6	25.8	893.5	135.5	244.6	25.8	1 308.3	179.0
青铜峡市	12.4	0.2	358.5	11.8	148.0	20.7	776.5	108.3	160.3	20.9	1 135.0	120.2
沙坡头区	68.4	0.1	594.5	33.1	447.6	26.2	2 824.3	318.2	516.0	26.4	3 418.8	351.3
中宁县	56.8	0.1	194.9	43.7	283.2	16.6	1 786.8	201.3	340.0	16.7	1 981.7	245.0
宁 东	323.1	0.0	964.2	99.9	103.5	9.3	793.3	70.9	426.5	9.3	1 757.5	170.8
总 计	1 018.3	4.6	5 442.1	596.7	3 585.9	124.6	20 366.4	2 772.6	4 604.2	129.2	25 808.4	3 369.3

表 7 2017 年研究区农业面源污染物入河量  
Table 7 Inflow of agricultural non-point source pollutants in the study area in 2017

宁夏引黄灌区	农业用地				畜禽养殖				农村生活			
	TN	TP	COD	氨 氮	TN	TP	COD	氨 氮	TN	TP	COD	氨 氮
银川市	466.36	11.08	582.31	72.14	26.05	2.78	36.08	12.39	7.40	1.59	37.01	6.34
永宁县	415.00	9.86	518.18	64.20	11.36	1.62	15.15	4.73	4.93	1.06	24.65	4.23
贺兰县	517.09	12.28	645.65	79.99	18.54	2.11	24.57	8.13	5.29	1.13	26.46	4.54
灵武市	286.12	6.80	357.25	44.26	27.10	5.27	35.89	11.47	5.82	1.25	29.10	4.99
大武口区	64.15	1.52	80.10	9.92	2.07	0.30	3.14	0.97	1.29	0.28	6.46	1.11
惠农区	265.19	6.30	331.12	41.02	19.55	3.09	21.03	6.21	1.39	0.30	6.97	1.19
平罗县	749.48	17.81	935.81	115.94	28.88	4.26	35.63	11.16	5.70	1.22	28.48	4.88
利通区	360.97	8.58	450.72	55.84	80.29	7.13	98.80	33.68	6.30	1.35	31.49	5.40
青铜峡市	462.58	10.99	577.59	71.56	40.20	4.51	57.26	19.96	6.20	1.33	31.00	5.31
沙坡头区	871.84	20.71	1 088.60	134.87	39.10	5.30	58.70	20.13	7.67	1.64	38.36	6.58
中宁县	803.76	19.09	1 003.59	124.34	34.81	4.86	52.53	18.49	8.01	1.72	40.07	6.87
合 计	5 262.6	125.00	6 570.90	814.10	327.90	41.20	438.80	147.30	60.00	12.90	300.00	51.40

污染物排放量占总排放量 40.2%，是点源的主要贡献源。

### 3.2 污染物入河量

2017 年点源污染物入河量 TN、TP、COD、氨氮分别为 4 604.2 t、129.2 t、25 808.4 t、3 369.3 t，如表 6 所列；面源污染物入河量分别为 5 650.5 t、

179.1 t、7 309.8 t、1 012.9 t，如表 7 所列。2017 年研究区污染物入河总量 TN 10 254.7 t、TP 308.3 t、COD 33 118.2 t、氨氮 4 382.2 t，对比 2017 年宁夏水文水资源勘测局对主要入黄排水沟污染物入河监测结果<sup>[42]</sup>，入河量 TN、TP、COD、氨氮分别为 6 736.8 t、

403.9 t、45 361.6 t、4 067.8 t, 两者互有大小, 大体相当。

## 4 讨论

### 4.1 污染物入河量特征

结合表 6、表 7 分析, 污染物入河贡献率全区点源占 70.6%、面源占 29.5%, 点源是主要污染源(见图 2)。在点源污染中, 城镇生活污染占 55.9%, 工业污染占 14.7%; 在面源污染中, 农田化肥污染占 26.6%、畜禽养殖污染占 2.0%、农村生活污染占 0.9%。可见, 城镇生活污染、农田化肥污染、工业污染是需要重点控制的对象。

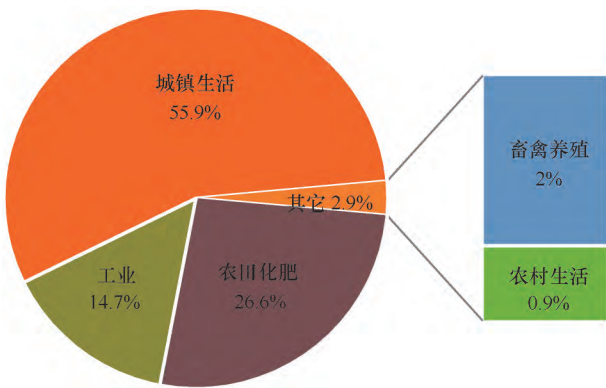


图 2 2017 年研究区污染物入河情况

Fig. 2 Pollutants entering the river in the study area in 2017

从四种污染物入河量分析, 四种污染物中 COD 入河量最大, 其次是 TN、氨氮和 TP(见图 3)。各污染源对入河量的贡献率, TN 是农田化肥>城镇生活>工业>畜禽养殖>农村生活, TP 是农田化肥>城镇生活>畜禽养殖>农村生活>工业, COD 和氨氮均是城镇生活>农田化肥>工业>畜禽养殖>农村生活。综上, TN、TP 入河量主要来自农田化肥施用和城镇生活污水, 两者合计占其入河量的 86.3%和 81.0%; COD、氨氮主要来自城镇生活污水和农田化肥施用, 两者合计占其入河量的 81.3%和 81.8%。因此, 控制农田化肥施用量和提高城镇生活污水排放的水质等级是减少污染物入河量、改善水环境质量的重要途径。

从污染空间分布特征看, 2017 年研究区污染物入河总量为 48 063.4 t, 银川市、沙坡头区污染物入河量最多(见图 4)。银川市经济相对发达, 城镇人口居全区第一, 城镇生活污水排放量大, 污染物入河量 TN 1 899.5 t、COD 7 663.7 t、氨氮 1 311.5 t, 分别占各污染物总量的 18.5%、23.1%、29.9%, 居全区之首, 故城镇生活污水是银川市主要污染源。沙坡头区污染物总量仅次于银川市, 农业发达, 化肥

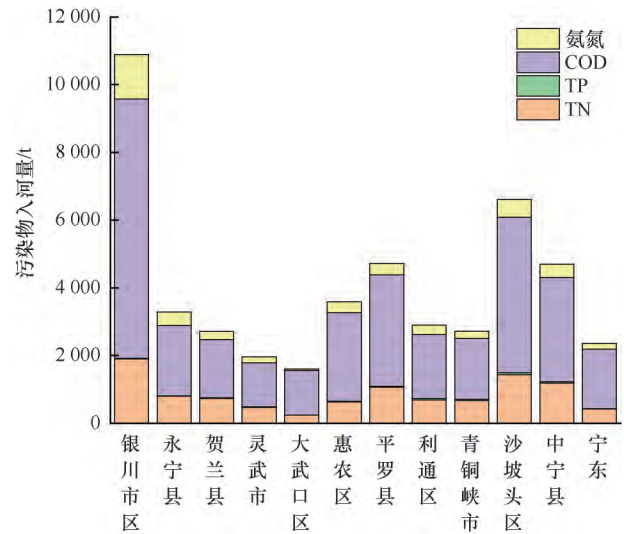


图 3 2017 年研究区污染物入河量

Fig. 3 Pollutants entering the river in the study area in 2017

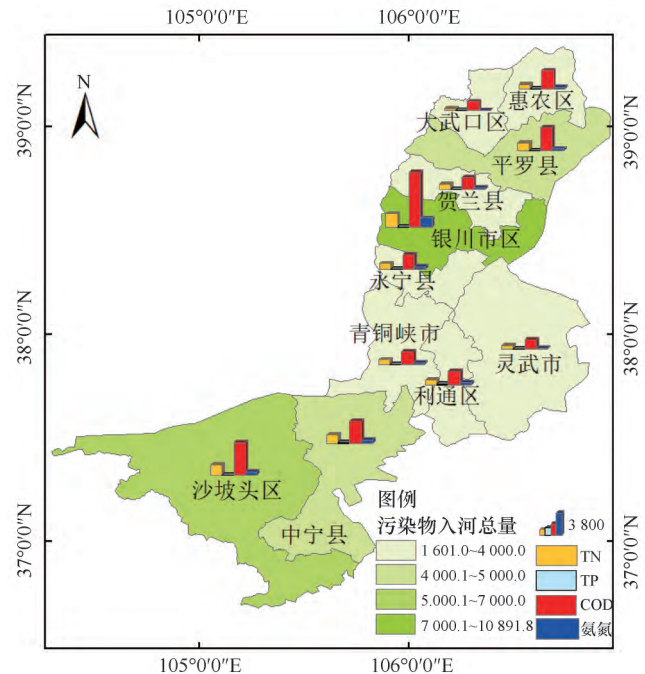


图 4 污染物入河量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of pollutants entering the river

施用量高、畜禽数量多, 面源污染对 TN、TP 入河贡献较高, 点源污染对 COD、氨氮入河贡献大。

### 4.2 污染物入河量控制分析

以上分析结果表明, 城镇生活污染是研究区第一污染源(其中包含了规模化养殖场污染物排放), 占总排放量的一半以上(见图 2)。虽然现有城镇污水处理厂处理量基本达到处理能力的 95%, 但污水处理排放标准是一级 A, 出水水质为劣 V 类, 尚不满足回用于河湖生态的要求, 若将出水水质由一级 A 提高至再

生回用观赏性景观用水标准, 即 TN 由 15 mg/L 减至 10 mg/L, TP 由 1 mg/L 减至 0.3 mg/L, COD 由 50 mg/L 减至 30 mg/L, 氨氮由 5 mg/L 减至 3 mg/L, 污染物入河量可由现状的 26 849.5 t 减至 16 311.4 t 左右, 消减为现状的 61%, 其中银川市区污染物削减最多, 其次是沙坡头区, 说明该地区应着重控制城镇生活污染, 提高出水水质, 各地区削减情况如图 5 (a) 所示。

农田化肥污染是研究区第二污染源。研究区是支撑当地粮食平衡和西部特色农产品的主要产区, 长期处于高投入高产状态。尽管遵照国家 2020 年实现“一控两减三基本”目标(即 2020 年实现农业用水总量控制, 化肥、农药施用量减少, 畜禽粪便、秸秆、农膜基本资源化利用), 近年来化肥、农药增速放缓, 但问题仍然突出。根据中国统计年鉴, 2014~2017 年全自治区耕地亩均化肥施用量(折纯量) 20~21 kg, 低于 2017 年全国平均值 29.0 kg, 但明显高于邻省甘肃省 10.5 kg, 远高于世界平均水平 8 kg, 而宁夏沿黄经济带甚至高达 47.0 kg。伴随着农田灌溉和排水, 大量未被利用的化肥(农药存在相似问题)进入排水沟、湖泊湿地等水体, 加重了局部地区水环境污染。若将亩均化肥施用量由现状 47.0 kg 压减至国际上公认上限 15 kg(相当于 225 kg/hm<sup>2</sup>), 则农田化肥污染量将约下降至现状的 32%; 若减至

2017 年全国平均值 29 kg, 则农田化肥污染量约下降至现状的 62%。平罗县、中宁县、青铜峡市污染物削减程度大, 说明控制化肥施用量对以上三个地区污染防治有显著影响, 如图 5 (b) 所示。

#### 4.3 分析中的不足

本研究选取对分析资料限制较小的 Johnes 输出系数模型估算研究区污染物排放量, 受资料条件的限制, 本次分析中输出系数值是参考相关文献获得的, 未考虑土地利用结构变化等对输出系数值的影响, 一般来说污染物输出系数值水田高于旱田。需在今后研究中进一步深化。

### 5 结论与建议

2017 年宁夏沿黄经济带 TN、TP、COD、氨氮污染物排放量分别为 2.23 万 t、0.15 万 t、6.16 万 t、1.00 万 t, 四项合计 9.54 万 t, 城镇生活污染、农田化肥污染、畜禽养殖污染分别占污染物排放总量的 40.2%、20.3% 和 20.0%。TN、TP、COD、氨氮污染物入河量分别为 1.03 万 t、0.03 万 t、3.31 万 t、0.44 万 t, 城镇生活污染、农田化肥污染、工业污染入河量分别占入河总量的 55.9%、26.6% 和 14.7%, 是污染防治的重点对象。从行政区看, 银川市区对污染物入河量的贡献最大, 次为沙坡头区, 是污染防治的重点地区。

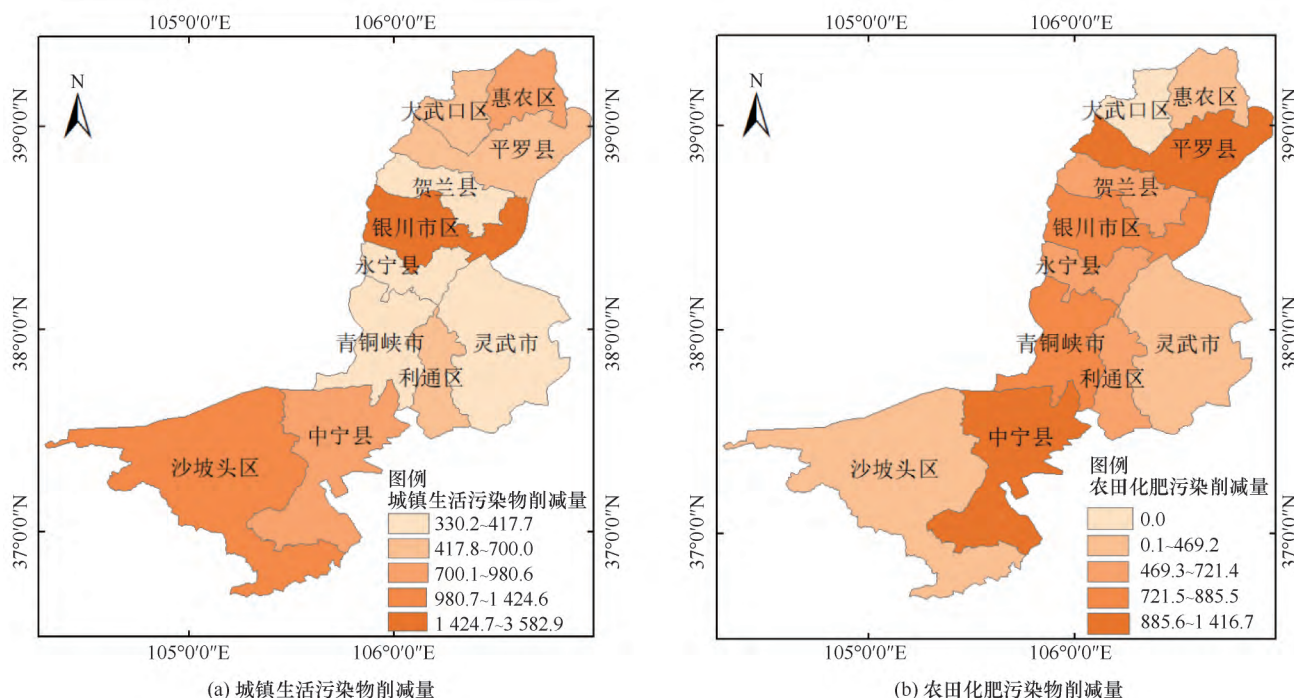


图 5 不同防控措施下污染物削减量

Fig. 5 Reduction of pollutants under different prevention and control measures

控制和提升城镇生活污水排放量和水质、消减农业化肥(农药)的施用量是污染防控的主要方向,主要建议如下:

(1) 实行城镇污水处理厂升级改造,将出水水质提升至准Ⅳ类。2017年城镇生活污水约占点源污水排放量的73.8%,基本实现了收集处理后达标排放,但城镇生活污水已成为第一大污染源。为提升排入黄河的水质,目前研究区正在开展湿地建设,以期通过末端湿地的过滤、吸附、沉淀,进一步减少入黄污染物量。但由于宁夏沿黄地区无霜期短,冬季寒冷,植物和生物处理效果几乎为零,无法满足冬季水质提升要求。建议对宁夏污水处理厂逐步实现升级提标,改造老厂为地埋式,保证微生物在适宜温度下正常工作,以应对6个月的低温天气,保障出水稳定达到准Ⅳ类。

(2) 实行全境化肥总量控制,将亩均化肥使用折纯量控制在15 kg(相当于225 kg/hm<sup>2</sup>)以下。2017年沿黄地区亩均化肥施用量(折纯量)高达47.1 kg,远高于全国平均值29.0 kg和国际上公认上限15 kg,已成为研究区第二大污染源。建议实施化肥施用量消减行动,原则上亩均化肥使用折纯量不超过15 kg。试行化肥农药凭票购买制,按亩核发化肥票和农药票,从源头扼制农业面源污染。同时加强对测土配方施肥等技术指导,科学施肥提高化肥利用率、减少化肥污染。通过实施沿黄生态经济带化肥消减行动和示范,引领和促进全区化肥农药施用效率的提升。

(3) 严控工业入黄直排口,宁东能源化工基地和工业园区实行近零排放。进一步加强对工业直排口排污量和浓度的监控和管理。严格限制高耗水、高污染项目准入,加大污水集中处理和再生水循环利用。采用低温多效闪蒸技术处理浓盐水,结晶成杂盐,外镀一层塑料膜,留待后人处理和利用。

#### 参考文献(References):

- [1] 郑灿,杨子超,邱小琼,等.宁夏引黄灌区排水沟水环境质量及其影响因素[J].水土保持通报,2018,38(6):74-79.  
ZHENG Can, YANG Zichao, QIU Xiaocong, et al. Water environmental quality of drainage ditches and their controls in Ningxia irrigation area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 74-79.
- [2] 张爱平.宁夏引黄灌区农业非点源污染评价[J].生态学杂志,2013,32(1):156-163.  
ZHANG Aiping. An assessment of agricultural non-point source pollution in Ningxia irrigation region, northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(1): 156-163.
- [3] 邱小琼,王德全,尹娟,等.宁夏农业面源污染及其影响因子

解析[J].水土保持学报,2012,26(5):190-194.

- QIU Xiaocong, WANG Dequan, YIN Juan, et al. Analysis of agriculture non-point source pollution and its influence factors in Ningxia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 190-194.
- [4] 杨丽慧,王少丽,阮本清,等.基于排水沟的宁夏银北灌区农田退水污染演变研究[J].中国生态农业学报,2015,23(12):1580-1587.  
YANG Lihui, WANG Shaoli, RUAN Benqing, et al. Evolution of drain-based research of irrigation return flow pollution in Yinbei irrigation area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(12): 1580-1587.
- [5] 邱晨.引黄灌区排水沟农业非点源污染物分布特征与水质管控对策研究[D].银川:宁夏大学,2019.  
QIU Chen. Study on distribution characteristics of agricultural non-point source pollutants and water quality control measures in drainage ditch of Yellow River irrigation district[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
- [6] 魏艳芳.青铜峡灌区排水沟农业非点源污染物分布特征及贡献率研究[D].银川:宁夏大学,2019.  
WEI Yanfang. Study on conventional pollution transport in drainage ditch of Qingtongxia irrigation area and its contribution rate to drainage ditch[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
- [7] 姜和震,吴习锦,郝芳华,等.近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J].环境科学学报,2020,40(5):1535-1549.  
JIANG Hezhen, WU Xijin, HAO Fanghua, et al. Research progress of non-point source pollution in China over the past 30 years and discussion of the future direction development[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1535-1549.
- [8] 李家科,李怀恩,沈冰,等.渭河干流典型断面非点源污染监测与负荷估算[J].水科学进展,2011,22(6):818-828.  
LI Jiako, LI Huaien, SHEN Bing, et al. Monitoring and estimating non-point source pollution on typical sections along the Weihe River[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 818-828.
- [9] XING L, DONGLONG L, HONGBO Z, 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.
- [10] 宁夏回族自治区水利厅.宁夏回族自治区水资源公报[R].银川:宁夏回族自治区水利厅,2017.  
Ningxia Water Conservancy. Ningxia water resources bulletin[R]. Yinchuan: Ningxia Water conservancy, 2017.
- [11] 宁夏回族自治区统计局.宁夏统计年鉴2018[M].北京:中国统计出版社,2018.  
Ningxia Bureau of Statistics. Ningxia Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [12] 宁夏回族自治区生态环境厅.宁夏环境统计年报[R].银川:宁夏回族自治区生态环境厅,2017.  
Department of Ecology and Environment of Ningxia. Annual statistic report on environment in Ningxia[R]. Yinchuan: Department of Ecology and Environment of Ningxia, 2017.

- [13] RECKHOW K H, SLMPSON J J. A procedure using modeling and error analysis for the prediction of lake phosphorus concentration from land use information[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37(9): 1439-1448.
- [14] SORANNO P A, HUBLER S L, CARPENTER S R, et al. Lathrop. Phosphorus loads to surface waters: A simple model to account for spatial pattern of land use[J]. Ecological Applications, 1996, 6(3): 865-878.
- [15] WORRALL F, BURT T P. The impact of land use change on water quality at the catchment scale: the use of export co-efficient and structural models[J]. Journal of Hydrology, 1999, 221(1): 75-90.
- [16] 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 modelling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3): 323-349.
- [17] 杨淑静, 张爱平, 杨正礼, 等. 宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3947-3955. YANG Shujing, ZHANG Aiping, YANG Zhengli, et al. Agricultural non-point source pollution in Ningxia irrigation district and preliminary study of load estimation methods[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(11): 3947-3955.
- [18] 黄仲冬, 樊向阳, 杜臻杰, 等. 宁夏引黄灌区典型区域农田退水水量与水质特征[J]. 中国农村水利水电, 2013(11): 154-156. HUANG Zhongdong, FAN Xiangyang, DU Zhenjie. Water quantity and quality of farmland drainage in a typical area of Yellow River irrigation region in Ningxia[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(11): 154-156.
- [19] 李强坤. 青铜峡灌区农业非点源污染负荷及控制措施研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010. LI Qiangkun. Study on the loads and control measures of agricultural non-point source pollution in Qingtongxia irrigation district[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [20] 张爱平. 宁夏黄灌区稻田退水氮磷污染特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009. ZHANG Aiping. Study on the characteristics of nitrogen and phosphorus pollution in the return flow of rice paddy in Ningxia irrigation region[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [21] 张学军, 陈晓群, 刘宏斌, 等. 宁夏引黄灌区稻田氮磷流失特征初探[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1202-1209. ZHANG Xuejun, CHEN Xiaqun, LIU Hongbin, et al. Preliminary study on nitrogen and phosphorus loss in Yellow River irrigated paddy field of Ningxia[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(5): 1202-1209.
- [22] 刘增进, 张关超, 杨育红, 等. 河南省农业非点源污染负荷估算及空间分布研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 1-6. LIU Zengjin, ZHANG Guanchao, YANG Yuhong, et al. Estimation and spatial distribution of agricultural non-point source pollution loads in Henan province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(11): 1-6.
- [23] 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 Mingxin, LI Tianhong, ZHAO Zhijie. 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.
- [24] 杨维, 杨肖肖, 吴燕萍, 等. 基于输出系数法核定双台子河非点源污染负荷[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(2): 338-343. YANG Wei, YANG Xiaoxiao, WU Yanping, et al. Based on export coefficient theory in simulating pollution load of non-point source of Shuangtaizi river[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2012, 28(2): 338-343.
- [25] 彭兆弟, 李胜生, 刘庄, 等. 太湖流域跨界区农业面源污染特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 458-465. PENG Zhaodi, LI Shengsheng, LIU Zhuang, et al. Characteristics of transboundary non-point source agricultural pollution in the Taihu valley[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(3): 458-465.
- [26] 杨晓东. 基于 ArcGIS 的阜阳市农业面源 COD 输出特征研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019. YANG Xiaodong. Study on output characteristics of COD from agricultural non-point sources in Fuyang city based on ArcGIS[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [27] 黄永刚, 付玲玲, 胡筱敏. 基于河流断面监测资料的非点源负荷估算输出系数法的研究和应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 159-162. HUANG Yonggang, FU Lingling, HU Xiaomin. Study and application of export coefficient model of non-point pollution source load using in-situ data[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 159-162.
- [28] 李泽琪, 胡卓玮, 蔡满堂. GIS 支持下的凡河流域农业非点源污染物时空特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 48-54. LI Zeqi, HU Zhuowei, CAI Mantang. Analysis of spatial-temporal characteristic of agricultural non-point source pollution in Fanhe river basin based on GIS[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(3): 48-54.
- [29] 杨世琦, 杨正礼. 宁夏引黄灌区农田面源污染控制农作技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014. YANG Shiqi, YANG Zhengli. Research and application of farming technology for non-point source pollution control in Ningxia Yellow River irrigation district[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2014.
- [30] 许凤冉, 阮本清, 王成丽. 流域生态补偿理论探索与案例研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. XU Fengran, RUAN Benqing, WANG Chengli. Theoretical exploration and case study of river basin ecological compensation[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [31] 冯永忠, 谢晓军, 杨引禄, 等. 基于 BMPs 的宁夏黄河灌区农业非点源污染控制方案[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 171-176. FENG Yongzhong, XIE Xiaojun, YANG Yinlu, et al. Project for

- controlling non-point source pollution in Ningxia Yellow River irrigation region based on Best Management Practices[J]. Journal of Northwest A & F University ( Natural Science Edition ), 2011, 39( 7): 171-176.
- [32] 宁夏回族自治区生态环境厅. 农村生活污水处理技术规范[EB/OL]. ( 2018-06-21) [2020-09-01]. <http://sthjt.nx.gov.cn/page/news/article/201612/20161213104209Ylo1HA.html>, 2016. Department of Ecology and Environment of Ningxia. Technical specification for construction of domestic sewage treatment[EB/OL]. ( 2018-06-21) [2020-09-01]. <http://sthjt.nx.gov.cn/page/news/article/201612/20161213104209Ylo1HA.html>, 2016.
- [33] 蔡明,李怀恩,庄咏涛,等. 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, 35( 7): 40-45. CAI Ming, LI Huaen, ZHUANG Yongtao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35( 7): 40-45.
- [34] 张倩,苏保林,罗运祥,等. 城市水环境控制单元污染物入海量估算方法[J]. 环境科学学报, 2013, 33( 3): 877-884. ZHANG Qian, SU Baolin, LUO Yunxiang, et al. Estimation of pollutant loads into the water environmental control units in urban areas [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33( 3): 877-884.
- [35] 刘庄,晁建颖,张丽,等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题[J]. 水科学进展, 2015, 26( 3): 432-442. LIU Zhuang, CHAO Jianying, ZHANG Li, et al. Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China [J]. Advances in Water Science, 2015, 26( 3): 432-442.
- [36] 乔飞,孟伟,郑丙辉,等. 长江干流寸滩断面污染负荷核算及来源分析[J]. 环境科学研究, 2010, 23( 8): 979-986. QIAO Fei, MENG Wei, ZHENG Binghui, et al. Pollution load accounting and source analysis at Cuntan section in main stream of Yangtze River [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23( 8): 979-986.
- [37] 张毅敏,高月香,许雪婷. 农业源污染物入水体负荷核算方法探索[J]. 环境保护, 2017, 45( 24): 25-29. ZHANG Yimin, GAO Yuexiang, XU Xueting. Exploration on estimation of agricultural sources pollutants into water body [J]. Environmental Protection, 2017, 45( 24): 25-29.
- [38] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R]. 北京: 中国环境规划院, 2003. The Chinese Academy for Environmental Planning. The technical guidelines of national water environmental capacity [R]. Beijing: The Chinese Academy for Environmental Planning, 2003.
- [39] 辛志伟. 区域水环境综合解析与管理策略: GEF 在天津[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009. XING Zhiwei. Comprehensive analysis and management strategy for regional water environment GEF in Tianjin [M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2009.
- [40] 苏保林,袁军营,李卉,等. 赣江下游平原圩区农村生活污染入河系数研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49( Z1): 256-260. SU Baolin, YUAN Junying, LI Hui, et al. Loss rates of rural domestic pollutants in the down-stream plain polder area of Ganjiang [J]. Journal of Beijing Normal University( Natural Science ), 2013, 49( Z1): 256-260.
- [41] 任宪韶. 海河流域水资源评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. REN Xianshao. Water resources evaluation of Haihe river basin [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [42] 宁夏水文水资源勘测局. 宁夏回族自治区水资源综合调查评价[R]. 银川: 宁夏水文水资源勘测局, 2017. Ningxia Hydrological information network. Comprehensive Investigation and Evaluation of Water Resources in Ningxia [R]. Yinchuan: Ningxia Hydrological information network, 2017.

(责任编辑 王海锋)