

基于SWAT的河套灌区氮磷面源污染时空变化研究

易绍荣, 冯雪娇, 王宗伟, 熊俊峰, 林晨, 夏雨, 吴瀚逸

引用本文:

易绍荣, 冯雪娇, 王宗伟, 熊俊峰, 林晨, 夏雨, 吴瀚逸. 基于SWAT的河套灌区氮磷面源污染时空变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2550–2559.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0436>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174–184 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853>

江西省农业面源污染时空特征及污染风险分析

熊昭昭, 王书月, 童雨, 程丽华, 徐新华

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2821–2828 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0149>

汉江流域农业面源污染的源解析

唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 常文倩, 唐新玥

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2242–2251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1751>

林芝市农业面源污染负荷时空变化与分布特征

郝守宁, 付意成

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1308–1315 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0499>

基于输出系数模型的1998—2016年洱海流域磷素时空变化特征分析

韦晓雪, 李晓琳, 郑毅

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 171–181 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0389>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

易绍荣, 冯雪娇, 王宗伟, 等. 基于SWAT的河套灌区氮磷面源污染时空变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2550–2559.

YI S R, FENG X J, WANG Z W, et al. Spatial-temporal changes of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Hetao Irrigation District based on SWAT[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(11): 2550–2559.

基于SWAT的河套灌区氮磷面源污染时空变化研究

易绍荣^{1,2}, 冯雪娇³, 王宗伟⁴, 熊俊峰^{2*}, 林晨², 夏雨¹, 吴瀚逸^{2,5,6}

(1. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 南昌 330099; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008; 3. 南京航天宏图信息技术有限公司, 南京 210012; 4. 江苏省测绘工程院, 南京 210013; 5. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 6. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:以河套灌区为研究区, 采用SWAT模型估算该灌区流域面源污染负荷, 分析面源污染的空间分布特征和年际变化趋势, 识别灌区面源污染关键区域和关键污染源。结果表明: 2001—2020年灌区内总氮、总磷负荷年平均值分别为 $565.23 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $108.93 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$; 面源氮磷负荷高值区主要分布于灌区中部, 低值区主要分布于灌区北部; 面源氮磷负荷在中部地区表现为先上升再下降趋势, 西部地区表现为先下降再上升趋势, 而在东部及北部地区表现为下降趋势; 灌区内产生生活污水过程中产生的氮类和磷类污染物贡献率最大, 达到44.51%, 其次就是种植业源和养殖业源, 贡献率分别为28.76%和26.73%, 其中种植业源贡献率会受降雨量变化影响, 从东部的乌拉特前旗站向西至杭锦后旗站水量逐渐减少, 种植业源贡献率也表现出东部高于西部。生活污水作为第一污染来源, 需要严格控制其排放, 应着重对厕所粪尿通过排入化粪池等处理方法将其中有害物质转化为沼液等对农作物有用的物质。

关键词: SWAT模型; 河套灌区; 总氮; 总磷; 面源污染; 污染源

中图分类号: X71; X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)11-2550-10 doi:10.11654/jaes.2023-0436

Spatial-temporal changes of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Hetao Irrigation District based on SWAT

YI Shaorong^{1,2}, FENG Xuejiao³, WANG Zongwei⁴, XIONG Junfeng^{2*}, LIN Chen², XIA Yu¹, WU Hanyi^{2,5,6}

(1. School of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Key Laboratory of Basin Geography, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Nanjing Piesat Information Technology Co., Ltd, Nanjing 210012, China; 4. Jiangsu Province Surveying and Mapping Engineering Institute, Nanjing 210013, China; 5. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875, China; 6. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In the context of the gradual intensification of agricultural activity, effective identification of key pollution sources and regions can mitigate the negative impact of non-point source pollution. Taking Hetao Irrigation District as the research area, a SWAT model was used to estimate the nitrogen and phosphorus load of the irrigation area and to analyze the spatial distribution characteristics and

收稿日期: 2023-06-05 录用日期: 2023-09-18

作者简介: 易绍荣(1997—), 男, 江西于都人, 硕士研究生, 主要研究方向为流域面源污染。E-mail: yiyui2022@163.com

*通信作者: 熊俊峰 E-mail: jfxiong@niglas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42201400); 江苏省自然科学基金项目(BK20221058); 自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室开放基金项目(KLSMNR-G202215)

Project supported: Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(42201400); Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China(BK20221058); Key Laboratory of Land Satellite Remote Sensing Application, Ministry of Natural Resources, China(KLSMNR-G202215)

interannual variation in non-point source pollution. The key areas and sources of non-point source pollution were identified. The average annual loads of total nitrogen and total phosphorus, from 2001 to 2020, were 565.23 and 108.93 $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The zone of high pollutant loading was mainly distributed in the middle of the irrigated area, and the low nitrogen loading zone was mainly distributed in the northern part of the irrigated area. In the study period (2001—2020), the nitrogen and phosphorus load from non-point sources showed a trend of first rising and then decreasing in the central region, first decreasing and then increasing in the western region, and decreasing in the eastern and northern regions. Domestic sewage in the irrigated area accounted for the largest contribution of nitrogen and phosphorus, at 44.51%, followed by cropping (28.76%) and animal breeding (26.73%) sources. The relative contribution rate of cropping sources was affected by the change in rainfall; the water quantity gradually decreased from Wulat Front Banner Station in the east to Hangjin Back Banner Station in the west. The contribution rate of planting source was higher in the east than in the west. If pollutant loading is to be reduced, domestic sewage as the greatest source of pollution needs to be strictly controlled. The management focus should be on the disposal of toilet feces and urine into septic tanks or similar systems in order to convert harmful substances into biogas slurry and other useful inputs for cropping.

Keywords: SWAT model; Hetao irrigation district; total nitrogen; total phosphorus; non-point source pollution; pollution source

随着经济社会的发展,人们对农产品产量和质量的需求迅速增加,导致农业生产中化肥大量施用、畜禽养殖密度增加,化肥农药剩余和养殖产生的污染物通过各种途径进入到自然环境中,成为农业面源污染的重要来源^[1]。因此探究农业面源污染中不同污染源及其排放特点,能够有效降低农业污染的危害。

面源污染模型可在复杂条件下模拟降水、气候等环境因素对水分、泥沙、农业污染物的影响,适用于大尺度区域污染研究^[2],其中有新安江模型^[3-4]、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型^[5-6]和 HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran)模型^[2,7]等被广泛使用。其中 SWAT 模型是当前应用最为广泛的模型之一^[8-9],相对于集总式模型,SWAT 模型能够综合利用降水、土壤、植被等多源遥感信息,综合考虑地形、土壤和土地利用等信息划分水文响应单元 (Hydrologic Research Unit, HRU)^[10-12],基于 HRU 对径流过程进行模拟更能反映污染物在流域内的空间迁移变化。相比于空间统计模型,SWAT 模型对实测数据的要求更加灵活,不过分依赖于经验关系来表达物理过程^[13-14]。SWAT 模型应用范围广泛,适用性强,在新安江上游屯溪流域^[15]、鄱阳湖流域^[16]和芳溪湖流域^[17]等南方湿润地区,以及格尔木河流域^[18]、梨园河流域^[19]和乌梁素海流域^[20]等北方的半干旱地区均取得了较好的应用效果。杨军军等^[21]分析了 SWAT 模型在湟水流域的不确定性,发现径流大的子流域模拟精度更高;周帅等^[22]在黄河上游构建 SWAT 模型,对流域控制站的月径流过程进行模拟,得到 R^2 和 NSE 均大于 0.75,模拟结果均满足要求。

河套灌区作为全国 3 个特大型灌区之一,是国家重要的农牧业基地^[23]。近年来河套灌区面源污染不

断加剧,乌梁素海作为河套灌区唯一的受纳水体,农药肥料、粪尿等随水通过各排干沟渠汇入总排干沟渠排出,导致乌梁素海生态环境显著恶化,体现河套灌区面源污染的严重性。田志强等^[24]调查了 2009—2017 年河套灌区总排干沟渠水质资料,面源总氮污染多年平均负荷达到 1 793.09 t。在流域面源污染的影响下,乌梁素海营养盐浓度不断上升,据红圪卜扬水站 1970—2002 年水质监测数据,入湖水体中总氮、总磷浓度均值分别为 1.74、0.07 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,该浓度监测值已超过国际上评价水体富营养化水平标准值的 8.0、3.5 倍^[25];2006—2014 年间乌梁素海总氮、总磷浓度均值分别为 2.66、0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[26],属于劣 V 类标准,2019 年总氮浓度继续升高达到 3.42 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[27]。因此,随着乌梁素海面源污染不断加剧,河套灌区所受面源污染危害更加严重,明确氮磷污染源,对河套灌区流域水环境治理尤为重要。

模型是一种有效的分析手段,其中 SWAT 模型可以高效和准确地实现评估,而对研究区面源污染的主要来源解析研究较少。因此本研究将借助 SWAT 模型模拟河套灌区面源氮磷负荷量,结合文献调研,分析种植业源、养殖业源和生活污水源的氮磷输出占比,为面源污染治理提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区是我国三大灌区之一,位于 $40^{\circ}15' \sim 41^{\circ}18' \text{N}$, $106^{\circ}20' \sim 109^{\circ}19' \text{E}$ 之间,属中温带大陆性季风气候,灌区内降雨量少,蒸发量大,风沙强烈。年平均降水量约 130~250 mm,最大降水量 432.6 mm,全年降水量有 80% 发生在 7—9 月,年内平均蒸发量高达

2 000~2 400 mm,是典型的干旱-半干旱地区^[28];该地区土地利用类型以耕地和不透水面为主(图1),土壤类型主要由盐渍化浅色草甸土和盐土组成。河套灌区总面积为 $1.073 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中灌溉面积为 $5.74 \times 10^3 \text{ km}^2$,是我国重要的商品粮生产基地,灌区内主要作物有小麦、油菜和玉米^[29],牧业重点发展羊、牛、猪三大主导品种。

1.2 面源污染模拟

基于数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据,分析流域地貌及水文特征,划分得到17个子流域(图1)。子流域平均面积 469.25 km^2 ,最小子流域面积 87.93 km^2 ,最大子流域面积 $1\,522.48 \text{ km}^2$ 。随后将研究区重分类后的土地利用类型与土壤类型图输入SWAT模型,并对土地利用、土壤类型和坡度分级分别设置面积阈值(10%、10%、10%)形成HRU,

每个HRU都对应着一种土地利用类型、土壤类型和坡度等级。

SWAT模型所需数据包括空间和属性数据库(表1),空间数据包括DEM、土地利用、土壤类型分布数据等,属性数据包括土壤的物理化学属性、气象、水文、水质及污染源数据等。

1.3 农业生产与农村生活影响的面源污染源分类

本研究将区域内面源污染来源分为以下3类:

(1) 种植业

灌区内耕地是农业活动最频繁的土地利用类型,而耕地以水田和旱地两种形式存在,数据从灌区土地利用数据中获取,见表1。

(2) 禽畜养殖业

首先考虑到猪、牛、羊的养殖周期差异,选用猪年末出栏量、牛年末出栏量、羊年末出栏量来代表各类

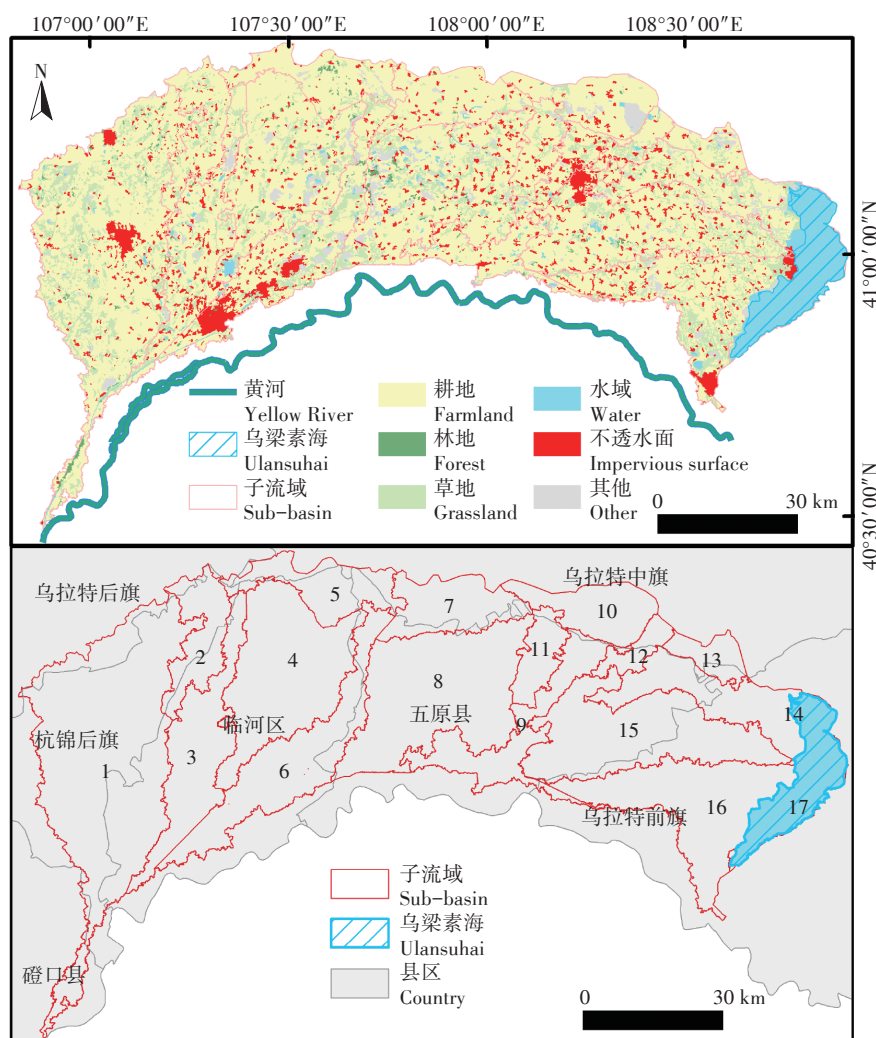


图1 土地利用类型及子流域分布图(1~17为子流域编号)

Figure 1 Distribution map of land use type and sub-basin(1~17 are sub-basin numbers)

表1 模型构建所需数据

Table 1 Data required for model construction

数据类型 Data type	格式 Format	来源 Source	数据说明 Data specification
数字高程模型	Grid	美国地质勘探局(USGS)	高程、坡度
土地利用数据	Grid	中国科学院资源环境科学数据中心	土地利用类型图
土壤数据	Grid	世界土壤数据库 HWSOV1.2数据集	土壤类型图
气象数据	Txt	中国区域高精度同化气象站(CMADS)	气象站点气温、降雨、风速、相对湿度、日照时间

禽畜一年的养殖量;其次考虑到不同禽畜排泄粪中氮磷含量不同,为方便评价禽畜养殖量的总体变化,采用当量猪进行标准化计算,一头牛等于13.55头当量猪,一只羊等于1.26头当量猪^[30-31]。计算公式:

$$L_i = l_i \times \frac{1}{2} \left(\frac{N_i}{N_p} + \frac{M_i}{M_p} \right) \quad (1)$$

式中: i 为畜禽养殖种类; L_i 为*i*类畜禽换算为猪的数量,头; l_i 为*i*类畜禽本身数量,头; N_p 、 M_p 为猪每年排泄的氮、磷量,kg; N_i 、 M_i 为*i*类畜禽每年排放的氮、磷量,kg。

(3)农村生活污水排放

农村生活污水是农村居民在日常生活中的污水,主要由农村人口数量决定^[32],计算公式:

$$Q_s = K \times V \times 365 \quad (2)$$

式中: Q_s 为生活污水年排放总量,L; K 为农村生活污水排放系数,L·人⁻¹·d⁻¹; V 为农村人口数,人。农村生活污水排放系数参考文献[33]。

1.4 时空变化和冗余分析

子流域2001—2020年污染负荷量年均变化趋势前后差异明显,根据前后不同的变化趋势可以划分为两个阶段,分别是2001—2010年阶段和2011—2020年阶段,两个阶段统一用5个模式来区分变化趋势,其中年均变化幅度计算如式(3)所示:

$$v = \frac{T_{10} - T_1}{t} \quad (3)$$

式中: v 为年均变化幅度,kg·a⁻¹; T_{10} 为最后一年污染负荷量,kg; T_1 为第一年污染负荷量,kg; t 为总年数,取固定值10a。

计算得到的变化幅度主要以-10、-5、5和10为分界线,因此认为当 $v < -10$ 为模式一快速下降, $-10 \leq v < -5$ 为模式二平缓下降, $-5 \leq v < 5$ 为模式三保持不变, $5 \leq v < 10$ 为模式四平缓上升, $10 \leq v$ 为模式五快速上升。

冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)方法能够计算得到自变量对因变量的贡献率,在面源污染中应

用RDA来计算污染源对总氮、总磷等的贡献程度得到了广泛应用^[34-35]。选取2011—2019年(2020年没有统计年鉴数据)解析各个子流域污染源贡献率,计算污染源对总氮和总磷变化的复合贡献率。在应用Canoco5进行RDA分析时,将污染源作为环境因子,总氮、总磷作为物种变量,Canoco5软件可自动对不同量纲的数据进行标准化处理,可减少因操作失误所引起的结果差异^[36]。

2 结果与分析

2.1 面源氮磷负荷空间分布

面源氮磷负荷空间分布如图2、图3所示,总氮和总磷的负荷分布具有显著的空间特征。2001—2020年间总氮负荷的变化范围为123.61~1 887.40 kg·km⁻²,年平均值为565.23 kg·a⁻¹,氮负荷量高值区主要分布在平原区域中部的以小麦地为主的子流域,其次为东部流域的以葵花地为主的子流域,低值区主要分布在北部山区及平原地区西部的1号子流域,灌区内中部平原区域面源氮负荷量高于北部山区及灌区西部。总磷负荷的变化范围为20.58~382.27 kg·km⁻²,年平均值为108.93 kg·a⁻¹,磷负荷量高值区主要分布在平原区域中部,其次分布在东部流域,低值区主要分布在北部山区,流域内中部平原区域面源磷负荷量高于北部山区。

2.2 面源氮、磷负荷年际变化趋势

2001—2010年河套灌区流域面源氮磷负荷变化模式如图4所示,面源氮磷负荷流失趋势为快速下降的子流域主要集中在灌区流域东部,乌拉特前旗及五原县东部,少部分在乌拉特中旗的7、10、13号子流域和临河区的4、5号子流域;面源氮磷负荷流失趋势为平缓下降的子流域主要集中在杭锦后旗,少部分在临河区的6号子流域和五原县的11号子流域;面源氮磷负荷流失趋势为快速上升的子流域主要集中在五原县的8号子流域,少部分在临河区的3号子流域。

2011—2020年河套灌区流域面源氮磷负荷变化模式如图5所示,面源氮磷负荷流失趋势为快速下降的子流域主要集中在五原县的8号子流域;面源氮磷负荷流失趋势为平缓下降的子流域主要分布在乌拉特中旗及五原县的14、15号子流域;面源氮磷负荷流失趋势为保持不变的子流域主要分布在五原县中部的9、11号子流域和乌拉特中旗的13号子流域;面源氮磷负荷流失趋势为平缓上升的子流域主要集中在杭锦后旗,少部分在临河区的6号子流域和五原县的

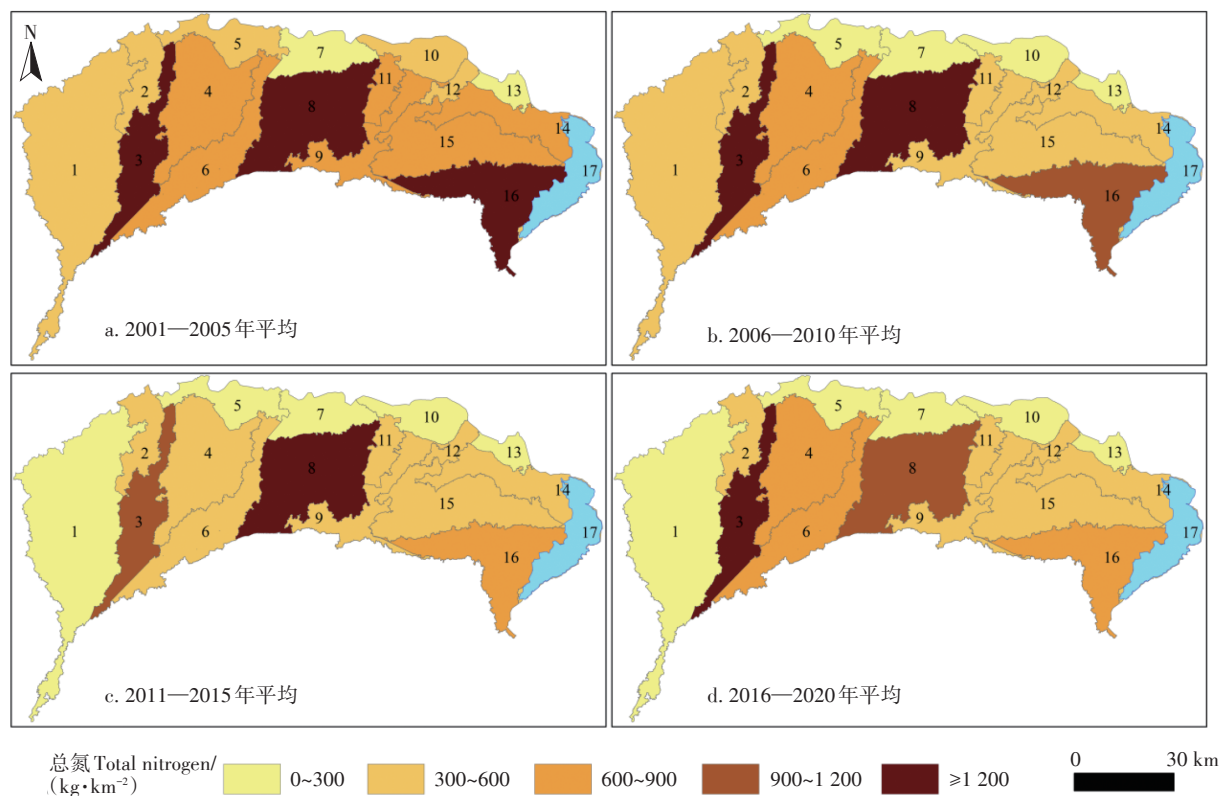


图2 灌区总氮负荷空间分布

Figure 2 Spatial distribution of total nitrogen load in irrigated district

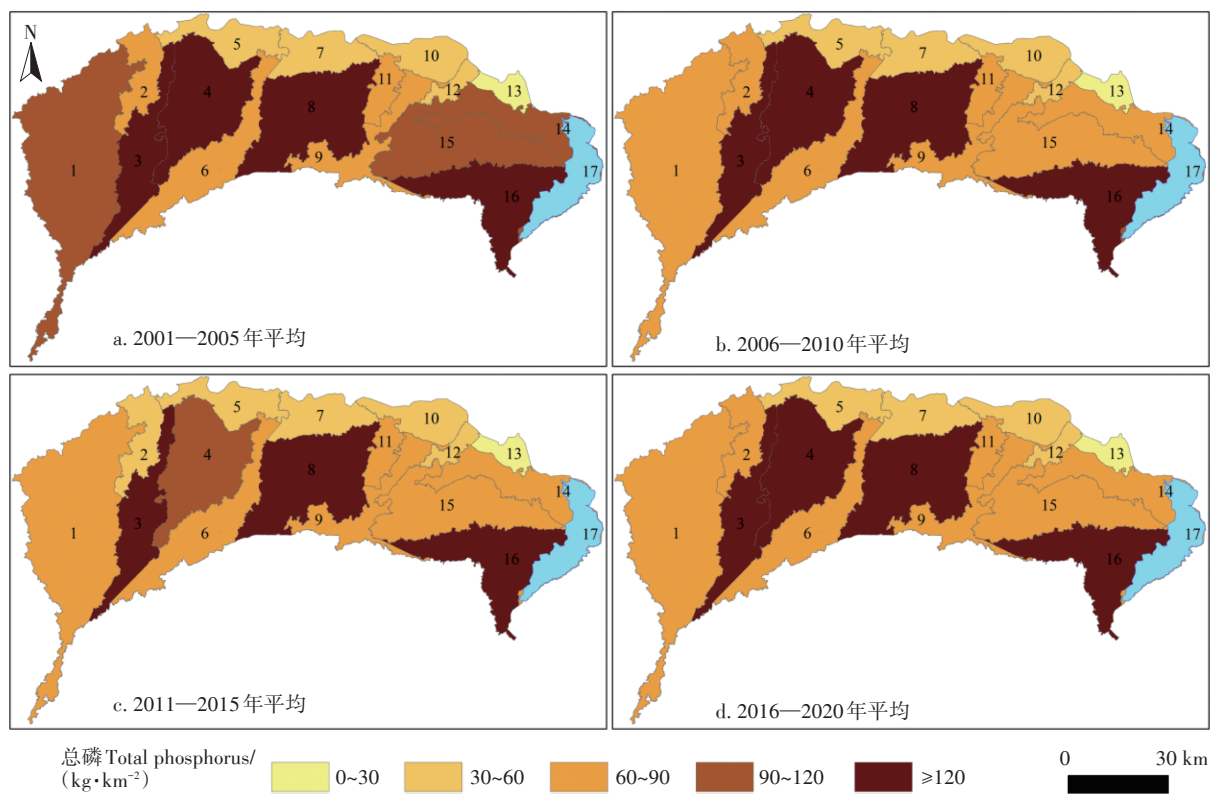


图3 灌区总磷负荷空间分布

Figure 3 Spatial distribution of total phosphorus load in irrigated district

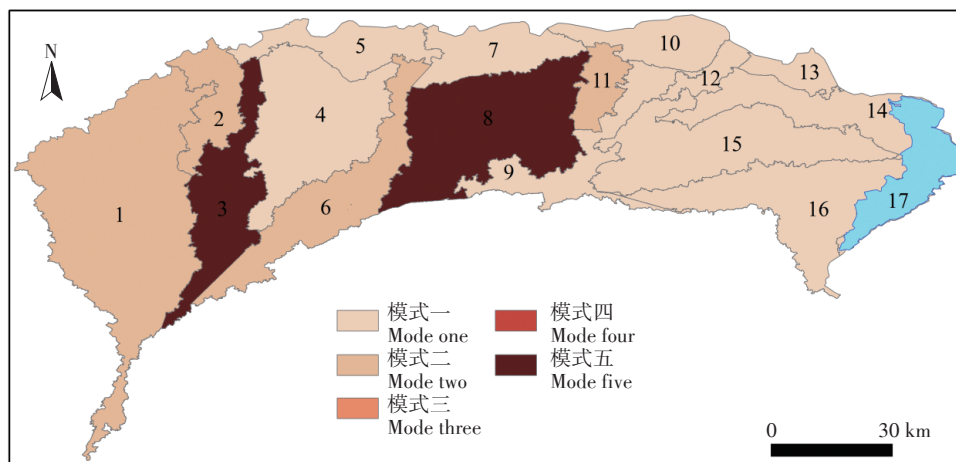


图4 2001—2010年氮磷负荷变化趋势图

Figure 4 Trend chart of total nitrogen and phosphorus load from 2001 to 2010

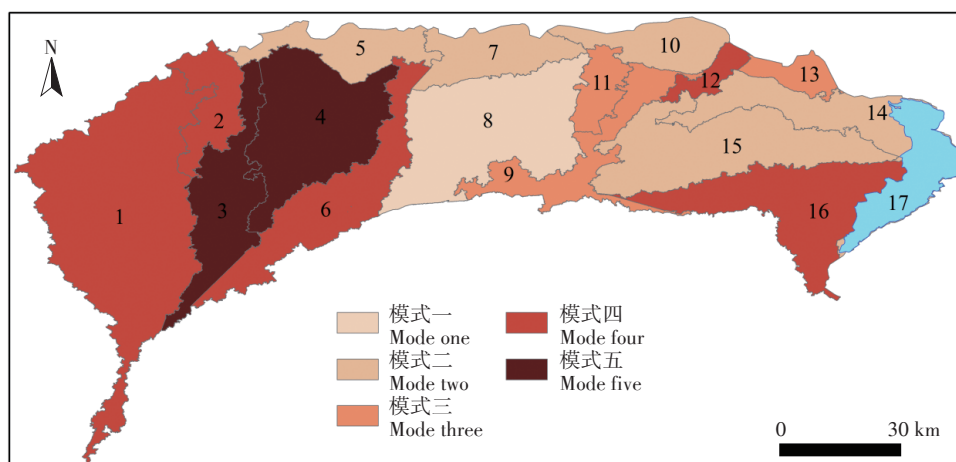


图5 2011—2020年氮磷负荷变化趋势图

Figure 5 Trend chart of total nitrogen and phosphorus load from 2011 to 2020

12子流域;面源氮磷负荷流失趋势为快速上升的子流域主要集中在临河区中部的3、4号子流域。

2.3 面源氮磷负荷来源解析

各子流域污染源贡献率解析结果如图6所示,2011—2019年间养殖业、种植业和生活污水对流域面源污染的平均贡献率分别为26.73%、28.76%和44.51%,说明生活污水超过传统种植业和养殖业的面源污染,成为河套灌区流域主要污染源。值得注意的是,2、5、16号子流域三种污染源中,养殖业源贡献率占比最大;10、11、14、15号子流域三种污染源中,种植业源贡献率占比最大;其他子流域三种污染源中生活污水贡献率占比最大。

3 讨论

河套灌区流域内面源污染氮磷负荷时空分布不

均,吴用^[25]研究了河套灌区污染物来源的空间变化,结果显示总氮贡献主要来源于灌区平原中部的小麦地,总磷贡献主要来源于东部的葵花地和中部的 wheat 地,其氮磷负荷空间分布情况与本研究结果大致相同。总氮、总磷负荷高值区主要分布在河套灌区流域中部,而低值区分布在北部,临河区和五原县是巴彦淖尔市重要的养殖区,根据2019年统计年鉴数据^[32]得出,牲畜总头数在全市中占比达到了38.75%,而乌拉特中旗占比仅14.94%。流域内中部和北部禽畜养殖量分别占总流域的28.48%和4.14%。因此中部大量的禽畜产生了大量粪便,导致中部面源污染严重。

河套灌区流域作为我国重要的农牧业基地,不但畜牧业发达,而且种植业也得到了很好的发展,在2011—2019年巴彦淖尔市种植业中的农作物播种面积从 $64.03 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 扩张到 $75.08 \times 10^4 \text{ hm}^2$,增加了

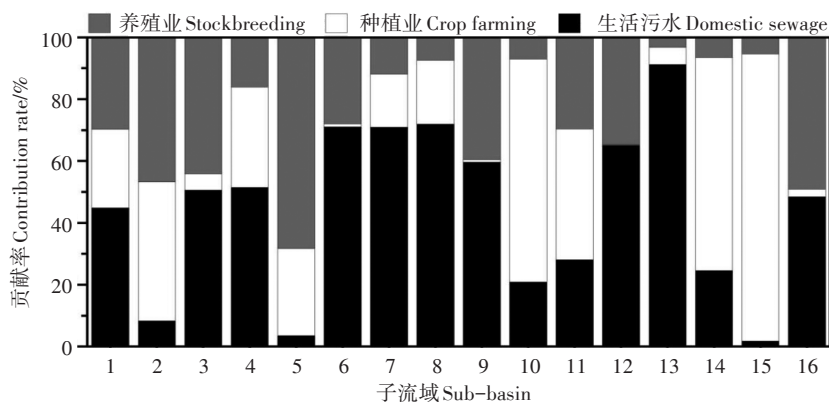


图6 子流域污染源贡献率

Figure 6 Sub-basin contribution rate of pollution sources

17.25%,而流域内中部和北部地区农作物播种面积所施用化肥折纯量分别占总流域的30.69%和3.35%。流域内中部的化肥施用量和禽畜养殖量均高于北部,因此流域内面源总氮、总磷负荷占比情况也是中部高于北部,但是从年均变化趋势结果上看中部地区面源氮磷负荷表现为前十年快速上升、后十年快速下降的趋势,而北部地区面源氮磷负荷表现为下降趋势。

灌区内种植业源作为重要污染来源,其年平均贡献率排在第二位,在2011—2019年间10、11、14、15号子流域的种植业源贡献率占比最大,主要集中在灌区东部,统计分析灌区内四个气象站点,即临河、五原、杭锦后旗、乌拉特前旗自2011—2019年的降雨量变化(图7),各站点降雨量差异明显,从东部的乌拉特前旗站向西至杭锦后旗站水量逐渐减少,且年降水量较低,种植业源贡献率也表现出东部高于西部,在三种污染源中占比较低,说明降水是导致种植业面源污染的主要驱动因素^[37]。巢湖流域和太湖流域作为南方农业面源污染严重的典型区域,降雨和农田施肥是造成种植业面源氮磷负荷时空差异的主要因素^[38-39]。而在北方地区,流域内的养殖业也是重要的面源污染来源,因为北方牧区禽畜散养的农业文化习俗,牧区养殖户以牛羊为主,数量占比总牲畜达到93.84%^[32],圈舍大多缺少粪污处理设施,容易产生面源污染^[40]。南方地区禽畜养殖以家禽为主,家禽养殖数量占禽畜养殖总数的94.5%,相比于北方牛羊养殖,排放系数小,因此养殖业占比较低^[41]。作为研究区中污染源贡献率最大占比的生活污水源,生活污水主要是农村人口生活所引起的,据统计年鉴数据^[32]统计研究区乡村人口在2011—2019年间占巴彦淖尔市总乡村人口均

值为55.82%,乡村人口的增加容易产生大量生活污水。从各子流域贡献率结果中发现生活污水贡献率总体表现为西部高于东部,统计研究区东西部人口占比,得出西部和东部人口分别占研究区人口总人数的48.72%和12.67%。由于低收入农户的农业生产活动占全部生产活动的比重较大,厕所污水常被用作农家肥施于土壤而利用率较高;而高收入农户由于农业生产活动要显著低于低收入农户而厕所污水的利用率较低,从而导致污染排放减少^[42],可见收入水平对农户厕所污水排放会有影响。

由于面源污染的随机性和不确定性,使得源头控制成为面源污染控制的关键^[43]。养殖业源作为河套灌区流域内重要污染源,禽畜所产生的粪便含有未被吸收的氮、磷元素,可以通过微波法、快速烘干法等处理粪便后作为肥料^[44];也可将粪便排入到化粪池中进行厌氧发酵,使其转化为沼气,同时沼液又是很好的有机肥料,沼渣也可以变成鱼苗饲料^[45],农户对厕所污水也可以采取此类方法,也可以让养殖户选购符合生产绿色畜产品质量要求和消化率高的饲料原料;对草地适当施肥可以提高牧草产量和增加土壤含氮量,协调管理好耕地和草地系统之间的氮素投入,不但能够有效减少农业生产对水环境的污染,而且还能够控制草场退化^[46];在流域内盐碱地配套改良措施种植甜高粱、饲用油菜、燕麦草等耐盐碱优质牧草,不但可以为草食动物的养殖提供优良饲草料,而且能够改善土质,实现经济和生态齐发展^[47]。还可采取生态沟渠、污水收集等工程措施,提高生活污水处理效率,将达标后的污水用于施肥、绿化等方面。可优先将厕所粪污纳入生活污水处理和收集系统,针对卫生旱厕地区,需要对粪污进行无害化处理,加强粪污的资源

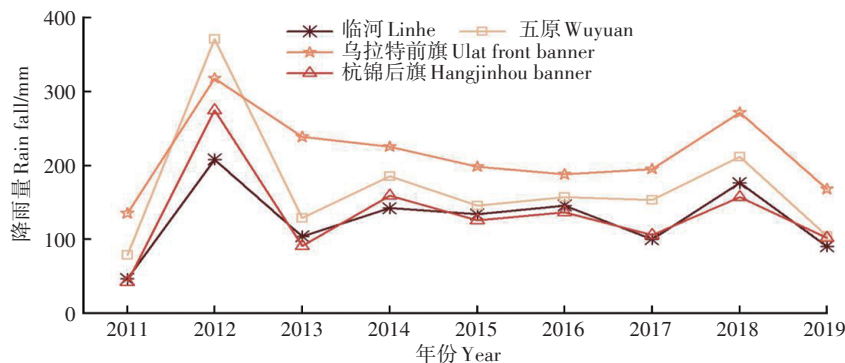


图7 研究区年降水量变化

Figure 7 Annual precipitation changes in the study area

利用^[48]。

4 结论

(1)通过分析面源氮磷负荷空间分布特征,结果表明:河套灌区内面源污染氮磷负荷流失呈现中部高于北部,整个灌区中部面源总氮、总磷污染负荷最高;总氮负荷的变化范围为123.61~1 887.40 kg·km⁻²、总磷负荷的变化范围为20.58~382.27 kg·km⁻²。

(2)通过分析面源氮磷负荷年际变化趋势表明:2001—2010年乌拉特前旗及五原县东部、杭锦后旗表现为下降趋势,五原县表现为快速上升趋势。2011—2020年五原县、乌拉特中旗表现为下降趋势;杭锦后旗及临河区表现为上升趋势;五原县中部地区表现为保持不变。

(3)各污染源对氮磷污染负荷平均贡献顺序为生活污水>种植业>养殖业。

参考文献:

- [1] 娄云, 朱国美, 赵怀瑾, 等. 皖东地区麦稻轮作农田径流氮磷流失特征研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(2): 78-80. LOU Y, ZHU G M, ZHAO H J, et al. Study on nitrogen and phosphorus loss in runoff of wheat-rice rotation farmland in eastern Anhui[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(2): 78-80.
- [2] 李亚娇, 宋佳宝, 李家科, 等. 四种典型非点源污染模型研究与应用进展[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 21-24, 32. LI Y J, SONG J B, LI J K, et al. Research and application progress of four typical non-point source pollution models[J]. *Journal of Hydropower Energy Science*, 2019, 37(3): 21-24, 32.
- [3] 龚珺夫, 陈红兵, 朱芳, 等. 新安江模型在资料匮乏的长江中下游山区中小流域洪水预报应用[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 581-594, 650. GONG J F, CHEN H B, ZHU F, et al. Application of Xin'anjiang River Model in flood prediction of middle and small river basins in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Lake Sciences*,

2021, 33(2): 581-594, 650.

- [4] 李慧赞, 王裕成, 单亮, 等. 暴雨径流对新安江入库总磷负荷量的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(4): 887-895. LI H Y, WANG Y C, SHAN L, et al. Effect of storm runoff on the total phosphorus load of Xin'an River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 887-895.
- [5] ONGLEY E D, ZHANG X L, YU T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [6] 张银辉. SWAT模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005(5): 123-132. ZHANG Y H. Progress in SWAT model and its application[J]. *Progress in Geography*, 2005(5): 123-132.
- [7] 谢晖, 邱嘉丽, 董建玮, 等. HSPF模型在面源污染模拟与管控中的研究进展[J]. 生态学报, 2022(15): 1-16. XIE H, QIU J L, DONG J W, et al. Research progress of HSPF model in non-point source pollution simulation and management[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022(15): 1-16.
- [8] 余倩, 刘超. SWAT模型在灌区中的应用研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(增刊1): 281-284. YU Q, LIU C. Application research progress of SWAT model in irrigated area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(Suppl1): 281-284.
- [9] 赖格英, 吴敦银, 钟业喜, 等. SWAT模型的开发与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 243-251. LAI G Y, WU D Y, ZHONG Y X, et al. Development and application of SWAT model[J]. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(3): 243-251.
- [10] 刘晋, 魏新平, 王军. SWAT模型在密赛流域的应用与比较研究[J]. 水文, 2014, 34(6): 49-54. LIU J, WEI X P, WANG J. Application and comparative study of SWAT model in Misai Basin[J]. *Hydrology*, 2014, 34(6): 49-54.
- [11] 肖豪, 周春辉, 尚艳丽, 等. 基于SWAT与新安江模型的闽江建阳流域径流模拟研究[J]. 水力发电, 2022, 48(10): 19-25. XIAO H, ZHOU C H, SHANG Y L, et al. Simulation of runoff in Jianyang Basin of Minjiang River based on SWAT and Xin'an River model[J]. *Hydropower*, 2022, 48(10): 19-25.
- [12] 朱炬明, 周买春. 不同水文模型在双桥流域的应用比较[J]. 人民黄河, 2016, 38(4): 22-26. ZHU J M, ZHOU M C. Application com-

- parison of different hydrological models in Shuangqiao Basin[J]. *Yellow River*, 2016, 38(4):22-26.
- [13] 李兆富, 刘红玉, 李燕. HSPF水文水质模型应用研究综述[J]. *环境科学*, 2012, 33(7):2217-2223. LI Z F, LIU H Y, LI Y. Review on the application of HSPF hydrologic and water quality model[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7):2217-2223.
- [14] XIE H, LIAN Y Q. Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 481:119-131.
- [15] 李泽利, 吕志峰, 赵越, 等. 新安江上游流域SWAT模型的构建及适用性评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(1):25-31. LI Z L, LV Z F, ZHAO Y, et al. Construction and applicability evaluation of SWAT model in the upper reaches of Xin'an River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(1):25-31.
- [16] 马广文, 王圣瑞, 王业耀, 等. 鄱阳湖流域面源污染负荷模拟与氮和磷时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5):1285-1291. MA G W, WANG S R, WANG Y Y, et al. Simulation of non-point source pollution load and spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus in Poyang Lake Basin[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 35(5):1285-1291.
- [17] 童晓霞, 崔远来, 赵树君, 等. 基于改进的SWAT模型农业面源污染变化规律数值模拟:以赣抚平原灌区芳溪湖小流域为例[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(3):89-94. TONG X X, CUI Y L, ZHAO S J, et al. Numerical simulation of agricultural non-point source pollution based on improved SWAT model: a case study of Fangxi Lake Watershed in Ganfu Plain[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(3):89-94.
- [18] 李健, 王辉, 黄勇, 等. 柴达木盆地格尔木河流域生态需水量初步估算探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 219(1):71-75. LI J, WANG H, HUANG Y, et al. Preliminary estimation of ecological water requirement in Golmu River Basin, Qaidam Basin[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2008, 219(1):71-75.
- [19] 薛天柱, 马灿, 魏国孝, 等. 甘肃梨园河流域SWAT径流模拟与预报[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(4):61-65. XUE T Z, MA C, WEI G X, et al. Simulation and prediction of SWAT runoff in Liyuan River Basin, Gansu Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2011, 22(4):61-65.
- [20] 王维刚, 史海滨, 李仙岳, 等. 基于改进SWAT模型的灌溉-施肥-耕作对乌梁素海流域营养物负荷及作物产量的影响[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(5):1505-1523. WANG W G, SHI H B, LI X Y, et al. Effects of irrigation, fertilization and tillage on nutrient load and crop yield in WuliangSuhai Watershed based on improved SWAT model[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(5):1505-1523.
- [21] 杨军军, 高小红, 李其江, 等. 湟水流域SWAT模型构建及参数不确定性分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1):82-88, 93. YANG J J, GAO X H, LI Q J, et al. SWAT model construction and parameter uncertainty analysis in Huangshui Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1):82-88, 93.
- [22] 周帅, 王义民, 郭爱军, 等. SWAT模型参数不确定性对黄河上游径流模拟的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(8):144-154. ZHOU S, WANG Y M, GUO A J, et al. Effect of SWAT model parameter uncertainty on runoff simulation of upper Yellow River[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(8):144-154.
- [23] 陈亮, 杨阳, 宋伟, 等. 基于时空遥感影像融合的河套灌区作物提取[J]. *人民黄河*, 2022, 44(12):154-157, 162. CHEN L, YANG Y, SONG W, et al. Crop extraction in Hetao Irrigated Area based on spatio-temporal remote sensing image fusion[J]. *Yellow River*, 2022, 44(12):154-157, 162.
- [24] 田志强, 霍铁珍, 韩翠莲, 等. 河套灌区总排干沟氮污染负荷分割与估算[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(3):75-79. TIAN Z Q, HUO Y Z, HAN C L, et al. Nitrogen pollution load segmentation and estimation of total drainage ditch in Hetao Irrigation Area[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 40(3):75-79.
- [25] 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, 2017:22-24. WU Y. Study on non-point source pollution simulation and total pollutant control in Hetao Region of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017:22-24.
- [26] 全栋, 史小红, 赵胜男, 等. 2006—2017年乌梁素海夏季水体营养状态及影响因子[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(5):1259-1267. QUAN D, SHI X H, ZHAO S N, et al. Nutrient status and influencing factors of summer water in WuliangSuhai from 2006 to 2017[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5):1259-1267.
- [27] 朱鹏航, 于瑞宏, 葛铮, 等. 乌梁素海长时序水质变化及其驱动因子[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(3):546-553. ZHU P H, YU R H, GE Z, et al. Long-term water quality changes and driving factors in Wuliangsu Hai[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(3):546-553.
- [28] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1):66-74. DU J, YANG P L, LI Y K, et al. Effects of different irrigation periods on nitrogen migration and non-point source pollution in farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1):66-74.
- [29] 王维刚, 史海滨, 李仙岳, 等. 遥感订正作物种植结构数据对提高灌区SWAT模型精度的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17):158-166. WANG W G, SHI H B, LI X Y, et al. Effects of modified crop structure data on the accuracy of SWAT model in irrigated area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(17):158-166.
- [30] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5):1-11. YANG F, YANG S Q, ZHU Y Q, et al. Livestock production and nitrogen pollution load of cultivated land in China in recent 30 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5):1-11.
- [31] 王爽, 孙磊, 金梁, 等. 黑龙江省畜禽养殖量时空分布特征及耕地污染负荷分析[J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(12):38-47, 64. WANG S, SUN L, JIN L, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of livestock and poultry production and pollution load analysis of cultivated land in Heilongjiang Province[J]. *Journal of North-*

- east Agricultural University, 2016, 47(12):38-47, 64.
- [32] 巴彦淖尔市统计局. 巴彦淖尔市统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2011. Bayannur City Statistics Bureau. Bayannur statistical yearbook[M]. Beijing:China Statistics Press, 2011.
- [33] 生态环境部. 排放源统计调查产排污核算方法和系数手册[R]. 北京:生态环境部, 2021. Ministry of Ecology and Environment. Handbook of accounting methods and coefficients of pollutant discharge from statistical investigation of emission sources[M]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2021.
- [34] 李燕, 李恒鹏. 太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响[J]. 环境科学, 2008(5):1319-1324. LI Y, LI H P. Influence of underlying surface factors on the output intensity of non-point source pollutants in the upper reaches of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2008(5):1319-1324.
- [35] 钟晶晶, 刘茂松, 王玉, 等. 太湖流域河流与湖泊间主要水质指标的空间关联特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8):2176-2182. ZHONG J J, LIU M S, WANG Y, et al. Spatial correlation of main water quality indexes between rivers and lakes in Taihu Basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(8):2176-2182.
- [36] 冯雪娇, 林晨, 熊俊峰, 等. 不同来源的非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响:以巢湖流域为例[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1):64-75. FENG X J, LIN C, XIONG J F, et al. Effects of different sources of non-point source pollution on nitrogen and phosphorus concentrations in lakes: a case study of Chaohu Lake Basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1):64-75.
- [37] 刘诗梦, 杨晶, 白美兰. 气候变化对内蒙古“一湖两海”面积的影响[J]. 内蒙古科技与经济, 2020, 465(23):68-69, 76. LIU S M, YANG J, BAI M L. The impact of climate change on the area of "one lake and two seas" in Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Science & Technology and Economy*, 2020, 465(23):68-69, 76.
- [38] 黄佳聪, 张京, 季雨来, 等. 太湖流域平原农业面源污染模拟与管控的思考[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11):2365-2370. HUANG J C, ZHANG J, JI Y L, et al. Consideration on simulation and control of agricultural non-point source pollution in Taihu Lake Basin Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11):2365-2370.
- [39] 武升, 张俊森, 管飞, 等. 安徽省巢湖流域众兴水库小流域农业面源污染调查与评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2):198-203. WU S, ZHANG J S, GUAN F, et al. Investigation and evaluation of agricultural non-point source pollution in small watershed of Zhongxing Reservoir, Chaohu Lake Basin, Anhui Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2):198-203.
- [40] 徐伟朴, 陈同斌, 刘俊良, 等. 规模化畜禽养殖对环境的污染及防治策略[J]. 环境科学, 2004, 25(增刊1):105-108. XU W P, CHEN T B, LIU J L, et al. Environmental pollution and control strategies of large-scale livestock and poultry breeding[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(Suppl1):105-108.
- [41] 罗永霞, 高波, 颜晓元. 太湖地区农业源对水体氮污染的贡献:以宜溧河流为例[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12):2318-2326. LUO Y X, GAO B, YAN X Y. Contribution of agricultural sources to water nitrogen pollution in Taihu Lake: a case study of Yili River[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2015, 34(12):2318-2326.
- [42] 王文林, 胡孟春, 唐晓燕. 太湖流域农村生活污水产排污系数测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6):616-621. WANG W L, HU M C, TANG X Y. Estimation of production and discharge coefficient of rural domestic sewage in Taihu Basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6):616-621.
- [43] 王立萍, 娄山崇, 孙秀玲, 等. 尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1):26-35. WANG L P, LOU S C, SUN X L, et al. Sources and characteristics of typical non-point source pollution in small watershed of Nishan Reservoir[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1):26-35.
- [44] 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, 25(2):311-319. GAO D, CHEN T B, LIU B, et al. Risk and control strategy of fecal pollution in livestock and poultry breeding[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2):311-319.
- [45] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1168-1176. WU H W, SUN X Q, LIANG B W, et al. Current situation, treatment and resource utilization of livestock and poultry manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6):1168-1176.
- [46] 赵永宏, 邓祥征, 鲁奇. 乌梁素海流域种-养系统氮素收支及其对当地环境的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5):442-447. ZHAO Y H, DENG X Z, LU Q. Nitrogen budget and its impact on local environment in species-nutrient system of Wuliangsuhei watershed[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(5):442-447.
- [47] 马惠茹. 河套灌区草牧业发展与盐碱地生态治理现状调查[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(2):60-63. MA H R. Investigation on the development of grassland husbandry and ecological management of saline-alkali land in Hetao Irrigation Area[J]. *Acta Ecologica Sinica of Livestock*, 2020, 41(2):60-63.
- [48] 李怀正, 金伟, 张文灿, 等. 我国农村生活污水综合治理研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5):154-160. LI H Z, JIN W, ZHANG W C, et al. Study on comprehensive treatment of domestic sewage in rural China[J]. *Engineering Science in China*, 2022, 24(5):154-160.

(责任编辑:叶飞)