

王 艳,焦 燕,杨文柱,等.内蒙古河套灌区农田非点源氮磷污染负荷估算 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6551~6560.

Wang Y, Jiao Y, Yang W Z, et al. Estimation of nitrogen and phosphorus pollution loads from non-point sources in farmland of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6551~6560.

## 内蒙古河套灌区农田非点源氮磷污染负荷估算

王 艳,焦 燕\*,杨文柱,闫颖超,邬 宏,灵 灵,史月超 (内蒙古师范大学化学与环境科学学院,内蒙古自治区环境化学重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010022)

**摘要:**为了解内蒙古河套灌区农田非点源污染现状,引入降雨影响因子( $\alpha$ )和地形影响因子( $\beta$ )对传统的输出系数模型(ECM)进行改进,量化该地区的农田非点源氮、磷污染负荷,结合污染物入河系数( $\gamma$ ),对农田非点源氮磷入河(乌梁素海)量进行估算,并识别污染源关键源区。结果表明,河套灌区 2021 年农田非点源总氮(TN)、总磷(TP)污染负荷为 3520.998 和 407.125t,分别占不同土地利用类型污染负荷总量的 79.674% 和 89.201%;农田非点源 TN、TP 污染负荷空间分布一致,表现为靠近水体、排干的乡镇贡献量最高,依次为新华镇、新安镇和塔尔湖镇,TN、TP 污染负荷分别为 316.658, 236.725, 199.344t/a 和 36.615, 27.371, 23.050t/a;农田非点源 TN、TP 入河量为 387.310t/a 和 16.285t/a,其中新华镇、新安镇、塔尔湖镇、隆兴昌镇、团结镇和蛮会镇是河套灌区的农田非点源污染重点防治乡镇;与实测值进行比较,验证了改进的输出系数模型的合理性,相对误差分别为-4.743% 和 19.037%。

**关键词:**河套灌区; 农田非点源污染; 改进的输出系数模型; TN; TP

中图分类号: X502 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)12-6551-10

**Estimation of nitrogen and phosphorus pollution loads from non-point sources in farmland of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia.** WANG Yan, JIAO Yan\*, YANG Wen-zhu, YAN Ying-chao, WU Hong, LING Ling, SHI Yue-chao (Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Chemistry, College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6551~6560

**Abstract:** To understand the current situation of farmland non-point source pollution in the Hetao irrigation district of Inner Mongolia, the traditional export coefficient model (ECM) was improved, and the farmland non-point source nitrogen and phosphorus pollution load was quantified by precipitation impact factor ( $\alpha$ ) and terrain impact factor ( $\beta$ ) in the area. The farmland non-point source nitrogen and phosphorus discharged into the river (Wuliangsuhai) was estimated, and the critical source areas of pollution was identified by the pollution river influx coefficient ( $\gamma$ ). The total export load of non-point source total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) from farmland were 3520.998 and 407.125t in the Hetao irrigation district in 2021, accounting for 79.674% and 89.201% of the total pollution load from different land use types, respectively. The spatial distribution of the export loads for TN and TP of farmland non-point sources was consistent, and the contribution in towns near drainage was the highest. The export loads of TN and TP pollution were 316.658, 236.725, 199.344t/a and 36.615, 27.371, 23.050t/a in Xinhua, Xin'an and Talhu township, respectively. The amount of TN and TP discharged into the river were 387.310 and 16.285t/a from non-point sources of farmland. The towns of Xinhua, Xin'an, Talhu, Longxingchang, Tuanjie and Manhui were key areas for pollution prevention and control in the Hetao irrigation district. The rationality of the improved export coefficient model with relative errors of -4.743% and 19.037% had been verified by comparing with measured values.

**Key words:** Hetao irrigation district; farmland non-point source pollution; improved export coefficient model; TN; TP

在过去的几十年里,我国氮肥和磷肥的施用在提高作物产量的同时,一系列农业环境污染问题也逐渐显现,其中水环境污染问题尤其严重,水环境污染主要由点源污染和非点源污染两部分构成<sup>[1]</sup>。随着点源污染得到有效治理后,非点源污染对水环境的影响逐渐突出,其中,农业非点源污染已成为水体富营养化的主要污染源<sup>[2]</sup>。《第二次全国污染源普查公报》<sup>[3]</sup>结果显示,2017 年农业源水污染物中的化学

需氧量、氨氮、总氮(TN)以及总磷(TP)排放量分别

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42175038);内蒙古自治区杰出青年基金资助项目(2022JQ02);内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT23041);2022 年蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2022YFHH0035);内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金资助项目(2022JBTD009);内蒙古师范大学高层次人才科研启动项目(2020YJRC056)

\* 责任作者, 教授, jiaoyan@imnu.edu

为 1067.13, 21.62, 141.49 和 21.20 万 t.

然而,农业非点源污染的广泛性、随机性、潜伏性<sup>[4]</sup>等特点,增加了研究和控制农业非点源污染的难度,利用模型对农业非点源污染负荷进行定量估算主要是主要的研究方法之一。输出系数模型<sup>[5]</sup>(ECM)由于不考虑污染物运移的复杂过程,具有参数少、建模成本低等特点而得到广泛应用,特别是对观测数据和以往研究不足地区优势愈加明显<sup>[6-7]</sup>。一些学者通过对输出系数模型进行不同方面的改进<sup>[8-10]</sup>,探究更适合本流域的输出系数模型,使模型模拟值与实测值更加吻合,并结合 GIS 等技术对污染物的空间分布特征进行探究。由于污染物被农作物、河道的截留等作用而产生滞留<sup>[11]</sup>,并不会完全进入水体。王萌等<sup>[12]</sup>在分析流域农业非点源污染负荷时,又考虑了污染物的入河系数  $\lambda$ ,减少了非点源污染估算过程中的不确定性。尽管众多学者对模型的改进提高了模型估算精度,但针对南方区域研究较多,对于北方区域研究较少。另外,将输出系数模型应用于农业非点源污染负荷估算的研究多集中于污染物输出或者单一阶段的污染物入河估算<sup>[13]</sup>。由于农业非点源对水环境的污染要经历一定阶段<sup>[14]</sup>,故本研究结合污染物入河系数,综合污染物输出量与污染物入河量估算农业非点源污染负荷。

内蒙古河套灌区是中国三大灌区之一,也是国家和自治区重要的商品粮油生产基地<sup>[15]</sup>,该地区农

业活动显著,化肥施用量大,但利用率低<sup>[16]</sup>,其余部分则是随着农田退水和地表径流等汇入乌梁素海湖泊,容易造成乌梁素海水环境的恶化。因此,本研究以内蒙古河套灌区为对象,采用考虑降雨和地形影响因子的输出系数模型,量化河套灌区农田非点源 TN、TP 污染负荷,结合污染物入河系数,进行农田氮、磷污染入河量的估算,并识别污染关键源区,为乌梁素海富营养化的防治以及区域水环境的保护提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河套灌区位于黄河内蒙古段北岸的“几”字弯上( $40^{\circ}19' \sim 41^{\circ}18'N$ ,  $106^{\circ}20' \sim 109^{\circ}19'E$ ),南北跨度约 50km,东西跨度约 250km<sup>[17]</sup>。该区域属于典型的大陆性气候,降雨少、蒸发强,多年平均气温  $8.6 \sim 12^{\circ}C$ ,多年平均蒸发量  $2000 \sim 2400mm$ ,多年平均降雨量  $111 \sim 236mm$ ,且降水量分布极不均匀,夏季降水量(6~8月)占全年降水量的 63%~70%,仅靠降雨不能满足河套灌区农作物的用水需求,春季播种(春灌)与夏季生长期(夏灌)都需要依靠灌溉来保证农业生产<sup>[18]</sup>。河套灌区年均引黄水量约 48 亿  $m^3$ <sup>[19]</sup>,90%以上的农田退水会通过排干汇入乌梁素海,从而引起乌梁素海水体的污染。研究区具体位置以及农田退水排干分布情况见图 1。

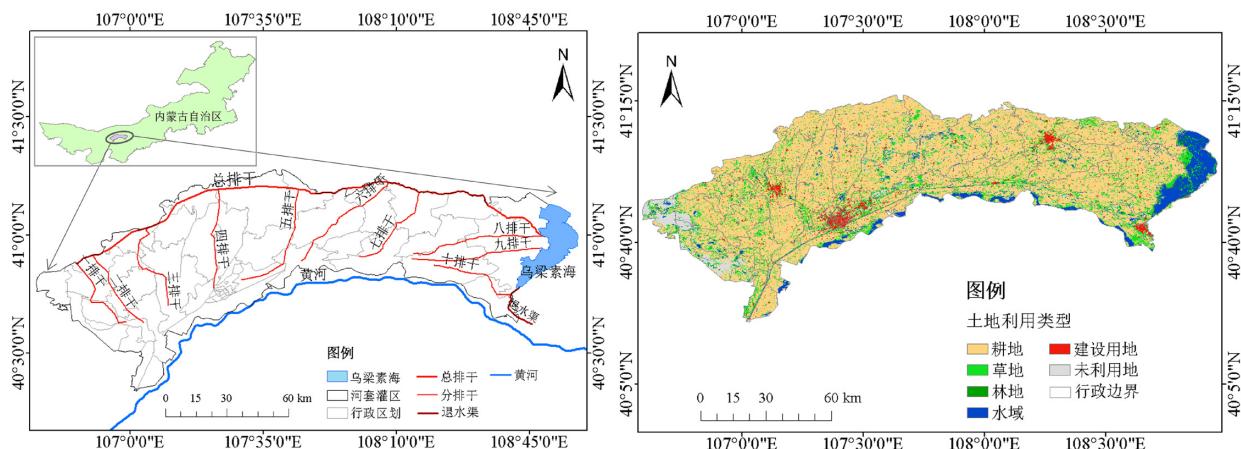


图 1 研究区概况和土地利用类型

Fig.1 Overview and land use types in the study area

### 1.2 数据来源及处理

本研究以 2021 年为基准年,所涉及的数据包括

数字高程图(DEM)、土地利用数据、气象数据、水文水质数据等,各类型空间数据的地理坐标和投影

统一,所有的空间操作基于 ArcGIS10.7 软件进行,详细数据来源见表 1. 其中,土地利用数据利用 ArcGIS

进行重分类,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据	数据描述	数据来源
数字高程图	GDEM V2 30m 分辨率数字高程数据	中国科学院地理空间数据云
土地利用类型	2020 年 30m 全球精细地表覆盖数据	地球大数据科学工程
气象数据	气象站点信息,降雨量	资源环境科学与数据中心、气象网站( <a href="http://hz.hjhh-e.com">http://hz.hjhh-e.com</a> )、巴彦淖尔市土地年鉴
水文水质	TN、TP 等污染物含量,农田退水量	实验室测定、《五原县水体达标方案》

### 1.3 改进的输出系数模型

输出系数模型是一种基于统计学的线性数学模型,由 Johnes 和 O'Sullivan 于 1989 年正式提出,随后 Johnes 又对其进行了修正,一般表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^n E_{ij} A_i + P \quad (1)$$

式中: $i$  为土地利用类型; $j$  为污染物类型; $n$  为土地利用类型的种类; $L_j$  为污染物  $j$  的输出量,t/a; $E_{ij}$  为  $i$  类土地利用类型中  $j$  污染物的输出系数,t/(km<sup>2</sup>·a); $A_i$  为  $i$  类土地利用类型的面积,km<sup>2</sup>; $P$  为降雨直接带来的污染物负荷,t/a.

传统的输出系数模型忽略了降雨、地形等条件对模拟结果的影响,而降雨、地形和土地利用方式在非点源污染物的输移过程中起着重要作用<sup>[20]</sup>,陈学凯等<sup>[21]</sup>在输出系数模型的基础上,加入降雨、坡度影响因子对模型进行优化,并验证了改进输出系数模型的合理性,李华林等<sup>[22]</sup>通过模拟分析,确定改进的

输出系数模型模拟结果更符合流域非点源污染特征。由于河套灌区干旱少雨,直接由降雨带来的污染较小,故而在模拟中忽略不计。因此本文构建改进的输出系数模型,计算公式为:

$$L_j = \alpha \beta \sum_{i=1}^n E_{ij} A_i \quad (2)$$

式中: $\alpha$  为降水影响因子; $\beta$  为地形影响因子。

输出系数模型模拟出来的结果是污染物的输出量,在降水冲刷和坡度作用下向河道输移的过程中,会受到植被拦截、自然沉降以及各种生化作用的影响,导致产生的污染物不可能全部到达附近排水沟以及乌梁素海,因此需要引入污染物入河系数  $\lambda$  来表征污染物迁移过程中的衰减影响<sup>[23-24]</sup>。公式如下:

$$L = \lambda_j L_j \quad (3)$$

式中: $L_j$  为污染物  $j$  输出量,t/a; $L$  为污染物入河量,t/a; $\lambda_j$  为污染物  $j$  的入河系数。

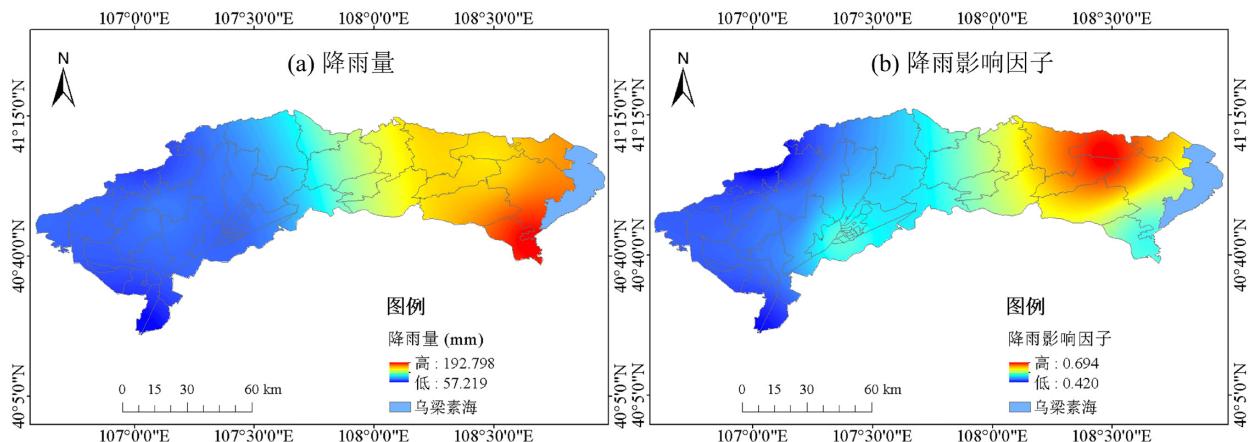


图 2 河套灌区 2021 年降雨量和降雨影响因子空间分布

Fig.2 Spatial distribution of precipitation and precipitation impact factor in the Hetao irrigation district in 2021

#### 1.3.1 降雨影响因子的确定 降雨量对氮、磷流失

量具有较为显著的影响,降雨影响因子  $\alpha$  主要受时

间不均匀性影响因子  $a_t$  和空间不均匀性因子  $a_s$  的影响<sup>[25~26]</sup>,计算公式为:

$$\alpha = a_t a_s = \frac{R}{\bar{R}} \frac{r_k}{\bar{r}_k} \quad (4)$$

式中: $R$  为研究区给定年年降雨总量,mm;  $\bar{R}$  为研究区多年平均年降雨量,mm; $r_k$  为子流域  $k$  给定年年降雨总量,mm;  $\bar{r}_k$  为子流域  $k$  多年平均年降雨量,mm.

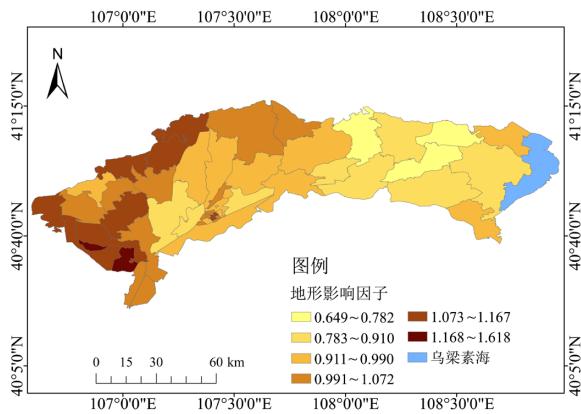


图3 河套灌区地形影响因子

Fig.3 Terrain impact factor in Hetao irrigation district

利用河套灌区 2021 年 7 个气象站点的降雨量数据,经过插值得到研究区年降雨量的空间分布图(图 2),研究区 2021 年降雨量为 57.219~192.798mm,整体呈现由东至西逐渐降低的空间分布特征。

根据巴彦淖尔市统计年鉴获得研究区多年平均降雨量 159.5mm,以研究区乡镇为输出单元进行划分,带入公式(4)进行计算,插值得到各个乡镇的降雨影响因子,研究区降雨影响因子  $\alpha$  为 0.420~0.694.根据

有关研究成果, $b$  为 0.6104<sup>[28]</sup>,对河套灌区的 DEM 数据进行提取计算,获得研究区坡度为 1.801°~8.217°,平均坡度为 3.693°,带入公式(6),借助 ArcGIS10.7 获得研究区地形影响因子  $\beta$  的空间分布图(图 3).研究区地形影响因子  $\beta$  为 0.649~1.618,空间分布上与坡度分布一致,研究区西北部的坡度影响因子较大.

**1.3.2 地形影响因子的确定** 在汇流过程中,坡度主要通过影响径流量来影响其携带的污染物的流失量,且坡度与地面径流量呈正相关关系,坡度越大地表水流速度越大,地表径流越大.相关研究表明,径流量可以表示为坡度的幂函数与常量的乘积<sup>[27]</sup>,表达式为:

$$Q = aS^b \quad (5)$$

通过径流量与地形的关系,则地形影响因子  $\beta$  可以表示为:

$$\beta = \frac{Q(S_j)}{Q(\bar{S})} = \frac{aS_j^b}{a\bar{S}^b} = \left( \frac{S_j}{\bar{S}} \right)^b \quad (6)$$

式中: $Q$  为径流量,m<sup>3</sup>/s; $S$  为坡度,°; $a, b$  为常量; $S_j$  为各乡镇坡度;  $\bar{S}$  为研究区平均坡度.

**1.3.3 输出系数的确定** 确定合理的污染物输出系数是输出系数模型的关键,输出系数的确定有 3 种常用方法,即文献分析法、试验模拟法和水文统计法<sup>[29]</sup>.鉴于河套灌区无土地利用输出系数实验数据,本研究采用文献分析法<sup>[30~31]</sup>,尽可能选择与河套灌区相符或相近研究区域的输出系数,计算其平均值,最终得到本研究的不同土地利用类型的输出系数,见表 2.

表2 河套灌区不同土地利用类型 TN、TP 输出系数

Table 2 TN and TP export coefficients for different land use in Hetao irrigation district

土地利用类型	输出系数[t/(km <sup>2</sup> ·a)]		其他流域文献输出系数参考[t/(km <sup>2</sup> ·a)]	
	TN	TP	TN	TP
耕地	1.107	0.128	0.763~1.345 <sup>[32~35]</sup>	0.075~0.224 <sup>[33, 35~41]</sup>
草地	0.435	0.038	0.157~0.856 <sup>[36~39, 42]</sup>	0.018~0.068 <sup>[36~39]</sup>
林地	0.283	0.019	0.190~0.438 <sup>[36~39, 42, 43]</sup>	0.005~0.072 <sup>[36~39]</sup>
水域	1.305	0.030	1.110~1.500 <sup>[36, 38]</sup>	0.017~0.036 <sup>[36~38]</sup>
建设用地	1.343	0.094	0.958~0.200 <sup>[36~38, 42]</sup>	0.096~0.180 <sup>[36~38]</sup>
未利用地	1.155	0.042	0.500~1.530 <sup>[37, 38, 42]</sup>	0.020~0.060 <sup>[36~38, 42]</sup>

#### 1.4 模型的验证

将模型模拟值与实测值进行对比分析,通过相对误差( $Re$ )这一指标来验证改进的输出系数模型的适用性.计算方法如下:

$$Re = \frac{U - U_0}{U_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $Re$  为相对误差; $U$  为模拟值; $U_0$  为监测值.若  $Re$  为正则说明模拟值偏大,若  $Re$  为负则说明模拟值偏

小,  $Re$  的绝对值越小, 则模型模拟效果较好, 反之则模型模拟效果较差.

## 2 结果与分析

### 2.1 河套灌区不同土地利用类型非点源 TN、TP 污染负荷分析

在选定的 TN、TP 输出系数以及不考虑流域损失的情况下, 根据模型模拟得到河套灌区不同土地利用类型所产生的非点源污染负荷(图 4). 2021 年河

套灌区不同土地利用类型下所产生的非点源 TN、TP 污染负荷分别为 4419.251t 和 456.414t, 其中污染物输出负荷量最高的土地利用类型为耕地, TN、TP 污染负荷分别为 3520.998t、407.125t, 占河套灌区不同土地利用类型下非点源 TN、TP 污染负荷的 79.674% 和 89.201%. 河套灌区其他土地利用类型 TN 污染负荷的贡献率大小依次为草地>未利用地>水域>建设用地>林地, TP 污染负荷的贡献率大小依次为草地>建设用地>未利用地>水域>林地.

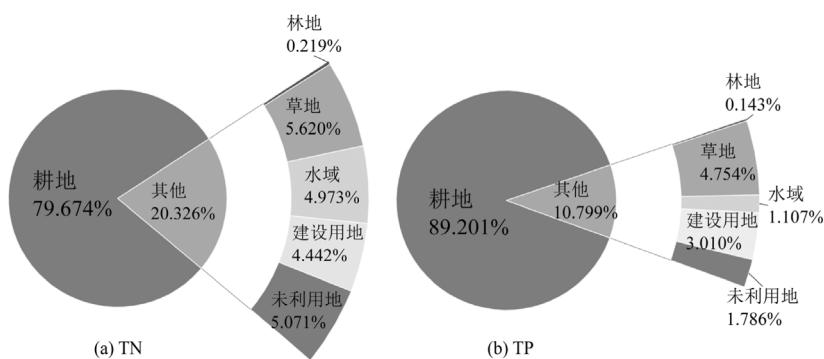


图 4 不同土地利用类型下 TN、TP 污染负荷占比

Fig.4 Percentage of TN and TP export loads under different land use types

### 2.2 河套灌区农田非点源 TN、TP 污染负荷分析

由图 5 可知, 河套灌区农田非点源 TN、TP 污染负荷空间分布规律基本一致, 但整体上分布不均, 呈现出污染负荷局部集中、靠近水体、排干的乡镇污染负荷高. 很可能是由于该区域的土地利用方式以耕地为主, 从事较多的农事活动, 且农田排水沟是农业非点源氮磷等污染物运输和迁移至水体的主要

途径<sup>[44]</sup>, 因此污染负荷高, 而灌区西部污染负荷比较低的区域则以草地和未利用地居多, 农用地少, 氮磷等营养物质的输入量也相对较低. 其中农田非点源 TN、TP 污染负荷最高的几个乡镇依次为新华镇、新安镇和塔尔湖镇, TN、TP 输出量分别为 316.658, 236.725, 199.344t/a 和 36.615, 27.371, 23.050t/a, 占农田非点源 TN、TP 输出总量的 21.378%.

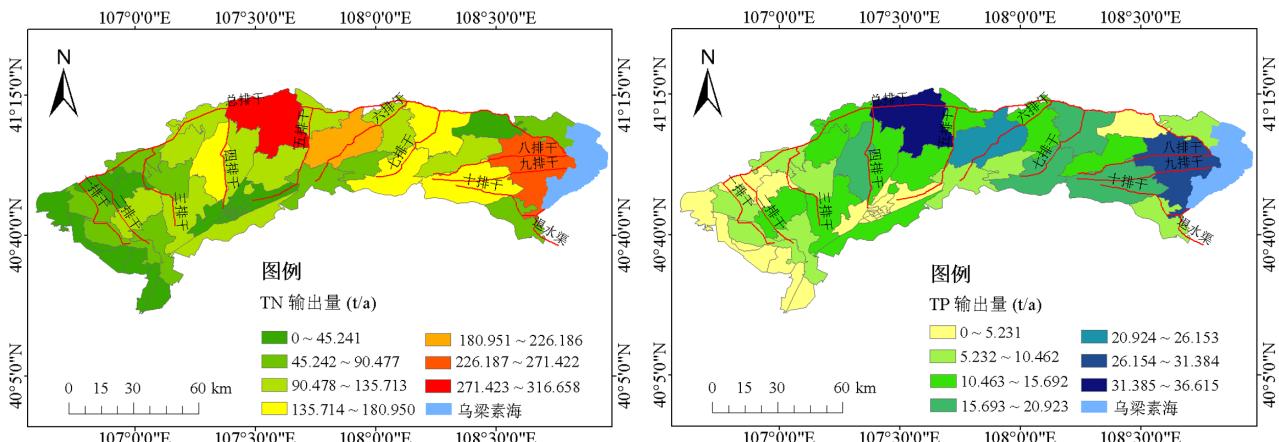


图 5 农田非点源 TN、TP 污染负荷空间分布

Fig.5 Spatial distribution of farmland non-point source TN and TP pollution loads

### 2.3 河套灌区农田非点源 TN、TP 污染负荷强度分析

为避免流域面积对污染负荷的影响,本文采用污染负荷强度法分析不同乡镇的 TN、TP 污染负荷强度(图 6).TN 污染负荷强度在 0.020~5.826kg/hm<sup>2</sup> 之间,平均值为 3.042kg/hm<sup>2</sup>,TP 污染负荷强度在 0.002~0.674kg/hm<sup>2</sup> 之间,平均值为 0.352kg/hm<sup>2</sup>,且 TN、TP 污染负荷强度空间分布一致.污染负荷强度较高的地区依次为团结镇、新华镇和蛮会镇,表明这

几个乡镇对整个研究区来说,更易产生氮、磷污染.最高污染负荷强度与最高污染负荷区域不一致,污染负荷强度最高的区域为团结镇,TN、TP 污染负荷强度分别为 5.826 和 0.674kg/hm<sup>2</sup>.最低污染负荷强度地区为临河区各办事处.分析其原因,团结镇和蛮会镇土地利用以耕地为主,耕地面积分别占乡镇总面积的 87.72% 和 82.93%,且总排干流经该乡镇导致 TN、TP 污染强度较高,而各办事处土地利用类型以居民建设用地为主,几乎不存在农田非点源输出.

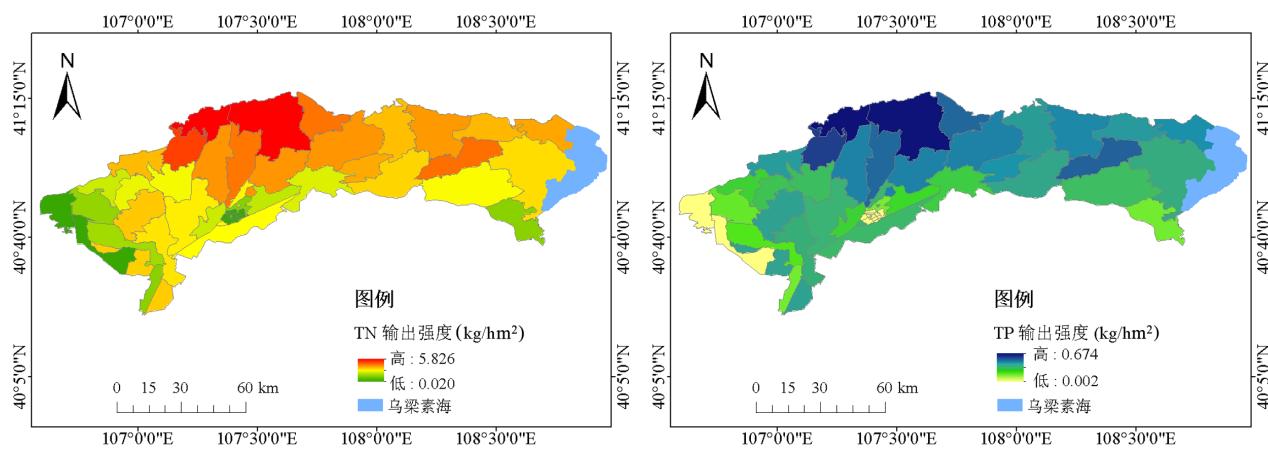


图 6 农田非点源 TN、TP 污染负荷强度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of farmland non-point source TN and TP export intensity

### 2.4 河套灌区农田非点源 TN、TP 入河量分析

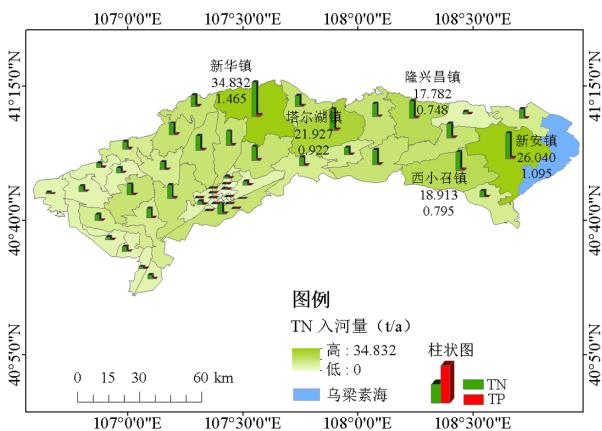


图 7 农田非点源 TN、TP 入河量空间分布

Fig.7 Spatial distribution of farmland non-point source TN and TP delivered to river

各地农田非点源 TN、TP 的入河系数各有差异,一般南方地区为 0.1~0.3,而北方地区由于气候干旱,降雨量低于南方地区,一般取值 0.03~0.1.考虑到河

套灌区农田的传统灌溉方式等措施,结合文献资料<sup>[23-24,45]</sup>,选取河套灌区农田非点源 TN 入河系数为 0.11,TP 入河系数为 0.04.

图 7 为河套灌区农田非点源 TN、TP 入河量的空间分布图,河套灌区农田非点源 TN、TP 的入河量空间分布特征一致,整体上与污染物输出负荷具有相似的空间分布,均为靠近水体、排干的乡镇污染贡献量大,农田非点源 TN、TP 入河总量分别为 387.310 和 16.285t/a,其中新华镇、新安镇、塔尔湖、西小召镇和隆兴昌镇对 TN、TP 入湖量的贡献较大,占污染物入河总量的 30.852%,是今后农田非点源污染防治的关键区域.

### 2.5 模型验证分析

为了验证改进输出系数模型的合理性,本研究选取六、七排干及皂沙排干汇水区所在乡镇作为模型的验证区,根据《五原县水体达标方案》获取六、七排干、皂沙排干沟的排水量分别为 1065.33 万 m<sup>3</sup>、1354.69 万 m<sup>3</sup> 和 381.3 万 m<sup>3</sup>,将污染物浓度与排水量

进行乘积后得到验证区 TN、TP 实测值.

表 3 改进的输出系数模型模拟精度

Table 3 Simulation accuracy of the improved export coefficient model

项目	TN	TP
监测值(t)	73.023	2.457
IECM (由 $\alpha\beta$ 改进)	模拟值(t) 相对误差(%)	69.559 -4.743
IECM (未用 $\alpha$ 改进)	模拟值(t) 相对误差(%)	121.815 66.818
IECM (未用 $\beta$ 改进)	模拟值(t) 相对误差(%)	79.419 8.759
ECM	模拟值(t) 相对误差(%)	138.209 89.268
		7.264 195.646

结合公式(7),结果如表 3 所示,验证区农田非点源 TN、TP 入河量实测值为 73.023t/a 和 2.457t/a,改进输出系数模型模拟值为 69.559t/a 和 2.925t/a. 模型模拟结果与实测值较为相近, 相对误差分别为 -4.743% 和 19.037%, 且由降雨影响因子和地形影响因子同时改进的输出系数模型提高了模型模拟精度, 表明所选用的系数合理可靠, 模型具有较好的模拟能力.

### 3 讨论

氮磷流失的数据源是基于种植面积的估算, 计算子流域的负荷可以有效降低估算带来的误差<sup>[46]</sup>, 所以本研究以乡镇为输出单元, 基于改进的输出系数模型并借助 GIS 技术, 进行河套灌区 2021 年农田非点源 TN、TP 污染负荷估算. 结果表明, 耕地是不同土地利用类型中非点源污染贡献量最大的土地利用类型, 孙海军等<sup>[47]</sup>研究了太湖流域北部山区小流域非点源污染, 说明了种植业是该流域的主要污染源. 河套灌区农田非点源 TN、TP 污染负荷空间分布一致, 靠近水体、排干的乡镇农田非点源 TN、TP 贡献量最高, 这与王文章等<sup>[48]</sup>对射洪县非点源评估的结果相符. TN、TP 污染负荷最高的几个乡镇依次为新华镇、新安镇和塔尔湖镇, 这是由于该区域的土地利用方式以耕地为主, 耕地面积较大, 从事较多的农事活动, 这与石庆玲等<sup>[49]</sup>通过探究农业非点源污染负荷对土地利用的响应关系, 证明污染负荷与耕地面积所占比重有很大关系结论一致.

目前, 将输出系数模型应用于农业非点源污染

负荷估算的研究多集中于污染物输出或者单一阶段的污染物入河估算<sup>[50]</sup>, 但农业非点源对水环境的污染要经历一定阶段<sup>[51]</sup>, 故本文结合污染物入河系数, 将污染物输出与污染物入河联系起来, 结果表明, 2021 年河套灌区农田非点源 TN、TP 污染负荷为 3520.998t, 407.125t, TN 贡献量约为 TP 的 8.65 倍, 李娜等<sup>[52]</sup>在长春市新立城水库的研究中, 若不考虑牛的养殖, TN 与 TP 的排放比达到 8.32, 本结果与其研究结果相似. TN、TP 污染负荷强度平均值分别为 3.042 和 0.352kg/hm<sup>2</sup>, 吴用<sup>[53]</sup>利用 SWAT 模型对乌梁素海流域的非点源污染进行模拟, 结果表明, 平原区流域中、东部氮和磷元素的输出平均值分别为 5.6, 2.3kg/hm<sup>2</sup> 和 0.25, 0.86kg/hm<sup>2</sup>, 本研究与其研究结果相符. 农田非点源 TN、TP 入河量分别为 387.310 和 16.285t, 管玉玲<sup>[54]</sup>利用排污系数法估算乌梁素海流域 2001~2014 年农田非点源污染物入河量, 其中 TN、TP 入河量分别为 673.18~918.90t 和 28.27~38.59t. 总氮总磷入河量比本研究偏高, 可能是因为近年来乌梁素海各项水质指标入河污染负荷均呈现出不同程度的下降趋势<sup>[55]</sup>, 且其研究区域为整个乌梁素海流域, 范围较大. 考虑到研究区缺乏 TN、TP 输出系数的监测数据, 模型所使用的输出系数参考其他地理环境相似流域的平均值, 模拟结果会具有一定的误差, 以上分析表明本研究结果具有一定的可信度, 今后, 在相关数据的支撑下, 基于本研究方法所得出的结果将会更加准确.

### 4 结论

4.1 耕地是河套灌区不同土地利用类型中非点源 TN、TP 污染负荷量最大的土地利用类型, 其他土地利用类型对 TN 污染负荷的贡献率大小依次为草地 > 未利用地 > 水域 > 建设用地 > 林地, TP 污染负荷的贡献率大小依次为草地 > 建设用地 > 未利用地 > 水域 > 林地.

4.2 河套灌区 2021 年农田非点源 TN、TP 污染负荷分别为 3520.998 和 407.125t, 污染负荷强度平均值分别为 3.042 和 0.352kg/hm<sup>2</sup>, 污染贡献量最高的几个乡镇依次为新华镇、新安镇和塔尔湖镇, 占农田非点源 TN、TP 输出总量的 21.378%.

4.3 结合污染物入河系数, 估算农田非点源 TN、TP 进入乌梁素海的负荷量, 河套灌区农田非点源 TN、

TP的入河量空间分布特征一致,整体上与污染物输出负荷具有相似的空间分布,均为靠近水体、排干的乡镇污染贡献量大,农田非点源TN、TP入河总量分别为387.310和16.285t/a,其中新华镇、新安镇、塔尔湖镇、西小召镇、隆兴昌镇、团结镇和蛮会镇是河套灌区农田非点源污染的重点污染防治乡镇。

**4.4 基于降雨和地形影响因子修正改进的输出系数模型**,对农田非点源TN、TP污染负荷模拟的相对误差分别为-4.743%和19.037%,模型模拟能力比较好。

#### 参考文献:

- [1] 王先甲,唐金鹏,李长杰,等.玛纳斯河灌区分水配水管理信息系统[J].干旱区资源与环境,2006,20(4):127-132.  
Wang X J, Tang J P, LI C J, et al. Management information system of water assignment in arid irrigation region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006,20(4):127-132.
- [2] Su Y, He S, Wang K, et al. Quantifying the sustainability of three types of agricultural production in China: An emery analysis with the integration of environmental pollution [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,252:119650.
- [3] 第二次全国污染源普查公报 [J]. 环境保护, 2020,48(18):8-10.  
The Second National Pollution Source Census Bulletin [J]. Environmental Protection, 2020,48(18):8-10.
- [4] 杨林章,冯彦房,施卫明,等.我国农业面源污染治理技术研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2013,21(1):96-101.  
Yang L Z, Feng Y F, Shi W M, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013,21(1):96-101.
- [5] 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(3/4):323-349.
- [6] Chen H Y, Teng Y G, Wang J S. Load estimation and source apportionment of nonpoint source nitrogen and phosphorus based on integrated application of SLURP model, ECM, and RUSLE: a case study in the Jinjiang River, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013,185:2009-2021.
- [7] Li S S, Zhang L, Du Y, et al. Evaluating phosphorus loss for watershed management: Integrating a weighting scheme of watershed heterogeneity into export coefficient model [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2016,21:657-668.
- [8] 杨彦兰,申丽娟,谢德体,等.基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015,37:112-119.  
Yang Y L, Shen L J, Xie D T, et al. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Three Gorges Reservoir area (Chongqing) based on the export coefficient modeling approach [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2015,37:112-119.
- [9] 荆延德,张华美,孙笑笑.基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染输出风险评估 [J]. 水土保持通报, 2017,37(3):270-274.  
JING Y D, ZHANG H M, SUN X X. Risk assessment of non-point source pollution in Nansihu lake basin using output coefficient model [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2017,37(3):270-274.
- [10] 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, 2004,49(7):40-45.  
CAI M, LI H E, ZHUANG Y T, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,49(7):40-45.
- [11] Junrui, C, Yuemin, G, Z, Z D, et al. Modeling the sources and retention of phosphorus nutrient in a coastal river system in China using SWAT [J]. Journal of Environmental Management, 2021,278:111556.
- [12] 王萌,王敬贤,刘云,等.湖北省三峡库区1991~2014年农业非点源氮磷污染负荷分析 [J]. 农业环境科学学报, 2018,37(2):294-301.  
WANG M, WANG J X, LIU Y, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus pollution loads from agricultural non-point sources in the Three Gorges Reservoir of Hubei Province from 1991 to 2014 [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018,37(2):294-301.
- [13] Wang, R, Kalin, L. Combined and synergistic effects of climate change and urbanization on water quality in the Wolf Bay watershed, southern Alabama [J]. Journal of Environmental Sciences:china, 2018, 64:107-121.
- [14] Kaixia, J, Zhaofu, L, Chuan, L, et al. The reduction effects of riparian reforestation on runoff and nutrient export based on AnnAGNPS model in a small typical watershed, China. [J]. Environmental science and pollution research international, 2019,26:5934-5943.
- [15] 丁春莲,尹晓敏,田志强,等.河套灌区总排干沟入乌梁素海面源污染负荷的便捷评估方法探讨 [J]. 内蒙古水利, 2016,37(6):7-8.  
Ding C L, Yin X M, Tian Z Q, et al. Study on convenient assessment method of surface pollution load from main drainage ditch into Wuliangsuhai in Hetao Irrigation District [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2016,37(6):7-8.
- [16] 魏国孝,孙继成,朱锋.内蒙古河套灌区农业面源污染及防治对策 [J]. 中国水土保持, 2009,30(8):27-29.  
Wei G X, Sun J C, Zhu F. Agricultural non-point source pollution and its control measures in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009,30(8):27-29.
- [17] Wu L, Gao J E, Ma X Y, et al. Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015,22:10647-10660.
- [18] 欧阳威,郭波波,张璇,等.北方典型灌区不同灌期农田系统中氮素迁移特征分析 [J]. 中国环境科学, 2013,33(1):123-131.  
Ouyang W, Guo B B, Zhang X, et al. Transfer characteristics of soil nitrogen in northern typical irrigation area under different irrigation periods [J]. China Environmental Science, 2013,33(1):123-131.
- [19] 黄永江,屈忠义.基于SPA-VFS耦合模型的河套灌区灌溉用水效率分级 [J]. 农业工程学报, 2021,37(11):85-92.  
Huang Y J, Qu Z Y. Classifying irrigation water use efficiency in Hetao Irrigation District using SPA-VFS coupling model [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(11):85–92.
- [20] Yang G X, Best E P H, Whiteaker T, et al. A screening-level modeling approach to estimate nitrogen loading and standard exceedance risk, with application to the Tippecanoe River watershed, Indiana [J]. Journal of Environmental Management, 2014,135:1–10.
- [21] 陈学凯,刘晓波,彭文启,等.渤海流域非点源污染负荷估算及其控制对策 [J].环境科学,2018,39(1):77–88.  
Chen X K, Liu X B, Peng W Q, et al. Estimation of and control strategies for pollution loads from non-point sources in the Chenghai watershed [J]. Environment Science, 2018,39(1):77–88.
- [22] 李华林,张守红,于佩丹,等.基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别:以北运河上游流域为例 [J].环境科学, 2023, 44(11):6194–6204.  
Li H L, Zhang S H, Yu P D, et al. Estimation and critical source areas identification of non-point source pollution based on improved export coefficient models: A case study of the upper Beiyun River Basin [J]. Environmental Science, 2023,44(11):6194–6204.
- [23] Chen D J, Lu J, Huang H, et al. Stream nitrogen sources apportionment and pollution control scheme development in an agricultural watershed in eastern China [J]. Environmental Management, 2013,52:450–466.
- [24] Cheng X, Chen L D, Sun R H, et al. An improved export coefficient model to estimate non-point source phosphorus pollution risks under complex precipitation and terrain conditions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25:20946–20955.
- [25] Ding X W, Shen Z Y, Hong Q, et al. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2009,383(3/4):233–244.
- [26] Chen X K, Liu X B, Peng W Q, et al. Non-point source nitrogen and phosphorus assessment and management plan with an improved method in data-poor regions [J]. Water, 2017,10(1):17.
- [27] Liu Q Q, Singh V P. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2004,9(5):375–382.
- [28] Li Y, Wang C, Tang H L. Research advances in nutrient runoff on sloping land in watersheds [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2006,9(1):27–32.
- [29] 张洪波,李俊,黎小东,等.缺资料地区农村面源污染评估方法研究 [J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(6):58–66.  
Zhang H B, Li J, Li X D, et al. Study on rural non-point source pollution assessment method of regions with sparse data [J]. Journal of Sichuan University (Advanced Engineering Sciences), 2013,45(6):58–66.
- [30] 胡富昶,敖天其,胡正,等.改进的输出系数模型在射洪县的非点源污染应用研究 [J].中国农村水利水电,2019,61(6):78–82.  
Hu F C, Ao T Q, Hu Z, et al. Applied research on the improved export coefficient model in non-point source pollution in Shehong County [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019,61(6):78–82.
- [31] 杨雯,敖天其,王文章,等.基于输出系数模型的琼江流域(安居段)农村非点源污染负荷评估 [J].环境工程, 2018,36(10):140–144.  
Yang W, Ao T Q, Wang W Z, et al. Estimation of pollution loads from rural non-point sources in Qiongjiang river basin (Anju district) based on export coefficient modeling approach [J]. Environmental Engineering, 2018,36(10):140–144.
- [32] 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 Q K. 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.
- [33] Duan M Q, Du X, Peng W Q, et al. Quantitative assessment of background pollutants using a modified method in data-poor regions [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020,192:1–15.
- [34] 王有霄,钟萍丽,于格,等.胶州湾氮、磷非点源污染负荷估算及时空分析 [J].中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(2):85–97.  
Wang Y X, Zhong P L, Yu G, et al. Estimation of N,P non-point source pollution loads and analysis of spatial and temporal characteristics in the Jiaozhou Bay [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(2):85–97.
- [35] 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 A P. 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 Agriculture Sciences, 2009.
- [36] Du X Z, Su J J, Li X Y, et al. Researchers from Chinese academy of sciences detail findings in environmental pollution (Modeling and evaluating of non-point source pollution in a Semi-Arid Watershed: Implications for watershed management) [J]. Ecology Environment & Conservation, 2016,44(3):247–255.
- [37] 程先,陈利顶,孙然好.考虑降水和地形的京津冀水库流域非点源污染负荷估算 [J].农业工程学报,2017,33(4):265–272.  
Cheng X, Chen L D, Sun H R. Estimation of non-point source pollution loads in the Beijing-Tianjin-Hebei reservoir basin considering precipitation and topography [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(4):265–272.
- [38] 李根,毛峰.我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估 [J].中国水土保持,2008,39(2):9–11.  
Li G, Mao F. Assessment of soil erosion-type non-point source pollution loads and their economic losses in China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2008,39(2):9–11.
- [39] 宋嘉,李怀恩,李家科,等.丹江流域陕西段农业非点源污染负荷估算 [J].中国农村水利水电,2020,62(11):67–72.  
Song J, Li H E, Li J K, et al. Load estimation of agricultural non-point source pollution in Shaanxi Section of Danjiang River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020,62(11):67–72.
- [40] 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 S J, Zhang A P, Yang Z L, 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.
- [41] 丁洋,赵进勇,董飞,等.妫水河流域农业非点源污染负荷估算与分析 [J].水利水电技术,2020,51(1):139–146.  
Ding Y, Zhao J Y, Dong F, et al. Estimation and analysis of agricultural non-point source pollution load in Guishui River Watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020,51(1):139–146.

- [42] 庞树江,王晓燕.流域尺度非点源总氮输出系数改进模型的应用 [J].  
农业工程学报, 2017,33(18):213–223.  
Pang S J, Wang X Y. Application of modified diffuse total nitrogen export coefficient model at watershed scale [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(18):213–223.
- [43] 刘亚琼,杨玉林,李法虎.基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算 [J]. 农业工程学报, 2011,27(7):7–12.  
Liu Y Q, Yang Y L, Li F H. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011,27(7):7–12.
- [44] 胡宜刚,吴 攀,赵 洋,等.宁蒙引黄灌区农田排水沟渠水质特征 [J]. 生态学杂志, 2013,32(7):1730–1738.  
Hu Y G, Wu P, Zhao Y, et al. Water quality of cropland drainage ditches in the Yellow River irrigation regions of Ningxia and Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(7):1730–1738.
- [45] 段 扬,蒋洪强,吴文俊,等.基于改进输出系数模型的非点源污染负荷估算——以嫩江流域为例 [J]. 环境保护科学, 2020,46(4):48–55.  
Duan Y, Jiang H Q, Wu W J, et al. Estimation of non-point source pollution load based on improved export coefficient model : A case study of Nenjiang Watershed [J]. Environmental Protection Science, 2020,46(4):48–55.
- [46] 左琳琳.巢湖流域农田面源污染负荷估算及其风险评估 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018.  
Zuo L L. Farmland non-point source pollution load estimation and risk assessment in Chaohu Lake Basin [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [47] 孙海军,吴家森,姜培坤,等.浙北山区典型小流域农村面源污染现状调查与治理对策 [J]. 中国农学通报, 2011,27(20):258–264.  
Sun H J, Wu J S, Jiang P K, et al. A survey about rural non-point pollution in mountain region of northern Zhejiang Province and the countermeasures [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(20):258–264.
- [48] 王文章,敖天其,史小春,等.基于输出系数模型的射洪县农村面源污染负荷估算 [J]. 环境工程, 2018,36(1):173–177.  
Wang W Z, Ao T Q, Shi X C, et al. Estimation of pollution loads from rural non-point sources in Shehong County Based on export coefficient modeling approach [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(1):173–177.
- [49] 石庆玲.乌梁素海流域非点源污染负荷对 LUCC 的响应研究 [D]. 济南:济南大学, 2013.  
ShiL Q L. The response of non-point source pollution to LUCC in Wuliangsuhai Watershed [D]. Jinan: University of Jinan, 2013.
- [50] 桂平婧,王 丰,李善朴,等.基于阶段输出系数模型的农业非点源污染负荷估算与评价——以四川省为例 [J]. 浙江农业学报, 2016, 28(1):110–118.  
Gui P J, Wang F, Li S P, et al. Estimation and evaluation of agricultural non-point source pollution load by stage export coefficient model: A case study in Sichuan Province [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016,28(1):110–118.
- [51] 王江川,吴玉琴,胡亚平,等.基于输出系数模型的非点源污染负荷估算 [J]. 农业工程学报, 2016,32(8):224–230.  
Wang J C, Wu Y Q, Hu A Y, et al. Application and establishment model of non-point source pollution based on statistical data[C]. Xi'an: International Symposium on Water Resource and Environmental Protection, 2011.
- [52] 李 娜,韩维峰,沈梦楠,等.基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算 [J]. 农业工程学报, 2016,32(8):224–230.  
Li N, Han W Z, Shen M N, et al. Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(8):224–230.
- [53] 吴 用.内蒙古河套地区流域非点源污染模拟及区域污染物总量控制研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017.  
Wu Y. Modeling of non-point sources pollution and total amount control of pollutants in Hetao irrigation district of the Inner Mongolia [D]. Huhehot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [54] 管玉玲.乌梁素海流域面源污染负荷入湖量计算 [J]. 内蒙古科技与经济, 2020,39(2):49–52.  
Guan Y L. Calculation of surface source pollution loads into the lake in the Wuliangsuhai Lake [J]. Inner Mongolia Science Technolog & Economy, 2020,39(2):49–52.
- [55] 杨文焕,尹 强,钟清涛,等.2013~2019 年乌梁素海排干入湖污染负荷与湖区水质的响应关系 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021,42(1):7–15.  
Yang W H, Yi Q, Zhong Q T, et al. Study on the response relationship between the pollution load of arterial drainage of Lake Wuliangsuhai and the water quality of the lake from 2013 to 2019 [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021,42(1):7–15.

**作者简介:** 王 艳(1996-),女,河南周口人,内蒙古师范大学硕士研究生,主要从事农业非点源污染研究.发表文章 1 篇.2469736853@qq.com.