

柏条河流域水质及非点源污染综合评估

张兴^{1,2}, 朱虹¹, 游如玥¹, 高丹阳¹, 敖天其^{1,2}

¹四川大学水利水电学院, 四川 成都

²四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都

Email: zhangxingscu@163.com

收稿日期: 2021年2月25日; 录用日期: 2021年3月17日; 发布日期: 2021年3月26日

摘要

为了解决非点源污染在缺资料地区难以模拟计算和综合评估的问题, 本文以柏条河流域为例, 采用主成分分析法和综合污染指数法对研究区水质进行了综合评价, 通过结合源强系数法(source strength coefficient method)和输出系数法(the export coefficient model)对研究区2017年非点源污染情况进行模拟计算, 并采用等标污染负荷法进行污染综合评估, 以明确研究区主要污染物和主要污染源。结果表明: 1) 柏条河流域水质整体偏好, 个别时段存在水质超标现象, 枯水期水质整体优于丰水期; 2) 研究区非点源污染比较严重, 主要污染物为TN, 其等标污染负荷占比为56.17%; 3) 农村生活污水和农业面源为主要污染源, 其等标污染负荷占比分别为69.53%和12.49%; 4) 污染最严重的乡镇为丽春镇、其次为唐昌镇, 需采取相应的措施加以治理。

关键词

水质评价, 非点源污染, 源强系数法, 输出系数法, 污染评估

Comprehensive Evaluation of Water Quality and Non-Point Source Pollution in Baitiao River Basin

Xing Zhang^{1,2}, Hong Zhu¹, Ruyue You¹, Danyang Gao¹, Tianqi Ao^{1,2}

¹College of Water Resources and Hydropower, Chengdu Sichuan

²State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Email: zhangxingscu@163.com

Received: Feb. 25th, 2021; accepted: Mar. 17th, 2021; published: Mar. 26th, 2021

Abstract

It is difficult to quantitatively simulate and comprehensively assess non-point source pollution in ungauged basins. The water quality in the study area was evaluated by PCA (Principal Component Analysis) and comprehensive pollution index method. The source strength coefficient method and the export coefficient model were used to simulate the non-point source pollution in the study area in 2017, and the pollution load method was used to comprehensively evaluate the pollution, the main pollutants and main pollution sources in the study area were obtained. The results show that 1) the water quality of Baitiao River Basin is preferred as a whole, and the water quality in different periods exceeds the standard, and the water quality in dry season is due to the water quality in high season; 2) the non-point source pollution in the study area is relatively serious, and the main pollutant is TN, which accounts for 56.17% of the standard pollution load; 3) The main sources of pollution were rural domestic sewage and agricultural non-point source, with their pollution load was 69.53% and 12.49%; 4) Lichun town is the most polluted region in the study area. It is necessary to take measures to manage the water non-point source pollution in Baitiao river basin.

Keywords

Water Quality Evaluation, Non-Point Source Pollution Evaluation, Source Strength Coefficient Method, The Export Coefficient Model, Evaluation of Surface Pollution

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水质评价是指按照评价目标,选择相应的水质参数、水质标准和评价方法来对水体质量和对水体处理要求做出评定。随着水质评价概念的提出,国内外对水质评价指标的选取和评价方法进行了一系列的研究。目前常用的水质评价方法主要有内梅罗指数法、综合污染指数法、主成分分析法、综合水质标识指数评价法、模糊综合评价法等[1]。非点源污染又称面源污染,是区别于点源污染而提出来的概念,其定义为伴随大规模降水和径流冲刷而造成的固体或者可溶性污染物进入水体而产生的水污染[2]。国外对非点源污染的研究开始于上世纪60年代,并得到迅速发展,主要分为三个阶段:①以通用土壤侵蚀方程为代表的统计分析模型;②以输出系数模型为代表的经验模型阶段;③以SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型为代表的机理模型阶段。我国对于非点源污染的研究起步较晚,由于非点源污染具有难检测性,数据获取比较困难,进行基于物理性质的机理模型模拟困难较大,所以常常建立经验模型进行非点源污染的研究。上世纪90年代,随着点源污染得到有效治理,非点源污染逐渐成为地区水环境污染的主要原因。柏条河作为成都市重要集中式饮用水水源地,得力于管理者的管理,流域内点源污染已经得到了有效的控制,流域内污染主要以非点源污染为主。为了更好地评估研究区水质,保证安全生活用水,本文利用主成分分析法和综合污染指数法对研究区2017年水质进行综合评价,并结合源强系数法、输出系数法以及等标污染负荷法对流域内非点源污染进行综合评估。

2. 研究区及数据

2.1. 研究区概况

柏条河流域位于成都平原西北部，介于东经 103°42′至 104°2′，北纬 30°43′至 30°52′之间，其起于都江堰市蒲柏闸，止于郫都区团结镇石堤堰枢纽，流经都江堰、彭州、郫都三个区县，共计 14 个乡镇，全长 44.76 公里，流域面积 258 平方公里，详见图 1。流域地处亚热带大陆性气候区域，多年平均气温 16°C，地势大体呈现出西北高东南低的趋势。柏条河径流主要来源于岷江，多年平均流量 37.0 m³/s，流域水系发育。

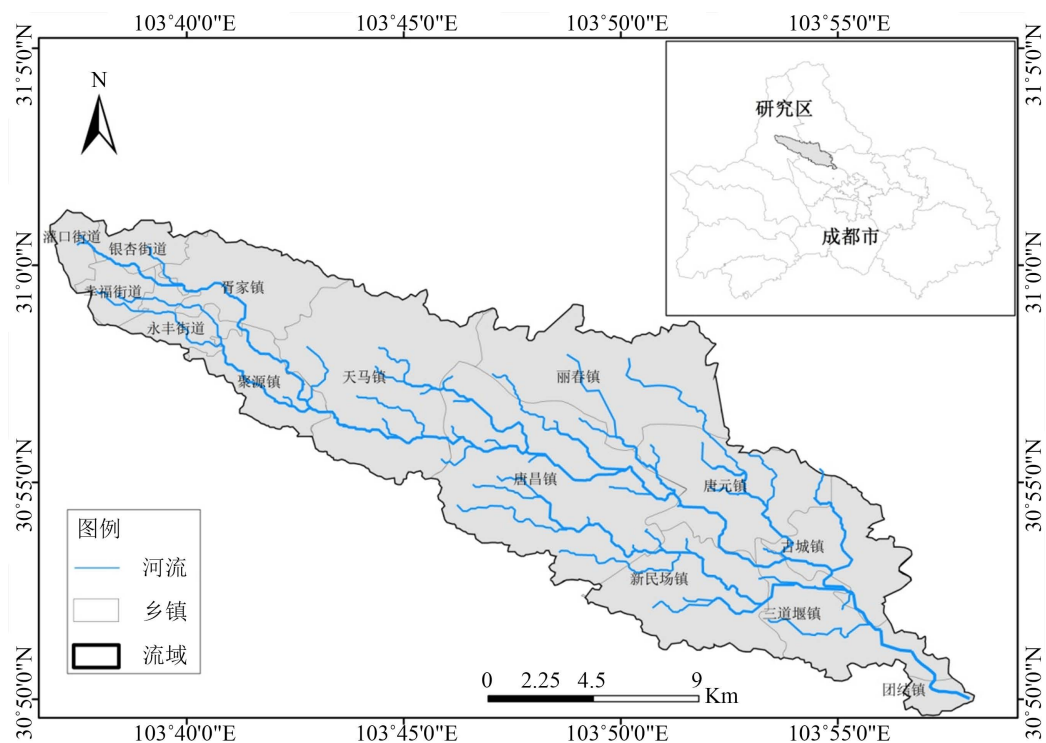


Figure 1. Geographic location and water system of the study area
图 1. 研究区地理位置及水系图

2.2. 数据来源

研究区用到的四川省数字高程(DEM)数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>),精度为 30 m。水质数据来源于都江堰市环保局和郫都区环保局。流域涉及乡镇人口、畜禽养殖数据、化肥使用量、乡镇土地利用等数据分别来源于所涉及区县的统计局、畜牧局、农业农村局、生态环境局以及现场实地调研和问卷调查等。

3. 研究方法

3.1. 水质评价方法

3.1.1. 主成分分析法

主成分分析法是一种基于降维思想的多元统计方法，其通过正交变换将多个单一初始变量转换为少数综合变量。转换后的综合变量又称为主成分，各主成分之间不仅相互独立，而且保留了初始变量的大部分

信息, 因此分析研究问题时可主要考虑主成分, 这使得工作效率大大提高, 其公式如下[3]:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix}; r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (1)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix}; e_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \times 100\%; Y_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\sqrt{\lambda_i}} \quad (2)$$

式中, X 为标准化后的初始矩阵; r_{ij} 为初始变量 x_i 和 x_j 的相关系数; R 为相关系数矩阵; λ_i 和 μ_i 为矩阵 R 的特征值以及相应的特征向量, 其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_n$; e_i 为主成分 i 的贡献率; Y_{ij} 为主成分载荷, 一般选择 $Y_{ij} > 80\%$ 的作为关键因子。

3.1.2. 综合污染指数法

综合污染指数是通过将各单项污染指数加权平均计算而来, 其计算公式如下[4]:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}; P_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i; K_i = \frac{P_i}{nP_j} \times 100\% \quad (3)$$

式中, P_i 为水质因子 i 的单项污染指数; C_i 为水质因子 i 的实测值, mg/L; S_i 为水质因子 i 的标准值, 一般选取Ⅲ类水为标准值, mg/L; P_j 为水体的综合污染指数; K_i 为水质因子 i 的污染分担率。综合污染指数水质类别判别标准如表 1 所示。

Table 1. Comprehensive pollution index water quality category standard

表 1. 综合污染指数水质类别标准

综合污染指数	水质类别	综合污染指数	水质类别
≤0.20	水质清洁	0.71~1.00	中度污染
0.20~0.40	水质良好	1.01~2.00	重度污染
0.41~0.70	轻度污染	>2.00	严重污染

3.2. 非点源污染分析方法

3.2.1. 源强系数法

源强系数法[5]于 2003 年由中国环境规划院提出, 因其在计算污染物 COD 中具有使用简单、准确度高优点, 被广泛用于非点源污染负荷中 COD 的计算, 且在国内有较好的应用。我国标准污染源的源强系数[5] [6] [7]如表 2 所示。

Table 2. Intensity coefficient and inflow coefficient of standard pollution sources

表 2. 标准污染源的源强系数和入河系数

类型	单位	COD	入河系数
农村居民	g/(per·d)	40	0.1
城镇居民	g/(per·d)	50	0.1
农田	t/(ha·a)	0.149	0.1
猪	g/(ca·d)	18	0.1

其基本原理为通过给定某种污染源一个标准的源强系数,根据污染源实际特征加以修正而得到某种污染源的源强系数,进而计算污染物排放量。以农业面源为例,标准农田定义为降雨量在 400~800 mm/a 之间,化肥用量为 373~522 kg/(ha·a),地处平原地带的小麦田,其 COD 源强系数为 0.149 t/(ha·a)。根据地形、作物类型、化肥施用量、年降雨量等特征值的不同,利用式(4)对其源强系数进行修正并计算相关污染物的排放量[8]。

$$L = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i P_i C_i F_i E_i \quad (4)$$

式中: L 为农业面源污染物排放量, t/a; E_i 为标准农田的源强系数, t/(ha·a); α_i 、 S_i 、 P_i 、 C_i 和 F_i 分别为农田 i 的坡度、土壤类型、降雨量、作物类型和化肥施用量的修正系数,为无量纲值。

3.2.2. 输出系数法

Johnes 和 O'Sullivan [9]等人于 1989 年最早提出了输出系数法的概念,其具有所需基础资料少、计算方便、准确度高等特点,因而在国内外具有较广泛的应用,在国内常常被用于非点源污染中 TN、TP 的计算。随后 Johnes 等人[10]在考虑作物固氮作用、人类污水处理设施、土地利用管理等对污染物输出的影响后,提出了改进的输出系数模型。本研究采用了改进的模型,见公式[11] (5):

$$L = \sum_{i=1}^n E_i [A_i (I_i)] + p \quad (5)$$

其中, L 为污染物的排放量, t/a; E_i 为营养源 i 的输出系数, t/(km²·a)或 kg/(per·a)或 kg/(ca·a); A_i 为土地利用类型 i 的面积, km²; 或畜禽类型 i 的数量, 只; 或人口数量, 人; I_i 为污染源 i 的输入量, t/a; p 为降水中污染物输入, t/a。

输出系数法中起关键作用的是输出系数的取值,取值的大小直接决定了各污染源中污染物(TN、TP)排入水体比例。由于研究区缺乏长期监测资料,本研究主要采用文献法[12]来确定输出系数的大小。各污染类型(旱地、水稻田、果园除外)输出系数直接引用自文献,旱地、水稻田和果园的输出系数利用化肥施用量进行修正,详见表 3。

Table 3. Output coefficients of each non-point source

表 3. 各非点源的输出系数

类型	单位	TN	TP
旱地	t/(km ² ·a)	0.120	0.00550
水稻田	t/(km ² ·a)	0.075	0.00545
果园	t/(km ² ·a)	0.042	0.0033
建设用地	t/(km ² ·a)	0.550	0.0144
生活污水	kg/(per·a)	0.935	0.1284
猪	kg/(ca·a)	0.695	0.0852
天然林地	t/(km ² ·a)	0.119	0.0090
荒地	t/(km ² ·a)	0.745	0.0306

3.2.3. 等标污染负荷法

为了将不同污染物对水环境的污染程度进行比较,本文引入等标污染负荷法[6]。通过将各污染源产生的污染物按统一评价标准转化,计算出各污染源产生的污染物占总污染负荷的比例,得出研究区主要污

污染源；通过计算各污染物占总污染负荷的比例，得出研究区主要污染物。公式[13]为：

$$P_j = \sum P_{ij}; P_{ij} = \frac{G_{ij}}{S_i} \quad (6)$$

式中： P_j 为第 j 种污染源的等标污染负荷，(t/a)/(mg/L)； P_{ij} 为第 j 种污染源中第 i 种污染物的等标污染负荷，(t/a)/(mg/L)； G_{ij} 为第 j 种污染源中第 i 种污染物的年排放量，t/a； S_i 为第 i 种污染物的评价标准，mg/L。

4. 结果与分析

4.1. 水质评价

柏条河流域设有金马、石堤堰两个水质监测断面，本文基于 2017 年两个断面的水质监测数据进行水质评价。将检出的 12 项水质因子原始监测数据导入 SPSS 软件进行主成分分析，结果表明：分析的数据通过了 $KMO > 0.5$ ， $P < 0.05$ 的置信区间的检验，能够适用于主成分分析。主成分的选取原则一般包括：① 特征值大于 1；② 累计贡献率大于 80%。各主成分因子荷载值如表 4 所示。由表 4 可知，选出的 2 个主成分相应特征值分别为 5.962 和 4.092，累计贡献率为 83.408%，表明这 2 个主成分可以基本代替监测数据中的绝大部分信息。在第 1 主成分中荷载较大的有 TN、TP，第二主成分中荷载较大的是 COD，因此选择 TN、TP 和 COD 作为本次水质评价指标。

Table 4. Principal component analysis factor load value

表 4. 主成分分析因子荷载值

指标	第1主成分	第2主成分
PH	-0.233	0.495
TN	0.913	-0.176
TP	0.762	-0.162
DO	0.205	0.364
COD	0.570	-0.651
COD _{Mn}	0.205	0.304
BOD	0.324	-0.040
NH ₃ -N	0.515	-0.086
氟化物	0.319	0.355
石油类	0.578	0.585
阴离子表面活性剂	0.231	0.493
砷	0.369	0.249
特征值	5.962	4.092
贡献率	49.460	33.947
累计贡献率	49.460	83.408

在筛选出水质评价指标的基础上，计算各指标所占污染比重，结果如图 2 所示。2017 年，两断面污染贡献率最高的都是 TN，所占比重都在 50%左右；TP 次之，污染比重仍达到 30%。综上表明，TN 对柏条河水质的影响最大，需得到重点关注。

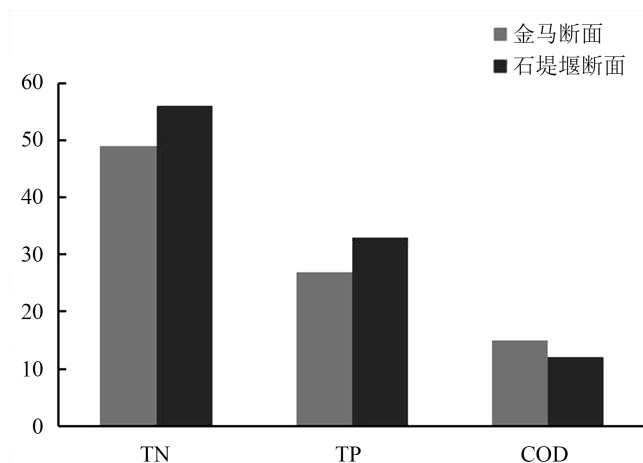


Figure 2. Pollution bearing rate of water quality evaluation index in the study area

图 2. 研究区水质评价指标污染承担率

综合分析金马、石堤堰断面 2017 年不同月份污染指数变化(见图 3), 结果表明: 两个断面水质情况较好, 金马断面全年污染指数介于 0.16~0.39 之间, 年平均污染指数为 0.28, 属于水质良好。而对石堤堰断面来说, 污染指数范围为 0.21~0.45, 年平均污染指数为 0.31, 除 8 月属于轻度污染外, 其余月份水质均属于良好。两断面污染指数从 5 月开始迅速增加, 在 8 月达到峰值。出现上述现象的原因可能为随着汛期的到来, 降雨逐渐增多, 在降雨的驱动下, 地表污染物随着径流进入水体, 使得污染物浓度进一步增加。

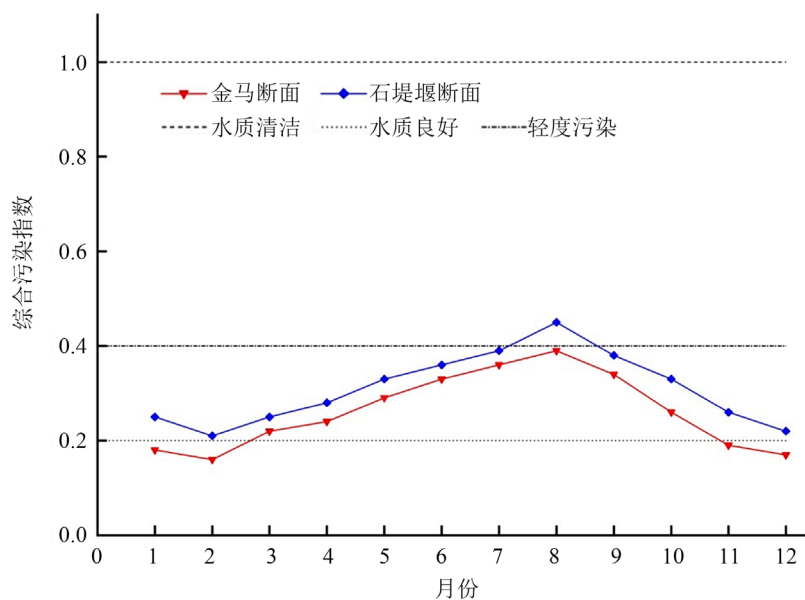


Figure 3. Annual distribution of comprehensive pollution index in Baitiao River

图 3. 柏条河年内综合污染指数分布

4.2. 非点源污染总量分析

本文结合输出系数法、源强系数法和等标污染负荷法, 选取 COD、TN、TP 作为评价污染物对研究区 2017 年污染情况进行评估, 具体计算结果见表 5。

Table 5. Equal-standard pollution load and equal-standard pollution load ratio (t/a)/(mg/L) of pollution sources entering rivers
表 5. 研究区各污染源入河等标污染负荷及等标污染负荷比(t/a)/(mg/L)

污染源	等标污染负荷(t/a)/(mg/L)				等标污染负荷比(%)			
	COD	TN	TP	总计	COD	TN	TP	总计
农业面源	28.57	46.48	12.2	87.25	4.09	6.66	1.75	12.49
畜禽养殖	4.27	21.98	13.45	39.70	0.61	3.15	1.93	5.68
农村生活污水	21.48	275.15	188.95	485.58	3.08	39.40	27.05	69.53
城市生活污水	3.80	48.67	33.40	85.87	0.54	6.97	4.78	12.30
总计	58.12	392.28	248.00	698.4	8.32	56.17	35.51	100.00

1) 主要污染源: 由表 4 可知, 农村居民生活污水和农业面源污染是研究区的主要污染源, 占有所有污染源的 82.02%, 其中农村居民生活污水贡献率最大, 其等标污染负荷比为 69.53%。

2) 主要污染物: 研究区内各污染物污染负荷表现为 $TN > TP > COD$, 其中, TN 等标污染负荷占总负荷的 56.17%, 是研究区内主要污染物; 其次为 TP, 约占 35.51%, 这与研究区水质评价结果一致。

4.3. 非点源污染空间分析

4.3.1. 从污染源的角度分析

利用四种污染源的污染负荷的计算结果, 通过 Arcgis 软件研究其空间分布, 结果如图 4 所示。由图可知, 农村生活污水污染负荷中, 污染贡献率最大的乡镇(街道)为丽春镇, 所占比例为 20.27%, 其次为唐昌镇, 所占比例为 14.17%。城镇生活污水污染负荷中, 污染贡献率最大的乡镇(街道)为灌口街道, 所占比例为 39.83%, 其次为幸福街道, 所占比例为 19.38%。农业面源污染负荷中, 污染贡献率最大的乡镇(街道)为丽春镇, 所占比例为 17.32%, 其次为唐昌镇, 占比为 10.09%。畜禽养殖污染负荷中, 污染贡献率最大的乡镇(街道)为新民场镇, 所占比例为 13.04%, 其次为丽春镇, 所占比例为 11.55%。

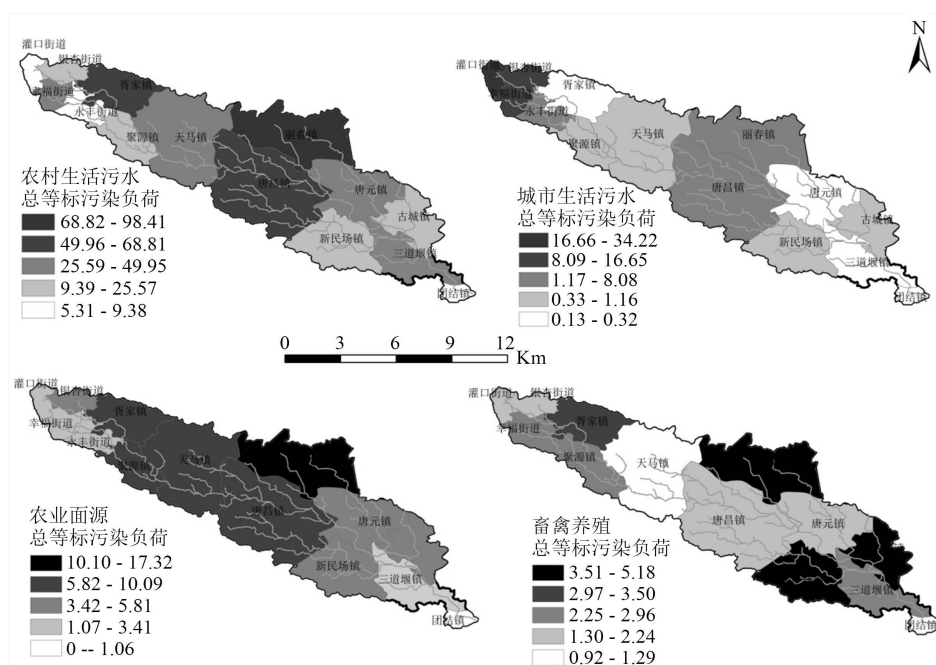


Figure 4. Pollution load of each pollution source

图 4. 各污染源等标污染负荷

4.3.2. 从污染物的角度分析

研究区内三种污染物的污染负荷空间分布如图 5 所示。从图 5 可以看出, 污染物在空间分布上较一致。在 TN、TP 等标污染负荷中, 污染贡献率前三的乡镇(街道)分别为丽春镇、唐昌镇和胥家镇。COD 等标污染负荷中, 污染贡献率前三的乡镇(街道)分别为丽春镇、胥家镇和唐昌镇。其中, 丽春镇、唐昌镇和胥家镇的 3 种污染物污染负荷在所研究乡镇(街道)中都居前三, 需要进行重点关注并根据实际情况进行有效治理。

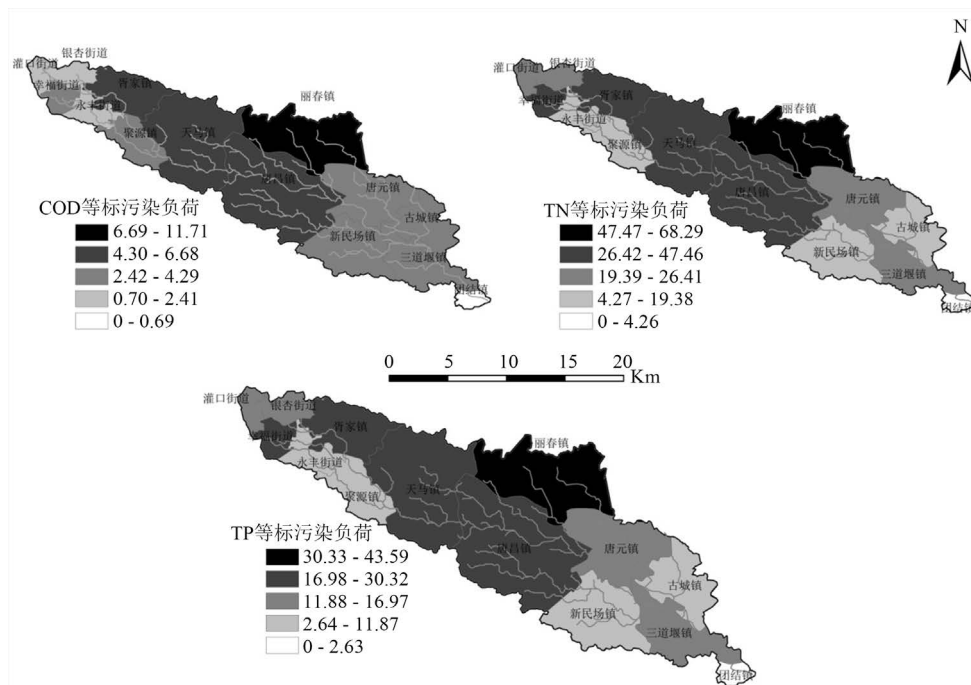


Figure 5. Pollution load of each pollutant standard

图 5. 各污染物等标污染负荷

5. 结论

本文首先通过主成分分析法筛选出研究区主要污染物为 TN、TP、COD, 利用综合污染指数法对研究区 2017 年水质进行综合评价, 进而选取源强系数法、输出系数法对柏条河流域内 4 种污染源(农村生活污水、城市生活污水、农业面源、畜禽养殖)和 3 种污染物(TN、TP、COD)进行模拟计算, 并通过等标污染负荷法对流域内非点源污染进行综合分析, 得出以下结论及建议:

1) 柏条河流域水质整体较好, 但存在个别月份水质不达标情况, 且丰水期水质劣于枯水期水质。

2) 从污染源的角度分析, 柏条河流域 4 种污染源所产生的污染负荷贡献率依次为农村生活污水 > 农业面源 > 城镇生活污水 > 畜禽养殖。因此柏条河流域要减少非点源污染, 应重点加强对农村生活污水的治理, 除了加强水污染宣传、设立专门的奖惩制度外, 还应加快农村污水处理站和相关污水处理设施的建设。

3) 从污染物的角度分析, 研究区内三种污染物的总等标污染负荷分别为 TN (56.17%)、TP (35.5%)、COD (8.2%), 流域内最严重的污染物是 TN。

4) 从乡镇(街道)角度分析, 研究区内污染负荷最严重的乡镇(街道)为丽春镇, 其次为唐昌镇、胥家镇, 需得到重点治理。

基金项目

成都市科技惠民项目“面源污染防治关键技术成都市集中式饮用水源地流域的集成应用示范”(2015-HM02-00103-SF)。

参考文献

- [1] 王睿, 左剑恶, 张宇, 任海腾, 于中汉, 陈磊. 北京通州区主要河道水质分析及综合评价[J]. 给水排水, 2020, 56(S1): 724-728, 736.
- [2] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., et al. (1998) Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- [3] 顾小涵, 朱诗洁, 毛劲乔. 基于主成分分析的滨湖城市生态水利效益评价研究[J]. 人民珠江, 2021, 42(1): 93-99.
- [4] 冉晓频. 综合污染指数法在酉阳县小坝水库水质评价中的应用[J]. 绿色科技, 2017(12): 71-72.
- [5] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R]. 北京, 2003.
- [6] 四川省环境保护厅, 四川省环境科学研究院. 四川省水环境容量核定技术指南[R]. 成都, 2004.
- [7] 自贡市环境保护局. 釜溪河流域水污染综合治理实施方案[R]. 自贡, 2011.
- [8] 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.
- [9] Johnes, P.J. and O'Sullivan, P.E. (1989) Nitrogen and Phosphorus Losses from the Catchment of Slapton Ley, Devon—An Export Coefficient Approach. *Fields of Study*, 7, 285-309.
- [10] Johnes, P.J. (1996) 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. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 183, 323-349. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02951-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02951-6)
- [11] 刘凌雪, 敖天其, 胡正, 等. 琼江流域(安居段)水质及面源污染综合评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 372-376.
- [12] 刘瑞民, 沈珍瑶, 丁晓雯, 等. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 667-682.
- [13] 史小春, 敖天其, 黎小东, 等. 涪江流域(射洪境内)面源污染综合评价[J]. 水土保持研究, 2018(4): 375-379.