

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.01.011

基于流域要素空间关系的水污染溯源研究

蓝志峰, 肖桂荣

(福州大学福建省空间信息工程研究中心, 福建 福州 350116)

摘要:为快速准确地实现水质监测断面水质超标时的河流水污染溯源,提出整合现有流域要素,构建水污染溯源的流域要素空间关系模型。该模型以划分为4个等级的河段和汇水单元为基础,建立汇水单元层级与上下游河段的编码关系;再将全流域要素与汇水单元建立空间关联关系,构建5个流域要素空间关系子系统模型;最后各子系统模型集聚组成一个相互协作的流域要素空间关系网络。以敖江流域实时水质监测断面为污染溯源触发点,将各个流域要素空间关系子系统模型直接应用于水污染溯源过程,结果表明,建立的关系模型在实际应用中能最大限度地提供污染源空间分布和结构信息,有效地识别和筛选研究区域的水污染引发源,快速缩小未知污染源搜查范围,提高了水污染溯源搜寻过程的效率和精度。

关键词:污染溯源;空间关系;流域要素;敖江流域

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2019)01-0056-07

Water pollution traceability based on spatial relationship of basin elements // LAN Zhifeng, XIAO Guirong (*Spatial Information Research Center of Fujian, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China*)

Abstract: In order to quickly and accurately trace the source of water pollution when the water quality of monitoring section exceeded the standard, a spatial relationship model of basin elements for water pollution traceability was proposed by integrating existing river basin elements. The model was based on four levels of river reach and catchment unit, and established the coding relationship between catchment unit level and upstream and downstream river reach. Then it established the spatial correlation relationship between the whole basin elements and catchment unit, and constructed five subsystem models of the spatial relationship of basin elements. Finally, the subsystem models were aggregated to form a collaborative spatial relationship network of river basin elements. Taking the real-time water quality monitoring section of Aojiang River Basin as the trigger point of pollution traceability, the subsystem model of spatial relationship of elements in each basin was directly applied to the process of water pollution traceability. The results show that the established relationship model can provide the spatial distribution and structure information of pollution sources to the greatest extent in practical application, effectively identify and screen the water pollution sources in the study area, quickly reduce the search scope of unknown pollution sources, and improve the efficiency and accuracy of water pollution traceability search process.

Key words: water pollution traceability; spatial relationship; basin element; Aojiang River Basin

近年来,由于城市化进程加快,密集的人类活动如农业活动中化肥的使用、工业废水及生活污水的排放等,导致水体污染日益严重^[1]。数据显示,2015年全国废水排放总量较2000年增加了76.9%;有近35.5%的国控断面水质劣于Ⅲ类水标准^[2]。如此严峻的水环境形势给水生态系统和人类生产生活带来重大影响。准确识别和追溯水质超标区域的污染

源已成为亟待解决的问题之一。

为有效解决该问题,相关学者在水污染溯源方法上做了大量研究,如Wei等^[3]基于反演思想,使用Bayesian法对水污染溯源问题进行了研究;邢利英等^[4]使用改进的共轭梯度算法重构污染源项。这些方法在溯源过程中容易因模型参数误差使溯源结果与实际发生较大偏离^[5],限制其在实际中的应

基金项目:福建省科技重大专项专题(2017NZ0003-1-5)

作者简介:蓝志峰(1994—),男,硕士研究生,研究方向为地理信息系统与水污染控制。E-mail:lanzffzu@gmail.com

通信作者:肖桂荣,研究员。E-mail:xiaogr@fzu.edu.cn

用。现阶段我国流域水环境监测主要以手工采样为主,辅以移动式快速应急监测技术的自动监测与常规监测^[6],环境监管部门在溯源问题上应用最多的还是污染源排查法^[7]。该方法是在现有流域环境监测基础上,进行大量应急监测,并收集相关环境数据,再结合系统科学的分析确定最有可能的污染源,该方法缺乏一定的搜索导则,溯源效率较低。刘颖等^[8]从优化流域水环境监测排查路径的角度对其进行了改进,但总体上时间、人力等成本还是较高。为改善上述方法中存在的问题,同时考虑到污染溯源问题实质可转化为空间搜索问题,本文尝试将要素的空间关系引入水污染溯源过程,从而提高溯源精度^[7,9]。选取福州市第二大饮用水源地所在的敖江流域作为研究区,挖掘该流域要素之间存在的空间关系,并采用属性标识方式建立要素间的空间关系,以期在河流水质监测断面超标时的水污染溯源过程中引入这些关系,排除不必要搜索范围,为水污染溯源提供一种新的思路。

1 研究区概况与数据来源

敖江是福建省第六大河流,发源于宁德市古田县鹞峰山脉东,主流流经宁德古田县、福州市的闽侯县、闽清县、罗源县、晋安区、连江县,最后于连江东岱镇注入东海(图 1(a))。干流全长 137 km,总面积 2 655 km²;流域水资源丰富,多年平均降雨量在 1 500 mm 以上,平均径流深 1 027 mm,平均流量 87.7 m³/s^[10]。福建省环保厅在全流域共布设 4 个水质自动监测站,监测指标包括 COD_{Mn}、DO、浊度等。流域内已建成的塘坂水库是福州市区第二饮用水源地,日均引水规模超 35 万 m³;在建的霍口水库供水工程设计日引水规模达 40 万 m³(图 1(b)),其水源地保护工作直接影响福州市上百万人的饮用水安全^[11-12]。

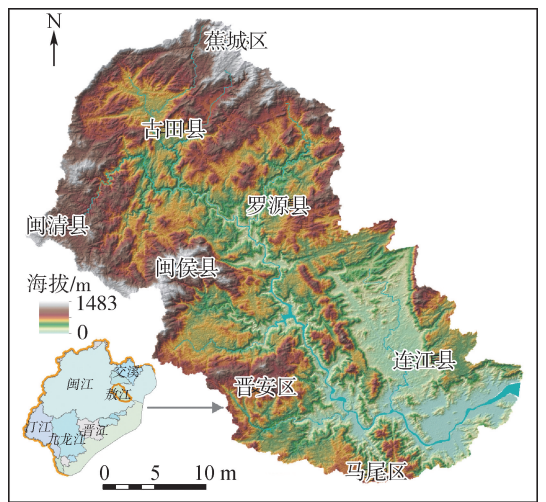
本研究涉及的数据来源于福建省环保厅提供的环境统计数据、水质自动监测点位信息及监测数据、2015 年统计年鉴和敖江流域基础地理信息数据(含等高线和土地利用图),同时引用 NASA/SEDAC 预测的人口分布数据和 Landsat 遥感影像数据。

2 要素关系模型构建

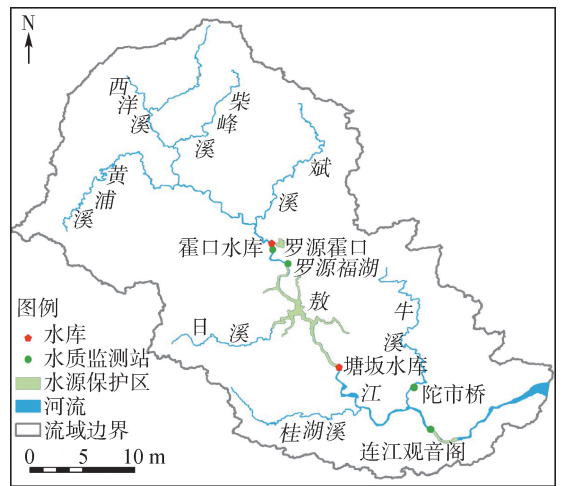
2.1 流域要素确定

流域要素指在流域范围内构成某一过程或情势的因素。本文研究的是基于构建的要素空间关系的水污染溯源,其前提是确定构建关系所需的流域要素。通过对全流域要素梳理,选取对构建污染溯源关系具有特定价值的要素作为构建源,再依据要素

的属性将其分为空间要素、污染源要素、监测要素和其他要素。



(a) 区位



(b) 水源地分布

图 1 研究区概况

a. 空间要素指以基本空间数据结构来表示现实世界的要素。根据污染溯源特点,选取的空间要素包括河网、汇水单元、干支流交汇点:①河网是污染物在水体中运移的通道,它是构建溯源空间关系的基础要素之一。河网的提取以地形数据辅以面状河道数据为基础,使用 GIS 的水文分析工具依次执行洼地填平、水流方向计算、水流积聚、矢量转换操作,将流域河网划分为 4 个等级,划分结果见图 2。②汇水单元指水源汇入某一范围河网的范围界线。溯源过程基于该特性确定一定范围内污染源排出废水与河段的纳入关系。此外,汇水单元主要用途是通过构建其间的等级与流向关系,使其相关联的流域要素获取等同的空间关联关系。研究选用敖江流域地形和面状河网数据,结合 GIS 水文分析工具,执行洼地填平、计算水流方向、水流积聚、河网矢量转换和提取汇水面等步骤获取初始汇水单元。划分过程中,为确保汇水单元的准确性和实际应用中的

适用性,不仅考虑到流域的地形、水系和汇水特征,还将监测点位、污染源分布、行政区划和土地利用等多种空间要素叠加分析的结果对划分单元进行调整,由此划分出能体现污染源排放与水体水质的输入响应关系的汇水单元(图3)。

③干支流交汇点指主干流与其沿途接纳支流的合流点,用于指示河流主干道与支流的交汇关系。干支流交汇点基于等级河网空间叠加分析确定。

b. 污染源要素指造成水环境污染的发生源,即排放有害物质的发生源。根据污染源是否具有固定排放点分为点源和面源,其中,点源包含企业点源和畜禽养殖源,面源包含生活源、农业源、水产养殖源。污染源要素主要用途是为溯源过程提供污染源分布和结构性信息,其信息的准确性将直接影响溯源的精度,具体确定方法见表1。

c. 监测要素指用于监控河流水质的要素,它能反映河流水质状况。监测要素包含水质自动监测站和人工监测点。监测要素的主要行为是基于监测的水质数据,触发水污染溯源过程,该要素将作为触发水污染警情信息最重要的渠道。监测要素点位信息及监测数据来自环境管理部门。

d. 其他要素主要指入河排污口信息,它是连通非直排污染源要素与河段的通道。将其与污水处理厂和污染源建立联系,有助于确定污染源废水排放去向。排污口信息由环境管理部门提供的数据确定。

2.2 要素关系模型设计

要素关系模型是将复杂溯源关系分解为若干关系子系统,分析各子系统中各要素的空间关系,建立各子系统内部要素和子系统间的空间关联,从而建

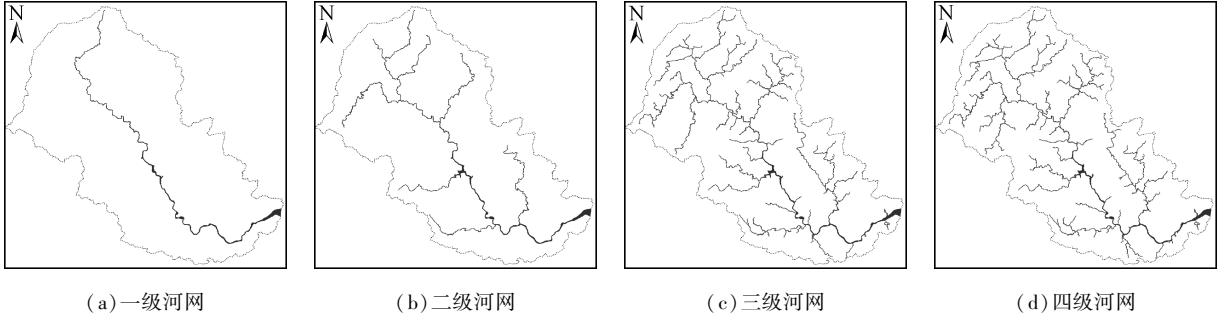


图2 河网划分结果

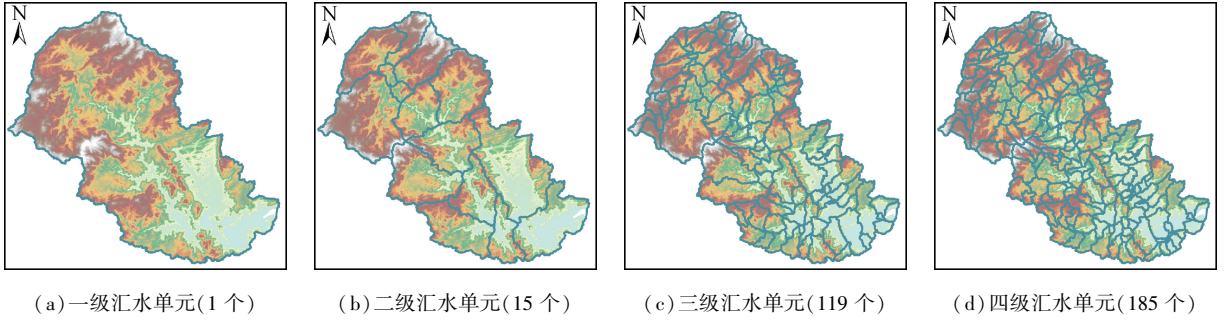


图3 汇水单元划分

表1 污染源要素确定方法

污染源类型	需确定项目	确定依据	使用数据
企业点源	空间位置、行政区、排污去向	空间位置、行政区、排污去向根据环境统计数据、排污申报登记信息确定,空间位置缺失部分基于地图 API 获取	2015 年环境统计、排污申报登记
畜禽养殖点源	空间位置、畜禽类型、畜禽数量	经福建省多年畜禽养殖综合整治,敖江流域只考虑规模化畜禽养殖场,其点位、畜禽类型及数量通过环境统计数据确定	2015 年环境统计
生活面源	空间范围、行政区、人口密度	空间范围和人口密度数据通过引入 NASA/SEDAC 预测的人口密度数据,并使用同期 Landsat 影像、土地利用、行政区划、常住人口等数据结合修正至误差小于 10%,行政区属性由区划图与生活源叠加获取	遥感影像、行政区划、统计年鉴、2015 年 NASA/SEDAC 人口预测
农业面源	空间范围、行政区、耕地类型、坡度	空间范围、行政区、耕地类型信息从基础地理信息数据库提取,并结合 Landsat 影像识别的结果区分耕地类型,坡度信息源于坡度分析结果	遥感影像、基础地理信息库
水产养殖面源	空间范围、行政区、养殖密度、类型、品种	2015 年福建省统计年鉴显示淡水养殖产量、淡水鱼类分别占总量的 91%、75.8%,淡水鳊、草鱼、鲢鱼、鲤鱼和罗非鱼这 5 种淡水鱼总产量占淡水鱼类总产量 70% 以上。此外,敖江作为重要水源保护地,水产养殖方式主要以池塘、水库养殖为主。综上,养殖品种确定为鱼类,养殖密度通过统计年鉴计算,空间范围、养殖类型和行政区信息从基础地理信息数据库中提取,并结合遥感目视解译方法修正	统计年鉴、遥感影像、基础地理信息库

立相互联动的要素关系模型。要素关系模型通过属性标识的方式,建立流域内各要素的关联关系,具有自动化搜索上游河段、监测断面、汇水单元等能力,可用于应对基于监测站点触发的水污染溯源。本文的要素关系模型主要包括:河段子系统、汇水单元子系统、监测断面-污染源子系统、监测断面-小流域-污染源子系统和入河排污口-污水处理厂-点源子系统。

a. 河段子系统。对已划分的4个等级河网,使用相同等级的汇水单元进行空间裁切,并与汇水单元等同的编码方式建立河段之间的空间流向与等级关系,以此确定污染物空间传输路径,形成全流域分等级的河流关系网络,如图4所示。

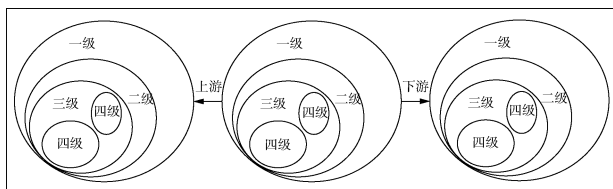


图4 河段(汇水单元)子系统

b. 汇水单元子系统。以划分的敖江流域4个等级的汇水单元为基础,依据水流流向,并参照《全国环境系统河流代码河流编码规则和水系代码》编码规范,以编码的方式建立起全流域汇水单元的等级、流向、空间邻接等关系,由此构成汇水单元子系统,如图4所示。

c. 监测断面-污染源子系统。该系统依据监测断面与河段、河段与汇水单元、汇水单元与污染源在现实状态下的空间拓扑关系建立。监测断面在该系统中起监测水质并触发污染溯源过程的作用,河段用于确定污染物运移通道,汇水单元用于划分废水排入某一河段的范围界限。由此构建起以监测断面为污染溯源触发点,依据要素流向和包含关系往上游搜索流入河段长度、汇入河段界限及界限内包含的污染源的子系统,子系统图解见图5。

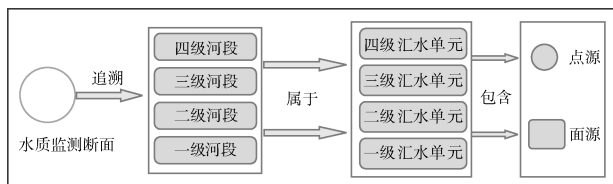


图5 监测断面-污染源子系统

d. 监测断面-小流域-污染源子系统。该系统根据干支流交汇点的位置,将其与上下游河段建立连接关系,并标识支流属性,使其具备识别干支流功能。此外,利用已建河段与汇水单元流向关系和汇水单元与污染源包含关系,即可形成以水质监测断

面为追溯起点,确定汇入某一范围河段的支流,并以支流为主要搜索单元,确定支流内潜在污染源的子系统,子系统图解见图6。

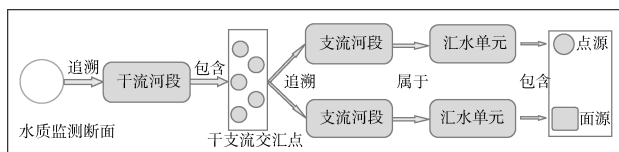


图6 监测断面-小流域-污染源子系统

e. 入河排污口-污水处理厂-点源子系统。通过对流域内点源排污废水去向分类,根据分类结果以属性标识方式建立点源与污水处理厂和点源与入河排污口对应关系,同时对排污口使用与河段空间叠加的方式获取排入河段属性。由此构建指定河段即可确定排入的排污口,并由排污口关联到相应的污水处理厂和点源信息,子系统图解见图7。

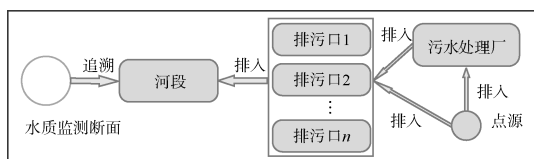


图7 入河排污口-污水处理厂-点源子系统

3 实例应用

将构建的要素空间关系模型应用于敖江流域水质自动监测断面触发的水污染溯源。研究区水体长期处富营养化状态^[1],近半年4个监测频率为4h的水质自动监测站的数据显示,各监测指标皆有超标记录(表2),以COD_{Mn}次数最多。

表2 水质监测指标统计

监测指标	超标次数/次
COD _{Mn}	84
NH ₃ -N	5
TP	73
DO	15

选取敖江流域某监测站于某日20:00:00监测到COD_{Mn}超标事件(图8)进行分析,当日未收到相关泄露信息通报。针对该污染事件,以触发水污染警情的水质监测断面为溯源起始断面,利用建立的河段与河段和监测断面与河段的空间拓扑关系,确定起始断面上游一定时间范围内COD_{Mn}不超过污染限值的断面,时间取流经上游断面与起始断面的时间间隔。受水质监测资源数量限制,起始断面以上不存在监测站点,初步将全流域185个四级汇水单元减少到起始断面及其上游的83个四级汇水单元。然后,由已建监测断面-小流域-污染源要素子系统获知筛选区主要由5个子流域构成:敖江干流、黄浦溪、西洋溪、柴峰溪和斌

溪。将确立的污染源空间分布数据与筛选区域进行空间叠加分析,可以得到,区域内点源除干流分布较多的石板材加工企业和规模化畜禽养殖场外,基本不存在其他工业源污染,这与文献[12]的结论一致,相比之下,面源分布较为广泛。根据李小梅等^[12]研究结果显示,受石板材加工行业废水污染的水体特征之一是浊度大于60,这与同时刻监测的浊度数据13.01相差近5倍,此外,近年来流域内多次实施全面关停石板材加工企业,基本可以排除石材加工行业作为此次COD_{Mn}超标引发源的可能性。综上分析,依据构建的流域要素空间关系子系统已初步将潜在引发源空间范围缩小近2/3,并将引发源结构信息确定为面源引发为主,规模化畜禽养殖场也存在一定的可能性。

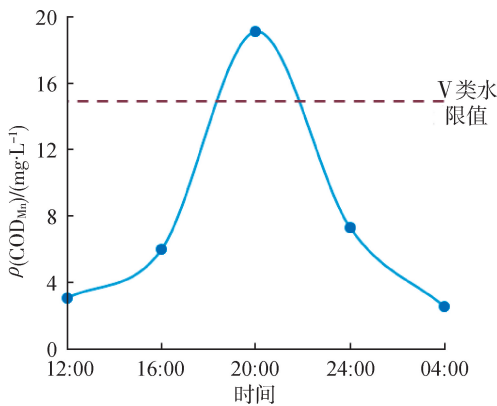


图8 某监测站COD_{Mn}监测值

为进一步挖掘未知引发源分布信息,根据上述分析确定的污染源结构,以5个子流域作为基本计算单元,使用排污系数法计算各单元COD排放量,计算公式见式(1)~(4),排放系数见表3,得到初筛范围内COD排放量见图9。

$$E_{P_j} = 365N_{P_j}W_{Pr} \quad (1)$$

$$E_{C_j} = \sum_{j=1}^n N_{C_j}W_{Ck} \quad (2)$$

$$E_{F_j} = N_{F_{d_j}}C_{E_{d_j}} + N_{F_{p_j}}C_{E_{p_j}} \quad (3)$$

$$E_{A_j} = N_{A_{p_{o_j}}}P_{po}W_A + N_{A_{r_{e_j}}}P_{re}W_A \quad (4)$$

式中: E_{P_j} 、 E_{C_j} 、 E_{F_j} 、 E_{A_j} 分别为第j单元生活源、畜禽养殖、种植业、水产养殖的COD排放量; N_{P_j} 为第j单元人口数量; W_{Pr} 为不同行政区生活源COD排放系数; N_{C_j} 为第j单元畜禽数量; W_{Ck} 为畜禽养殖区不同畜禽种类的COD排放系数; $N_{F_{d_j}}$ 为第j单元农业种植中旱地的面积; $C_{E_{d_j}}$ 为第j单元种植业中旱地的COD排放系数; $N_{F_{p_j}}$ 为第j单元农业种植中水田的面积; $C_{E_{p_j}}$ 为第j单元种植业中水田的COD排放系数; $N_{A_{p_{o_j}}}$ 为第j单元水产养殖中池塘的面积; P_{po} 为池塘养殖密度; W_A 为水产养殖的COD排放系数; $N_{A_{r_{e_j}}}$ 为第j单元水产养殖中水库的面积; P_{re} 为水库

养殖密度。

表3 敖江流域污染源排污系数

区域	生活源排污系数/ (g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	依据
晋安区	37.5	2015年环境统计数据
连江县	44.0	
罗源县	33.8	
闽清县	27.3	
蕉城区	44.9	
古田县	42.4	
闽侯县	32.5	
地形	农业源排污系数/ (kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹)	依据
平地	150	《水环境容量核定技术指南》 (2003年)
缓坡地	165	
陡坡地	180	
种类	畜禽养殖排污系数/ (kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹)	依据
生猪	24.772	《污染源普查畜禽养殖业源产 排污系数手册》(2009年)
肉牛	269.817	
蛋鸡	0.7884	
种类	水产养殖排污系数/ (g·kg ⁻¹ ·a ⁻¹)	依据
鱼类	53.58	《污染源普查水产养殖业污染 源产排污系数手册》(2009)

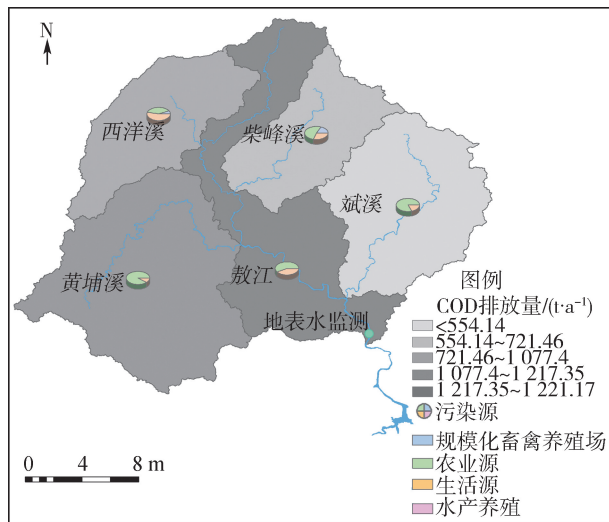


图9 筛选区内COD排放量

由图9可见,筛选区内各小流域COD污染负荷存在较大差异。具体来说,敖江干流最大,平均COD排放量1221.3t/a,其中农业源占比最大,为690t/a,占该小流域总负荷量的56.5%;其次为生活源和水产养殖源,分别为524.9t/a和6.2t/a,贡献比例分别为43%和0.5%;畜禽养殖源贡献量接近于0。贡献量次之的黄埔溪与干流的污染特征相似,COD年度排放量达到1217.3t,占筛选区COD总排放量的25.4%,农业源仍居首位,为1101t/a,对该小流域贡献比达90.4%,其次为生活源和水产养殖源,分别为114.2t/a和2t/a,贡献比仅占9.4%

和 0.2%, 畜禽养殖贡献量为 0。与干流和黄埔溪相比, 西洋溪、柴峰溪和斌溪的总量贡献相对较小, 西洋溪的生活源贡献最大, 达到 569.8 t/a, 占西洋溪的 52.9%, 其次为农业源、畜禽养殖, 分别占 40.9%、5.9%; 柴峰溪和斌溪占筛选区 COD 总排放量较小, 分别为 15.1% 和 11.5%, 排放结构相似, 主要以农业源为主, 生活源次之, 畜禽养殖和水产养殖贡献率不大。基于以上统计, 从污染源结构上看筛选区以面源污染为主, 且以农业源负荷最大, 5 个小流域中有 4 个小流域农业源 COD 排放量占据首位, 占比超 50%, 其次为生活源排放, 水产养殖与畜禽养殖排放量较小。从空间分布看, 干流及其左岸汇入的黄埔溪排放量较高, 由构建的生活源分布与小流域空间包含关系显示, 居民主要分布在干流沿岸和西洋溪, 同时区划图与筛选区叠加表明, 区域内以小型集镇为主, 而人口密度常与污染物排放量呈现正相关性, 这势必造成人口分布较密集的区域污染排污量较大, 引发源很可能存在于此区域。

为进一步揭示区域污染源空间分布信息, 在已建汇水单元层级关系系统支持下, 以三级和四级汇水单元为单位, 计算 COD 排放量, 结果见图 10 和图 11。由图 10 可知筛选区空间差异更加显著, 污染物排放集聚特征也更为突出, 主要集中在 5 个单元, 分别位于西洋溪上游、筛选区敖江干流中上游鹤塘镇所在地和黄埔溪主流左侧, 这些汇水单元具有极大可能性。由图 11 可见, 为使源分布和结构信息更加明确, 污染排放同样集中在上游几个汇水单元, 且以西洋溪与主干流交汇处所在的鹤塘镇污染物年度贡献量最大。同时, 个别单元基本不存在污染, 这些分析结果可有效减少后期精确排查引发源的工作量。

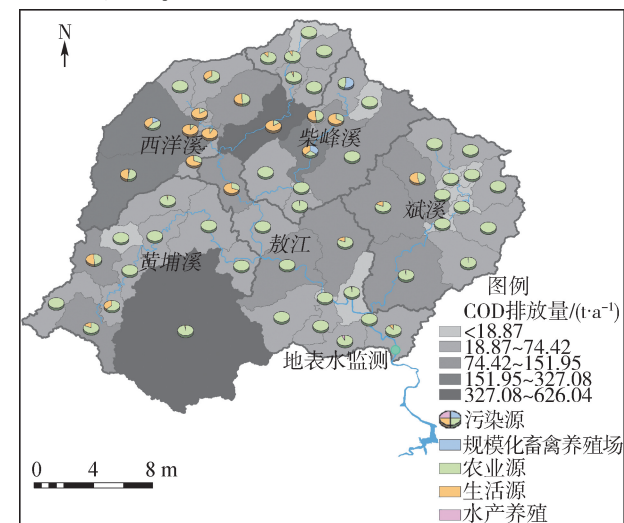


图 10 三级汇水单元 COD 排放量

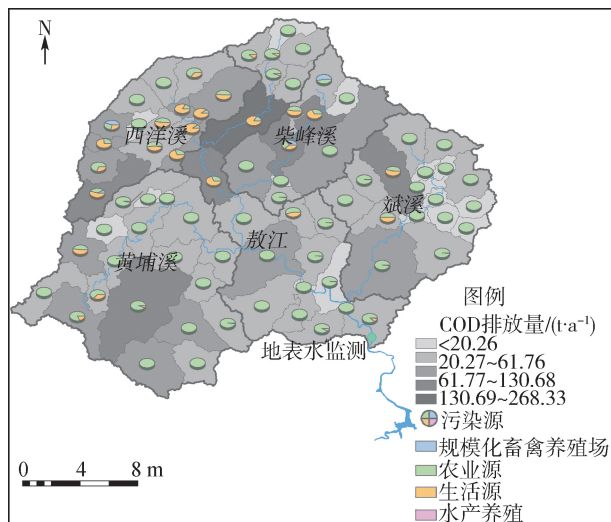


图 11 四级汇水单元 COD 排放量

4 结 语

从地学空间关系视角出发, 以划分的河网和汇水单元为基础, 将原本互不联系的流域要素进行整合, 构建了用于水污染溯源的流域要素空间关系模型。将此模型运用于敖江水质监测断面超标实例中, 结果表明, 该模型在实际场景中能有效识别并筛选研究区的污染源, 将未知污染源搜索半径缩小到更小范围, 且最大限度地提供引发源分布和结构性信息, 其溯源结果对水污染事件的应急处置具有指导意义, 同时, 也为水污染溯源引入一种新的思路和方法, 若能对流域内的污水排污口全覆盖布点在线监测, 结合雨水事件面源污染的特征分析, 将更加快速准确地对水质监测断面的水质指标超标情况进行判断。该方法与传统溯源相比较, 既能节约污染溯源的时间成本, 又可有效缩小搜索范围, 节省了环保执法成本, 溯源结果提供的信息也为环保执法人员更进一步实地排查提供方向指引。

参考文献:

- [1] 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 等. 太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1076-1084. (LI Yanli, YANG Zirui, YIN Xijie, et al. Identification of nitrate sources and the fate of nitrate in downstream areas: a case study in the Taizi River Basin [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1076-1084. (in Chinese))
- [2] 国家环境保护总局. 中国环境状况公报[M]. 北京: 国家环境保护总局, 2015.
- [3] WEI Guozhen, CHI Zhang, YU Li, et al. Source identification of sudden contamination based on the parameter uncertainty analysis [J]. Journal of Hydroinformatics, 2016, 18(6): 919-927.

- [4] 邢利英,张国珍. 基于改进的共轭梯度算法重构地下水污染源项[J]. 水资源保护,2017,33(3):42-46. (XING Liying, ZHANG Guozhen. Reconstruction of the groundwater pollution source with improved conjugate gradient algorithm[J]. Water Resources Protection,2017, 33(3):42-46. (in Chinese))
- [5] 姜继平,董芙嘉,刘仁涛,等. 基于河流示踪实验的 Bayes 污染溯源:算法参数、影响因素及频率法对比[J]. 中国环境科学,2017,37(10):3813-3825. (JIANG Jiping, DONG Fujia, LIU Rentao, et al. Applicability of Bayesian inference approach for pollution source identification of river chemical spills: a tracer experiment based analysis of algorithmic parameters, impacts and comparison with frequentist approaches [J]. China Environmental Science, 2017, 37 (10): 3813-3825. (in Chinese))
- [6] 刘颖,刘丹. 我国流域事故污染源搜索的困境与方法初探[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(1):72-77. (LIU Ying, LIU Dan. Study on the predicament and method in searching a accidental pollution source in watershed [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(1):72-77. (in Chinese))
- [7] 郑军,张立,杨常青,等. 跨国界流域重金属污染溯源体系框架初步构建[J]. 水资源保护,2015,31(6):57-61. (ZHENG Jun, ZHANG Li, YANG Changqing, et al. Initial framework construction of sources identification system of heavy metal pollution in trans-boundary river basin [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (6): 57-61. (in Chinese))
- [8] 刘颖,朱清新,刘丹. 基于最优搜索理论的流域事故污染源搜索新方法[J]. 环境科学与技术,2008,31(11):140-145. (LIU Ying, ZHU Qingxin, LIU Dan. New method for searching accidental pollution source in drainage area based on optimal search theory [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31 (11): 140-145. (in Chinese))
- [9] 李雪,曹芳芳,陈先春,等. 敏感区域目标污染物空间溯源分析:以新安江流域跨界省断面为例[J]. 中国环境科学,2013,33(9):1714-1720. (LI Xue, CAO Fangfang, CHEN Xianchun, et al. Spatial source apportionment analysis of target pollutant for sensitive area: a case study in Xin'anjiang River Basin for interprovincial assessment section [J]. China Environmental Science, 2013, 33(9): 1714-1720. (in Chinese))
- [10] 张玉珍,黄文丹,王智苑,等. 福建敖江流域水域生态系统健康评估[J]. 湖泊科学,2015,27(6):1079-1086. (ZHANG Yuzhen, HUANG Wendan, WANG Zhiyuan, et al. Evaluation of aquatic ecosystem health in Aojiang Basin, Fujian Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(6):1079-1086. (in Chinese))
- [11] 翁笑艳. 山仔水库叶绿素 a 与环境因子的相关分析及富营养化评价[J]. 干旱环境监测,2006,20(2):73-78. (WENG Xiaoyan. Correlation between Chlorophyll-a and related environmental factors in Shanzi Reservoir [J]. Arid Environmental Monitoring, 2006, 20(2):73-78. (in Chinese))
- [12] 李小梅,吴春山,庄一庭,等. 石板材加工行业的水环境污染特征研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2006,22(4):67-71. (LI Xiaomei, WU Chunshan, ZHUANG Yiting, et al. Pollution characteristics of water environment caused by stone-processing industry [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2006, 22(4):67-71. (in Chinese))

(收稿日期:2018-03-13 编辑:王 芳)

(上接第 51 页)

- [12] USA STM. E1739-2002 standard guidance for risk- based action applied at petroleum release sites [S]. Washington D C : ISO, 2002 : 1-53.
- [13] UK EPA. Model procedures for the management of land contamination [R]. Bristol : Environment Agency-Rio House, 2003 : 4-22.
- [14] New Zealand Ministry for the Environment. Site investigation and analysis of soils: contaminated land management guideline No. 5 [S]. Wellington : Ministry of the Environment, 2004 : 4-8.
- [15] ISO TC190 SC2. Guidance on the procedure for the investigation of urban and industrial sites with regard to soil contamination; ISO-10381-5 [S]. Bern : ISO, 2005 : 3-32.
- [16] 蔡五田,张敏,刘雪松,等. 论场地土壤和地下水污染调查与风险评价的程序和内容[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6):125 -134. (CAI Wutian, ZHANG Min, LIU Xuesong, et al. On procedure and contents of investigation and risk assessment with regard to site soil and groundwater contamination [J]. Hydrogeo-logical & Engineering Geology, 2011, 38(6):125-134. (in Chinese))
- [17] 蔡五田. 论污染场地的几个问题[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1):123-128. (CAI Wutian. Several issues on contaminated sites [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(1):123-128. (in Chinese))
- [18] 李五金,于福荣,付丽,等. 东光县地下水水压采效果及环境影响预测[J]. 水资源保护,2017,33(5):123-129. (LI Wujin, YU Furong, FU Li, et al. Forecast of underground water compressive exploitation effects and environmental impact in Dongguang County [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (5): 123-129. (in Chinese))

(收稿日期:2018-01-29 编辑:王 芳)