

沱江流域污染负荷与生态系统服务价值 空间关系解析研究

樊敏¹ 肖宇婷¹ 姚婧¹ 谌书¹ 刘云峰² 陈雯² 邓粤² 王美玲²¹

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;

2. 成都市沱江流域投资发展集团有限公司, 四川 成都 610000)

【摘要】: 沱江流域是四川盆地中部人类与水土资源发生相互作用最为频繁的区域, 近年来, 流域人口增长迅速、经济发展快速、城镇化进程加快, 导致该区域水环境污染日益严重和生态系统服务功能退化。采用单位土地利用类型面积生态系统服务价值赋值法和排污系数法, 分别对沱江流域 28 个区县的生态系统服务价值和污染负荷进行了估算, 揭示了两者在空间上的匹配关系, 以为流域水环境管理和生态保护提供建议。结果表明: (1) 沱江流域污染物排放量中 COD 排放最多, TP 排放最少, COD、NH₃-N、TN 和 TP 污染负荷的最大值分别为 71067.51、11108.76、21320.08 和 3073.99t。流域污染负荷的分布具有较大的空间异质性, 上游污染负荷较小, 中游污染负荷较大, 下游污染负荷相对于中游较低。(2) 流域 4 种类型生态系统服务价值的空间分布差异显著, 上游具有较大的供给型、调节型、支持型和文化型生态系统服务价值, 而总生态系统服务价值的空间分布格局与支持型生态系统服务的空间分布格局极为相似。(3) 沱江流域生态系统服务与污染负荷的空间匹配性差异显著, 其差异性较大值出现在流域的中下游, 需要构建合理的生态补偿机制和有效的污染负荷削减方案, 改善流域水环境和生态系统服务功能。因此, 流域污染负荷和生态系统服务价值的空间关系研究, 不仅加深了生态系统服务与污染负荷间关系的理解, 而且丰富了流域水环境生态管理的研究案例, 也为流域水环境质量管理 and 生态建设提供了依据。

【关键词】: 污染负荷 生态系统服务价值 空间异质性 空间匹配 沱江流域

【中图分类号】: X524 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)06-1354-16

水资源是社会生存与发展的不可或缺的因素, 其中流域生态系统给人类社会经济发展提供了十分重要的生态系统服务。人类在利用水资源的同时, 排入河流的过度污染负荷扰乱了维持生态系统循环的水流过程, 改变了流域的生态环境^[1]。流域污染负荷评估是识别流域污染控制优先区域的重要手段, 也是污染物总量控制的关键技术支持^[2,3,4]。污染负荷评估方法主要包括输出系数法、分布式模型法、污染分割法、降雨量差值法等^[5,6,7,8,9]。输出系数应用较为广泛, 其计算原理简单, 所需水文水力基础参数少, 又具有一定的精度, 适合估算大中尺度流域面源污染的年负荷量, 同时, 该方法结合多元统计方法(如主成分分析、聚类分析和相关性分析)和 GIS 空间可视化技术, 揭示流域污染负荷的空间分布特征, 为水环境质量空间变化的内在机理分析提供了数据支撑。

作者简介: 樊敏(1984~), 女, 副教授, 主要研究方向为流域生态系统服务功能与水环境。E-mail: firstfanmin@hotmail.com; 谌书 E-mail: crickswust@163.com

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目(2019YFS0057, 2019YFS0055, 2020YFS0306); 国家自然科学基金项目(41601088)

生态系统服务是指生态系统形成的、用于维持人类赖以生存和发展的环境条件与效用，是人类直接或间接从生态系统得到的所有收益，主要包括供给型(产水服务、粮食生产)、调节型(水土保持、水质净化)、支持型(生物多样性)和文化型(娱乐文化)生态系统服务^[10,11,12]。联合国千年生态系统评估表明，水土资源结构变化的改变是导致流域生态系统类型转变和格局变化的重要因素，也是导致生态系统服务变化的直接动力。水土资源结构变化直接影响水土资源的空间分布格局，进而影响生态系统服务的地域分异规律和可持续性^[13,14,15]。生态系统服务功能价值评估与制图能够揭示流域内不同土地利用类型的生态系统服务空间异质性，为辅助决策者童工流域生态系统管理的重要依据。流域作为一个完整的地理生态单元，当前面临着生态、环境、经济和社会发展难以解决的复杂问题，流域生态系统系统与居民在承受过度污染负荷排放时，迫切需要通过提升生态系统服务功能提供减缓污染负荷过度排放。因此，沱江流域污染负荷与生态系统服务价值空间关系解析研究从生态和水环境两方面探索流域生态系统服务和污染负荷的空间分布热点区域，为流域水土资源的可持续性管理提供科学依据。

沱江是长江上游的一级支流，流域面积约为 27860km²，主要包括 28 个区(县)是四川省工业城市比较集中的河流，随着工农业生产的发展和城镇化的加快，沱江水质状况不容乐观^[16]。2016 年四川省环境公报显示，沱江流域水质总体较差，其中，流域成都段和泸州段水质均处于劣Ⅲ类。先前关于沱江流域的研究多仅集中于污染负荷或生态系统服务价值的评估，未将流域污染负荷与生态系统服务的空间分布格局运用到流域水环境生态保护管理中去^[17,18,19,20]。如何维持流域污染负荷排放与生态环境保护之间的友好互动，量化污染负荷与生态系统服务功能之间的空间关系，成为流域水环境管理发展与突破的关键。因此，本文以沱江流域为研究区域，开展流域污染负荷和生态系统服务价值的空间相互作用关系研究，揭示人类社会经济活动对流域生态环境影响的作用机理，提出人类社会经济活动的生态约束条件，发展适用于沱江流域生态环境保护的理论与技术体系，确保流域生态系统健康及生态安全。

1 研究区域概况

沱江流域(103.68° E~105.76° E, 28.87° N~31.70° N)位于四川省中东部，流域多年平均降水量 1200mm，年径流量 351×10⁸m³，其中岷江补给约占 33.4%(图 1)。流域行政区域上主要包括了成都市、德阳市、资阳市、眉山市、内江市、自贡市、泸州市 7 个市级行政单位的 28 个区(县)级行政单元(图 2)^[17]。沱江全长 712km，地势总体上西北高东南低，境内有岷山、龙门山、龙泉山等山脉，地势较为平坦。在前人的研究基础上，本研究根据沱江流域的水系分布特征、地形地貌特点和县(区)行政单元的完整性，将沱江流域划分为上(源头至金堂赵镇)、中(金堂至内江)和下(内江至河口)游。该流域的土地利用类型主要以农田、林地和建设用地为主，分别约占整个区域的 78%、15%和 4%。境内人口比较集中，且工业和农业发达，截止 2016 年为止，流域内总人口为 1921.06 万人(农村人口为：974.61 万人，城市人口为：968.49 万人)，GDP 为 267.19 亿元，人均 GDP 达 52571.29 元/人，增长了近 5 倍，经济发展迅速。

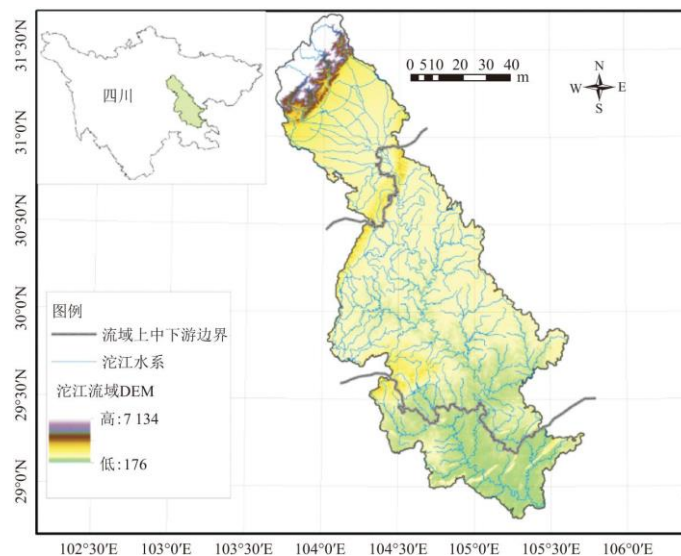


图 1 沱江流域地理空间分布图层

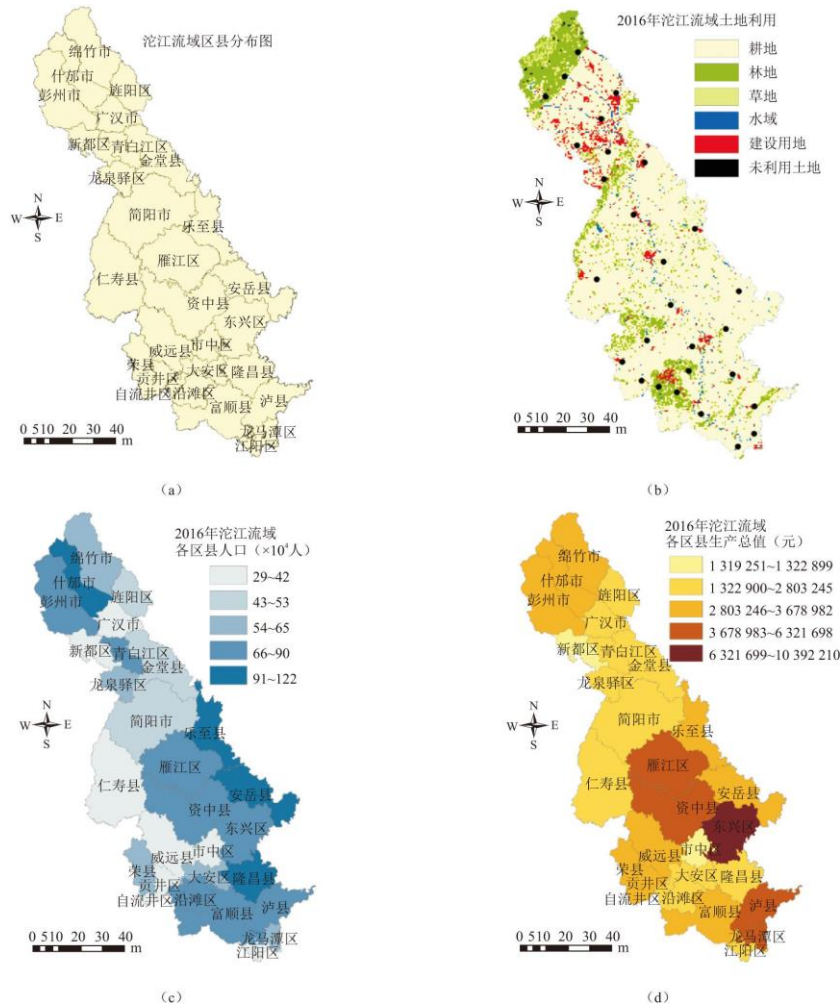


图 2 沱江流域自然-社会-经济因子空间分布图层

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

考虑到数据的可获取性，本文分别选取 2015 年土地利用类型数据计算生态系统服务价值和 2016 年的社会经济统计年鉴估算流域污染负荷。本研究所需的 2015 年土地利用类型空间分布均来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 和国家地球系统科学数据共享平台 (<http://www.geodata.cn/index.html>)；数字高程模型，来源于 30m 精度的 ASTERGDEM 数据和 90m 精度的 SRTM 数据；研究区域边界及区(县)行政单元图层，来源于国家地球系统科学数据共享平台 (<http://www.geodata.cn/index.html>)；研究流域所涉及的 28 个区(县)的《2016 年四川省农业统计年鉴》和《2016 四川统计年鉴》，来源于国家网络公开数据及当地政府公开出版年鉴；2016 年的工业污染源排放量，来源于四川省生态环境研究院。

2.2 研究方法

根据上述沱江流域研究背景以及意义，拟采用排污系数法、生态系统服务价值评估模型、多元统计分析方法和空间分析方法，从生态系统供需视角出发对流域污染负荷与生态系统服务价值间的空间相互作用关系进行深入研究，具体实施步骤如下：

(1) 本研究采用排污系数法对沱江流域 2016 年 28 个县(市、区)的各污染源污染负荷(COD、NH₃-N、TN、TP)进行估算，基于沱江流域的实地调研和对该流域的研究基础，该流域污染源非点源污染源主要包括畜禽养殖污染源、农村生活垃圾污染源、农村生活污染源、农田固废类污染源、农田径流污染源、城市径流污染源，点源污染源主要包括城镇生活污染源和工业点源^[21]。排污系数的确定通过参考第二次全国污染源普查产排污系数手册和文献检索法确定^[22]，各污染源污染负荷入河量的详细计算信息如表 1 所示。

表 1 各污染源污染负荷计算方法及相关参数的确定

污 染 源	污染负荷计算公式	参数选择
畜 禽 养 殖 污 染 源	$\text{畜禽养殖污染负荷} = \text{畜禽粪便排泄系数} \times \text{畜禽饲养量} \times \text{畜禽粪便中污染物平均含量} \times \text{畜禽粪便污染物流失率} + \text{畜禽尿液排泄系数} \times \text{畜禽饲养量} \times \text{畜禽尿液中污染物平均含量} \times \text{畜禽尿液污染物流失率}$	<p>本次估算采用原国家环保总局推荐的畜禽排泄系数进行估算，畜禽粪便流失率的确定依据的研究^[23]；畜禽粪便和尿液排泄系数和畜禽尿液、粪便中各污染物平均含量来源于原国家环保总局文件《关于减免家禽业排污费等有关问题的通知》</p>
农 村 生 活 污 染 源	$\text{农村生活污染负荷} = \text{人均产物系数} \times \text{人数} \times \text{入河系数}$	<p>参考《全国水环境容量核定指南》和《西南地区农村生活污水处理技术指南》，COD、NH₃-N、TN 和 TP 的人均产污系数分别取为 40、4、5 和 0.7g/人·d；另外，根据《主要水污染物总量分配指导意见》(环发[2005]185 号)及沱江流域农村居民住宅区与周围水体的距离，确定农村污水入河系数取 0.3^[24]</p>
农 村 生 活 垃 圾 污 染 源	$\text{农村生活垃圾污染负荷} = \text{农村人口总数} \times \text{人均垃圾产生量} \times \text{垃圾渗滤液中污染物平均含量} \times \text{入河系数}$	<p>农村人均产生生活垃圾约为 0.31kg/d，每吨积存生活垃圾的 COD、NH₃-N、TN 和 TP 释放负荷分别为 55、8.1、14 和 2.8kg，入河系数取 0.20^[25]</p>
农 田 固 废	$\text{农田固废污染负荷} = \text{作物产量} \times \text{作物秸秆固废产量比} \times \text{农作物固废污染物含量} \times \text{秸秆养分流失率} \times \text{产污系数}$	<p>沱江流域稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类、油料(花生、油菜)的秸秆粮食比分别取为 0.97、1.03、1.37、1.71、0.61 和 2.26；秸秆养分流失率和产污系数取自前人相关的研究^[26,27]</p>

类污染源		
农田径流污染源	$L = \sum_{i=1}^n a_i S_i F_i$	<p>其中, L 为农田地表径流的污染物排放量; a_i 为修正后农田源强系数, S_i 入河系数, F_i 耕地面积, 标准农田源强系数为 COD150kg/hm²·a, NH₃-N30kg/hm²·a, TN51kg/hm²·a, TP6.9kg/hm²·a; 结合沱江流域地形、气象和农田用地类型等实际情况分别取坡度修正系数为 1.2、农作物类型修正系数(水田为 1.5、旱地为 1.0)、化肥使用量修正系数为 1.1、降水量修正系数为 1.1、土壤修正系数为 1.0; 入河系数取 0.05^[28]</p>
城市径流污染源	<p>城市径流污染负荷=城镇建设用地面积×年均连续降雨量大于 10mm 的频次×径流中污染物浓度</p>	<p>城镇径流中 COD、NH₃-N、TN、TP 浓度分别为 302.79、1.71、15.99、1.67mg/L^[29]; 沱江流域年均连续降雨量大于 10mm 的频次取为 24 次; 城镇建设用地面积来自于前文土地利用类型空间分布图层中建筑用地面积的统计</p>
城镇生活污染源	<p>城镇生活污染量=人均产污系数×人数×入河系数</p>	<p>根据《主要水污染物总量分配指导意见》和沱江流域各市区居民住宅区与周围水体的距离, COD、NH₃-N、TN 和 TP 的人均产污系数分别取为 75、5、9 和 1.2g/人·d; 城镇污水入河系数取 0.9(城镇生活污染源的污染负荷部分在生活污水厂处理后, 以点源的形式排出, 该部分数据由四川省生态环境研究院提供; 剩余部分城镇生活污染源的污染负荷以非点源排放)</p>
工业污染源	——	由四川省生态环境研究院提供

(2) 计算生态系统服务价值的关键是土地利用类型单位面积生态系统服务价值赋值, 本文基于全球生态服务价值的估算^[1,2]和我国生态服务价值系数表^[30,31], 并结合沱江流域实际情况, 确定食物生产生态服务价值当量因子的经济价值量等价于当年平均粮食单产市场价值的 1/7^[32,33], 得到沱江流域不同土地利用类型的单位面积生态系统服务价值(表 2)。然后以区(县)行政区域为生态系统服务的管理单元, 在 GIS 平台下, 将栅格尺度生态系统服务和价值与乡镇行政边界进行精确叠加, 采用区域统计分析, 将栅格尺度生态系统服务和价值转化到区(县)行政单元, 得到各区(县)生态系统服务价值。

表 2 沱江流域不同土地利用类型的单位面积生态系统服务价值(元·hm⁻²·a⁻¹)

土地利用类型	气体调节	气候调节	水源涵养	土壤形成与保护	废物处理	生物多样性保护	食物生产	原材料	娱乐文化
农田	913.12	1625.34	1095.74	2666.3	2995.02	1296.62	1826.23	182.62	18.26
林地	6391.81	4930.82	5843.94	7122.3	2392.36	5953.51	182.62	4748.2	2337.57
草地	1460.98	1643.61	1460.98	3561.15	2392.36	1990.59	547.87	91.31	73.05
水体	0	840.07	37218.57	18.26	33200.86	4547.31	182.62	18.26	7925.84
建设用地	0	0	54.79	36.52	18.26	620.92	18.26	0	18.26
未利用土地	0	0	54.79	36.52	18.26	620.92	18.26	0	18.26

沱江流域各类土地利用的生态服务价值、各生态服务功能类型的生态服务价值及其总的生态服务价值的主要计算公式如下：

$$ESV_k = A_k \times VC_k \quad (1)$$

$$ESV = \sum_k A_k \times VC_k \quad (2)$$

$$ESV_f = \sum_k A_k \times VC_{kf} \quad (3)$$

式中： ESV_k 、 ESV 和 ESV_f 分别表示土地利用类型 k 的生态服务价值，总的生态服务价值和生态服务功能类型 f 的价值； A_k 是土地利用类型 k 的面积 (公顷)； VC_k 代表土地利用类型 k 的单位面积生态服务价值 (元 \cdot $hm^{-2}a^{-1}$) 和 VC_{kf} 是土地利用类型 k 具有生态服务功能类型 f 的价值 (元 \cdot $hm^{-2}a^{-1}$)。

(3) 为了进一步揭示污染负荷 (COD、 NH_3-N 、TN、TP) 与生态系统服务价值 (供给型生态系统服务价值、调节型生态系统服务价值、支持型生态系统服务价值和文化行生态系统服务价值) 间的相互作用关系，采用 Pearson 相关分析法计算各污染负荷和各生态系统服务类型间的相关系数^[34]。同时，采用 GeoDA 中的双变量空间自相关在表征生态系统服务与污染负荷间的相关性，还能揭示空间分布匹配性^[35]。此外，根据前人对流域水环境功能和生态系统功能评价的研究^[36, 37, 38, 39]，本研究采用主成分分析分别将各类型流域污染负荷和生态系统服务价值进行降维处理，并求出污染负荷和生态系统服务价值的综合得分，并将其归一化，用生态系统服务价值的归一化值减去流域污染负荷的归一化值，从而得到两者的空间匹配关系。

3 结果

3.1 流域各污染负荷空间分布

沱江流域污染物排放量中 COD 排放最多，TP 排放最少， NH_3-N 和 TN 介于两者之间，COD、 NH_3-N 、TN 和 TP 污染负荷的最大值分别为 71067.51、11108.76、21320.08 和 3073.99t (图 3)。沱江流域各污染负荷的空间分异特征明显，沱江上游污染负荷较小，中游污染负荷较大。COD、 NH_3-N 、TN 和 TP 污染负荷最大值均主要出现在中游的简阳市、仁寿县、雁江区、资中县和安岳县。

3.2 流域各生态系统服务价值空间分布

根据沱江流域不同土地利用类型的单位面积生态系统服务价值，本研究计算了整个区域和 28 个区县的供给型 (食物生产、

原材料)、调节型(气体调节、气候调节、水源涵养、废物处理)、支持型(土壤形成与保护、生物多样性保护)和文化型(娱乐文化)生态系统服务价值。从流域整体上看,耕地和林地提供了该区域主要的生态系统服务价值,这与较广的耕地和林地分布面积有关,分别约占流域面积的78%和14%(表3)。农田、林地、水体、草地和建设用地提供的总生态系统服务价值分别为 24.02×10^9 、 14.12×10^9 、 3.45×10^9 、 0.47×10^9 和 0.076×10^9 元。未利用土地提供的总生态系统服务价值最小,为 24.02×10^9 元,这与该种土地利用类型分布面积较少有关。林地提供的气体调节和原材料生态系统服务价值最高,这与林地提供的气体调节单位面积生态系统服务价值($6391.81 \text{元} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)和原材料单位面积生态系统服务价值($4748.2 \text{元} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)有关,其余各种类型的较高生态系统服务价值均由耕地提供。

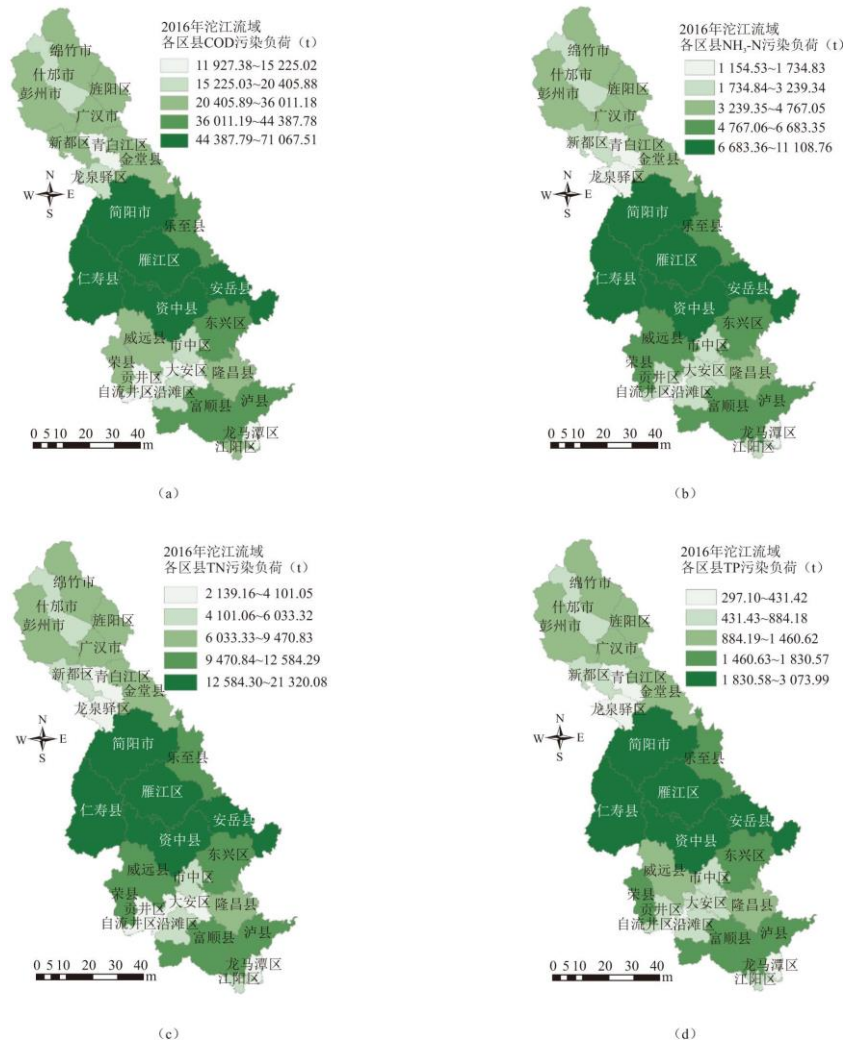


图3 沱江流域污染负荷空间分布图层

表3 沱江流域不同土地利用类型的生态系统服务价值($\times 10^9$ 元)

生态系统服务类型	土地利用类型					
	农田	林地	草地	水体	建设用地	未利用土地
气体调节	1.74	2.26	0.052	0	0	0

气候调节	3.09	1.75	0.059	0.035	0	0
水源涵养	2.09	2.07	0.052	1.53	0.0054	0.00015
土壤形成与保护	5.08	2.52	0.13	0.00075	0.0036	0.000099
废物处理	5.70	0.85	0.085	1.36	0.0018	0.000049
生物多样性保护	2.47	2.11	0.071	0.19	0.061	0.0017
食物生产	3.48	0.065	0.020	0.0075	0.0018	0.000049
原材料	0.35	1.68	0.0033	0.00075	0	0
娱乐文化	0.035	0.83	0.0026	0.33	0.0018	0.000049
供给型生态系统服务	3.82	1.75	0.023	0.0083	0.0018	0.000049
调节型生态系统服务	12.62	6.92	0.25	2.93	0.0072	0.00020
支持型生态系统服务	7.54	4.63	0.20	0.19	0.065	0.0018
文化型生态系统服务	0.035	0.83	0.0026	0.33	0.0018	0.000049
总生态系统服务	24.02	14.12	0.47	3.45	0.076	0.0021

为了进一步揭示生态系统服务的空间分布格局和实现流域生态保护的可操作性，本研究分别量化了沱江流域各区县供给型、调节型、支持型和文化型的空间分布特征(图 4)。4 种类型生态系统服务价值的空间分布特征差异显著，4 种类型生态系统服务价值的较大值均包括上游的绵竹市和彭州区，供给型、调节型、支持型生态系统服务价值的较大值出现在流域中游的简阳市和仁寿县，此外，资中县的供给型和调节型生态系统服务价值较高，这也与该区域的土地利用类型是以耕地为主有关。新都区和青白江区的供给型、调节型、支持型生态系统服务价值均较小，市中区、贡井区和自流井区也一直是较低供给型、调节型、支持型生态系统服务价值的分布区。

3.3 流域生态系统服务价值与污染负荷空间关系分析

本文采用 Pearson 相关分析法计算各污染负荷和各生态系统服务类型间的相关系数的结果如表 4 所示。各污染负荷与供给型生态系统服务的相关性较大，其次为调节型和支持型生态系统服务，与文化型生态系统服务的相关性较小，尤其是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 污染负荷与供给型生态系统服务的相关性高达 0.703。因为供给型生态系统服务与各污染负荷的相关性较高，以及各污染负荷空间分布的相似性，本研究进一步揭示了供给型生态系统服务与 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷的空间相关($\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 负荷与供给型生态系统服务的空间相关性相似)(图 5)。供给型生态系统服务和 COD 污染负荷在简阳县、仁寿县、雁江区、资中县和安岳县都处于高值水平，且该高值的分布对以上 5 个区(县)的相邻区域也有较大的影响，而供给型生态系统服务低值和 COD 污染负荷高值出现在乐至县。供给型生态系统服务和 COD 污染负荷在自流井区都处于低值水平。供给型生态系统服务和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染负荷在仁寿县、雁江区、资中县和安岳县都处于高值水平，供给型生态系统服务低值和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染负荷高值也出现在乐至县，供给型生态系统服务和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染负荷在自流井区都处于低值水平。

根据沱江流域 28 个区县的 4 种污染负荷和 4 种类型生态系统服务，本文采用主成分分析求出污染负荷和生态系统服务价值的综合得分，并将其归一化，得到沱江流域污染负荷与生态系统服务价值归一化值及其差值空间相关分布图层(图 6)。流域生态

系统服务较大的区域主要包括绵竹市、彭州市和简阳市，而流域污染负荷较大的区域主要包括简阳市、仁寿县、雁江区、资中县和安岳县。流域生态系统服务较低的区域主要包括青白江区和市中区，而流域污染负荷较低的区域主要包括青白江区、市中区、贡井区、大安区、沿滩区和自流井区。沱江生态系统服务价值与污染负荷归一化值的高值区域主要包括仁寿县和雁江区，该区域的综合生态系统服务和污染服务在空间上具有较高的相关性，而沱江生态系统服务价值的归一化低值与污染负荷的归一化高值出现在乐至县。按自然断点法将沱江生态系统服务价值与污染负荷归一化值间的差值划分为五大类，绵竹市、什邡市和彭州市生态系统服务远高于污染负荷，龙泉驿区、简阳市、威远县、大安区、沿滩区和自流井区生态系统服务较高于污染负荷。沱江流域东南区域的生态系统服务小于污染负荷，尤其是安岳县，其差值达到-0.68。

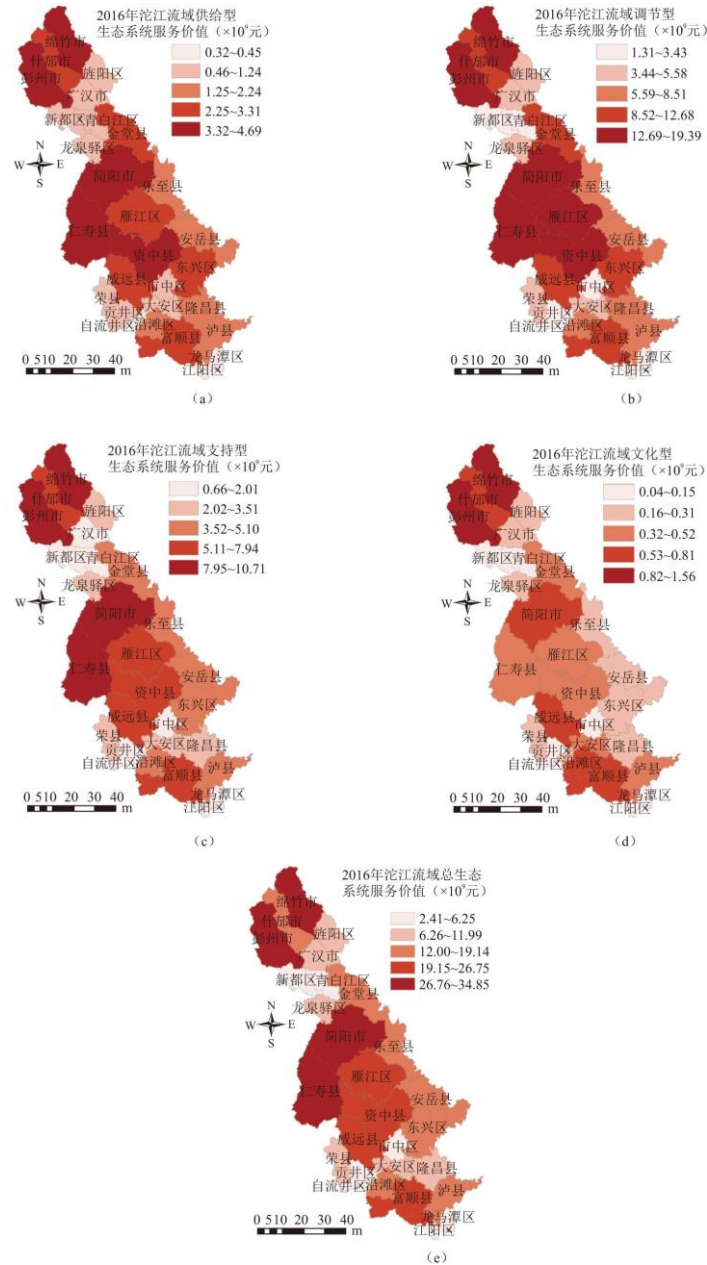


图4 沱江流域生态系统服务价值空间分布图层

表4 沱江流域各污染负荷与各生态系统服务类型的相关性

污染负荷	生态系统服务类型			
	供给型生态系统服务	调节型生态系统服务	支持型生态系统服务	文化型生态系统服务
COD	0.696**	0.666**	0.606**	0.155
NH ₃ -N	0.703**	0.672**	0.616**	0.172
TN	0.698**	0.667**	0.609**	0.163
TP	0.703**	0.672**	0.615**	0.171

注: **p<0.01.

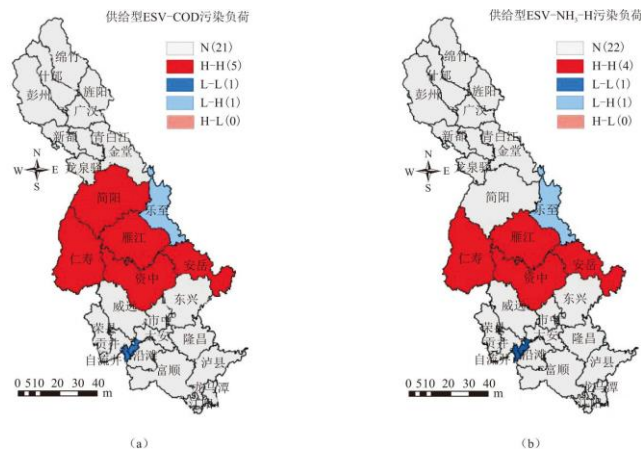


图5 沱江流域污染负荷与供给型生态系统服务空间相关性分布图层

4 讨论

4.1 流域污染负荷空间分布特征

如果想要维持人类活动与流域生态环境保护之间的友好互动,流域污染负荷空间分布成为流域水环境管理的关键^[31,40]。沱江流域成都段彭州市、都江堰市和金堂县地表水资源量均较丰富,彭州市、新都区地下水资源量相对丰富,流域中下游地表水资源量和地下水资源量均相对匮乏^[5]。自2016年11月至2017年11月,沱江流域上游地区的湔江、蒲阳河、青白江及其相应点位水质相对较好,以II沱江流域类为主;中游地区的毗河、西江河、长流河上的相应点位水质最差,基本上以劣V类为主;下游地区(以沱江干流为主)的相应点位水质以IV应点类为主^[18]。此外,沱江流域总人口占四川总人口的30%以上,平均人口密度是全国平均人口密度的5倍多,巨大的土地人口承载力和高强度的自然资源开发,导致该流域水环境功能退化异常严重,水质严重超标,水质污染来源为生活污水、工业废水和农业污染等^[16]。由于各区县自然(降雨和地形)和社会-经济(城市和农业人口、粮食和经济作物产量)驱动因子,沱江流域各污染负荷的空间分异特征明显,沱江上游污染负荷较小,中游污染负荷较大(图3)。沱江上游4种污染负荷均较小,这与该区域的地形地貌和植被等因素有关,流域源头地势较高、贮有丰富的地下水源、土地利用类型为林地,导致产生的污染负荷较小。除源头外,虽然上游其它区域地势较为平坦且土地利用类型为建设用地,但该区域污水处理厂及配套管网设施较为完善,大大降低了污染负荷的产生。

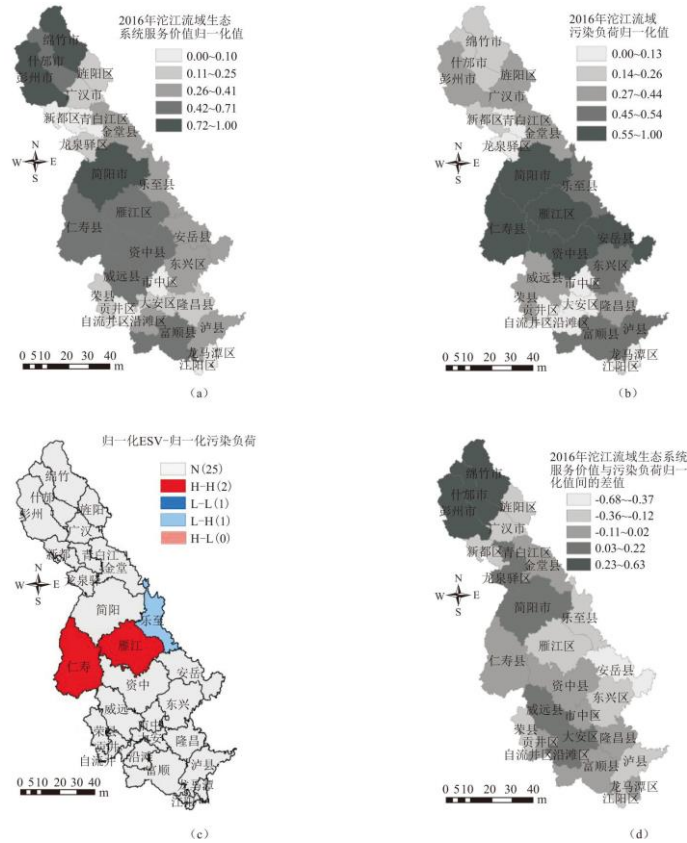


图 6 沱江流域污染负荷与生态系统服务价值归一化值及其差值空间相关分布图层

沱江中游地势平坦、土地肥沃、水流缓和、土地利用类型为耕地和建设用地，工农业活动集中而频繁(图 2)。由于吸纳了中游两岸的化工、机械和造纸等行业的工业废水、沿岸场镇生活污水和流域两岸农村面源污染，造成了中游的水质重度污染^[19]。区域大部分农村没有污水管网和垃圾处理系统，大部分都直接排入河道，造成地表水严重污染，特别是，简阳市乡镇污水处理设施严重不足，其乡镇收集处理率仅为 13.1%。在快速城镇化过程中，人口结构变化导致城镇特别是城乡结合部排放的生活污水导致了负荷不断增加。沱江流域中段遍布着规模不等的畜禽以及大量散养农户，其产生的废弃物排放绝大多数没有经过任何处理直接排放，相对应的污染物处理设备也没有配套跟上，给水环境造成严重污染。该区域农药和化肥的使用量过大，含磷量大的畜禽粪便、农药化肥等污染通过地表径流进入河流，造成雨季河流流量增加，总磷超标更严重的原因。大量流动人口从农村到城市打工、就业，到了农耕季节返乡选择雨季后施用氮、磷肥，再加上农田没有保护性缓冲截留措施，形成降雨径流后直接进入地表水体中，或者下渗形成壤中流排放地表水体，成为导致该地地表水氮、磷污染程度恶化的主要原因。沱桥下游污染负荷相对于中游较低，表明内江至河口段没有重大排污口，对沱江水质影响不大，但沿岸污水收集管网系统有待改善，加强对难以进入污水收集管网的污水排放管理^[20]。

根据排污系数法计算出的来自于各污染源的 4 种污染负荷空间分布计算结果可知，城镇集中区及工农业集中的区域的污染情况较为严重，表明该区域是以消耗流域自然资源和污染水环境质量为代价来维持人口的增长和经济的发展，更深层次地揭示该区域对生态系统服务的需求较大。针对以上污染排放较为严重的区域，应该采取有效的减排措施提高流域生态系统服务的功能，首先，流域范围内工业废水集中处理率较低，且现有的生活污水处理厂处理能力尚不能满足流域污水处理需求。因此，将该区域工业排污口出水进行收集或新建集中处理设施，可有利削减局部区域的点源污染。其次，农田径流污染对 TN 和 TP 的污染负荷产生较大影响，对于减少农田对地表水的环境造成的非点源污染而言，农田的 TN 和 TP 排放是主要控制对象。最后，沱江流域畜禽养殖对流域非点源污染负荷影响比较大，对农户散养畜禽进行集中养殖，建设清洁畜禽养殖小区，从而集中处理畜禽污染

物；对畜禽粪便进行集中利用，实现粪便的资源化，制作有机肥料是削减畜禽养殖污染负荷的有效方法。

4.2 流域生态系统服务价值空间分布特征

上游的绵竹市和彭州区位于龙门山南麓，坡度较陡，海拔较高，林地面积分布较广有关，人类活动对这些地区的影响较小，生态状况较好^[17](图 4)。林地提供的生态系统服务，不仅包括林产品、生物资源及旅游资源，也包括水源涵养、土壤保持、气候调节、气体调节、水质净化等方面的功能^[32,41]。近年来，成都市政府规划了沱江上游龙泉山脉生态旅游功能区，提出了实现龙泉山脉丘陵山区“山山见绿、川川见水”等保持水土资源的目标，迄今为止，该区域已完成水土流失治理面积 500km²。同时，在缺水丘陵区开展“集雨节灌”“山丘区抗旱能力提升”、“百湖工程”、“龙泉山植绿”等工程建设，既解决了丘陵山区农业生产用水问题，又实现了治山治水、维护生态水保的效果，显著地提高了生态系统服务价值。

供给型、调节型、支持型生态系统服务价值的较大值出现在流域中游的简阳市和仁寿县，这与该区县较广的耕地面积和政策因素有关。该区域水热条件好，地势平坦，降雨量丰富，适合农作物的种植，所以该区域的农作物生产的价值较高。另外，由于该区域城市化进程越来越快，农业和果园业发展较快，使得人类活动对土地景观的影响加大，又大大地增加了该区域的供给型生态系统服务价值^[17]。该区域隶属的市级财政大量投入补助资金，通过修建库、塘、池、沉沙凼及沟渠来收集利用雨水，同时理顺了坡面水系，配合农业结构调整，种植林草等，有效减少了水土流失，增加了调节型和支持型生态系统服务价值。此外，资中县的供给型和调节型生态系统服务价值较高，这也与该区域的土地利用类型是以耕地为主有关。该区域城镇化率在自贡市甚至整个沱江流域都处于较低水平，城市建成区面积较小，人类活动对土地景观的影响较小，生态状况良好，导致以上 2 种类型生态系统服务价值较高。

新都区和青白江区的供给型、调节型、支持型生态系统服务价值均较小，这与该区域的区位优势和政策因素有关。依托于成都迅速发展的优势，新都区是成德绵经济带重要节点城市，地处成都城市发展北中轴线上，包括新都智能家居产业城、智能物流产业园和新都现代交通产业功能区三大主导产业功能区，是“蓉欧快铁”和“南丝绸之路”的起点城市。青白江区是国家“一五”时期规划建设的西南第一个工业区，是四川省重要的冶金、建材和机械制造基地，也是中国西部最大的铁路物流枢纽。市中区、贡井区和自流井区也一直是较低供给型、调节型、支持型生态系统服务价值的分布区，这是因为该区域区县面积小，且几乎全为建成区，是内江市的经济文化商业中心，生态用地面积小，所以导致以上区域 3 种类型生态系统服务价值是整个沱江流域的最低值。总生态系统服务价值的空间分布格局与支持型生态系统服务的空间分布格局极为相似，表明支持型生态系统服务对总生态系统服务的空间分布特征起着决定性的作用，可以将其作为认知沱江流域生态系统服务的“窗口”，实现沱江流域复杂人地系统问题的简化。

4.3 流域生态系统服务价值与污染负荷的空间相互作用关系

沱江流域各污染负荷与各生态系统服务价值的总体相关性较高，尤其是供给型生态系统服务价值与污染负荷的相关性达到最大值，表明沱江流域经济的发展主要是以消耗流域生态系统提供的供给型、调节型和支持型生态系统服务为代价，造成水环境质量严重降低(表 4 和图 5)。沱江流域水环境质量下降既有年均径流量减少导致生态基流减少自然因素的原因，也有点源污染源包括涉磷企业及城镇生活和面源污染源包括农村生活、畜禽养殖及农田径流等人为因素的原因，其中人为因素对流域水环境质量的影响更为强烈。沱江流域近年来随着城市化进程加快，城镇建成区快速扩张，经济方式多样化发展，生态环境问题突出，例如化学、酿酒、制糖等工业生活废水的乱排滥放，资源紧缺、环境污染、生态脆弱等环境问题愈发明显，损害了生态系统提供服务的功能，生态环境遭受着一定的风险，对沱江流域水环境生态系统的管理刻不容缓。

沱江流域基于生态系统服务价值与污染负荷的空间匹配较差，前者较大值主要出现在绵竹市、彭州市和简阳市，后者较大值出现在简阳市、仁寿县、雁江区、资中县和安岳县(图 6)。其中，简阳市的生态系统服务供给较高主要是因为该区域拥有较广泛的耕地面积和区县面积有关，农业活动主要以传统耕作方式为主，农业非点源污染负荷较高，造成河流水环境严重污染，故该区

县也是污染负荷较大的区域^[18]。青白江区和中城区的生态系统服务较低主要是因为该区域的土地利用类型以建设用地为主，商业活动频繁，城市建成区扩张迅速，且具有完善的污水处理厂及配套管网工程，故该区县也是污染负荷较低的区域。绵竹市、什邡市和彭州市生态系统服务高于污染负荷，表明该区域为流域下游提供了丰富的生态系统服务，如水源涵养、水土保持和气候调节等。同时，该区域为保护河流环境与水资源安全牺牲了自身的经济发展的机会，应该根据不同区段得生态特征和水环境污染严重程度，构建合理的生态补偿机制，缓解该区域经济发展和保护环境的矛盾^[33]。

龙泉驿区、简阳市、威远县、大安区、沿滩区和自流井区生态系统服务供给高于生态系统服务需求，这与区县面积、城镇发展速率和人类活动等因素的综合作用有关。庞大的城市人口及其污染排放是导致旌阳区、广汉市和新都区生态系统服务供需失衡的直接原因和主要原因。沱江流域东南区域的生态系统服务供给小于需求，尤其是安岳县(-0.68)，从土地利用类型来看，该区域以耕地和建设用地为主，为流域农业和城镇集中地，人为活动最为剧烈，污染负荷值较高，生态系统服务价值较低。因此，沱江流域城市化进程速度过快，污染物负荷削减能力较低，流域污染治理等人为调控作用薄弱，去存量能力不足，对污染负荷削减量的需求较大。为了维持沱江流域的生态可持续发展，该流域急需挖掘污染负荷的削减空间，加大人为调控能力，提升污染负荷削减能力。在此基础上，完善流域生产和生活的污染物处理，将自然生态系统服务功能作为辅助手段处理人为调控无法解决的剩余污染排放问题，进而改善流域生态环境功能。

4.4 流域污染负荷与生态系统服务空间关系研究的完善

当前在“一带一路”、长江经济带发展、共筑长江上游重要生态屏障等国家重大战略推动下，沱江流域社会经济呈一体化发展趋势，亟需从环境学和生态学角度制定配套的流域生态环境协同管理方案，以维持该区域“社会-经济-自然”复合生态系统的可持续性。本研究量化了来自于各污染源污染负荷和各生态系统服务价值的空间分布格局，揭示了污染负荷和生态系统服务的空间作用关系，其相关研究结果调和了在流域水环境管理过程中，社会经济发展与生态系统服务保护间的矛盾。较之当前国内外相关研究多侧重于从污染负荷评估和生态系统服务价值估算单一视觉进行流域水环境管理对策措施探讨，本研究从生态系统服务供需平衡的角度综合分析污染负荷与生态系统服务的相互作用关系，为有效地构建流域水环境管理方法提供了一种新思路，也是对基于地理学-环境学-生态学交叉学科的流域人类活动与水环境关系的具象化表征。

受社会经济统计数据的可获取性限制，本研究计算的流域污染负荷和生态系统服务价值都是以区县为基本计算单元，但由于沱江流域各县(区、市)的土地总面积相差甚大，由此得出的各区县污染负荷和生态服务价值总量相差也较大，忽略了区县内部自然-人口-经济驱动因子的空间分异性，因此，在后续研究中可以采用分辨率更高的计算单元，例如乡镇和流域水文响应单元。另外，本文仅从涉及到水土资源结构变化的两个指标(流域污染负荷与生态系统服务)去定量刻画其在空间上的分布特征，虽然也考虑了部分来自城市径流污染源种的大气污染排放，但受数据本身的可获取性和空间分辨率限制，未能将其他方面大气污染监测数据集成到本研究中，后续研究应采用高精度的空间插值技术将高分辨率的大气污染监测数据耦合到流域环境生态综合管理中去。最后，本文只考虑了某特定年份下的污染负荷、生态系统服务价值的估算和两者间空间匹配关系，属于静态研究，未考虑自然-社会-经济驱动因子的动态变化特征，因此在今后的研究中可以研究生态系统服务价值与污染负荷匹配关系的时空变化特征，以发展的理念推进流域水环境的可持续管理。

5 结论

本研究采用排污系数法和单位土地利用类型面积生态系统服务价值赋值法，定量刻画了流域污染负荷和生态系统服务价值和两者间的空间匹配关系，揭示了人类活动对流域水环境生态的影响程度，为流域水环境管理和生态保护提供了新的思路和方法。

(1) 流域污染负荷的空间分布特征：

沱江流域污染物排放量中 COD 排放最多, TP 排放最少, COD、NH₃-N、TN 和 TP 污染负荷的最大值分别为 71067.51、11108.76、21320.08 和 3073.99t。沱江上游污染负荷较小, 中游污染负荷较大, 下游污染负荷相对于中游较低, COD、NH₃-N、TN 和 TP 污染负荷最大值均主要出现在中游的简阳市、仁寿县、雁江区、资中县和安岳县。该结果表明城镇集中区及工农业集中的区域的污染情况较为严重, 应该采取有效的减排措施提高流域水环境功能。

(2) 流域生态系统服务的空间分布特征:

4 种类型生态系统服务价值的较大值均包括上游的绵竹市和彭州区, 这与该区域良好的生态位势有关。供给型、调节型、支持型生态系统服务价值的较大值出现在流域中游的简阳市和仁寿县, 这与该区较广的耕地面积和政策因素有关。总生态系统服务价值的空间分布格局与支持型生态系统服务的空间分布格局极为相似, 表明支持型生态系统服务对流域总生态系统服务的空间分布特征起着关键性的作用。

(3) 流域污染负荷与生态系统服务间的空间匹配:

沱江流域污染负荷与生态系统服务空间匹配差异性明显, 上有的绵竹市、什邡市和彭州市生态系统服务远高于污染负荷, 中下游的龙泉驿区、简阳市、威远县、大安区、沿滩区和自流井区生态系统服务较高于生态系统服务需求。沱江流域东南区域的生态系统服务小于污染负荷, 尤其是安岳县的生态系统服务与流域污染负荷之间的差值达到-0.68。流域水环境生态管理与保护政策和措施的制定需要构建合理的生态补偿机制和提出有效的污染负荷削减方案, 进而改善流域水环境和生态系统服务功能空间匹配差异显著的现状。因此, 本研究探讨污染负荷与生态系统服务价值的空间作用关系, 可为促进流域污染负荷和生态系统服务研究转向流域水环境生态管理规划实践提供参考, 同时对当前正成为热点问题的与人口增长和经济发展相适应的流域水环境生态安全建设具有重要理论指导意义。

参考文献:

- [1] TANAKA T, SATO T, WATANABE K, et al. Irrigation system and land use effect on surface water quality in river, at lake Dianchi, Yunnan, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(6):1107-1116.
- [2] 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.
- [3] FAN M, SHIBATA H, LI C. Environmental and economic risks assessment under climate changes for three land uses scenarios analysis across Teshio watershed, northernmost of Japan[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599-600:451-463.
- [4] 段永蕙, 张乃明. 滇池流域农村面源污染状况分析[J]. 环境保护, 2003(7):28-30.
- [5] 刘菊, 傅斌, 王玉宽, 等. 四川山区农村面源污染负荷估算与评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24):218-225.
- [6] 孟晓云, 于兴修, 泮雪芹. 2012. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J]. 环境科学, 33(06):1789-1794.
- [7] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3):574-581.
- [8] 耿润哲, 王晓燕, 焦帅, 等. 密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5):1484-1492.

-
- [9]FAN M,SHIBATA H.Simulation of watershed hydrology and stream water quantity under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed,Northern Japan[J].Ecological Indicators,2015,50:79-89.
- [10]DAILY G C.Nature' s services:Societal dependence on natural ecosystems[M].Washington DC:Island Press,1997.
- [11]COSTANZA R,D' ARGER R,GROOT R D,et al.The value of the world' s ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387(6630):253-260.
- [12]肖玉,谢高地,鲁春霞,等.基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展[J].生态学报,2016,36(10):3096-3102.
- [13]马琳,刘浩,彭建,等.生态系统服务供给和需求研究进展[J].地理学报,2017,72(7):1277-1289.
- [14]FAN M,SHIBATA H.Spatial and temporal analysis of hydrological provision ecosystem services for watershed conservation planning of water resources[J].Water Resources Management,2014,28:3619-3636.
- [15]白杨,王敏,李晖,等.生态系统服务供给与需求的理论与管理方法研究[J].生态学报,2017,37(17):5846-5852.
- [16]胡芸芸,王永东,李廷轩,等.沱江流域农业面源污染排放特征解析[J].中国农业科学,2015,48(18):3654-3665.
- [17]陈丹,蒋贵国,张妍,等.基于生态服务价值的沱江流域土地景观生态风险时空分异研究[J].水土保持通报,2019,39(3):223-230.
- [18]孟兆鑫,李春艳,邓玉林.沱江流域生态安全预警及其生态调控对策[J].生态与农村环境学报,2009,25(2):1-8.
- [19]许静,王永桂,陈岩,等.长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征[J].地球科学,2020,45(06):1937-1947.
- [20]汪嘉杨,郭倩,王卓.岷沱江流域社会经济的水环境效应评估研究[J].环境科学学报,2017,37(4):1564-1572.
- [21]BRAMER W M,RETHLEFSEN M L,MAST F,et al.Evaluation of a new method for librarian-mediated literature searches for systematic reviews[J].Research synthesis methods,2018,9(4):510-520.
- [22]肖宇婷,谌书,樊敏.沱江流域污染负荷时空变化特征研究[J].环境科学学报,2021,41(5):1981-1995.
- [23]万晓红,邱丹,赵小明.太湖流域规模畜禽养殖场污染特性的解析[J].农业环境与发展,2000(2):35-38.
- [24]钱秀红,徐建民,施加春,等.杭嘉湖水网平原农业非点源污染的综合调查和评价[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002(2):31-34.
- [25]韩智勇,费勇强,刘丹,等.中国农村生活垃圾的产生量与物理特性分析及处理建议[J].农业工程学报,2017,33(15):1-14.
- [26]赖斯芸,杜鹏飞,陈吉宁.基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J].清华大学学报(自然科学版),2004(9):1184-1187.

-
- [27]李占斌,张秦岭,李鹏,等.丹汉江流域水土流失非点源污染过程与调控研究[M].北京:科学出版社,2017.
- [28]张鹏远,苟楚璇,巫杨,等.四川凯江流域农村非点源污染特征分析[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):398-404.
- [29]鲁雄飞.城市主干道初期雨水污染特征研究[D].西南交通大学,2013.
- [30]谢高地,张懿铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001,16(1):47-53.
- [31]谢高地,鲁春霞,肖玉,等.青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J].山地学报,2003,21(1):50-55.
- [32]张文广,胡远满,刘淼,等.基于土地利用变化的生态服务价值损益估算——以岷江上游地区为例[J].长江流域资源与环境,2007,16(6):821-825.
- [33]刘桂林,张落成,张倩.长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2014,34(12):3311-3319.
- [34]李辉,周启刚,李斌,等.近30年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):654-666.
- [35]巩杰,柳冬青,高秉丽,等.西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例[J].应用生态学报,2020,31(4):1278-1288.
- [36]唐兵,安瓦尔·买买提明,玉素甫江·买买提.基于主成分分析的博斯腾湖水污染动态评价[J].水资源保护,2012,28(6):41-45.
- [37]谢飞,顾继光,林彰文.基于主成分分析和熵权的水库生态系统健康评价——以海南省万宁水库为例[J].应用生态学报,2014,25(6):1773-1779.
- [38]龚建周,夏北成.城市景观生态学与生态安全——以广州为例[M].北京:科学出版社,2008.
- [39]TURNER KATRINE G, ODGAARDMETTE V, BØCHERPEDER K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125(6): 89-104.
- [40]朱靖,余玉冰,王淑.岷沱江流域水环境治理绩效综合评价方法研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):1995-2004.
- [41]王大菊,卫海燕,贺敏,等.基于土地利用的三峡库区生态系统服务价值时空格局分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):90-100.