

面向行政区的总氮污染源解析

——以新安江流域重点区县 GWLF 模型应用为例

李国光¹, 赵兴华¹, 沙健¹, 赵越², 王玉秋¹

(1. 南开大学 环境科学与工程学院 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071;

2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 提出了一种面向行政区总氮污染源解析的流域模型技术方法, 基于广义流域负荷模型(GWLF), 结合净氮负荷输入系统(NANI), 利用地理信息系统(GIS)空间分析技术, 衔接子流域分区和行政区管理边界, 实现面向人为定义空间区域模拟的流域模型应用, 并在中国安徽省黄山市新安江流域针对重点区县开展了案例研究。结果表明: 休宁县、屯溪区、歙县对街口国控断面总氮污染物的比例分别为 15.5%、41.4%、43.1%; 不同区县内对流域出口的总氮污染物所占比例呈现行政区域特征。本研究方法能够实现对新安江流域总氮污染负荷来源的行政区差异性解析, 进而针对不同区县污染特征开展有针对性的污染治理措施, 为水环境分区化管理提供有效的决策支持信息。

关键词: 水环境; 总氮污染源解析; 面向行政区; GWLF 流域模型; 新安江流域

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0118-06

Total nitrogen source apportionment in administrative region-objected:

Model of GWLF's application in Xin'anjiang

LI Guoguang¹, ZHAO Xinghua¹, SHA Jian¹, ZHAO Yue², WANG Yuqiu¹

(1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria of Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. Institute of Environmental Planning of Ministry of Environment Protection, Beijing 100012, China)

Abstract: The paper introduced a method of basin model about total nitrogen source apportionment faced on administration. Based on generalized watershed loaded function(GWLF), combined with net anthropogenic nitrogen inputs(NANI) and geographic information system(GIS), it implemented user-defined area(administrative) simulation through linking up the watershed boundary partition and administrative region. This method has a good application in Xin'anjiang basin. The results show that Xiuning County, Tunxi District, She County account for 15.5%: 41.4%: 43.1% in total nitrogen pollution to the Jiekou state-controlled section. The different districts show administrative regional characteristics. The method can achieve analyzing different administrative regions' total nitrogen source apportionment and providing effective decision-supported information for the watershed partition management of water environment.

Key words: water environment; total nitrogen source apportionment; facing administrative region; GWLF watershed model; Xin'an Jiang watershed

近年来,随着我国经济的飞速发展和城市化进程的不断加快,流域水环境保护形势日趋严峻^[1],不断出现的水污染防治问题与落后的流域水环境管理模式之间的矛盾日趋加剧。可以预见到随着我国社会经济的进一步发展,流域水环境必将承受更大

的压力,这对流域污染控制理念和方法都提出了较高的要求^[2]。针对我国地域辽阔,水环境特征差异显著的特点,当前水污染防治工作主要是对流域水环境开展分区化管理^[3]。然而,由于控制单元的划分不能跨越行政区边界,而行政区划与流域/子流域

收稿日期:2014-08-01; 修回日期:2014-09-16

基金项目:环境保护部环境规划院水污染综合防治项目(2013A009)

作者简介:李国光(1990-),男,海南万宁人,硕士研究生,主要从事流域地表水环境模型研究。

通讯作者:王玉秋((1965-),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,主要从事水环境管理决策与技术支持、流域及水源地保护战略等研究。

划分并不完全一致^[4-5],流域的整体性和人为行政区划分割间存在矛盾^[6],跨界问题难以协调^[7]。针对这些问题,完善流域管理与区域管理相结合的水资源管理制度势在必行^[8]。由于行政区域对经济、社会的影响以及区域水行政主管部门的双重职责,区域管理依然发挥着重要的作用^[6]。为便于主体功能分区的规划与管理,必须使主体功能区界线尽量与一定级别的行政区划界线相吻合。这不仅有利于各类资料的收集、整理以及统计分析,也有利于实施对各级政府的责任目标管理^[9]。继续抓好以行政区为主的生态文明建设试点工作也是今后五年生态文明建设的重点任务^[10]。

作为国际公认的水环境管理决策支撑工具,流域模型技术以其经济性、高效性和可预测性等特点^[11-12],使其成为改善区域水环境质量的重要工具。现有流域模型主要针对流域单元分析得出的科学结论与基于行政区划的环境管理实际需求相脱节,往往某个行政区内包含在多个子流域中,而源解析结果来自多个子流域,一般无法直接反映出该行政区的污染源特征和比例关系。本文面向中国的数据可达性(例如只有月监测数据、水文站点覆盖度不高等),选取美国环保局(USEPA)认证的广义流域负荷模型(GWLF),并结合净氮负荷输入系统(NANI)和地理信息系统(GIS)空间分析技术,提出了面向行政区水环境管理决策支持的模型应用方法,并在安徽省黄山市新安江流域针对重点区县其水体总氮污染防治开展了相关案例研究。

1 研究方法

1.1 模型概述

广义流域负荷模型(GWLF)基于地表径流与地下水过程,在月尺度上提供可靠的河川径流、沉积物、可溶性营养盐及总营养盐污染负荷通量的模拟,并能够实现 对 污 染 物 来 源 分 配 比 例 的 动 态 解 析^[13]。GWLF 模型是一个靠水文学驱动的准经验性集总参数模型^[14],其忽略流域环境过程的空间分布情况,而将相似的土地利用类型进行汇总归类,进而对径流与营养盐进行相互独立的模拟。GWLF 模型数据需求量适度,算法结构灵活,适用范围广。不同版本的 GWLF 模型已经被 EPA 授权认证,并在包括中国在内的全球多个国家得到广泛应用^[15-16]。本研究采用的是在 VBA 下开发的 ReNuMa-GWLF 模型版本。

1.2 研究区概况

新安江全流域面积 5 916 km²,其范围覆盖了歙

县、黟县、屯溪区、徽州区、黄山区、祁门县、休宁县和绩溪县,共 8 个县级行政区。新安江流域整体水质良好,但流域出口注入新安江水库的水体总氮浓度偏高。流域所处区域整体开发程度较低,以自然林地为主要 的 土 地 利 用 形 式,占 到 整 个 流 域 面 积 的 72%,有 利 于 流 域 模 型 的 开 发 和 应 用。同时,流域内受人类活动影响较大的区域主要集中在歙县经济开发区和人口密集的屯溪区,其污染特征与行政区划密切相关。研究区选定为新安江流域内的重点区县(休宁县、屯溪区、歙县),目标断面为街口国控断面。

1.3 数据来源与处理转化

本模型研究所使用的数据主要包括数字高程数据(DEM)、空间土地利用数据、空间人口数据、气象数据、污染源数据、水文数据,以及河道水质监测数据等,其原始数据来源如表 1 所示。

表 1 模型分析所需的原始数据来源			
项目	来源	精度属性	年份
DEM	中国科学院科学数据库	90m×90m	2000
土地利用	地球系统科学数据共享平台	1km×1km	2000
人口	地球系统科学数据共享平台	1km×1km	2003
气象	黄山市气象局	10 个站点	2000-2010
污染源	黄山市环境保护局	区县调查	2008
水量	黄山市水务局	7 个站点	2000-2010
泥沙量	黄山市水务局	2 个站点	2000-2010
河道水质	黄山市环境监测站	街口断面	2000-2010

对上述原始数据,基于 ArcGIS 平台,进行加工处理与统计计算,最终得到满足模型所需要的输入数据集。流域河网及子流域分区是模型分析的基础,其通过 DEM 数据,利用 Archydro 工具进行流域水文分析,经校准得到适量河网,并进一步分析得到相应的子流域分区^[17](图 1)。利用分析得到的子流域分区,对空间土地利用数据和空间人口数据进行转化,得到模型所需土地利用面积和人口数量等信息。利用逐月流量水文数据,除以基于子流域分区计算得到的研究区流域面积,再经过单位转换,得到与模型水文分析对应的径流深实测数据。利用逐月泥沙浓度水文数据和河道溶解性总氮浓度水质数据,乘以对应月份的总水资源量,再经单位换算,得到模型泥沙量模拟和溶解性总氮污染物评估的负荷质量实测值。

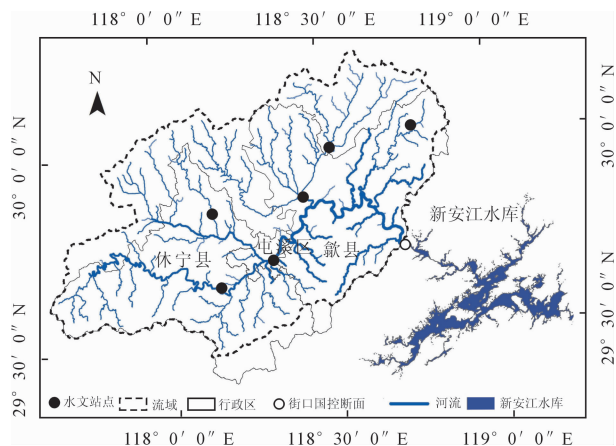


图1 新安江流域、相关行政区及水文站点示意图

1.4 模型流域的校准与验证

将经处理后的数据输入到模型中,利用实测数据对模型参数进行校准,率定模型参数,并对基于此参数数据集分析得到的模拟结果进行有效性验证,即完成对流域模型的构建。本研究选取国际上通用的纳氏系数(R_{NS}^2)作为模型校准的目标函数。

$$R_{NS}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m_i} - Q_{r_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{r_i} - \bar{Q}_r)^2} \quad (1)$$

式中: Q_{m_i} 为第 i 月的模拟值; Q_{r_i} 为第 i 月的实测值; $\bar{Q}_r$ 为实测值月平均值; n 为模拟的总月数。

依据模型性质的原始假设,校准分水文校准、泥沙量校准以及营养盐校准,共 3 个步骤依次进行。针对每个校准过程,根据所掌握的实测数据时间范围和数据量,将模拟过程分为校准期和验证期。首先在校准期率定模型参数,之后利用率定得到的参数集,模拟对应的验证期预测结果,将其与实测数据进行对比分析,进而评价所率定参数数据集的有效性。

由于流域出口的街口断面为水质站,没有历史水文监测资料,因此本研究利用加权参数平均法得到全流域水文过程参数^[18],即利用流域内站点所对应的子流域,分别开展参数校准,之后利用经率定、验证后的几组参数集,基于其对应的模拟精度值(R_{NS}^2),进行加权平均,最终得到适用于全流域的水文参数数据集。

水文过程校准要率定的主要参数包括各种土地利用类型的 CN 值、每个月份的蒸发覆盖因子,以及决定地下水过程的退水系数和渗滤系数。共掌握 6 个水文站点 2000–2010 年共 11 a 的逐月水量监测数据,选择 2000–2005 年作为水文参数校准期,选择 2006–2010 年作为水文参数验证期;泥沙过程校

准要率定的主要参数包括各种土地利用类型的 KLSCP 因子乘积值、每个月份的侵蚀系数,以及决定泥沙传输的沉积物传输比。共掌握 2 个站点自 2000–2010 年共 11 a 的逐月泥沙监测数据,选择 2000–2005 年作为泥沙参数校准期,选择 2006–2010 年作为泥沙参数验证期;营养盐过程校准所需要率定的参数主要包括农业区施肥–径流氮浓度转化参数以及林地的径流氮浓度核算参数。共掌握该水质站点自 2002–2010 年共 9 年的月溶解性总氮监测数据,其中 2008 年以前为隔月监测,之后为逐月监测。选择 2002–2008 年作为参数校准期,2006–2010 年为参数验证期,率定、验证得到可靠的全流域溶解性总氮营养盐过程参数。

在此基础上,基于经实验监测得到的泥沙吸附氮浓度和月泥沙产量,得到全形态总氮通量。整合经校准验证后的水文、泥沙、营养盐 3 大模型参数集到包含有全流域基础环境数据的模型文件中,即完成了对流域模型的构建工作,得到了能够用于分析评估新安江流域水环境过程的可靠流域模型系统。

1.5 流域与行政区的模型对接

本研究利用净氮负荷输入系统(NANI),基于 ArcGIS 平台,在空间上实现对流域和行政区的空间属性对接。NANI 是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)沿海水体溶氧缺乏研究规划(ChRP)支持开发的 GIS 工具箱^[19]。该工具箱主要包含 3 个 GIS 工具,其中的 NANI–GIS–Tools 可实现流域与行政区边界的空间叠加,用于计算不同政治界限(行政单元)落尽流域内的比例;NANI–extraction tools 可实现对数据的提取与重组,用于流域环境数据和行政区环境数据的相互转化;NANI–budgeting tools 可实现对污染源数据的比例计算,用于与包括 GWLF 模型在内的流域模型相关输入数据的对接(图 2),其核心计算为:

$$I_w = S_{d_i} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{L_{ij}}{S_{f_{ij}}} \right) + \frac{P_i}{S_i} \right] \quad (2)$$

式中: I_w 为流域 w 的总模型输入数据; S_{d_i} 为行政区 i 落在流域 w 上的面积; n 为流域 w 所涵盖的行政区个数; L_{ij} 为行政区 i 上的第 j 种农业土地利用类型的排放量; $S_{f_{ij}}$ 为行政区 i 上的第 j 种农业土地利用类型的面积; m 为行政区 i 上的农业土地利用类型个数; P_i 为行政区 i 上的人口数; S_i 为行政区 i 的总面积。上述面向流域和行政区的模型输入数据对接的实现,要基于下面两点假设:(1)人口在行政区上均匀分布;(2)化肥/有机肥施用量在各个行政区内的农

业区土地上均匀分布。

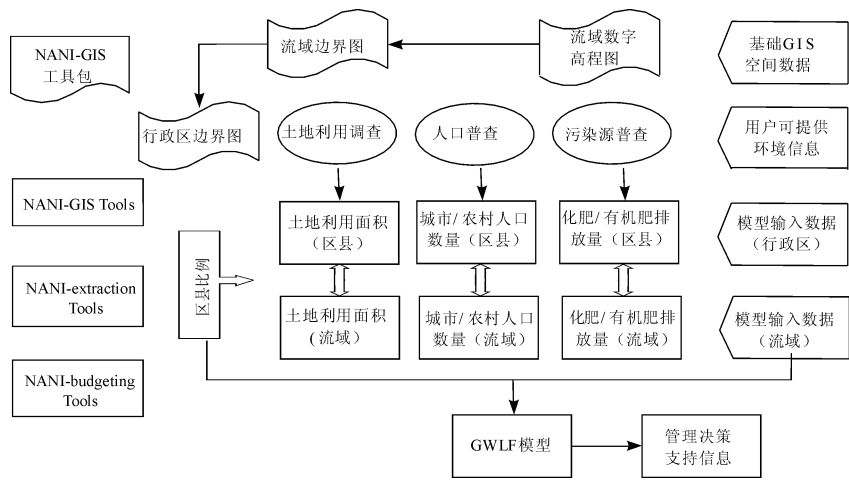


图2 NANI 工具箱工作流程示意图

对于同一个流域出口,不止一个行政区对其污染有贡献,可以算出不同行政区所有污染物贡献比例:

$$P_w = \frac{\sum_{j=1}^m H_{wj}}{\sum_{w=1}^k \sum_{j=1}^m H_{wj}} \times 100\%$$

(3)

式中: P_w 为第 w 个行政区在 k 个行政区中对流域出口的所有污染物贡献比例; m 为污染源的个数; H_{wj} 为第 w 个行政区的第 j 种来源解析结果。

1.6 面向行政区总氮污染源解析

面向模型需求对基于行政边界的县域基础环境信息和污染源数据进行统计、加工和转化,再代入已经构建好的新安江流域 GWLF 模型,利用已校准的模型参数,结合 NANI 工具,进行以区县为基本单位的模型分析,解析不同区县内的污染源构成。

2 结果与讨论

2.1 流域模型结果

2.1.1 水量模拟结果 基于校准后水文参数,对新安江流域内6个水文站点的逐月水量应用 GWLF 模型进行分析。模型结果表明,新安江流域多年平均年河川径流量 72.79 cm,即年均总水资源量约 43 亿 m³,且在不同年份之间以及年内不同月份间的水量差异显著。将模拟结果与历史监测数据对比可知,GWLF 模型能够很好地模拟新安江流域水传输过程。用于表征模拟精度的 R^2_{NS} 值在校准期可达 0.93 以上,而在验证期略有下降,但也达到 0.9 以上(表 2),与相关文献研究结果具有一致性。上述结果表明,经过水文校准后的 GWLF 模型,能够在月尺度上提供可靠的水量模拟,基于此水文过程架构

可以进一步开展针对泥沙和营养盐的模拟。

2.1.2 泥沙量模拟结果 基于校准后的水文及泥沙参数,针对新安江流域内有泥沙量历史监测数据的渔梁和屯溪水文站,应用 GWLF 模型对其逐月泥沙量进行分析。模型结果表明,新安江流域多年平均年总泥沙通量 79.4 万 t,且不同月份间的泥沙通量差异显著。将模拟结果与历史监测数据对比可知,GWLF 模型能够提供对新安江流域泥沙传输过程的模拟。用于表征模拟精度的 R^2_{NS} 值在校准期分别可达到 0.77 和 0.65,而在验证期有所下降,但也都在 0.5 以上,其精度水平与相关文献研究结果一致(表 2)。上述结果表明,经过泥沙校准后的 GWLF 模型,能够在月尺度上提供可靠的泥沙量模拟,基于此可以进一步开展针对营养盐负荷过程的模拟。

2.1.3 氮负荷模拟结果 基于校准后的水文、泥沙和营养盐参数,针对位于新安江流域出口的街口断面逐月溶解性总氮负荷,应用 GWLF 模型进行模拟分析。将模拟结果与历史监测数据对比可知,GWLF 模型能够在新安江流域开展可靠的月溶性营养盐模拟。用于表征模拟精度的 R^2_{NS} 值在校准期和验证期均可达到 0.85 以上(表 2),表明经校准后的 GWLF 模型,能够在月尺度上实现对溶解性氮负荷通量的模拟。同时,基于已校准的泥沙量模拟结果和经实验得到的单位质量泥沙携带氮含量,计算得到逐月吸附态氮通量。在此基础上,模拟得到新安江流域逐月总氮负荷通量。模型结果表明,新安江流域多年平均年总氮负荷通量 8 588 t,且不同月份间负荷通量差异显著。经校准的 GWLF 模型能够对新安江流域总氮负荷行为开展有效模拟,可基于

此模型架构进一步开展针对氮污染负荷来源的解析与评估分析,为管理提供决策支持。

2.2 基于行政区县的氮污染物来源解析

基于已构建好的新安江流域污染负荷模型,对流域出口街口断面的总氮污染物来源构成进行了解析与评估(图3),茶树种植源约占全部贡献的1/3,茶树种植作为新安江流域主要且典型的土地利用形式,也是总氮污染负荷的主要来源。从全流域整体角度分析,由点源导致的总氮污染负荷较少,与流域整体开发程度低,区域工业不发达的现状相吻合。

表2 新安江流域 GWLF 模型模拟结果精度

站点类型	站点名称	校准期 R^2_{NS}	验证期 R^2_{NS}
水文	月潭	0.966	0.915
	新亭	0.956	0.949
	临溪	0.943	0.907
	渔梁	0.936	0.928
	王干	0.942	0.917
	梅溪	0.952	0.918
泥沙	渔梁	0.773	0.547
	屯溪	0.649	0.501
水质	街口	0.881	0.875

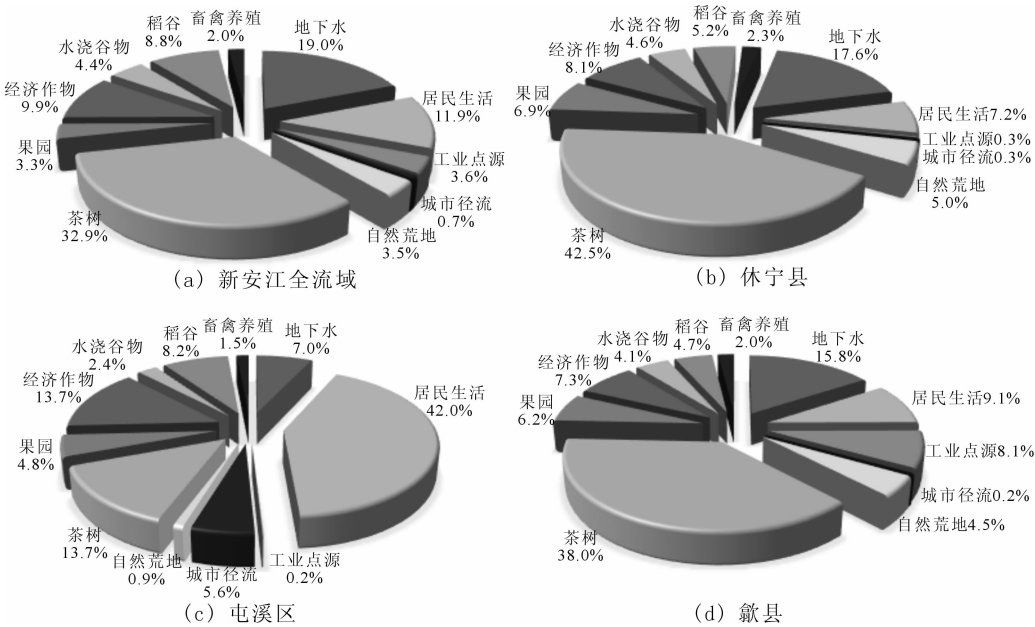


图3 新安江全流域、休宁县、屯溪区、歙县总氮污染源解析

基于已构建好的模型参数,利用 NANI - GIS 空间分析技术,对新安江流域内的屯溪区、歙县和休宁县三个典型区县开展了 GWLF 模型分析,评估了其对流域出口断面总氮污染负荷通量特征。结合公式(3)可得到休宁县、屯溪区、歙县对街口国控断面的总污染物贡献比例分别为 15.5%、41.4%、43.1%。由模拟结果可知,不同区县内对流域出口的总氮负荷贡献绝对量不同,且其污染源构成比例存在显著差异。

休宁县在 3 个区县中总氮污染所占比例最小(15.5%),其主要总氮污染物来源是茶树种植和地下水,分别占到全部负荷量的 42.5% 和 17.6%。休宁县境内开发程度低,以茶叶种植和其他种植业为主要经济形式,由茶树种植而对自然林地开发所导致的水土流失,以及因过度施肥导致的地下水污染,是休宁县主要的总氮污染原因。应加强施肥管理、提高施肥效率,合理开发利用自然林地,减少水土流失。

屯溪区在不同行政区中有不小的贡献量(41.4%)。居民生活源(42%)是总氮污染物主要来源。屯溪区是黄山市政府所在地,城市化程度高且人口密集,是居民生活源比例大的原因。城市下垫面以柏油路为主,不透水区域较多,导致地下水贡献相对较少(7%)。而城市径流源相对显著(5.6%),降雨在不透水路面上的冲刷随城市排水管网进入河道,最终对流域出口造成污染。此外,经济作物和茶树的贡献也不容忽视(均为 13.7%)。控制污染的途径应包括加强对城镇生活污水的处理和对生活垃圾的管理等。

歙县对街口总氮污染占有量最大(43.1%),茶树、地下水、工业点源污染显著,分别占了 38%、15.8%、8.1%。作为黄山市主要的工业企业聚集区,歙县是全流域主要的点源污染区。地下水污染的总氮来源除了包括对茶树的施肥外,还有工业用水的污染。因此,必须实施优化产业结构、从施肥结

构控制氮素用量等措施减缓污染。

由不同区县总氮污染源解析结果及不同区县对流域出口所占比例可以得到不同污染源中各区县的占有比例(图 4),所得结论与前面解析结果吻合。休宁县中的地下水、自然荒地、屯溪区的居民生活、城市径流、歙县的工业点源等总氮来源污染都应在管理上重点关注。

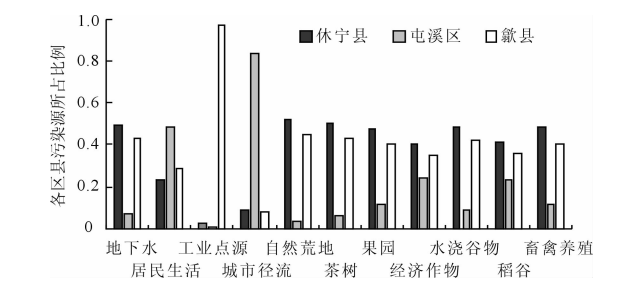


图 4 不同污染源中各区县的占有比例

3 结 语

本文提出了基于行政区划的流域模型总氮污染源解析方法,并在新安江流域开展了案例研究。结果表明,休宁县、屯溪区、歙县对街口国控断面的总氮污染物贡献比例分别为 15.5%、41.4%、43.1% 不同区县内对流域出口的总氮污染物占有比例呈现行政区域特征。

广义流域负荷模型(GWLF)能够在新安江流域得到成功应用,精度能够满足对流域总氮污染负荷的模拟,结合净氮负荷输入系统(NANI)和地理信息系统(GIS)空间分析技术,能够实现基于行政区的总氮污染物负荷来源解析;新安江流域内不同区县的污染行为特征与区县的环境特征关系密切,不同区县对流域出口的总氮污染物负荷量和贡献比例差异显著,应针对不同区县污染特征开展有针对性的水环境管理措施。

参考文献:

[1] 吴舜泽,夏青,刘鸿亮. 中国流域水污染分析[J]. 环境科学与技术, 2000(2): 1-6.

[2] 孟伟,张远,张楠,等. 流域水生态功能分区与质量目标管理技术研究的若干问题[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7):1345-1351.

[3] 孟伟. 中国流域水环境污染综合防治战略[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5):712-716.

[4] Thomas P, Bernd K, Reiner M. The environment as a challenge for governmental responsibility - The case of the European Water Framework Directive[J]. Ecological Eco-

nomics, 2009, 68(7): 2058-2065.

[5] Michael W, David M O, Rob F, et al. Catchments, sub-catchments and private spaces: Scale and process in managing microbial pollution from source to sea[J]. Environmental Science and Policy, 2011, 14(3):315-326.

[6] 施祖麟,毕亮亮. 我国跨行政区河流域水污染治理管理机制的研究——以江浙边界水污染治理为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(3): 3-9.

[7] 孟伟,苏一兵,郑丙辉. 中国流域水污染现状与控制策略的探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(4):242-246.

[8] 中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定[EB/OL]. [2010-12-31]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2011/content_1803158.htm.

[9] 朱传耿,仇方道,马晓东,等. 地域主体功能区划理论与方法的初步研究[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 136-141.

[10] 2011 年中国环境状况公报[Z]. 北京:环境保护部, 2011:4-13.

[11] He Chansheng. Integration of geographic information systems and simulation model for watershed management[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(8): 809-813.

[12] Thomas W, Seth T, Thomas D. Modellers' and outreach professionals' views on the role of models in watershed management[J]. Environmental Policy and Governance, 2011, 21(6): 472-486.

[13] Barry M E, David W L, Kenneth J C, et al. A comprehensive GIS-based modeling approach for predicting nutrient loads in watersheds[J]. Journal of Spatial Hyrology, 2002, 2(2):2-18.

[14] Evans B M, Lehning D W, Corradini K J. AVGWLF version7.1 Users Guide[M]. New York: the Pennsylvania State University, 2008.

[15] 何因,秦保平,李云生,等. GWLF 模型的原理、结构及应用[J]. 城市环境与城市生态, 2009, 22(6): 24-27.

[16] Sha Jian, Liu Min, Wang Dong, et al. Application of the ReNuMa model in the Sha He river watershed: Tools for watershed environmental management[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 124: 40-50.

[17] 石春力,李雪,孙韧,等. Arc Hydro 模型在流域水文特征提取中的应用——以蓟县沙河流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 73-76+80.

[18] Li Xuyong, Weller D E, Jordan T E. Watershed model calibration using multi-objective optimization and multi-site averaging[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(3-4): 277-288.

[19] Hong B, Swaney D P, Howarth R W. A toolbox for calculating net anthropogenic nitrogen inputs (NANI)[J] Environmental Modelling & Software. 2011, 26(5):623-633.