

# 浑河上游清原县非点源污染负荷及其空间分布特征

刘志波, 魏建兵\*, 程全国 (沈阳大学环境学院, 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110044)

**摘要** 以浑河上游清原县为研究对象, 采用输出系数法和 ArcGIS 平台对清原县各乡镇和浑河主要支流非点源污染总氮(TN)、总磷(TP) 负荷进行估算和空间分布特征分析, 探讨从行政分区和河流集水区 2 个尺度控制非点源污染的方法与指导治理实践。结果表明, 2017 年清原县 TN、TP 的输出负荷量分别达 3 410.66、208.47 t, 重点污染乡镇为清原镇、英额门镇、南口前镇、南山城镇; 综合污染负荷较重的支流为长山堡河、古城子河和南杂木河, TN、TP 的输出负荷量分别为 397.41、331.58、319.03 t, 29.63、22.39、20.04 t; 清原流域接近于主干流的区域和支流污染较重, TN、TP 污染负荷空间分布有相似性。旱田是 TN 的主要污染源, TP 主要污染源为旱田、居民生活和养殖; 非点源污染控制应关注年内雨季和春季融冻期径流的监测和治理, 生活污水和垃圾的收集与处理, 分散型养殖和小型加工企的环保管理。

**关键词** 非点源污染; 输出系数法; 氮磷负荷; 空间分布; 浑河上游清原县

中图分类号 X 522

文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)06-0064-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.06.014



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Non-point Source Pollution Load and Its Spatial Distribution Characteristics of Qingyuan County in the Upper Reaches of Hunhe River

LIU Zhi-bo, WEI Jian-bing, CHENG Quan-guo (Key Laboratory of Ecological Restoration of Regional Polluted Environment, Ministry of Education, School of Environment, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044)

**Abstract** Taking Qingyuan County in the upper reaches of the Hunhe River as the research object, the output coefficient method and ArcGIS platform were used to estimate the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) loads of non-point source pollution in the towns of Qingyuan County and the main tributaries of the Hun River and analyze the spatial distribution characteristics. The purpose of this paper was to explore the methods and practice of non-point source pollution control from two scales of administrative division and river catchment. The results showed that in 2017, the annual output load of TN and TP in Qingyuan County was 3 410.66 and 208.47 t, respectively, and the key pollution towns were Qingyuan Town, Yingemen Town, Nankouqian Town and Nanshan Town. The tributaries with heavy comprehensive pollution load were Changshanbao River, Guchengzi River and Nanzamu River, with the annual output loads of TN and TP were 397.41 t, 331.58 t, 319.03 t, 29.63 t, 22.39 t and 20.04 t, respectively. The area and tributaries close to the main stream in Qingyuan watershed were heavily polluted, and the spatial distribution of TN and TP pollution load was similar. The main pollution sources of TN were dry-land, then TP emission mainly came from dry-land, residents' life and breeding industry. The control of non-point source pollution should pay attention to the monitoring and treatment of runoff in rainy season and spring thawing period, the collection and treatment of domestic sewage and garbage, and the environmental management of decentralized aquaculture and small processing enterprises.

**Key words** Non-point source pollution; Output coefficient method; TN and TP load; Spatial distribution; Qingyuan County in upper reaches of Hunhe River

河流上游是辽东地区维护水源涵养、土壤保持、水质净化和生物多样性等生态服务功能的重点关注区。随着人口的增长和社会经济的快速发展, 水资源缺乏和水污染问题不断凸显, 河流源头区的生态建设和环境保护逐渐得到重视。在我国, 经过长期的流域规划与治理, 特别是“十一五”以来国家水体污染控制与治理科技重大专项、农村环境连片整治项目的大量实施, 作为水源保护目标的大部分河流上游点源污染的排放得到了良好的控制。河流、湖泊、水库等水体的主要污染负荷也由点源污染<sup>[1]</sup> 逐渐转变为农业非点源污染<sup>[2]</sup>, 尤其是氮、磷等非点源污染已经成为迫切需要解决的水环境问题<sup>[3]</sup>。为更好地解决农业非点源污染的问题, 采用水文水质模型进行非点源污染的时空模拟和负荷量化研究成为重要的手段。然而现有的 SWAT、HSP、GBNP 等分布式模型对数据资料要求高, 参数众多且率定困难, 对于广大偏远而缺乏监测资料的流域和地区, 分布式机理模型参数率定和精度验证等成为模型应用的难题<sup>[4]</sup>。因此, 选取和使用对

数据资料要求较低、简单实用的输出系数模型就成为国内外研究此类问题的有效解决途径之一<sup>[5]</sup>。Johnes<sup>[6]</sup> 提出的输出系数法在综合考虑污染物侵蚀、迁移、转化的基础上, 利用土地利用状况等资料即可估算流域污染物输出量, 该方法对缺乏长期水量、水质数据流域的非点源污染负荷估算有显著优势。

浑河上游流域是国家九大饮用水源地之一大伙房水库的集水区, 水库供给沈阳、抚顺、大连等 7 大城市 2 300 万人口的工业和生活用水, 在辽宁省经济社会发展中具有举足轻重的战略地位。2014 年 9 月被国务院批准确定为国家重点保护和优先修复的湖泊水库之一, 根据环境部门的监测, COD 出现下降, 但 N、P 污染超标问题的解决依然面临挑战。通过实地考察, 流域已无较大的工业点源, 农业非点源污染成为浑河上游流域的主要污染源。近年来, 很多科研院所和高校在该地区开展了有关非点源污染的大量研究, 基本摸清了 2 条主要入库河流水质污染程度及其与土地利用的关系, 但限于缺乏河流流量等水文水质模型需要的监测数据, 流域非点源污染负荷计算的工作一直较为缺乏。笔者选取浑河上游清原县为研究区域, 基于输出系数法, 从乡镇分区和主要支流流域尺度进行非点源污染负荷评估, 并分析其空间分布

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41771200, 41171399)。

**作者简介** 刘志波(1996—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 研究方向: 环境规划与可持续发展。\*通信作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事景观生态学、环境生态学教学和科研工作。

**收稿日期** 2021-07-05

特征,为基于行政分区管理和集水范围治理方案制定提供科学依据。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 清原县位于辽宁省东部(图 1),地理坐标为 124°20'06"~125°28'58"E、41°47'52"~42°28'25"N,包括 14 个乡镇,面积 3 932.96 km<sup>2</sup>。截至 2017 年,清原县总人口为

32.2 万,其中城镇人口 10.5 万,农业人口 21.7 万。产业结构以种植业和养殖业为主,耕地面积为 69 427.39 hm<sup>2</sup>,主要农作物类型为水稻、玉米和大豆,农田管理方式和化肥施用管理较为粗放;主要养殖类型有大牲畜(1.82 万头)、猪(0.50 万头)、羊(3.88 万只)和家禽(35.23 万只),主要养殖方式尚以散养为主。

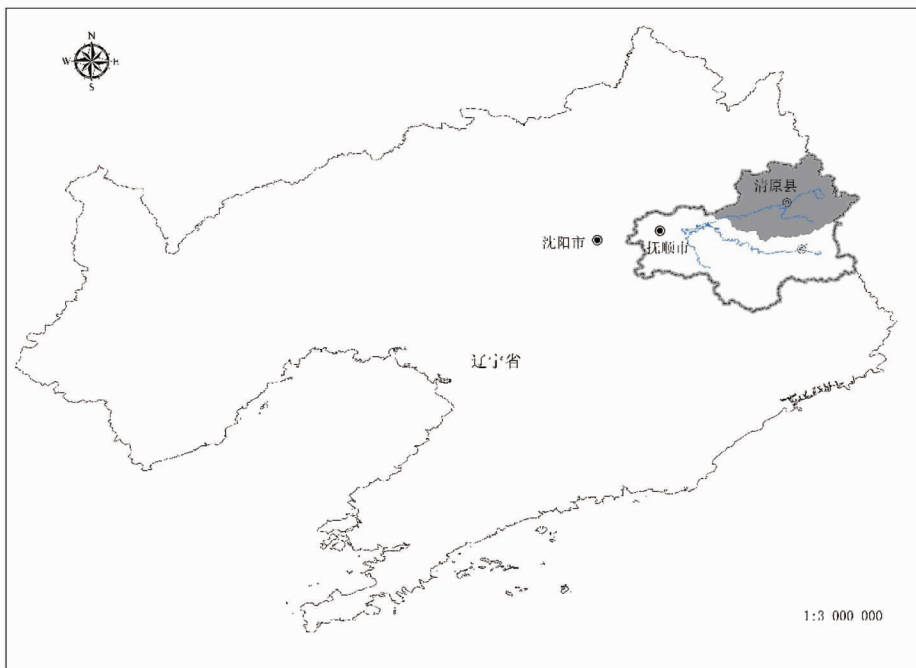


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

**1.2 数据来源及处理** 研究区各乡镇人口数据(农业人口与非农业人口)来源于《2017 年清原县统计年鉴》;土地利用数据以清原县统计资料为基础,结合清原县 ALSO 卫星遥感影像解译和现场调查获得;畜禽养殖情况以清原县畜牧局 2017 年畜禽养殖调查表为依据,并筛选出重点养殖乡镇进行现场调查核实;水系数据和流域边界采用 ArcGIS 10.2 软件水文分析功能模块由清原县 DEM(数字地形模型)提取而来。

## 1.3 研究方法

**1.3.1 输出系数法。**输出系数法将非点源污染源分为城镇用地、农村生活、农田、人口、牲畜等几大类,根据土地利用类型的差异、居民非点源污染物的排放和处理状况、牲畜的数量和分布,对不同的土地利用和不同牲畜采用不同的输出系数<sup>[7-8]</sup>,流域的总负荷量计算公式如下:

$$L = \sum_{i=1}^n (E_i \times A_i \times I_i) + P \quad (1)$$

式中, $L$ 为营养物质(污染物)的输出负荷(t/a); $E_i$ 为第*i*种营养源(污染源)的输出系数[t/(km<sup>2</sup>·a)或 kg/(人·a)]; $A_i$ 为第*i*类土地利用类型的面积(hm<sup>2</sup>)或第*i*种牲畜的数量、人口数量; $I_i$ 为第*i*种营养源的营养物质(污染物)的输入量(t/a); $P$ 为降雨输入的营养物质(污染物)的数量(t/a)。对于各种土地利用类型来说, $E_i$ 表示土地利用中所流失的营养物质(污染物)的比例;对于牲畜而言,它表示牲畜排泄物直接进入受纳水体的比例,中间应考虑人类收集和储存粪肥过程中的氨挥

发;对于人类而言,它反映当地人群对含磷去污剂的使用状况、饮食和生活,对于农村人口来说,由于农村没有配套的污水处理设施且农村人口分布分散,该系数主要反映农村生活污水中的营养物质(污染物)进入受纳水体的比例<sup>[9]</sup>。

确定合理的输出系数是输出系数模型的关键,确定输出系数有 3 种常用方法,即文献分析法、试验模拟法和水文统计法<sup>[10]</sup>。该研究采用文献分析法<sup>[4,11-15]</sup>结合前期研究支流水质采样监测数据综合得到不同类型污染源的 TN、TP 输出系数(表 1)。

表 1 研究区非点源输出系数的分类与取值

Table 1 Classification and value of non-point source output coefficients in the study area

污染源 Pollution source	类型 Type	TN	TP
农村生活 Rural life // kg/(人·a)	—	1.870	0.214
农田污染 Farmland pollution // t/(hm <sup>2</sup> ·a)	旱田	29.000	0.900
	林地	2.380	0.150
	草地	10.000	0.200
	果园	1.750	0.005
畜禽养殖 Livestock and poultry breeding // kg/(头·a)	水稻田	0.150	0.009
	大牲畜	10.210	0.218
	猪	0.740	0.142
	羊	0.400	0.045
家禽	0.040	0.005	

**1.3.2 支流集水区 TN、TP 输出负荷计算及空间分布图绘制。**使用河流集水区边界裁切县域 TN、TP 输出负荷,跨多个乡镇的集水区采用面积加权求平均值的方法确定河流集水 TN、TP 输出负荷,其计算公式如下:

$$E_i = \frac{E_j A_j + \dots + E_n A_n}{n} \quad (2)$$

式中, $E_i$  为第  $i$  个河流集水区的负荷, $E_j$  为第  $j$  个乡镇的负荷, $A_j$  为第  $j$  个河流集水区在第  $j$  个乡镇内的面积, $n$  为河流集水区跨越的乡镇数量。使用 ArcGIS 10.2 矢量数据属性表

输入功能赋值支流集水区负荷并绘制空间分布图。

**2 结果与分析**

**2.1 行政分区角度 TN、TP 输出负荷估算** 根据输出系数模型计算得到研究区 2017 年 TN 和 TP 输出负荷量分别为 3 410.66、208.47 t,不同乡镇不同类型污染源输出量及其占比情况见表 2。从表 2 可以看出,清原县经济和人口中心清原镇 TN 和 TP 的负荷均为最高,分别为 399.17、29.83 t,经济较为落后与人口密度较小的敖家堡乡 TN 和 TP 负荷最低,分别为 149.31、7.70 t。

表 2 2017 年清原县各乡镇 TN、TP 输出负荷估算结果

Table 2 Estimation results of TN and TP output load of each township in Qingyuan County in 2017

序号 No.	乡镇 Township	农村生活 Rural life//t		农田污染 Farmland pollution//t		畜禽养殖 Live stock breeding//t		合计 Total//t		占比 Proportion//%	
		TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
1	土口子	29.57	3.38	168.28	7.07	16.99	1.47	214.84	11.92	6.30	5.72
2	北三家子	27.52	3.15	162.36	6.84	14.12	1.34	204.00	11.33	5.98	5.44
3	敖家堡	19.77	2.26	124.33	4.93	5.21	0.51	149.31	7.70	4.38	3.69
4	大苏河	17.53	2.01	137.09	6.15	22.15	1.24	176.77	9.40	5.18	4.50
5	柁乃甸	13.81	1.58	135.99	5.56	36.65	3.41	186.45	10.55	5.47	5.06
6	清原镇	159.75	18.28	193.78	7.95	45.64	3.60	399.17	29.83	11.70	14.31
7	红透山	50.57	5.79	118.66	5.00	25.80	2.38	195.03	13.17	5.72	6.32
8	草市	29.09	3.33	237.56	7.96	22.10	1.28	288.75	12.57	8.47	6.03
9	英额门	33.08	3.79	231.96	8.85	38.93	3.16	303.97	15.80	8.91	7.58
10	南口前	43.40	4.97	212.00	8.75	41.46	4.01	296.86	17.73	8.70	8.51
11	南山城	55.14	6.31	207.84	13.73	33.88	1.98	296.86	22.02	8.70	10.56
12	湾甸子	31.53	3.61	199.13	8.58	21.49	1.45	252.15	13.64	7.39	6.54
13	大孤家	36.61	4.19	173.02	6.59	13.62	1.10	223.25	11.88	6.55	5.70
14	夏家堡	56.40	6.45	147.69	12.92	19.16	1.56	223.25	20.93	6.55	10.04
	总计	603.77	69.10	2 449.69	110.88	357.20	28.49	3 410.66	208.47	100	100

**2.2 行政分区角度 TN、TP 污染负荷空间格局与构成** 清原县产业以农林业发展为主,城镇区配套的污水管网措施不健全,农村地区居民产生的生活污水和畜禽养殖的污水大多是直接排放或通过简易化粪池和沼气池处理后排放;产生的沼液和沼渣被施入农田,作为农作物生产或苗木生产的基肥,与施入农田和林下中草药而未被植物吸收利用的化肥一起,在降雨径流和融雪径流的冲刷下逐渐累积和汇入水体,成为地表水污染的主要来源。

从图 2 可看出,TN、TP 输出负荷的空间分布格局基本一致,最高负荷量出现在中部的清原镇,而位于清原镇南北两侧的敖家堡、大苏河镇和柁乃甸污染负荷则相对较低。TN 输出负荷较高的乡镇为南口前、英额门、清原镇、南山城,共占清原县乡镇总污染负荷的 38.01%;TP 输出负荷较高的乡镇为清原镇、南山城和夏家堡,共占全县污染负荷的 34.91%,主要是因为这些乡镇耕地面积广、人口密集,受到农业面源和农村生活污染的影响较大。而敖家堡、柁乃甸人口密度

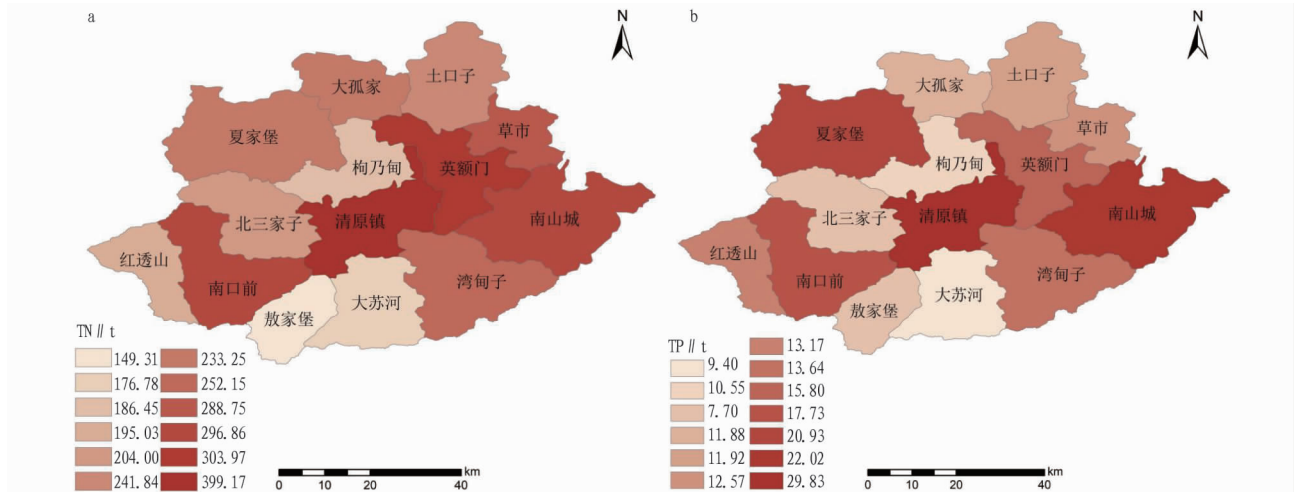
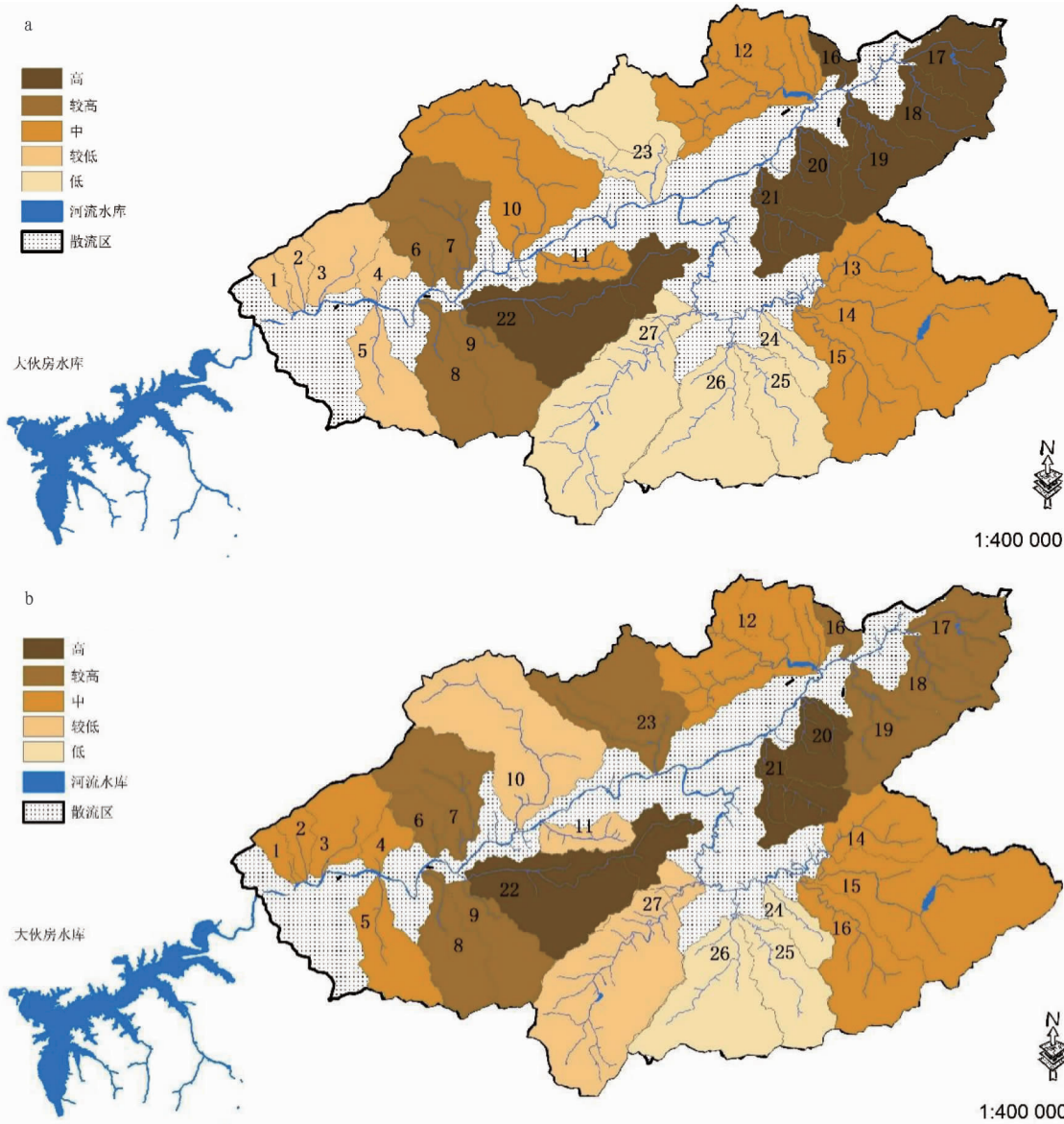


图 2 2017 年各乡镇非点源污染 TN (a) 和 TP (b) 输出负荷空间分布

Fig.2 Spatial distribution of TN (a) and TP (b) output load of non-point source pollution in each town in 2017

小,主要以林地、草地为主。污染物输出负荷量较高的乡镇对地表水环境威胁性大。在各污染源分类中,TN 主要来源于农田污染,其污染负荷排放量占总体的 71.82%,农田中尤以旱田污染为重;TP 主要来源于农田污染,占比达53.19%,农村生活和畜禽养殖污染贡献率也较大,占比达到 46.81%,畜禽养殖尤以猪和家禽的 TP 负荷贡献率较大。因此减少 TP 污染负荷不仅要注意农村生活污水收集与治理,也要关注旱田磷肥的合理施用和猪、家禽养殖污染排放的有效控制。

**2.3 主要支流集水区角度 TN、TP 输出负荷** 除以行政区为单元来加强环境的管理外,目前地表水环境的保护多采取“河长制”的管理方式,以整条河流或某河段为单元,以当地的行政主管领导和相关技术人员组成河流环境保护委员会,加强河流湖泊水环境、水生态和水景观的巡视管理和制定治理规划。因此,提取出研究区流域边界和主要河流,估算河流集水区的污染负荷,对于明确重点治理河流和确定治理优先顺序具有指导价值。图 3 为浑河上游清原流域主要支流水系及其集水区 TN、TP 负荷分级。



注:图中支流 1~27 分别为栏木河、沔阳河、沔阳东河、红透山河、苍石河、北腰堡河、十八岭河、向阳河、南口前河、黑石木河、下烟沟河、小孤家子河、龙头村河、朴家崴子河、木家岭河、下玉城河、英额河、柳木桥河、长春屯河、长山堡河、古城子河、南杂木河、斗虎屯河、南天门河、大苏河、复兴河、大莱河

Note: The tributaries 1~27 in the figure are Lanmu River, Mianyang River, Mianyang East River, Hongtoushan River, Cangshi River, Beiyabao River, Shibaling River, Xiangyang River, Nankou Qianhe River, Heishimu River River, Xiayangou River, Xiaogujiazi River, Longtou Village River, Pujiawei-zi River, Mujialing River, Xiayucheng River, Ying'e River, Liumuqiao River, Changchun Tun River, Changshanbao River, Guchengzi River, Nanzamu River, Douhutun River, Nantianmen River, Dasu River, Fuxing River, Dalai River

图 3 2017 年清原流域主要支流集水区 TN (a) 和 TP (b) 负荷分级

Fig.3 The TN (a) and TP (b) load classifications of the main tributary catchment areas of the Qingyuan Basin in 2017

从 TN 负荷(图 3a)来看,各支流年负荷在 150.00~397.41 t,高负荷支流为下玉城河、英额河、柳木桥河、长春屯河、长山堡河、古城子河和南杂木河,年负荷在 319.03~397.41 t,较高负荷的支流为北腰堡河、十八岭河、向阳河和南口前河,年负荷在 295.45~292.26 t,这些支流应该优先考虑治理。TP 负荷空间分布(图 3b)与 TN 趋势大体相似,各支流年负荷在 9.40~29.63 t,高负荷支流为长山堡河、古城子河和南杂木河,年负荷在 20.40~29.63 t,较高负荷的支流为北腰堡河、十八岭河、向阳河、南口前河、斗虎屯河、下玉城河、英额河、柳木桥河和长春屯河,年负荷在 15.00~17.69 t,这些支流应该优先考虑治理。从 TN、TP 综合考虑的角度,长山堡河、古城子河和南杂木河是非点源污染 TN、TP 控制较优先的支流,TN、TP 的输出负荷量分别为 397.41、331.58、319.03、29.63、22.39、20.04 t。结合野外调查分析,长山堡河、古城子河集水区域农业种植和养殖密度大,南杂木河集水区域居民密度大和小型加工业企业多,而这些区域污染物排放管理和集中处理设施薄弱。

### 3 讨论

基于输出系数模型和借助 GIS 技术对区域或流域尺度非点源污染 TN、TP 负荷进行评估,并分析其空间分布特征与治理优先顺序。浑河上游清原县主要以农业生产为主,水环境重点的治理方向为非点源污染。农村生活污水、农田地表径流是研究区重点的治理方向,这个结论与张静等<sup>[16]</sup>对浑河流域非点源污染负荷估算与分析结论类似。研究区畜禽养殖以散养为主,其排放的畜禽粪便、有机物残体等对地表水环境造成污染,这与赵倩等<sup>[17]</sup>对浑河上游大苏河乡面源污染负荷及现状评价结果相符。在乡镇中心建立配套的污水管网作为试点是治理资金投入的重点,农村地区污水管网未覆盖的地方污水至少应该简单处理后再排放,这与城镇化程度和经济发展程度密切相关,同时也说明该地区经济发展程度尚不足以支撑环境污染治理投入,需要关注经济发展与环境保护的协调问题。尽早将农村污水建设成网和进一步加强农田施肥管理仍是今后研究区水环境治理的重点和难点。

TN、TP 负荷空间分布趋势相似,这与李铸衡等<sup>[18]</sup>对土地利用情景下浑河—太子河流域非点源污染模拟结论一致。根据各乡镇污染物 TN、TP 空间分布可看出水环境治理的重点应放在清原镇、英额门镇、南口前镇;从主要支流 TN、TP 负荷空间分布格局来看,长山堡河、古城子河和南杂木河是非点源污染控制较优先的支流。

该研究确定污染源输出系数采用了文献分析法,为了使模型估算的准确性更高,未来的研究应考虑加入模拟试验和实地监测的方法确定土地利用、农村生活和畜禽养殖区域的输出系数。对比胡正等<sup>[7,19-20]</sup>基于改进的输出系数模型对我国南方地区非点源污染估算评价,该研究采用的输出系数模型尚未考虑降雨所带来的营养物质对研究数据的影响,据该地区以往降雨测定表明,雨水中以氮沉降为主的营养物质浓度较低。因此,针对河流上游以森林覆盖为主的流域,该研

究选用的输出系数模型对于非点源污染负荷的估算用于指导管理实践是适用的,GIS 技术也能够为分析污染负荷空间分布及确定优先治理区域提供有力的支持。

### 4 结论

(1)浑河上游清原县 2017 年非点源污染 TN、TP 的输出负荷量分别为 3 410.66、208.47 t,TN、TP 污染负荷的空间分布较为相似,重点污染乡镇为清原镇、英额门镇、南口前镇、南山城镇,其次为湾甸子乡、土口子乡、柞乃甸乡。

(2)浑河上游清原县 2017 年 TN 负荷主要来源为农田面源,TP 负荷中农村生活和畜禽养殖污染贡献率也较大,综合污染负荷较重的支流为长山堡河、古城子河和南杂木河,TN、TP 的输出负荷量分别为 397.41、331.58、319.03、29.63、22.39、20.04 t。

(3)浑河上游旱田是 TN 的主要污染来源,TP 主要污染源为旱田、居民生活和养殖,应关注年内雨季和春季融冻期径流的监测和治理,生活污水和垃圾的收集与处理,分散型养殖和小型加工企的环保管理。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部.第一次全国污染源普查公报[N].人民日报,2010-02-10(016).
- [2] 第二次全国污染源普查公报[J].环境保护,2020,48(18):8-10.
- [3] 国务院印发《“十三五”生态环境保护规划》提出 12 项约束性指标到 2020 年生态环境质量总体改善[J].环境经济,2016(ZA):8-9.
- [4] 刘增进,张关超,杨育红,等.河南省农业非点源污染负荷估算及空间分布研究[J].灌溉排水学报,2016,35(11):1-6.
- [5] WORRALL F, BURT T P. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: The use of export coefficient and structural models [J]. Journal of hydrology, 1999, 221(1/2): 75-90.
- [6] JOHNS 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.
- [7] 胡正,敖天其,李孟芮,等.改进的输出系数模型在缺水地区面源综合评价[J].灌溉排水学报,2019,38(2):108-114.
- [8] 张辰,陆建忠,陈晓晓.基于输出系数模型的云南洱海流域农业非点源污染研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(1):108-114.
- [9] 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.
- [10] 张洪波,李俊,黎小东,等.缺水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.
- [11] 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(6):78-82,92.
- [12] 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.
- [13] 程静,贾天下,欧阳威.基于 STELLA 和输出系数法的流域非点源负荷预测及污染控制措施[J].水资源保护,2017,33(3):74-81.
- [14] 蔡明,李怀恩,庄咏涛,等.改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J].水利学报,2004,35(7):40-45.
- [15] 郑尧文.浑河清原流域地表水氮素污染特征及其源汇研究[D].沈阳:沈阳大学,2019.
- [16] 张静,何俊仕,周飞,等.浑河流域非点源污染负荷估算与分析[J].南水北调与水利科技,2011,9(6):69-73.
- [17] 赵倩,马建,向青春,等.浑河上游大苏河乡农业非点源污染负荷及现状评价[J].生态与农村环境学报,2010,26(2):126-131.
- [18] 李铸衡,刘淼,李春林,等.土地利用变化情景下浑河—太子河流域的非点源污染模拟[J].应用生态学报,2016,27(9):2891-2898.
- [19] 陈亚荣,阮秋明,韩凤翔,等.基于改进输出系数法的长江流域面源污染负荷估算[J].测绘地理信息,2017,42(1):96-99,104.
- [20] 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.