

滦河流域承德市非点源污染遥感模型评估分析

冯爱萍, 郝新, 罗仪宁, 王雪蕾, 李宣瑾, 黄莉

引用本文:

冯爱萍, 郝新, 罗仪宁, 王雪蕾, 李宣瑾, 黄莉. 滦河流域承德市非点源污染遥感模型评估分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2417-2427.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0462>

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>

资江尾间集水区景观格局与非点源污染过程关系研究

贾玉雪, 帅红, 韩龙飞

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 833-843 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1107>

分布式水土流失型面源污染模型初探

朱凯航, 陈磊, 王怡雯, 刘国王辰, 颜小曼, 郭晨茜, 张亮, 沈珍瑶

农业环境科学学报. 2022, 41(11): 2382-2394 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0676>

同位素示踪解析北澄子河流域硝态氮污染贡献

高月香, 李想, 高田田, 张毅敏, 陈婷, 张志伟

农业环境科学学报. 2022, 41(10): 2269-2276 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0205>

磷酸铵镁堆肥产品养分释放特性及其肥效研究

李丹阳, 元传仁, 卫亚楠, 李国学

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2066-2073 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0186>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

冯爱萍, 郝新, 罗仪宁, 等. 滦河流域承德市非点源污染遥感模型评估分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2417-2427.

FENG A P, HAO X, LUO Y N, et al. Evaluation and analysis of non-point source pollution in Chengde City, Luanhe River Basin using a remote sensing model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2417-2427.



开放科学 OSID

滦河流域承德市非点源污染遥感模型评估分析

冯爱萍¹, 郝新², 罗仪宁³, 王雪蕾^{1*}, 李宣瑾⁴, 黄莉¹

(1. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094; 2. 北京师范大学, 北京 100875; 3. 陕西省环境监测中心站, 西安 710054; 4. 生态环境部对外合作与交流中心, 北京 100035)

摘 要:本研究采用遥感分布式非点源污染评估模型(DPeRS),对滦河流域承德市非点源污染负荷的空间分布特征和污染来源进行遥感像元尺度评估分析,进一步识别非点源污染优控单元,并探讨分析了非点源污染贡献率及影响因子。结果表明:污染量上,2019年滦河流域承德市总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)和化学需氧量(COD_{Cr})非点源污染排放负荷分别为0.12、0.014、0.06 t·km⁻²和0.05 t·km⁻²,入河量分别为119.6、7.8、70.3 t和49.8 t;污染类型上,滦河流域承德市氮型(TN和NH₄⁺-N)非点源污染的主要来源是农田径流,TP主要是来自农田径流和水土流失,COD_{Cr}主要污染来源是畜禽养殖;空间分布上,滦河流域承德市非点源污染高负荷区主要分布在流域的中部和南部地区,TN和NH₄⁺-N的非点源污染优控单元面积占比均达到65%以上,而TP为整个区域需防控的非点源污染指标。降水量与氮磷非点源污染入河负荷相关性较好,丰水期TN和TP非点源污染对河流中氮磷污染的贡献率分别为33%和50%;控制单元内耕地和林地面积占比与水土流失型氮磷非点源污染排放负荷的决定系数均超过0.5。因此,重点应从源头上防范丰水期非点源污染排放,建议进一步加强水土保持工作,以减少林草天然源水土流失引发的非点源污染排放,同时也应加强农田养管理以减少养分流失。

关键词:非点源污染;DPeRS模型;遥感;滦河流域;承德市

中图分类号:X52;X87 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)11-2417-11 doi:10.11654/jaes.2022-0462

Evaluation and analysis of non-point source pollution in Chengde City, Luanhe River Basin using a remote sensing model

FENG Aiping¹, HAO Xin², LUO Yining³, WANG Xuelei^{1*}, LI Xuanjin⁴, HUANG Li¹

(1. Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Shaanxi Environmental Monitoring Center, Xi'an 710054, China; 4. Foreign Cooperation and Exchange Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035, China)

Abstract: In this study, a remote sensing distributed non-point source pollution assessment model was used to evaluate and analyze the spatial distribution characteristics of the non-point source pollution load and pollution sources in Chengde City of the Luanhe River Basin, using a remote sensing pixel scale. Further, the priority control unit of non-point source pollution was identified, and the contribution rate and influencing factors of non-point source pollution were analyzed. The results showed that, in 2019, the non-point source pollution discharge loads of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH₄⁺-N), and chemical oxygen demand (COD_{Cr}) were 0.12 t·km⁻², 0.014 t·km⁻², 0.06 t·km⁻², and 0.05 t·km⁻², respectively, with the amount of river entry being 119.6 t, 7.8 t, 70.3 t, and 49.8 t, respectively. Farmland runoff was the most important source of TN and NH₄⁺-N non-point source pollution in Chengde City. TP non-point

收稿日期:2022-05-07 录用日期:2022-06-29

作者简介:冯爱萍(1988—),女,山西晋中人,硕士,工程师,主要从事流域面源污染模拟研究。E-mail:fengaiping1108@126.com

*通信作者:王雪蕾 E-mail:wslbnu@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFE0102300);国家自然科学基金项目(41871346);全球环境基金水资源与水环境综合管理主流化项目(P145897)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2021YFE0102300); The National Natural Science Foundation of China (41871346); GEF Mainstreaming Integrated Water and Environment Management Project (P145897)

source pollution mainly came from farmland runoff and soil erosion. For the COD_{Cr} index, livestock was the primary source of non-point source pollution. Non-point source pollution was relatively serious in the central and southern areas of Chengde City. The optimal control unit area accounted for more than 65% of TN and NH_4^+-N non-point source pollution, and the TP was the non-point source pollution index to be controlled in the whole region. There was good correlation between precipitation and the load of nitrogen and phosphorus non-point source pollution entering the river, and the contribution rates of TN and TP non-point source pollution to nitrogen and phosphorus pollution in the river were 33% and 50%, respectively. The determination coefficients of the proportion of cultivated land and woodland in the control unit and the discharge load of soil-erosion-type non-point source pollution of TN and TP were all greater than 0.5. Therefore, non-point source pollution discharge at the source during the wet season should be prevented. These findings suggest that soil and water conservation work should be further strengthened to reduce the non-point source pollution discharge caused by soil erosion in natural sources of forest and grass, and farmland nutrient management should be strengthened to reduce nutrient loss.

Keywords: non-point source pollution; DPeRS model; remote sensing; Luanhe River Basin; Chengde City

氮、磷是作物生长的必需元素,人类活动对氮、磷的生物地球化学循环产生了巨大变化,直接影响了粮食安全,导致了一系列水环境问题^[1]。粮食安全与水资源是未来全球面临的主要挑战之一,作为一个人口和农业大国,我国面临着更为严峻的水资源和粮食生产压力。在过去几十年中通过扩大农业用地面积和利用肥料提高农田生产力来维持其庞大的人口,农业扩张和施肥增加极大提高了作物产量,确保了我国的粮食安全,但同时也增加了非点源的流失,对水环境造成了一定影响,如水质退化和水生生态系统中的生物多样性丧失等^[2]。

近几十年来,随着点源污染的控制取得了较大进展,非点源污染已成为全球关注的重要问题^[3-4]。非点源污染受到气候、水文、土地利用和耕作管理等诸多因素的影响,传统的非点源污染监测方法只能在较小范围内开展,研究结果也不能较好的推广应用到其他流域^[5-7]。随着计算机技术发展,在非点源污染机理研究的基础上,许多数学模型被开发出来用于预测和量化流域尺度上的非点源污染流失负荷,如 AnnAG-NPS 模型^[8-10]、HSPF 模型^[11]、SWAT 模型^[12-14]等。随着遥感技术的发展,遥感数据应用于非点源污染监测可以进一步提高非点源污染监测评估的精度和准确性。

滦河流域是京津冀地区的重要水源地之一,也是京津冀都市圈最前沿的生态环境屏障,然而随着用水量的增加,废水排放量也相应增加,滦河流域承德市水环境总体上呈恶化趋势,水污染引起的“水质型缺水”,加剧了水资源的短缺,因此,亟需开展滦河流域承德市污染源解析,而非点源污染作为影响水环境质量的重要污染源,引起管理部门的广泛关注。前人的研究多集中在滦河流域水质污染解析^[15-16]、单一指标或单一类型非点源污染分析^[17-18]、水环境治理与保护

及污染防治对策^[19-20]、生态系统健康评价研究^[21]等方面,缺少流域多类型、多指标非点源污染空间分区分类的评估。

本研究从管理需求出发,以滦河流域承德市为研究区,开展不同类型非点源污染的精细化评估,为管理部门开展滦河流域承德市水环境治理提供技术支撑和区域参考。非点源污染遥感分布式估算模型(DPeRS模型)可实现像元尺度多类型、多指标流域非点源污染量的精细化空间评估,因此,本研究采用DPeRS模型对滦河流域承德市农田种植源、畜禽养殖源、农村生活源、城镇生活源和水土流失源5个类型,总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)和化学需氧量(COD_{Cr})4个指标的非点源污染排放负荷和入河负荷进行空间像元尺度评估,利用SWAT模型和排污系数法评估结果进行对比论证,明确了非点源污染量及污染空间分布特征,识别了非点源污染主要类型和优控单元,并探讨分析了非点源污染贡献率及影响因子,为管理部门开展滦河流域承德市非点源污染防治提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取滦河流域承德市作为研究区(图1),对其非点源污染特征进行评估分析。滦河流域发源于巴颜图古尔山麓的小梁山,流域面积 44 750 km²,地理范围 39°10'~42°30'N 和 115°30'~119°15'E。滦河流域承德市集水面积 28 616 km²,占全市总面积的 72%,占滦河流域总面积的 64%。滦河流域承德市属于典型的温带大陆性季风气候,年均气温为 5~12℃,年降水量为 400~700 mm。研究区土地利用类型主要包括耕地、林地和草地,分别占流域面积的 18.8%、

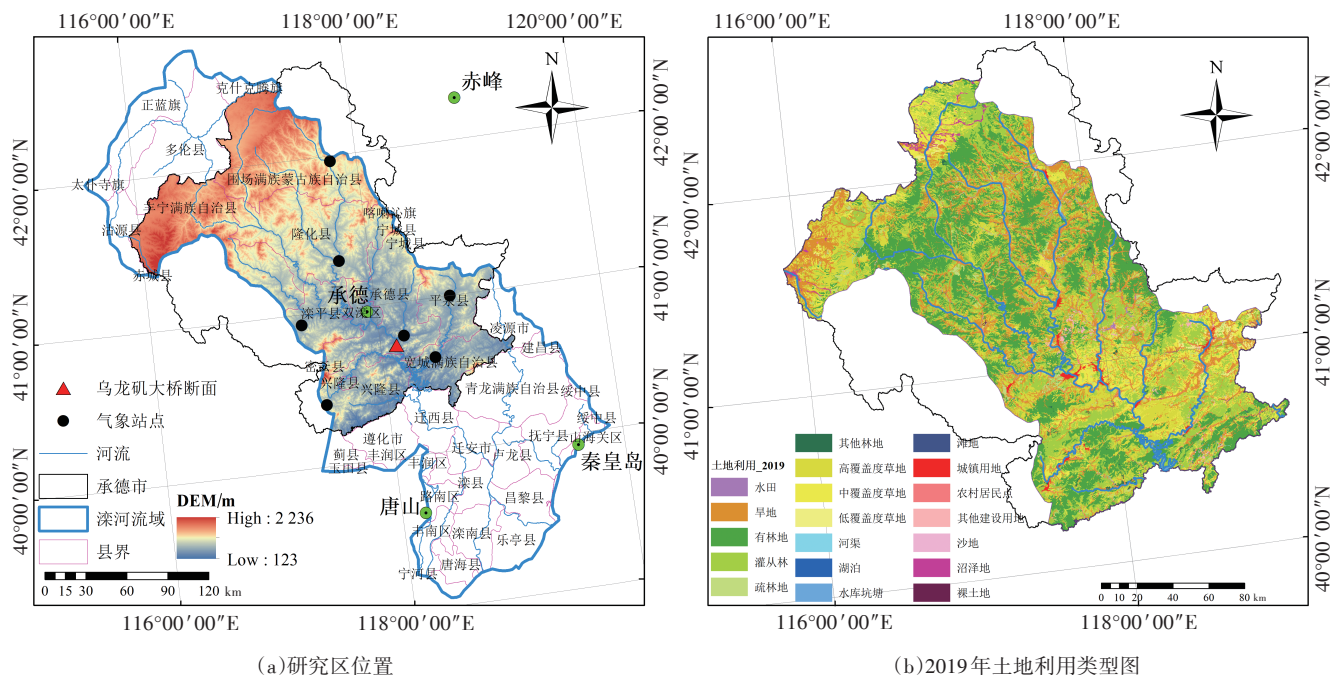


图1 研究区概况

Figure 1 Overview of the study area

48.6%和28.1%,受耕作条件的限制,流域主要以旱田为主,水田仅分布在流域东南部,占比不足流域面积的0.1%。

1.2 非点源污染遥感模型方法

从非点源污染的发生机理和污染特点出发,非点源污染发生的条件主要有动力因素、水文条件和地形特点,降雨径流过程、侵蚀过程和污染物的迁移转化过程是非点源污染形成、影响和作用的主要特征^[22]。从污染源角度,将非点源污染源类型分为农业非点源、城镇生活源和水土流失源三大类,其中,农业非点源污染主要是农业生产的化学物质大量投入、农村生活污水和垃圾的任意排放、畜禽养殖场未经处理粪便的排放和农用等因素导致^[22],因此,进一步将农业非点源污染细分为农田种植、畜禽养殖和农村生活3种类型。

DPeRS模型是基于二元结构原理构建的遥感分布式非点源污染模型,模型算法以遥感数据为驱动,以遥感像元为基本模拟单元,耦合定量遥感模型和生态水文过程模型,实现了流域非点源污染负荷的月尺度空间估算和不同污染源在遥感像元上的空间量化表达,重点评估由降水引起的地表径流型非点源污染,DPeRS模型的技术框架体系和核心算法详见文献[23–24]。DPeRS模型可概括为5种污染类型、2个元素形态和4个模拟指标,污染类型包括农田径流、农村生活、畜禽养殖、城镇生活和水土流失,污染物形态包括溶解态和颗粒态,模拟指标包括TN、TP、NH₄⁺-N

和COD_{Cr}。该模型包含农田氮磷平衡核算、植被覆盖度定量遥感反演、溶解态污染负荷估算、颗粒态污染负荷估算和入河估算5大模块。

1.3 非点源污染遥感模型数据库构建

DPeRS模型的数据主要包括地形数据、气象数据、土壤数据、土地利用数据和植被覆盖度数据及统计数据等(表1),所有数据的空间分辨率均统一转换为30 m的栅格数据。其中,DEM数字高程数据用于研究区坡度和坡长数据的计算^[25];利用薄板样条滑动平均法进行降水量的空间插值^[26];采用最大最小值定量反演算法进行流域植被覆盖度反演^[27];统计数据为2019年滦河流域承德市县域尺度数据,通过输入输出法核算农田氮磷表观平衡量^[28],此外,通过实地采样检测获得研究区部分点位土壤样品和生活垃圾样品的氮磷含量,为模型参数校验提供数据支撑。

1.4 非点源污染优控单元识别方法

研究采用的控制单元为《重点流域水污染防治规划(2016—2020年)》提出的全国1 784个控制单元,其中,滦河流域承德市的控制单元有19个。由于源头治理和过程控制是非点源污染管理和控制的两种重要方式,本研究基于非点源污染排放负荷和入河量两项指标对非点源污染类别进行识别判定,非点源污染优先控制单元筛选方法详见文献[29],非点源污染本底阈值为DPeRS模型评估的2005年、2010年和2015年河北省非点源污染量的平均值,TN、TP、NH₄⁺-N

表1 模型主要数据
Table 1 The main data of model

数据类型 Data type	数据内容 Data content	数据来源 Data source
地形数据	30 m 数字高程数据(DEM)	地理空间数据云平台(www.gscloud.cn)
土壤数据	土壤类型空间分布和土壤属性	中国科学院南京土壤研究所,中国土壤数据库(http://vdb3.soil.csdb.cn)
气象数据	月和年降水量	中国气象数据网(http://data.cma.cn)
土地利用	耕地(水田/旱地)、林地、草地、建设用地、水域等不同类型的分布	https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search
植被覆盖度	MOD13A2的NDVI数据	https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search
统计数据	分县人口数量、畜禽养殖量、耕地面积、化肥施用量、作物产量及播种面积等统计数据	http://tongji.cnki.net/kns55/Navi/NaviDefault.aspx
水文水质数据	2019年乌龙矶大桥断面月度流量和水质监测数据	——

和 COD_{Cr} 四项指标排放负荷的阈值分别为0.29、0.02、 $0.15 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $1.92 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,入河量的阈值分别为34.9、2.1、16.1 t和 $177.9 \text{ t}^{[29]}$ 。

2 结果与分析

2.1 非点源污染排放负荷分布特征

采用DPeRS模型估算的2019年滦河流域承德市的非点源污染排放负荷的空间分布特征如图2所示(负荷分级方法参考文献[30]),2019年滦河流域承德市TN的排放负荷分布范围在 $0 \sim 20.4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,大部分区域TN排放负荷在 $0 \sim 1 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,TN排放负荷较高的区域主要分布在流域中下游距离河流较近的耕地上。 NH_4^+-N 排放负荷主要分布在流域中下游,空间分布特征与TN相似,平均排放负荷为 $0.06 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。与TN相比,2019年滦河流域承德市TP的排放负荷相对较低,变化范围在 $0 \sim 6.5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 之间。与TN的空间分布不同,流域整体TP的排放负荷相对较大,大部分区域TP排放负荷处于 $0.01 \sim 0.05 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 之间。与氮磷相比,滦河流域承德市 COD_{Cr} 污染负荷空间分布较为分散,分布范围在 $0 \sim 55 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 之间。

2.2 非点源污染入河负荷分布特征

本研究将滦河流域承德市划分了68个水文单元,基于研究区水文站实测的径流量、输沙量等数据,分别核算了各水文单元溶解态污染物入河系数(值域范围 $0 \sim 0.19$)和颗粒态污染物入河系数(值域范围 $0 \sim 0.076$),结合2019年滦河流域承德市非点源污染排放负荷,进一步核算了2019年滦河流域承德市非点源污染入河负荷(空间分布见图3,负荷分级方法参考文献[30])。与非点源污染排放负荷相比,滦河流域承德市非点源污染的入河负荷相对较小,TN的入河负荷量变化范围为 $0 \sim 1.28 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,而TP的入河负荷为 $0 \sim 0.01 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,且研究区大部分地区TN和TP的入

河负荷小于 $0.01 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $0.0005 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。研究区 COD_{Cr} 的入河负荷也相对较小,变化范围为 $0 \sim 0.4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。研究区非点源污染入河负荷相对较小的原因主要是滦河流域承德市2019年降雨量较少,导致该流域水资源量与其他年相比相对较少,从而降低了非点源污染入河负荷。

2.3 不同类型非点源污染特征

基于滦河流域承德市非点源污染排放负荷空间分布特征,进一步利用DPeRS模型对滦河流域承德市5种类型非点源污染排放量进行空间分类统计(图4)。结果表明,2019年滦河流域承德市TN和 NH_4^+-N 排放量分别为3565.5 t和1792.0 t,农田径流型是滦河流域承德市最主要的氮型非点源污染源,2019年农田径流型TN和 NH_4^+-N 排放量分别为2882.6 t和1788.1 t,分别占流域TN和 NH_4^+-N 总排放量的80.6%和99.8%。2019年滦河流域承德市非点源污染TP排放总量为400.03 t,水土流失是TP首要的污染类型(占比74.2%),其次为农田径流型(28.9%)。 COD_{Cr} 非点源污染类型与氮磷不同,仅包括畜禽养殖型、农村生活型和城镇生活型,其中畜禽养殖型是 COD_{Cr} 的最主要的非点源污染源,约占总排放量的94.5%。

基于滦河流域承德市非点源污染排放负荷空间分布和入河系数估算的滦河流域承德市不同类型非点源污染的入河量分布特征如图4所示。与滦河流域承德市TN和 NH_4^+-N 非点源污染的排放特征一致,农田径流型是5种类型中氮型(TN和 NH_4^+-N)非点源入河量的主要贡献类型,入河量总量分别为111.49 t和70.2 t;滦河流域承德市农田径流型TP的入河量大于水土流失型,两者分别为4.19 t和3.49 t,分别占TP入河总量的53.72%和44.74%;畜禽养殖型仍是 COD_{Cr} 入河量的首要贡献类型,畜禽养殖型年 COD_{Cr} 入河量为47.09 t。

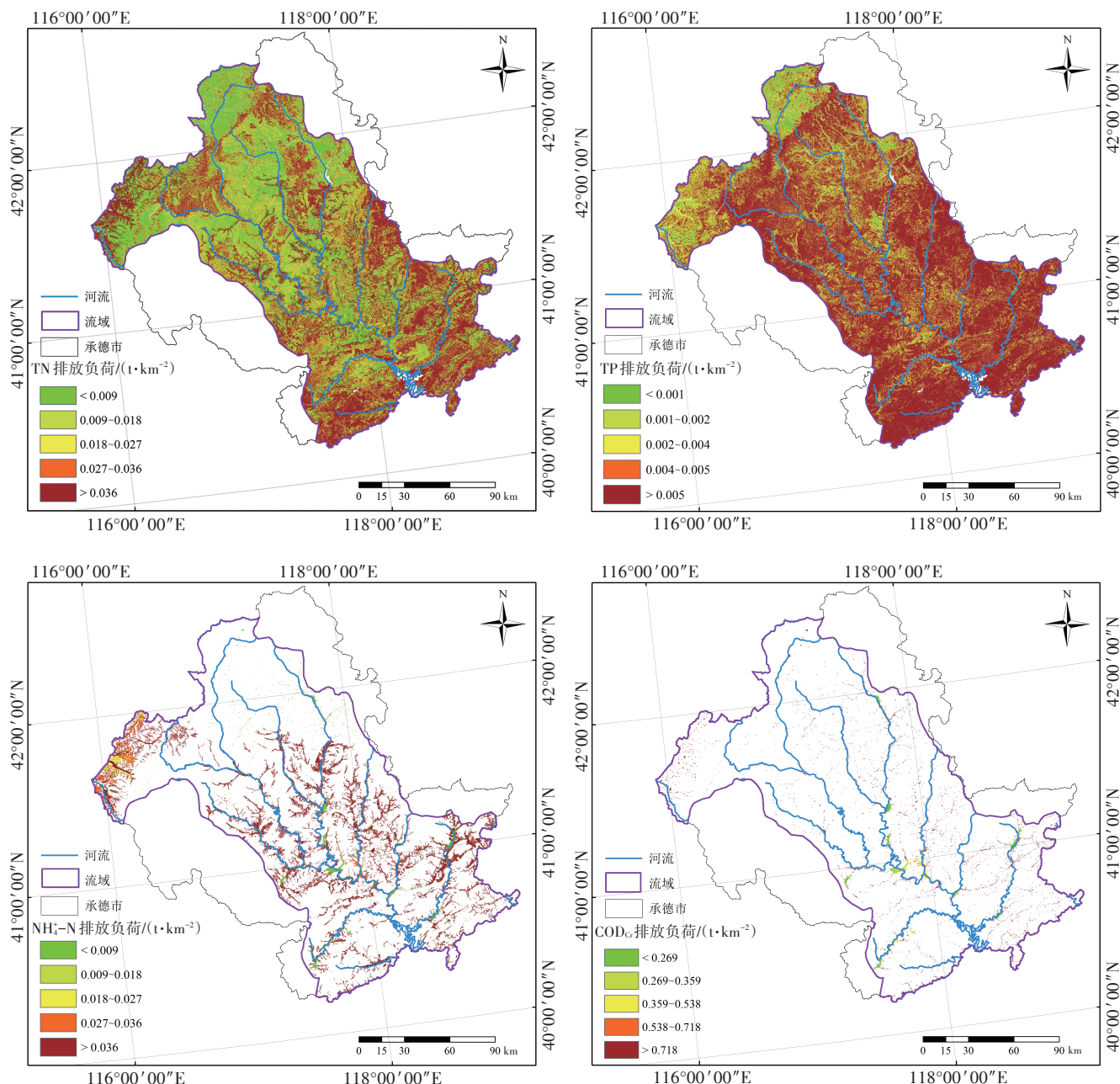


图2 滦河流域承德市非点源污染排放负荷空间分布

Figure 2 Spatial distribution of non-point source pollution discharge loads of Chengde City, Luanhe River Basin

2.4 非点源污染优控单元识别

基于滦河流域承德市非点源污染排放负荷和入河量的空间分布特征,对滦河流域承德市19个控制单元进行非点源污染优控单元识别,4种污染指标非点源污染优先控制单元统计结果如表2所示。滦河流域承德市非点源污染优控指标主要为氮磷型,TN、TP和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的优控单元主要为Ⅱ类源头控制单元,属于Ⅱ类源头控制单元的单元个数分别为12、15、10个。TN、TP和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 非点源污染属于Ⅰ类优控单元

的单元个数分别为3、4、3个,没有Ⅱ类入河过程控制单元,因此滦河流域承德市非点源污染要加强源头控制,4种污染指标非点源污染优先控制单元的空间的分布见图5。在滦河流域承德市19个控制单元中,4号、5号和6号控制单元是TN、TP和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 三种污染物的Ⅰ类优控单元。TN和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 非点源污染的优控面积分别占研究区的68.47%和65.41%,而TP的非点源污染的优控面积占研究区的100%。空间分布上,Ⅰ类优控单元主要分布在滦河流域承德市西南部和东

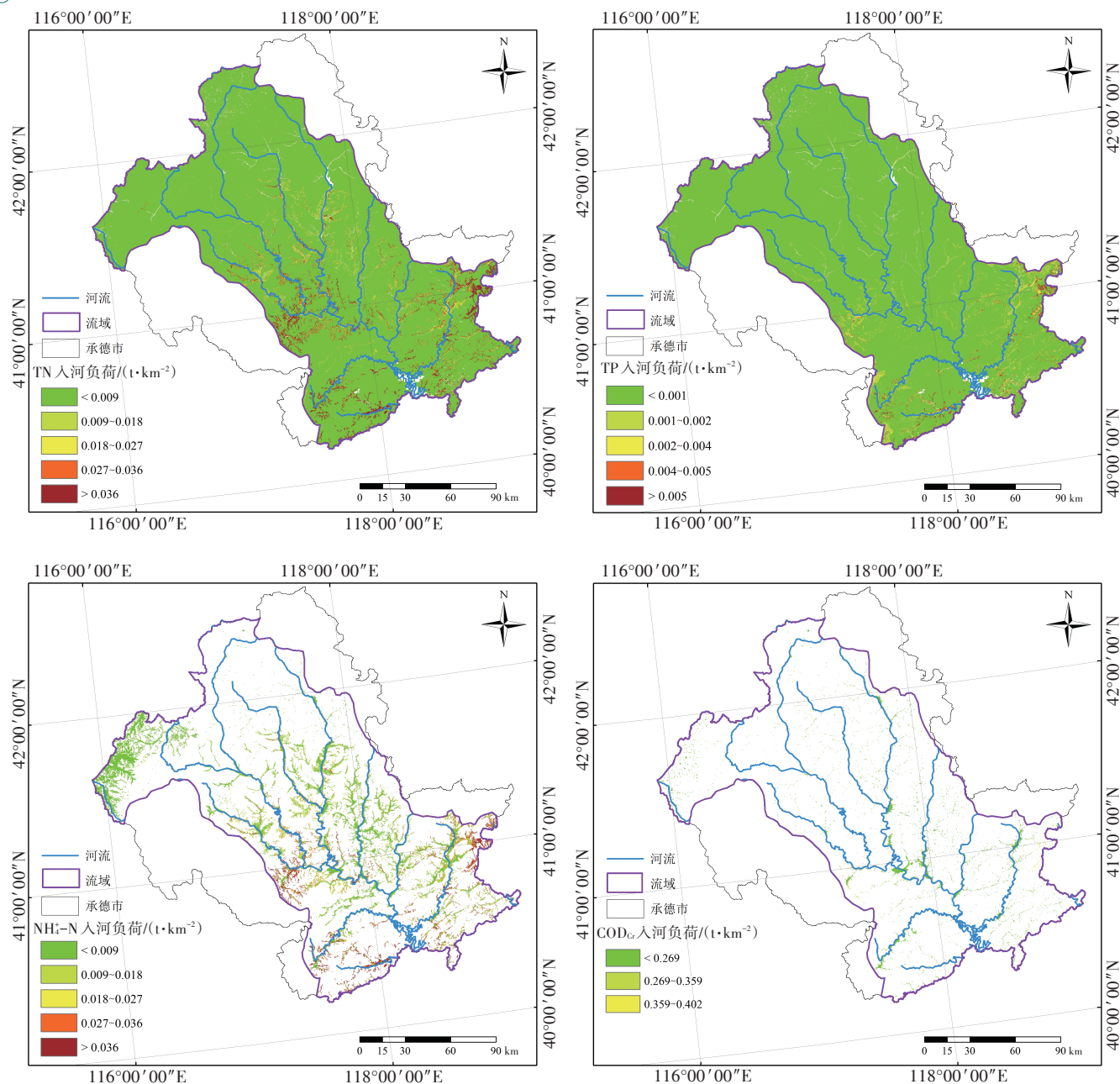


图3 滦河流域承德市非点源污染入河负荷空间分布

Figure 3 Spatial distribution of non-point source pollution inflow loads of Chengde City, Luanhe River Basin

南部的部分地区。

2.5 非点源污染遥感模型的验证

研究采用SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型非点源污染氮磷的输出结果与DPeRS模型模拟结果进行验证。SWAT模型属于半分布式水文模型,模型将子流域内的地形特征、土地覆盖特征、土壤类型和坡度等级划分等信息重叠后获得模型的最小计算单元——水文响应单元(Hydrology Respond Unit, HRU),HRU是计算各子流域的污染物向河道内的迁

移转化过程的基本单元。SWAT模型的构建和率定详见文献[31-32],通过对比SWAT模型HRU尺度污染物的输出通量和DPeRS模型模拟的污染物入河量,验证DPeRS模型模拟结果的准确性。

滦河流域承德市共划分了2 674个HRU,以HUR为基本单元,对DPeRS模型与SWAT模型的模拟结果进行对比分析,结果表明(图6),两种模型TN和TP模拟结果拟合度很好(R^2 分别为0.83和0.78),且两种模型输出结果的变化区间相似,表明DPeRS模型的模

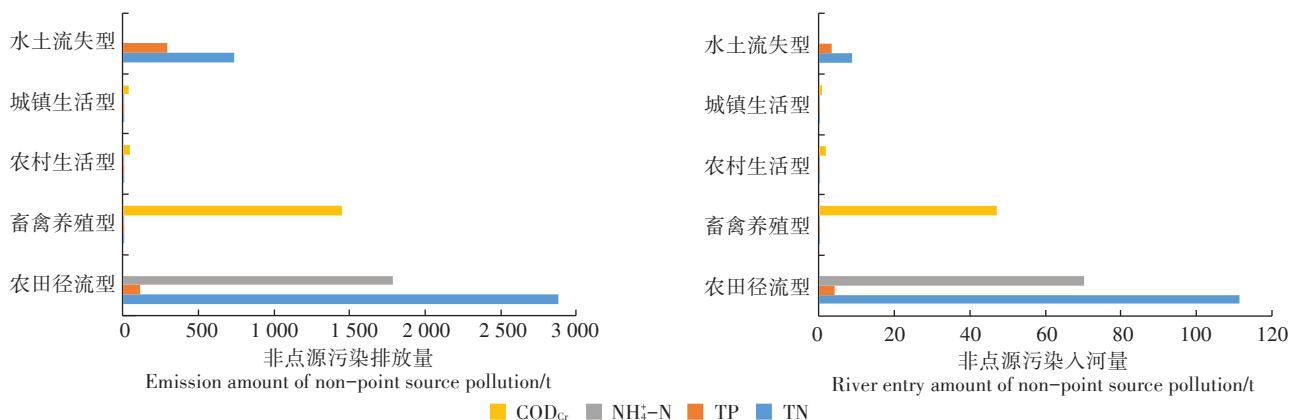


图4 滦河流域承德市非点源污染量

Figure 4 Pollution amount of non-point source pollution of Chengde City in Luanhe River Basin

表2 滦河流域承德市非点源污染优控单元信息统计表

Table 2 Information of the priority control unit of non-point source pollution of Chengde City in Luanhe River Basin

指标 Index	非点源污染优控单元个数 Number of the priority control unit of non-point source pollution			非点源污染优控面积占比 Area percentage of the priority control unit of non-point source pollution/%
	I类源头	II类源头	II类入河过程	
TN	3	12	0	68.47
TP	4	15	0	100.00
NH ₄ ⁺ -N	3	10	0	65.41
COD _{Cr}	0	0	0	0

拟结果是可接受的,满足研究需要。

3 讨论

3.1 DPeRS的适用性及滦河流域非点源污染对比

对比国内外其他非点源污染模拟模型,DPeRS模型在模型结构、运行条件和模拟指标等方面具有较大的管理应用优势。该模型以遥感像元为基本单元,与SWAT模型提出的水文响应单元相比,在保证模拟精度的前提下极大提高了非点源污染模拟的空间分辨率^[23]。同时,DPeRS模型耦合了定量遥感模型,弥补了无资料或缺资料地区模型估算的不足。该模型的参数设置为开放模式,可根据参数丰富度进行重新构架,还可根据管理需求开展多层次的非点源污染监测与评估。模拟指标为TN、TP、NH₄⁺-N和COD_{Cr},与管理部门关注的指标一致。此外,DPeRS模型实现了遥感像元尺度分类型、分指标非点源污染负荷的空间可视化,可直观提供非点源污染的关键源区,与传统总量减排核算方法相比,实现了由“点”到“面”的突破,为科学制定非点源污染防治措施提供技术支撑。

WANG等^[23]采用DPeRS模型对新安江流域非点源污染量进行模拟分析,并将模拟结果与黄山市污染源调查结果进行验证,结果表明,TN、TP、NH₄⁺-N和COD_{Cr} 4个指标的平均模拟精度超过0.7。

张令能^[18]利用SPARROW模型对滦河流域非点源总氮污染进行模拟,结果表明流域上游产污量较小,污染较严重区域在中下游,局部区域污染严重,滦河流域承德市位于滦河流域的中上游地区,这与本研究结果一致。李越^[16]利用排污系数法对2018年滦河流域(承德市境内)上游非点源污染负荷进行估算,得出滦河流域(承德市境内)上游的农村生活源TP排放量为0.134 t,畜禽养殖业COD_{Cr}排放量为213.22 t,种植业NH₄⁺-N和TP排放量分别为485.29 t和28.13 t;DPeRS模型模拟的2019年滦河流域承德市农村生活型TP排放量为4.77 t,畜禽养殖型COD_{Cr}排放量为1 447.67 t,农田径流型NH₄⁺-N和TP排放量分别为1 788.06 t和115.73 t。滦河流域(承德市境内)上游为滦河流域承德市的一部分,对比发现,排放量数值在数量级上是可接受的,这与模型方法、数据源、模拟时间等因素有关。

3.2 非点源污染贡献

基于滦河流域承德市非点源污染入河量和地面实测的断面污染通量,可分析非点源污染对水体污染的贡献量。本研究中,主要以乌龙矶大桥断面的地面实测数据,结合DPeRS模型模拟的该断面所在汇水区非点源污染入河量,核算出TN和TP非点源污染对河流中氮磷污染的贡献。乌龙矶大桥断面(图1a)位于滦河流域承德市滦河干流下游,其控制的汇水面积占研究区总面积的93%。经核算,由非点源污染产生的氮磷入河量分别占河流中氮磷污染通量的11%和34%(图7),与TN相比,非点源TP对水体中磷的贡献占比更

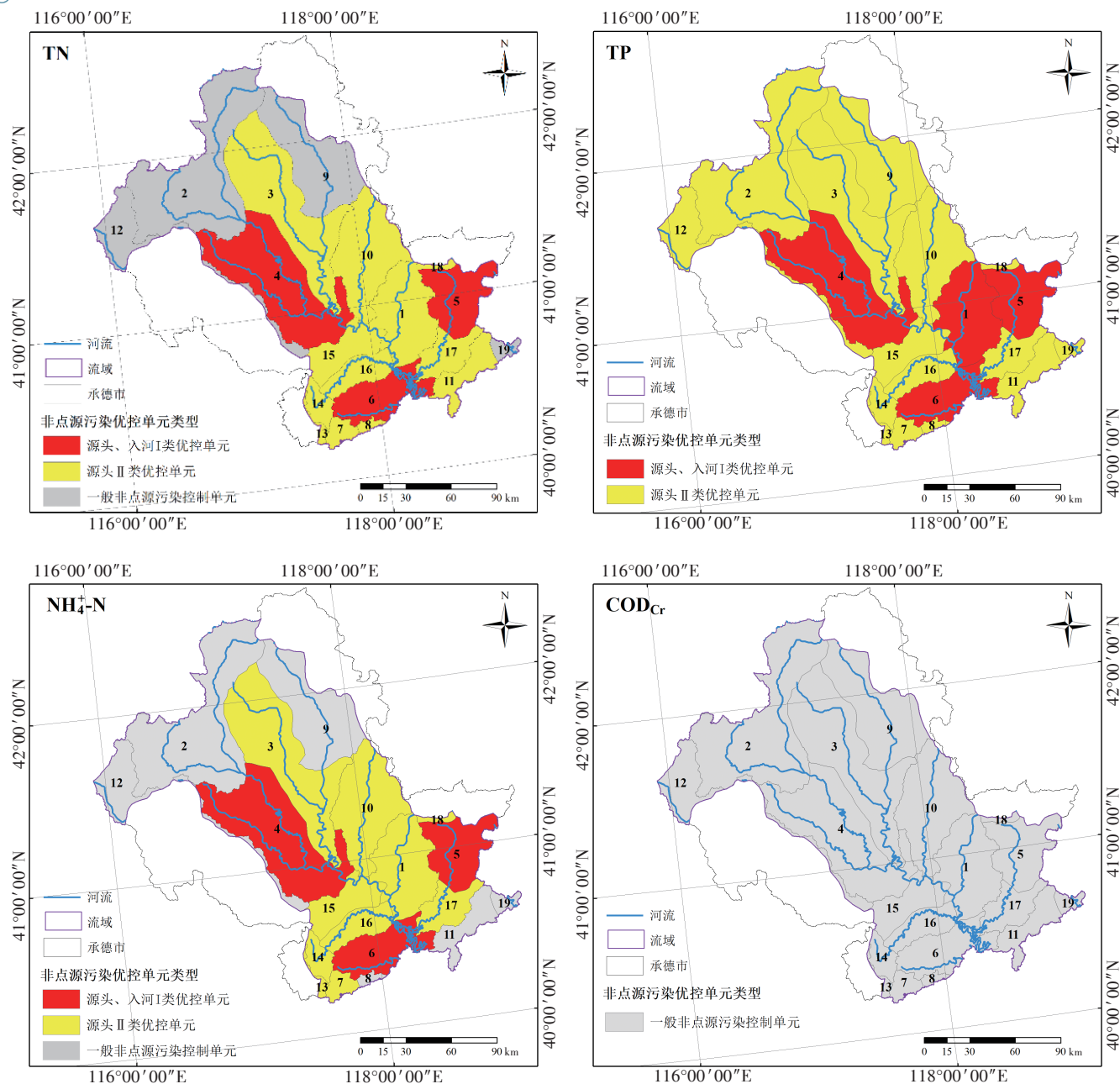


图5 滦河流域承德市非点源污染优先控制单元空间分布

Figure 5 Spatial distribution of the priority control unit of non-point source pollution of Chengde City in Luanhe River Basin

大,这与TP流失主要受农业活动和水土流失影响有关。

滦河流域承德市丰水期为6—8月,枯水期为12月至次年3月,基于DPeRS模型核算的乌龙矶大桥断面所在汇水区非点源污染月度TN和TP入河量,结合该断面地面实测的断面污染通量,分别核算丰水期和枯水期TN和TP非点源污染对河流中氮磷污染的贡献率,结果表明,丰水期和枯水期非点源污染的贡献率存在很大差别,丰水期TN和TP非点源污染的贡献率分别为33%和50%,而枯水期非点源污染的贡献率

均小于1%,这与非点源污染的发生特征密切相关,污染物经雨水冲刷通过径流过程而汇入受纳水体,造成水体污染,因此丰水期非点源污染对水体污染的贡献率更大,重点应从源头上防范丰水期非点源污染排放。

3.3 非点源污染影响因子

降雨径流是农业非点源污染的主要驱动力,是非点源污染负荷产生的动力和输移条件的载体,下垫面地表污染物类型及其积累数量是非点源污染的物质基础,这两个条件随时空差异具有显著的随机性,

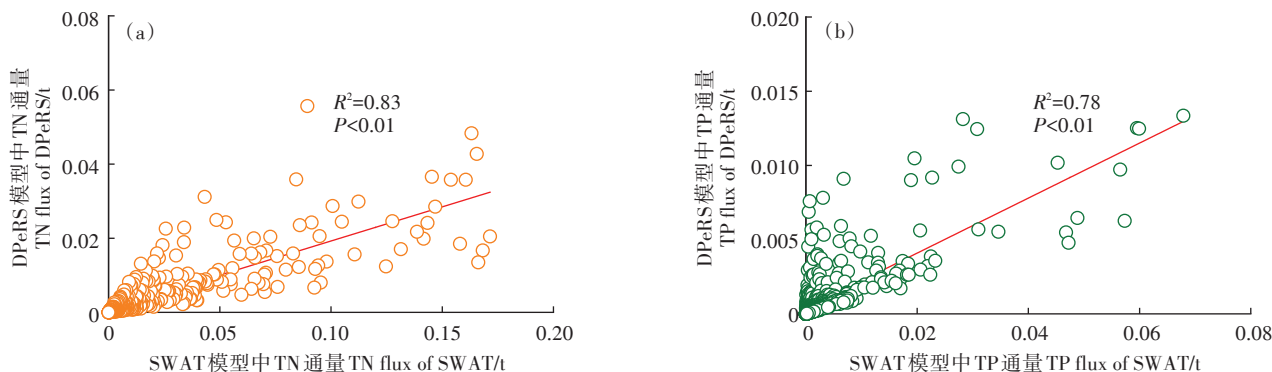


图6 SWAT模型与DPeRS模型空间验证结果

Figure 6 Spatial verification results of SWAT model and DPeRS model

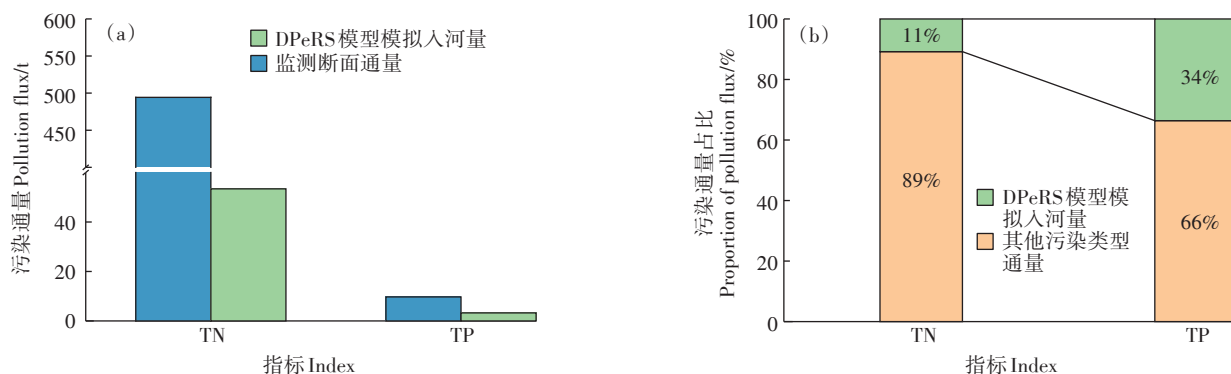


图7 非点源污染贡献分析

Figure 7 Contribution analysis of non-point source pollution

常使非点源污染负荷变化范围超过几个数量级^[33]。因此,基于研究区19个控制单元,分析了降水量和土地利用因子与滦河流域承德市氮磷非点源污染负荷的相关性,结果表明,降水作为非点源污染产生的驱动因子之一,降水量与TN和TP非点源污染排放负荷的决定系数分别达到0.42和0.79(图8);研究区土地利用以耕地、林地和草地为主,面积占比达到95%以上,控制单元内耕地和林地面积占比与水土流失型氮磷非点源污染排放负荷的决定系数均超过0.5,草地面积占比与水土流失型氮磷非点源污染排放负荷的相关性相对较低($R^2>0.3$),详见图9。由此可见,加强区域水土保持工作,减少林草天然源水土流失及减少由农田养分流失引发的非点源污染排放,是区域污染防控的重点。

4 结论

(1)基于DPeRS模型的非点源污染模拟结果表明,2019年滦河流域承德市TN、TP、 NH_4^+-N 和 COD_Cr 非点源污染排放负荷分别为0.12、0.014、0.06 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ 和0.05 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$,排放量分别为3 565.5、400.3、1 792.0 t和

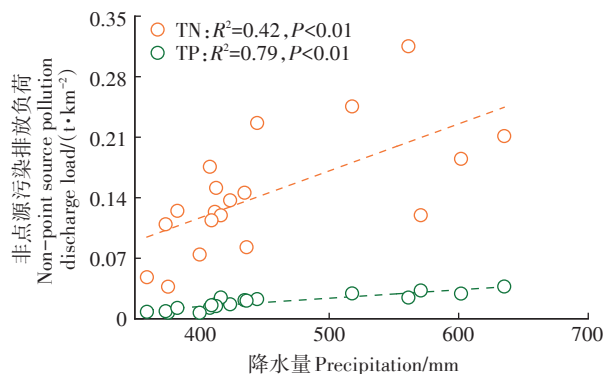


图8 滦河流域承德市降水量与非点源污染排放负荷的相关性分析图

Figure 8 Correlation analysis chart of precipitation and non-point source pollution discharge load in Chengde City of Luanhe River Basin

1 531.6 t,入河量分别为119.6、7.8、70.3 t和49.8 t。滦河流域承德市氮型(TN和 NH_4^+-N)非点源的主要来源是农田径流型,TP非点源污染主要来源是农田径流和水土流失, COD_Cr 非点源污染的主要污染来源是畜禽养殖。

(2)滦河流域承德市非点源污染负荷相对较高的

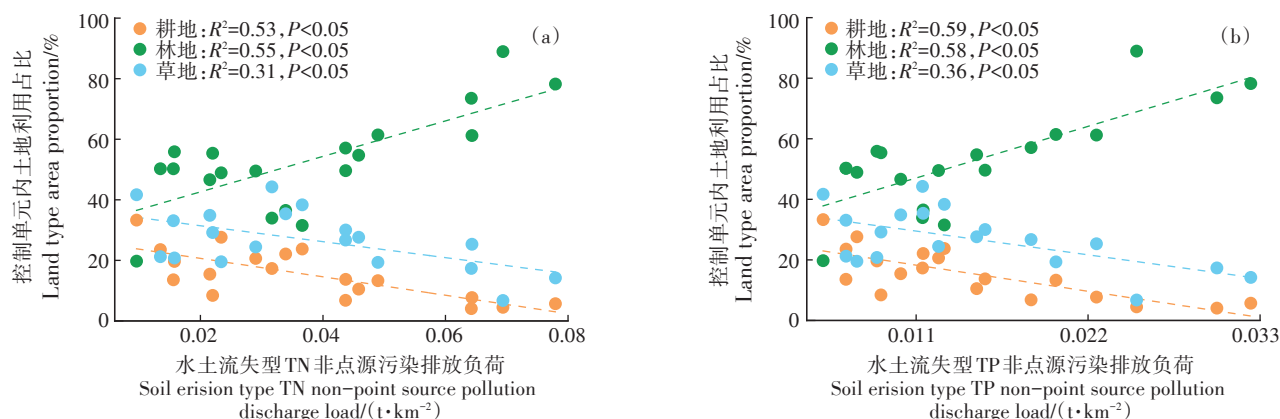


图9 滦河流域承德市地类面积占比与水土流失型非点源污染排放负荷的相关性分析图

Figure 9 Correlation analysis chart of land type area proportion and soil erosion type non-point source pollution discharge load in Chengde City of Luanhe River Basin

区域主要分布在流域中部和南部, TN非点源污染对河流中氮素污染的贡献量相对较小(约占10%), TP非点源对水体中磷的贡献占比较大(约占34%)。降水是非点源污染产生的驱动因子之一, 降水量与氮磷非点源污染负荷的相关性很高, 丰水期和枯水期非点源污染对河流中氮磷污染的贡献率差别很大, 丰水期TN和TP非点源污染的贡献率分别为33%和50%, 而枯水期非点源污染的贡献率均小于1%, 重点应从源头上防范丰水期非点源污染排放。

(3) 滦河流域承德市TN和 NH_4^+-N 非点源污染优控单元的面积占比分别为68.47%和65.41%, 而TP为整个区域需防控的非点源污染指标。滦河流域承德市以林地、草地和耕地为主, 面积占比达到95%以上, 控制单元内耕地和林地面积占比与水土流失型氮磷非点源污染排放负荷的决定系数均超过0.5, 且农田径流和水土流失是滦河流域承德市氮磷非点源污染的主要污染源, 因此, 应加强区域水土保持工作, 以减少林草天然源水土流失引发的非点源污染排放, 同时也应加强农田养管理以减少养分流失。

参考文献:

- [1] LIU X, SHENG H, JIANG S, et al. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(10): 2609–2614.
- [2] HOU Y, MA L, GAO Z L, et al. The driving forces for nitrogen and phosphorus flows in the food chain of China, 1980 to 2010[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 962–971.
- [3] ONGLEY E D, ZHANG X, YU T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159–1168.
- [4] DWIVEDI S, MISHRA S, TRIPATHI R D. Ganga water pollution: A

- potential health threat to inhabitants of Ganga basin[J]. *Environment International*, 2018, 117: 327–338.
- [5] COLBORNE S F, MAGUIRE T J, MAYER B, et al. Water and sediment as sources of phosphate in aquatic ecosystems: The Detroit River and its role in the Laurentian Great Lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1594–1603.
- [6] GREGAR J, PETRU J, NOVOTNA D. Evaluation of the SWAT model as an integrated management tool in the Svihov drinking water supply catchment[J]. *Soil and Water Research*, 2019, 14(2): 76–83.
- [7] LONGYANG Q. Assessing the effects of climate change on water quality of plateau deep-water lake: A study case of Hongfeng Lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1518–1530.
- [8] 王晓利, 姜德娟, 张华. 基于AnnAGNPS模型的胶东半岛大沽河流域非点源污染模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(7): 1379–1387. WANG X L, JIANG D J, ZHANG H. Simulation of non-point source pollution in Dagou Watershed, Jiaodong Peninsula based on AnnAGNPS model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1379–1387.
- [9] 边金云, 王飞儿, 杨佳, 等. 基于AnnAGNPS模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2659–2666. BIAN J Y, WANG F E, YANG J, et al. Simulation of nitrogen and phosphorus loss in Siling Reservoir watershed with AnnAGNPS[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(8): 2659–2666.
- [10] 涂宏志, 侯鹰, 陈卫平. 基于AnnAGNPS模型的苇子沟流域非点源污染模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1345–1352. TU H Z, HOU Y, CHEN W P. Simulation of non-point source pollution in Weizigou watershed with AnnAGNPS model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1345–1352.
- [11] CHANG C L, LI M Y. Predictions of diffuse pollution by the HSPF model and the back-propagation neural network model[J]. *Water Environment Research*, 2017, 8: 732–738.
- [12] 张招招, 程军蕊, 毕军鹏, 等. 甬江流域土地利用方式对面源污染的影响: 基于SWAT模型研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 650–658. ZHANG Z Z, CHENG J R, BI J P, et al. Impact of land use on non-point sources of phosphorus in the Yong River Basin: SWAT model analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,

- 2019,38(3):650-658.
- [13] 王晓燕,秦福来,欧洋,等.基于SWAT模型的流域非点源污染模拟——以密云水库北部流域为例[J].农业环境科学学报,2008,27(3):1098-1105. WANG X Y, QIN F L, OU Y, et al. SWAT-Based simulation on non-point source pollution in the northern watershed Miyun Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1098-1105.
- [14] 陈媛,郭秀锐,程水源,等.基于SWAT模型的三峡库区大流域不同土地利用情景对非点源污染的影响研究[J].农业环境科学学报,2012,31(4):798-806. CHEN Y, GUO X R, CHENG S Y, et al. Research on management of non-point source pollution with land use changing in Three Gorges Reservoir, macro-scale watershed based on SWAT[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):798-806.
- [15] 郭丽峰,郭勇,罗阳,等.季节性Kendall检验法在滦河干流水质分析中的应用[J].水资源保护,2014,30(5):60-67. GUO L F, GUO Y, LUO Y, et al. Application of seasonal Kendall test method to analysis of water quality in main stream of Luanhe River[J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(5):60-67.
- [16] 李越.滦河流域(承德市境内)典型污染物超标原因解析研究[D].邯郸:河北工程大学,2021:91-94. LI Y. Analysis on the reasons for typical pollutants exceeded the water quality standards in Luanhe River Basin(Chengde)[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021:91-94.
- [17] 郝晓东,张怀,周伟,等.承德市滦河流域主要水土流失策源地面源污染分析[J].海河水利,2009(3):29-31. HAO X D, ZHANG H, ZHOU W, et al. Analysis on non-point pollution of main water and soil loss sources in Luanhe Basin, Chengde[J]. *Haihe Water Resources*, 2009(3):29-31.
- [18] 张令能.滦河流域非点源总氮污染的模型模拟[D].南昌:南昌大学,2012:36. ZHANG L N. The simulation of diffuse TN pollution in Luan River watershed[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012:36.
- [19] 林田野.基于滦河流域水环境治理与保护的思考[J].水资源开发与管理,2020(1):14-17. LI T Y. Thinking on water environment management and protection in the Luanhe River Basin[J]. *Water Resources Development and Management*, 2020(1):14-17.
- [20] 刘秀芳,张丽英,孙海林.滦河锡林郭勒盟控制单元水污染防治对策建议[J].环境与发展,2014,26(6):54-56. LIU X F, ZHANG L Y, SUN H L. Countermeasures and suggestions to preventing water pollution of control unit of Luan River in Xilinguole League[J]. *Environment and Development*, 2014, 26(6):54-56.
- [21] 龙笛,张思聪.滦河流域生态系统健康评价研究[J].中国水土保持,2006(3):14-16. LONG D, ZHANG S C. Study and evaluation health of ecosystem of Luanhe River Basin[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2006(3):14-16.
- [22] 李其林,魏朝富,王显军,等.农业面源污染发生条件与污染机理[J].土壤通报,2008,39(1):169-176. LI Q L, WEI C F, WANG X J, et al. Mechanism and condition of agricultural non-point source pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1):169-176.
- [23] WANG X L, WANG Q, WU C Q, et al. A method coupled with remote sensing data to evaluate non-point source pollution in the Xin'anjiang catchment of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 430:132-143.
- [24] 王雪蕾,蔡明勇,钟部卿,等.辽河流域非点源污染空间特征遥感解析[J].环境科学,2013,34(10):3788-3796. WANG X L, CAI M Y, ZHONG B Q, et al. Research on spatial characteristic of non-point source pollution in Liaohe River Basin[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10):3788-3796.
- [25] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110. FU S H, LIU B Y, ZHOU G Y, et al. Calculation tool of topographic factors[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5):105-110.
- [26] 刘志红,LI LINGTAO, TIM R MCVICAR,等.专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用[J].气象,2008,34(2):92-100. LIU Z H, LI L T, TIM R M, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(2):92-100.
- [27] 王洪亮,冯爱萍,高彦华,等.伊犁河流域最大植被覆盖度的时空动态变化[J].环境科学与技术,2018,41(6):161-167. WANG H L, FENG A P, GAO Y H, et al. Temporal-spatial dynamic change on maximum vegetation coverage degree of Ili River Basin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(6):161-167.
- [28] WANG X L, FENG A P, WANG Q, et al. Spatial variability of the nutrient balance and related NPSP risk analysis for agro-ecosystems in China in 2010[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 193:42-52.
- [29] 冯爱萍,吴传庆,王雪蕾,等.海河流域氮磷面源污染空间特征遥感解析[J].中国环境科学,2019,39(7):2999-3008. FENG A P, WU C Q, WANG X L, et al. Spatial character analysis on nitrogen and phosphorus diffuse pollution in Haihe River Basin by remote sensing [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7):2999-3008.
- [30] 冯爱萍,王雪蕾,徐逸,等.基于DPeRS模型的海河流域面源污染潜在风险评估[J].环境科学,2020,41(10):4555-4563. FENG A P, WANG X L, XU Y, et al. Assessment of potential risk of diffuse pollution in Haihe River basin based on DPeRS model[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10):4555-4563.
- [31] 李冲,张璇,吴一帆,等.京津冀生态屏障区景观格局变化及其对水源涵养的影响[J].中国环境科学,2019,9(6):2588-2595. LI C, ZHANG X, WU Y F, et al. Landscape pattern changes of the ecological barrier zone in Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on water conservation[J]. *China Environmental Science*, 2019, 9(6):2588-2595.
- [32] 李冲,张璇,许杨,等.京津冀生态屏障区人类活动对生态安全的影响[J].中国环境科学,2021,41(7):3324-3332. LI C, ZHANG X, XU Y, et al. The impacts of human activities on ecological security in the ecological barrier zone in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(7):3324-3332.
- [33] 柴世伟,裴晓梅,张亚雷,等.农业面源污染及其控制技术研究[J].水土保持学报,2006,20(6):192-195. CHAI S W, PEI X M, ZHANG Y L, et al. Research on agricultural diffuse pollution and controlling technology[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6):192-195.

(责任编辑:叶飞)