

高艳妮,杨彩云,冯朝阳,等. 辽河保护区退耕封育措施消减污染物入河量估算[J]. 环境工程技术学报,2020,10(4):539-544.

GAO Y N, YANG C Y, FENG C Y, et al. Estimation of pollutants into river reduced by measures of returning cropland to enclosure in Liaohe Conservation Area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(4): 539-544.

# 辽河保护区退耕封育措施消减污染物入河量估算

高艳妮<sup>1,2</sup>, 杨彩云<sup>1,3\*</sup>, 冯朝阳<sup>1,2</sup>, 杨春艳<sup>1,2</sup>, 孙倩莹<sup>1,2</sup>

1. 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 中国环境科学研究院

2. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院

3. 贵州师范大学地理与环境科学学院

**摘要** 为了定量评估辽河保护区退耕封育措施在控制面源污染方面的作用,利用高分辨率遥感影像分析了2010—2018年辽河保护区农田面积变化,并基于源强系数法估算了各年农田地表径流污染物入河量。结果显示:2010年辽河保护区河流两岸分布着大量农田,面积约为627.13 km<sup>2</sup>,占辽河保护区总面积的33.55%,农田地表径流COD和NH<sub>3</sub>-N入河量分别为1 864.79和372.96 t/a;2011年随着退耕封育措施的实施,农田面积降为155.63 km<sup>2</sup>,约减少了75.18%,仅零散分布于河流两岸,农田地表径流COD和NH<sub>3</sub>-N入河量减至419.55和83.91 t/a;2012—2018年农田面积和地表径流污染物入河量与2011年基本持平;与2010年相比,2011—2018年退耕封育措施累积消减农田地表径流COD和NH<sub>3</sub>-N入河量分别为11 734.49和2 346.90 t。

**关键词** 辽河保护区;退耕封育;农田;源强系数;污染物入河量

中图分类号:X522 文章编号:1674-991X(2020)04-0539-06 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200028

## Estimation of pollutants into river reduced by measures of returning cropland to enclosure in Liaohe Conservation Area

GAO Yanni<sup>1,2</sup>, YANG Caiyun<sup>1,3\*</sup>, FENG Chaoyang<sup>1,2</sup>, YANG Chunyan<sup>1,2</sup>, SUN Qianying<sup>1,2</sup>

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Ecological Processes and Functions Assessment,

Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3. School of Geographical and Environmental Sciences, Guizhou Normal University

**Abstract** To quantitatively estimate the effect of returning cropland to enclosure on non-point source pollution in Liaohe Conservation Area, the dynamic change of cropland from 2010 to 2018 was analyzed by using high-resolution remote sensing data, and the inflow of pollutants from cropland area surface runoff was estimated by employing the method of source intensity coefficient. The results showed that lots of croplands distributed on both sides of the river in 2010, with an area of about 627.13 km<sup>2</sup>, accounting for 33.55% of the total area. The COD and NH<sub>3</sub>-N inflows from cropland surface runoff were 1 864.79 and 372.96 t/a in 2010, respectively. With the measure of returning cropland to enclosure being taken, the cropland area decreased to 155.63 km<sup>2</sup> in 2011, with the rate about 75.18%, and only scattered on both sides of the river. The COD and NH<sub>3</sub>-N inflows from cropland surface runoff decreased to 419.55 and 83.91 t/a, respectively. From 2012 to 2018, the cropland area and the inflow of surface runoff pollutants were generally consistent with that in 2011. Compared with that in 2010, the measures of returning cropland to enclosure reduced the COD and NH<sub>3</sub>-N inflows from farmland surface runoff by 11 734.49 and 2 346.90 t, respectively,

收稿日期:2020-02-28

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-03);国家重点研发计划项目(2016YFC0500205);国家自然科学基金青年科学基金项目(41501381)

作者简介:高艳妮(1984—),女,博士,主要从事生态资源资产评估研究,gaoyan@craes.org.cn

\*通信作者:杨彩云(1995—),女,硕士,主要从事生态参数遥感反演研究,792519305@qq.com

from 2011 to 2018.

**Key words** Liaohe Conservation Area; returning cropland to enclosure; cropland; source intensity coefficient; pollutant inflow

土地利用是河流生态系统健康和稳定的重要影响因素之一<sup>[1]</sup>,其决定了河流生态系统的结构和功能<sup>[2-4]</sup>,与河流水循环过程<sup>[5]</sup>、物质循环过程<sup>[6]</sup>、水环境质量<sup>[7]</sup>等密切相关。当前,随着人类活动的增强和农业的发展,河流两岸农田、农村建设用地等引起的农业面源污染已成为许多发达国家水环境恶化的主要原因之一,也是我国水体污染的一个主要来源<sup>[8]</sup>。

辽河保护区划定之前,农田是河流两岸的主要土地利用类型。据统计,2007年辽河保护区旱地和水田面积分别占保护区总面积的38.13%和3.68%<sup>[9]</sup>,2009年分别占34.10%和3.00%<sup>[10]</sup>。由于这一时期干流两岸点源污染得到了有效控制,农业面源污染成为辽河主要污染治理对象之一<sup>[11]</sup>,其主要污染形式是农业种植污染<sup>[12]</sup>。有研究表明<sup>[12]</sup>,在辽河流域农田全部种植的情况下,辽河干流面源污染物COD入河量可达9.6万t/a。若辽河干流约413 km<sup>2</sup>河滩地全部退耕还河,将直接减少农业面源污染物COD产生量约0.81万t/a,减少NH<sub>3</sub>-N产生量约0.16万t/a<sup>[11]</sup>。为恢复河流自然生境,遏制农业面源污染对河流水质的影响,进而提升河流水环境质量,辽河保护区划定后对河流两岸采取了农田撂荒和退耕还林还草等措施<sup>[13-14]</sup>。

为定量分析辽河保护区划定以来,退耕封育措施对农田面积、农田类型以及由此引起的农田地表径流污染物入河量的影响,笔者利用高清遥感影像,并结合地面勘察等手段,获取2010—2018年辽河保护区农田空间分布图,分析了不同农田类型的时空动态变化,进而利用源强系数法估算了各年农田地表径流污染物入河量及退耕封育措施实施以来累积消减的入河量,以期为辽河保护区生态保护修复成效评估提供数据支撑。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

辽河保护区于2010年划定,是我国首个河流保护区,主要保护对象为辽河干流水体、河流湿地和珍稀野生动植物。辽河保护区位于辽宁省境内,起始于东西辽河交汇处的铁岭市福德店,途经沈阳市、鞍山市,终止于盘锦市入海口,共涉及14个县(区),全长为538 km,面积为1 869.2 km<sup>2</sup>。辽河保护区所

属气候类型为暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温为4~9℃,平均降水量为450~650 mm,且主要集中在6—9月;地貌类型以平原为主,地势平坦,滩地开阔,河道迂回曲折;生物多样性较为丰富,2016—2017年共监测到约234种植物,约483种动物<sup>[15]</sup>;主要土壤类型为草甸土、潮土和沼泽土。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 农田地表径流污染物入河量估算

采用源强系数法估算农田地表径流污染物入河量,计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} \times S_{ij} \times P_{ij} \times C_{ij} \times F_{ij} \times E \times \lambda_r \quad (1)$$

式中:W为农田地表径流污染物入河量,t/a。 $a_{ij}$ 、 $S_{ij}$ 、 $P_{ij}$ 、 $C_{ij}$ 、 $F_{ij}$ 分别为第*i*类农田第*j*个栅格的坡度、土壤类型、降水量、农田类型、化肥施用量的修正系数,具体数据见表1。 $E$ 为标准农田地表径流的源强系数,t/(hm<sup>2</sup>·a);标准农田是指平原地貌,种植作物为小麦,土壤类型为壤土,化肥施用量为0.38~0.53 t/(hm<sup>2</sup>·a),年降水量为400~800 mm的农田;其COD的源强系数为0.15 t/(hm<sup>2</sup>·a),NH<sub>3</sub>-N为0.03 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[16-17]</sup>。 $\lambda_r$ 为入河系数,取值为0.1<sup>[18]</sup>。

表1 农田地表径流污染物排放量修正系数

Table 1 Correction coefficient of pollutant discharge from cropland surface runoff

修正因子	分级	修正系数	数据来源
坡度/(°)	≤25	1.0~1.2	文献[16-17]
	>25	1.2~1.5	
农田类型	旱地	1.0	文献[18]
	水田	1.5	
	其他	0.7	
土壤类型	壤土	1.0	文献[16-17]
	砂土	1.0~0.8	
	黏土	0.8~0.6	
化肥施用量/ [t/(hm <sup>2</sup> ·a)]	≤0.38	0.8~1.0	文献[16-17]
	0.38~0.53	1.0~1.2	
	>0.53	1.2~1.5	
降水量/(mm/a)	≤400	0.6~1.0	文献[16-17]
	400~800	1.0~1.2	
	>800	1.2~1.5	

辽河保护区主要农作物类型为玉米和水稻,玉米施肥量为 $1.05 \sim 1.65 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,水稻为 $0.75 \sim 1.20 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[19]</sup>,因此,辽河保护区化肥施用量的修正系数取1.3。

### 1.2.2 累积消减农田地表径流污染物入河量估算

为了评价退耕封育措施实施以来辽河保护区累积消减农田地表径流污染物入河量,将2010年污染物入河量与2011—2018年各年入河量分别相减,再计算其累积值。公式如下:

$$W_{\text{sum}} = \sum_{k=2011}^{2018} (W_{2010} - W_k) \quad (2)$$

式中: $W_{\text{sum}}$ 为2011—2018年辽河保护区累积消减农田地表径流污染物入河量,t; $W_{2010}$ 为2010年农田地表径流污染物入河量,t/a; $W_k$ 为第 $k$ 年农田地表径流污染物入河量,t/a。

## 1.3 数据来源与处理

### 1.3.1 农田类型

基于 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 分辨率的Google Earth高清影像,采用面向对象分类和人机交互解译的方法获取2010—2018年辽河保护区农田空间分布图,包括旱地、水田、水浇地3种类型。对于影像难以判断的区域,综合利用《全国第二次土地利用调查数据(2009年)》和野外实地勘查数据进行验证和修改。

### 1.3.2 坡度

利用 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  DEM数据(来源于地理空间数据云)计算辽河保护区河流两岸坡度。

### 1.3.3 土壤类型

利用辽河保护区上游至下游18个采样点的土壤颗粒组成数据,对照国际制土壤质地分级标准<sup>[20]</sup>,判别各采样点土壤类型。在此基础上,结合1:100万土壤类型图(来源于中国科学院南京土壤研究所),获取辽河保护区土壤类型空间数据。

### 1.3.4 降水量

选取2010—2018年辽河保护区及周边地区17个站点的年降水量数据(来源于中国气象局气象数据中心,http://data.cma.cn),以 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  DEM数据为协变量,利用AUSPLIN软件<sup>[21]</sup>进行空间插值,函数选取三次样条函数,再利用辽河保护区边界进行裁剪后,获得辽河保护区2010—2018年年降水量空间数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 退耕封育措施下辽河保护区农田变化特征

2010—2018年辽河保护区不同农田类型面积动态变化见图1。从图1可以看出,2010年辽河保

护区各类农田面积为 $627.13 \text{ km}^2$ ,约占辽河保护区总面积的33.55%;此后,随着退耕封育措施的实施,农田面积急剧减少,2011年面积仅为 $155.63 \text{ km}^2$ ,相比2010年,约减少75.18%;2012—2018年农田面积为 $111.42 \sim 170.35 \text{ km}^2$ ,平均面积为 $137.84 \text{ km}^2$ ,虽然存在年际间波动,但是整体与2011年相差不大。本研究获取的2010年辽河保护区农田面积占比略低于以往研究估算的2007年(41.99%)<sup>[9]</sup>和2009年面积占比(37.10%)<sup>[10]</sup>;2011年面积占比又较明显低于以往研究估算的2011年面积占比(13.71%~17.30%)<sup>[10,19]</sup>。其原因一方面可能是所用遥感影像存在差别,另一方面可能是影像获取月份有所不同。

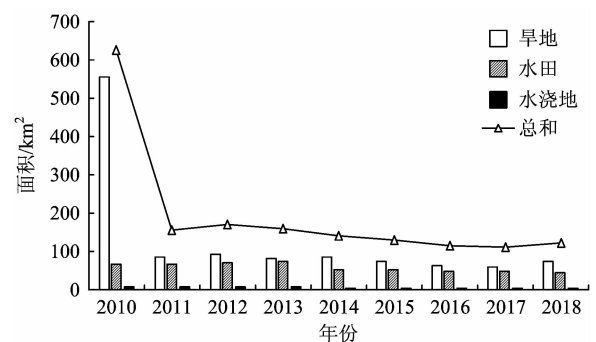


图1 2010—2018年辽河保护区不同农田类型面积动态变化

Fig. 1 Dynamic change of cropland in Liaohu Conservation Area from 2010 to 2018

由图1可见,旱地始终是辽河保护区主要农田类型,但是退耕封育措施的实施使旱地面积大为减少。2010年旱地面积约为 $554.26 \text{ km}^2$ ,占农田面积的88.38%;2011—2018年旱地面积为 $58.21 \sim 92.24 \text{ km}^2$ ,平均面积仅为 $76.06 \text{ km}^2$ ,相比2010年减少84.78%。与2010年相比,水田面积变化较小,其在2010—2013年为 $65.61 \sim 73.26 \text{ km}^2$ ,平均面积为 $69.45 \text{ km}^2$ ,呈先略有减少再有所增加的趋势;2014—2018年则有所下降,面积为 $44.16 \sim 51.69 \text{ km}^2$ ,平均面积为 $48.69 \text{ km}^2$ ,与2010—2013年相比,减少了29.89%。水浇地面积较小,2010—2018年为 $3.67 \sim 6.15 \text{ km}^2$ ,总体上呈减少趋势,2018年相比2010年减少了40.37%。

从空间分布特征来看,2010年,除辽河口国家级自然保护区外,辽河保护区河流两岸分布着大量农田,在铁岭、沈阳和鞍山市域内几乎均为旱地,在盘锦市域内则旱地和水田面积大致相当(图2)。

2011 年,河流两岸农田开始呈现撂荒状态,但也有零星农田分布,在铁岭、沈阳市域内仍然以旱地为主,而在鞍山和盘锦则主要为水田,这一格局持续到 2018 年没有明显变化。

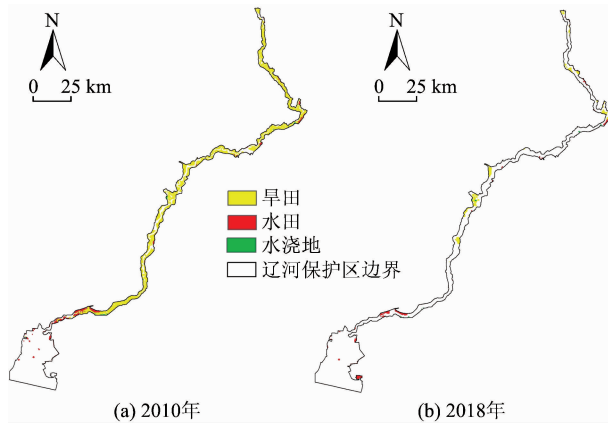


图 2 2010 年和 2018 年辽河保护区农田空间分布  
Fig. 2 Spatial distribution of cropland in Liaohe Conservation Area in 2010 and 2018

## 2.2 退耕封育措施对农田地表径流污染物入河量的影响

基于源强系数法估算辽河保护区不同农田类型地表径流污染物入河量,结果见表 2 和图 3。从表 2 和图 3 可以看出,2010 年辽河保护区农田面源污染物 COD 入河量为 1 864.79 t/a, NH<sub>3</sub>-N 入河量为 372.96 t/a;其中,旱地贡献率为 83.97%,水田为 15.37%,水浇地为 0.67%。2011 年,辽河保护区农田面源污染物 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量大幅消减,其中, COD 入河量减至 419.55 t/a, NH<sub>3</sub>-N 减至 83.91 t/a;水田为主要贡献源,贡献率为 54.19%,旱地贡献率为 43.59%,水浇地为 2.22%。2011—2018 年,农田面源污染物 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量呈先略有增高,后波动减少的变化趋势,其中, COD 入河量为 312.33 ~ 548.12 t/a, NH<sub>3</sub>-N 入河量为 62.47 ~ 109.62 t/a;水田贡献率为 45.19% ~ 57.10%,旱地为 40.79% ~ 52.93%,水浇地为 1.81% ~ 2.60%。

表 2 辽河保护区不同农田类型地表径流污染物入河量

Table 2 Inflow of pollutants from surface runoff of different cropland types in Liaohe Conservation Area

年份	降水量/(mm/a)	实际降水条件						平均降水条件					
		COD 入河量/(t/a)			NH <sub>3</sub> -N 入河量/(t/a)			COD 入河量/(t/a)			NH <sub>3</sub> -N 入河量/(t/a)		
		旱地	水田	水浇地	旱地	水田	水浇地	旱地	水田	水浇地	旱地	水田	水浇地
2010	958.21	1 565.79	286.54	12.45	313.16	57.31	2.49	1 391.10	247.39	10.88	278.22	49.48	2.18
2011	482.58	182.88	227.37	9.30	36.58	45.47	1.86	196.21	243.01	10.09	39.24	48.60	2.02
2012	826.76	240.59	296.31	11.21	48.12	59.26	2.24	228.22	267.97	10.51	45.64	53.59	2.10
2013	676.18	200.12	280.17	10.37	40.02	56.03	2.07	191.65	272.71	10.21	38.33	54.54	2.04
2014	396.41	194.40	165.96	6.92	38.88	33.19	1.38	210.79	189.16	7.98	42.16	37.83	1.60
2015	446.71	173.83	179.72	7.67	34.77	35.94	1.53	181.48	192.92	8.29	36.30	38.58	1.66
2016	794.29	170.99	188.51	9.59	34.20	37.70	1.92	149.76	178.84	8.82	29.95	35.77	1.76
2017	486.42	136.76	171.35	7.45	27.35	34.27	1.49	142.56	181.24	7.98	28.51	36.25	1.60
2018	387.66	162.33	144.35	5.65	32.47	28.87	1.13	177.75	165.46	6.35	35.55	33.09	1.27

除 2010 年外,辽河保护区农田地表径流污染物入河量与农田面积的相关系数( $R^2$ )为 0.83,与降水量的相关系数为 0.49,表明辽河保护区农田地表径流污染物入河量除受农田面积变化的影响外,还与降水量显著相关。因此,进一步估算了 2010—2018 年平均降水条件下辽河保护区农田地表径流污染物入河量,结果见表 2 和图 4。从表 2 和图 4 可以看出,平均降水条件下,2010 年辽河保护区农田面源污染物引起的 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量分别为 1 649.37 和 329.87 t/a,相较实际降水条件有所减少;旱地贡献率

为 84.34%,水田为 15.00%,水浇地为 0.66%。2011—2018 年 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量的变化趋势与实际降水条件下没有显著区别。其中, COD 入河量为 331.77 ~ 506.70 t/a, NH<sub>3</sub>-N 入河量为 66.35 ~ 101.34 t/a;水田贡献率为 46.37% ~ 57.47%,旱地为 40.38% ~ 51.67%,水浇地为 1.82% ~ 2.61%。

将 2010 年农田地表径流污染物入河量与 2011—2018 年各年相应数值分别相减,再将各差值进行加和后可以看见,在实际降水条件下,2011—2018 年辽河保护区因退耕封育措施的实施累积消

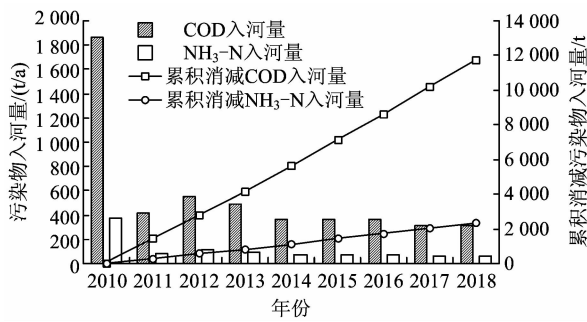


图3 2010—2018年实际降水条件下辽河保护区农田地表径流污染物入河量动态变化

Fig. 3 Temporal variation of pollutants inflow from cropland surface runoff in Liaohe Conservation Area under the condition of actual precipitation in 2010-2018

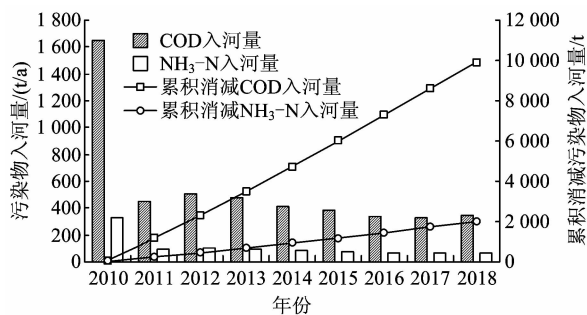


图4 2010—2018年平均降水条件下辽河保护区农田地表径流污染物入河量动态变化

Fig. 4 Temporal variation of pollutants inflow from cropland surface runoff in Liaohe Conservation Area under the condition of average precipitation in 2010-2018

减 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量分别为 11 734.49 和 2 346.90 t(图 3);平均降水条件下,累积消减 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量分别为 9 955.03 和 1 991.01 t(图 4),相比实际降水条件下,二者均减少了 15.16%。

### 2.3 源强系数法估算农田地表径流污染物入河量的不确定性分析

源强系数法属于估算面源污染的经验方法,是根据研究区的坡度、土壤类型、降水量、农田类型、化肥施用量等因子对标准农田的源强系数进行修正后获得。该方法操作简单,可以较好地反映研究区面源污染的时空动态变化,在缺少监测数据的条件下得到了广泛的应用<sup>[22]</sup>。有研究指出,基于典型地块监测法计算的 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量与基于源强系数法估算的结果差距不大<sup>[18]</sup>。但由于大多数因子的修正系数有一个取值范围,因此,为了评估修正系数取值对估算的辽河保护区农田地表径流污染物入

河量的影响,对各因子的修正系数分别取相应级别的最小值和最大值进行再次估算。结果表明:基于最小值估算的 2011—2018 年退耕封育措施累积消减 COD 入河量为 8 954.69 t,累积消减 NH<sub>3</sub>-N 入河量为 1 790.94 t;基于最大值估算的累积消减 COD 入河量为 16 692.78 t,累积消减 NH<sub>3</sub>-N 入河量为 3 338.56 t。最大值估算的结果约相当于最小值的 1.86 倍,相当于本研究估算结果的 1.42 倍。此外,源强系数法在估算过程中忽略了农田与河流的距离,也会给研究结果带来不确定性。

### 3 结论

(1)利用高清遥感影像获取的 2010—2018 年辽河保护区农田空间分布图显示,2010 年辽河保护区河流两岸分布着大量农田,面积约为 627.13 km<sup>2</sup>,约占辽河保护区总面积的 33.55%。随着退耕封育政策的实施,2011 年农田面积大量减少,只零星分布于河流两岸,面积仅占保护区总面积的 8.33%。2012—2018 年农田面积虽然存在着年际波动,但与 2011 年差距较小。旱地是辽河保护区主要农田类型,其在 2010 年占农田总面积的 88.38%,在 2011—2018 年仅略高于水田面积。

(2)基于源强系数法的估算结果表明,在实际降水条件下,2010 年辽河保护区农田面源污染物 COD 入河量为 1 864.79 t/a, NH<sub>3</sub>-N 入河量为 372.96 t/a,旱地贡献率为 83.97%。2011 年, COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量分别消减到 419.55 和 83.91 t/a,水田贡献率超过了旱地,贡献率为 54.19%。2011—2018 年,辽河保护区累积消减农田地表径流 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 入河量分别为 11 734.49 和 2 346.90 t,高于平均降水条件下的累积消减量,约高 15.16%。

(3)为了评估源强系数法估算结果的不确定性,对各因子修正系数分别取最大值和最小值进行污染物入河量再次估算,结果显示取最大值估算的污染物累积消减入河量约为最小值的 1.86 倍,约为本研究结果的 1.42 倍。

### 参考文献

[1] ALLAN J D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35: 257-284.  
 [2] ENGLERT D, ZUBROD J P, SCHULZ R, et al. Variability in ecosystem structure and functioning in a low order stream: implications of land use and season [J]. Science of the Total

- Environment, 2015, 538:341-349.
- [3] PRICE E L, SERTIĆ PERIĆ M, ROMERO G Q, et al. Land use alters trophic redundancy and resource flow through stream food webs [J/OL]. *Journal of Animal Ecology*, 2019. doi: 10.1111/1365-2656.12955.
- [4] HANNA D E L, RAUDSEPP-HEARNE C, BENNETT E M. Effects of land use, cover, and protection on stream and riparian ecosystem services and biodiversity [J/OL]. *Journal of the Society for Conservation Biology*, 2019. doi: 10.1111/cobi.13348.
- [5] KAUSHAL S S, GOLD A J, MAYER P M. Land use, climate, and water resources: global stages of interaction [J]. *Water*, 2017, 9(11):815.
- [6] AUGUSTO F G, TASSONI F M, ANDERSON F, et al. Land use change in the Atlantic Forest affects carbon and nitrogen sources of streams as revealed by the isotopic composition of terrestrial invertebrates [J]. *Biota Neotropica*, 2015, 15(2):e20140188.
- [7] DOS R O P C, van der GEEST H G, KRAAK M H S, et al. Land use affects lowland stream ecosystems through dissolved oxygen regimes [J/OL]. *Scientific Reports*, 2019. doi: 10.1038/s41598-019-56046-1.
- [8] 郝芳华, 程红光, 杨胜天, 等. 非点源污染模型: 理论与应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [9] 王思宇, 段亮, 宋永会, 等. 辽河保护区景观格局初步分析 [J]. *环境工程技术学报*, 2013, 3(6):481-485.  
WANG S Y, DUAN L, SONG Y H, et al. Analysis of landscape patterns in Liaohe Conservation Area [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, 3(6):481-485.
- [10] 温日红, 王笑影, 吕国红, 等. 辽河保护区生态恢复遥感分析 [J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(6):110-115.  
WEN R H, WANG X Y, LÜ G H, et al. Remote sensing analysis of ecological recovery in the Liaohe River Protection Zone [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(6):110-115.
- [11] 刘森, 李宇斌, 孙勇, 等. 辽河保护区生态水质净化经济效益分析 [J]. *环境保护与循环经济*, 2013, 33(2):58-62.
- [12] 涂响, 彭剑峰, 段亮, 等. 辽河保护区干流自然生境恢复措施研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2013, 3(6):503-507.  
TU X, PENG J F, DUAN L, et al. Study on measures of natural habitat restoration in the mainstream of Liaohe Conservation Area [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, 3(6):503-507.
- [13] 张鸿龄, 郭鑫, 孙丽娜. 辽河保护区河岸带自然生境恢复现状 [J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2016, 28(2):98-104.  
ZHANG H L, GUO X, SUN L N. Status of natural habitat restoration of riparian zone in Liaohe River Conservation Area [J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2016, 28(2):98-104.
- [14] 夏会娟, 孔维静, 孙建新, 等. 基于 MODIS NDVI 的辽河保护区成立前后植被覆盖时空动态研究 [J]. *生态学报*, 2018, 38(15):5434-5442.  
XIA H J, KONG W J, SUN J X, et al. Spatial-temporal dynamics of vegetation cover before and after establishment of Liaohe River Reserve based on MODIS NDVI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15):5434-5442.
- [15] 辽河保护区生物多样性监测与评价报告(2016—2017) [R]. 沈阳: 辽河凌河保护区管理局, 辽宁大学, 沈阳农业大学, 2017.
- [16] 全国水环境容量核定技术指南 [R]. 北京: 环境保护总局环境规划院, 2003.
- [17] 全国饮用水水源地环境保护规划 [R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2006.
- [18] 刘占良. 青岛市重点流域水环境承载力与污染防治对策研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [19] 李宇斌, 党中印, 孙勇, 等. 辽河保护区生态治理对区域发展影响的研究 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [20] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨 [J]. *土壤学报*, 2019, 56(1):227-241.  
WU K N, ZHAO R. Soil texture classification and its application in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1):227-241.
- [21] HUTCHINSON M F. Anusplin version 4.2 user guide [M]. Canberra: Australian National University, 2001.
- [22] 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 (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(6):58-66. ▷