

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.05.004

ArcGIS在水源地污染源强度空间分析中的应用

殷绪华^{1,2}, 朱亮^{1,2}, 陈琳^{1,2}, 吴新明³, 方长风⁴, 朱月华⁵, 邱云鹏^{1,2}, 谭相君^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省骆运水利工程项目管理处, 江苏 宿迁 223800;
4. 溧水区水务局, 江苏 南京 211200; 5. 溧水区水务局方便水库管理所, 江苏 南京 211212)

摘要:以南京市溧水区方便水库为研究对象,运用 ArcGIS 对其汇水区域进行子流域划分,同时结合遥感技术对各子流域污染源强度和空间分布进行模拟,确定方便水库各入库河流主要污染源及汇水区域内污染源强度分布情况,然后利用实际监测值对 ArcGIS 模拟值进行验证。结果表明:ArcGIS 技术可直观反映各入库河流汇水面积大小及各污染源强度的空间分布情况;ArcGIS 估算值与实测值计算的污染物入库量的误差范围在 10% 以内。
关键词: ArcGIS; 水文分析; 子流域划分; 土地利用; 汇水面积; 污染源强度; 污染物空间分布; 污染排放量; 方便水库

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)05-0395-07

Application of ArcGIS in the spatial distribution analysis of pollution source intensity in water source

YIN Xuhua^{1,2}, ZHU Liang^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, WU Xinming³, FANG Changfeng⁴,
ZHU Yuehua⁵, QIU Yunpeng^{1,2}, TAN Xiangjun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Jiangsu Luoyun Water Project Management Department, Suqian 223800, China;
4. Lishui District Water Bureau, Nanjing 211200, China;
5. Lishui Fangbian Reservoir Management Office, Nanjing 211212, China)

Abstract: The Fangbian Reservoir in the Lishui district of Nanjing City was selected as the study object. The ArcGIS technology was used in the watershed subdivision of catchment area in Fangbian Reservoir, and then combined with the remote sensing technology, this study simulated the pollution intensity and spatial distribution to determine the main pollution source of inflow stream and the intensity distribution of pollution source. After that, the simulating results of ArcGIS has been validated by the actually monitored water quality. The results showed that the catchment area of inflow stream and spatial distribution of pollution source intensity can be directly reflected by the ArcGIS technology. Besides, the difference of pollution emission amount calculated between the ArcGIS simulation and the surveyed data was less than 10%.

Key words: ArcGIS; hydrological analysis; watershed division; land use; catchment area; pollution source intensity; spatial distribution of the pollution; pollution emission amount; Fangbian Reservoir

作者简介: 殷绪华(1992—),男,硕士研究生,主要从事水污染控制理论与技术研究。E-mail:84551735@qq.com
通信作者: 朱亮,教授。E-mail:zhulianghhu@163.com
引用本文: 殷绪华,朱亮,陈琳,等. ArcGIS在水源地污染源强度空间分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):395-401.
YIN Xuhua, ZHU Liang, CHEN Lin, et al. Application of ArcGIS in the spatial distribution of pollution source intensity in water source [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(5):395-401.

我国各类型地表水源地中,湖库型水源地的比例约为40%,是我国饮用水源的重要类型之一^[1]。研究表明,我国湖库型水源地的主要污染物包括化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)等,污染来源主要是点源污染、面源污染和内源污染^[2-3]。其中,点源污染和面源污染主要是通过入库河流来水携带污染物进入水库^[4]。传统的污染源调查方法主要采用现场采样、区域入户调查和水质监测分析等,无论是数据的时效性还是准确度都存在一定的局限,而且消耗大量的人力物力^[5-7]。

ArcGIS 技术由于其强大的空间制图、空间可视化、空间分析和数据管理功能,在各类规划中应用广泛^[8-11]。Khalil 等^[12]运用数据库和 GIS 技术评估废弃矿场的环境影响及预测污染形成过程,开发出基于 GIS 的环境数据库,为其他废弃矿场的污染研究提供依据。周慧平等^[13]运用 GIS 技术强大的可视化功能识别非点源污染的主要来源、迁移途径,预报污染产生负荷、变化趋势及对水体水质的影响。王晓燕等^[14]在密云水库石匣小流域非点源污染研究中,运用 GIS 技术确定流域内非点源污染的分布规律和重点控制区。温兆飞等^[15]利用 GIS 的空间叠加分析法,对三峡库区农田面源污染的关键影响因子进行筛选,获取农田面源污染典型区域,并发现不同典型区分布差异的主导因素是土壤类型。

目前,运用 ArcGIS 技术模拟污染源分布情况已有了相应的研究,但用其进行污染物入库量的模拟计算却很少。笔者运用 ArcGIS 技术结合调查数据和遥感技术对方便水库土地利用方式进行分析,同时对入库污染源源强空间分布进行模拟,并用模拟结果计算各污染物的入库量,然后通过实际监测数据进行验证。将 ArcGIS 技术应用到污染物入库量的研究中,旨在为河流的污染源源强分布研究提供有效的分析手段。

1 研究区概况及监测布点

1.1 研究区概况

方便水库保护区位于南京市溧水区城区东北 7km 处,库区地处东经 119°05'07"~119°07'02"、北纬 31°40'~31°43'之间。方便水库在整个汇水区域范围内已进行了保护区的划定:一级保护区范围为校核洪水位(29.15 m)以下的库区,即生态红线范围之内的区域,面积约为 12.21 km²;二级保护区范围为生态红线以外所有的汇水区域(生态黄线范围),面积约为 64.92 km²。

1.2 监测布点

研究范围为整个方便水库汇水区域,总面积为 77.13 km²,其中主要入库河流为青龙桥河、四古凹河、西南村河、西村河、杨家坝河、谢家棚河、王家山河、后吕河这 8 条河流。为了验证 ArcGIS 模拟结果的可行性和准确性,在方便水库各入库河流上分别设置采样点(图 1),根据实际监测的数据计算各污染物的入库量。监测指标有 COD、TN、TP 和 NH₃-N,水质指标分析按照《水和废水监测分析方法》^[16]。

2 研究方法

2.1 流量计算

根据方便水库 1975—2012 年降水资料,采用水文手册中的方法,对陈墩库区入库水量进行计算。频率分析计算表明,1978 年为枯水年(保证率 $P=90\%$),1992 年为平水年($P=50\%$),2002 年为丰水年($P=20\%$)。根据上述 3 个代表年全年各月的降雨分配情况,查《江苏省水文手册》秦淮河山丘区月降雨-径流关系曲线图,推算得到陈墩库区枯水年、平水年、丰水年入库流量分别为 3.46 万 m³、32.83 万 m³、91.46 万 m³。2014 年总降雨量为 1368.9 mm,为丰水年($P=20\%$),年入库流量按 91.46 万 m³ 计算。根据 ArcGIS 水文分析计算出的各入库河流所占比例,推算得到各条河流的年入库流量。

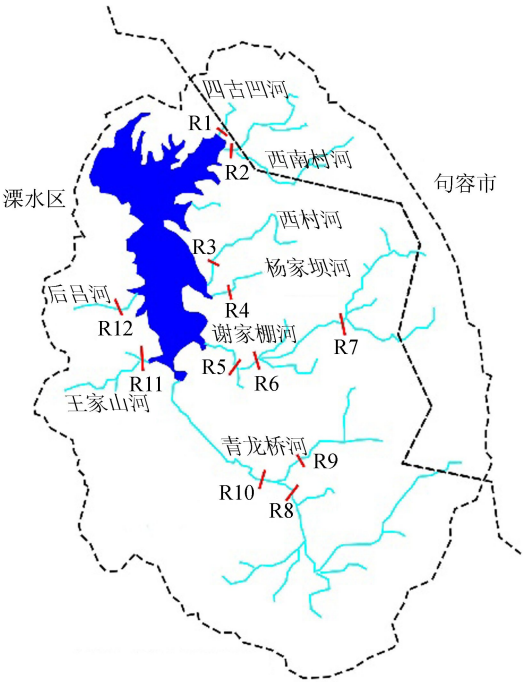


图1 方便水库汇水区域及各入库河流监测点布局
Fig.1 Layout of monitoring points around the Fangbian Reservoir and its inflow rivers

2.2 子流域划分

通过 ArcGIS 对数字高程模型 (DEM) 数据进行水文分析,得到方便水库汇水区域内河流水系分布及各条入库河流的汇水面积^[17-18]。分析过程为:DEM 数据生成、DEM 栅格数据填洼处理、流向和洼地识别处理、计算汇流累积量、计算河网栅格数据、计算河流连接数据、计算子流域栅格、转化矢量数据后合并^[19]。分析过程结合流域的实际情况,选择适当的汇流累积量阈值,将整个小流域划分为 8 个子流域。

2.3 土地利用类型分析

土地利用数据解译是基于谷歌卫星影像遥感信息,结合实地调查和其他辅助数据,采用全数字人机交互作业方法,主要根据对图像光谱、纹理、色调等的认识结合地形图目视解译而成。同时,根据溧水方便水库汇水区域水田为主、坑塘众多的特点,采用由点到面、由易到难的方式进行数据解译。按照全国土地利用分类体系,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用土地等 6 个一级类型和 24 个二级类型。

2.4 ArcGIS 模拟污染排放量分布

区域内污染物排放量主要是通过现场调查以及相关资料收集统计。结合土地利用图,将各种污染排放量按土地利用类型进行分类及赋值,区域重合的部分数值进行叠加,以此模拟得到整个汇水区域内各入库河流小流域的污染排放量分布情况。然后,按污染排放量属性对其进行分级,分级按照 ArcGIS 软件中提供的自然间断点分级法,此方法可自动识别、分组数据,使各级之间差异最大化。最后,运用 ArcGIS 的矢量剪切功能计算各入库河流汇水面积内的污染排放量,各入库河流小流域污染排放量及贡献率。

2.5 污染排放量分布计算结果验证

由于各个污染源产生点距离库区的距离不能确定,污染物进入库区的途径差别较大,汇入库区过程中自然降解以及削减情况未能有准确、详细的调查数据,因此污染物入库量通过污染物排放量乘以相关入库系数计算得出,最后用实际监测数据计算污染物入库量,作为对计算结果的验证。计算过程中,不考虑入库沿途物理、化学等方面的自然降解作用,从而核算出水源保护区水库最大污染物入库量,以最不利情况考虑水源保护区的水质污染问题。

a. 根据 ArcGIS 模拟估算污染排放量及排放系数计算污染入库量。各类污染物入库量计算公式如下:

$$W_{\text{入库量}} = (W_{\text{排放量}} - \theta)\beta$$

式中: $W_{\text{排放量}}$ ——不同来源的污染物年排放量; θ ——污水处理厂处理掉的污染物量,取零; β ——不同来源生活污染物的入库系数。

根据《全国水环境容量核定技术指南》及其他大中型水库的实际调研结果,水库各类污染源入库系数见表 1。

b. 根据河流入库处的实际监测数据及河流入库流量计算污染物入库量。计算公式如下:

$$W_{\text{入库量}} = \frac{CQ\alpha}{10^6}$$

(2)

式中: C ——入库河流入库处污染物实测质量浓度; Q ——年入库总流量; α ——各入库河流的入库流量占比(表 2)。

表 1 各类污染源入库系数

Table 1 Storage coefficient of different pollution sources

污染源	COD	TN	TP	NH ₃ -N
工业、城镇生活	0.8~1.0	0.8~1.0	0.8~1.0	0.8~1.0
农村生活	0.1~0.2	0.1~0.2	0.1~0.2	0.1~0.2
农田径流	0.1~0.3	0.1~0.3	0.1~0.3	0.1~0.3
禽畜养殖	0.2~0.4	0.2~0.4	0.2~0.4	0.2~0.4
水土流失	0.1~0.3	0.1~0.3	0.1~0.4	0.1~0.5

表 2 入库河道汇水情况

Table 2 Catchment condition of inflow rivers

河道名	汇水面积/km ²	α /%	河道名	汇水面积/km ²	α /%
四古凹河	1.177	1.81	谢家棚河	11.625	17.91
西南村河	6.592	10.16	青龙桥河	35.617	54.87
西村河	2.781	4.28	王家山河	3.617	5.57
杨家坝河	1.614	2.49	后吕河	1.883	2.91

3 结果与讨论

3.1 河流水系分布及汇水面积

通过 ArcGIS 对水文 DEM 数据的模拟分析,得到方便水库汇水区域内河流水系分布(图2)及各条入库河流的汇水面积(表2)。由表2可以看出青龙桥河是汇入方便水库的主要河流,青龙桥河自溧水区共和山区汇流而来,来水量占总入库水量的50%以上。该河系山区性河流,降雨后径流汇聚快,来水较猛,汇流时间短,坡面水流很快汇入河道,并挟带大量泥沙,是主要的入库水沙来源。除青龙桥河外,谢家棚河及西南村河相较于其他河流来水量较大,分别占总来水量的17.91%和10.16%。

3.2 土地利用类型分析

方便水库水源地保护区总面积约77.13 km²,其中水域面积10.25 km²,土地面积66.88 km²,各用地类型面积、所占土地面积比例以及在各级保护区内的分布见表3。从表3可知,方便水库水源地一级保护区内大部分为耕地,耕地比例高达72.4%,其次为林地,以及城乡、工矿、居民用地,所占比例均为11.76%。二级保护区内占比最高的仍为耕地(54.19%),其次为林地(32.78%)。综合整个汇水区域来看,水源保护区内耕地和城乡、工矿、居民用地总的比例过高,而林地和草地所占比例偏低。

表3 方便水库汇水区域土地利用状况

Table 3 Land use status in the catchment area of Fangbian Reservoir

土地利用类型	一级保护区		二级保护区		整个汇水区	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
耕 地	4.25	72.40	33.06	54.19	37.31	55.79
林 地	0.69	11.75	20.00	32.78	20.69	30.94
草 地	0.24	4.09	0.74	1.21	0.98	1.47
城乡、工矿、居民用地	0.69	11.76	6.94	11.38	7.63	11.41
未利用土地	0	0	0.27	0.44	0.27	0.39

3.3 饮用水源地污染源强度计算与验证

3.3.1 水源地污染排放量

经现场调查以及溧水区水务局提供的相关资料统计,方便水库主要污染源包括工业企业和集约化畜禽养殖造成的点源污染和农村生活污水、农田径流、农村固体废弃物、水土流失以及分散式禽畜养殖造成的面源污染。考虑到方便水库水面以下底泥面积和底泥释放通量等监测困难,故在研究方便水库污染源的过程中,只考虑外源污染。方便水库保护区污染物产生量统计见表4。综合点源和面源2种污染来源,方便水库的主要污染源为面源污染,面源污染的COD、TN、TP、NH₃-N排放量占各自总污染排放量的97.60%、99.67%、98.10%、98.71%。其中,农田径流污染是面源污染中的第一大污染源,这与种植面积及施肥量密切相关。

表4 方便水库保护区不同来源污染物排放量及贡献率

Table 4 Emission amount and contribution rate of pollutants from different sources in the Fangbian reservoir

污染类别	COD		TN		TP		NH ₃ -N	
	排放量/(t·a ⁻¹)	贡献率/%	排放量/(t·a ⁻¹)	贡献率/%	排放量/(t·a ⁻¹)	贡献率/%	排放量/(t·a ⁻¹)	贡献率/%
工业污染源	1.81	0.08	0.18	0.02	0.05	0.03	0.14	0.03
集约化禽畜养殖	36.16	1.60	2.73	0.31	3.03	1.87	5.83	1.26
生活污水	222.83	9.86	62.37	7.08	6.67	4.11	43.62	9.43
农田径流	1830.12	80.98	694.36	78.82	134.68	83.01	385.14	83.27
农村固体废弃物			59.73	6.78	7.01	4.32		
水土流失	165.20	7.31	60.79	6.90	10.40	6.41	27.47	5.94
分散禽畜养殖	3.84	0.17	0.79	0.09	0.41	0.25	0.32	0.07

注:工业污染源、集约化禽畜养殖为点源污染,其他为面源污染。



图2 方便水库汇水区河网分布
Fig.2 River network distribution of catchment area in the Fangbian reservoir

3.3.2 ArcGIS 模拟计算汇水区域内污染物排放量分布

结合 RS 技术对区域内土地利用方式的调查及各类型土地利用方式污染排放系数,同时结合表 4,模拟计算整个汇水区域内各入库河流小流域的污染物排放量分布情况(图 3)。从图 3 可以直观地看出不同入库河流小流域污染物排放量存在明显差异。图 3 中红色区域分别表示 COD 排放量为 175.0~325.4 t/a、TN 排放量为 61.2~121.2 t/a、TP 排放量为 12.6~23.4 t/a 和 NH₃-N 排放量为 35.4~65.8 t/a,均分布在青龙桥河流域和谢家棚河流域内;其次为橙红色区域,分别表示 COD 排放量为 90.6~175.0 t/a、TN 排放量为 33.7~66.2 t/a、TP 排放量为 6.5~12.6 t/a 和 NH₃-N 排放量为 18.3~34.5 t/a,主要分布在青龙桥河流域、西村河流域、西南村河流域以及四古凹河流域小部分区域内。后吕河流域和王家山河流域内多为深绿色和浅绿色,可见这 2 个流域污染负荷年排放量较小。

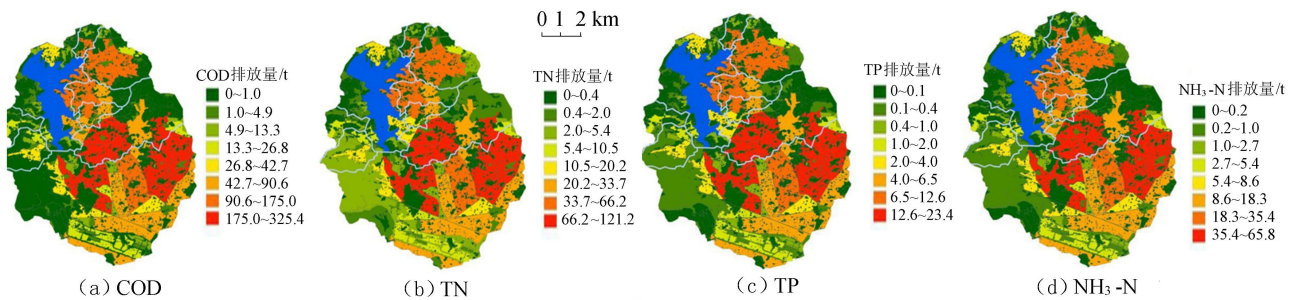


图 3 方便水库保护区污染物年排放量分布

Fig. 3 Annual discharge distribution of pollution in the Fangbian Reservoir

运用 ArcGIS 的矢量剪切功能计算各入库河流汇水面积内的污染物排放量,各入库河流小流域污染物排放量及贡献率见表 5。由表 5 可知,青龙桥河流域及谢家棚河流域污染负荷产生量较大,主要原因:(a)二者的流域汇水面积较大,青龙桥河、谢家棚河流域汇水面积各占水库总汇水面积的 46.20% 和 15.08%;(b)处在这 2 条河流汇水区域内的农田及人口较多,且苗木种植也多在这 2 个流域范围内,故农田径流污染及农村生活、农村固废污染等面源污染的排放量大。

表 5 方便水库保护区入库河流小流域污染排放量及贡献率

Table 5 Pollution emission amount and contribution rate of sub-watershed in the Fangbian Reservoir

编号	流域	COD		TN		TP		NH ₃ -N	
		排放量/(t·a ⁻¹)	贡献率/%	排放量/(t·a ⁻¹)	贡献率/%	排放量/(t·a ⁻¹)	贡献率/%	排放量/(t·a ⁻¹)	贡献率/%
1	青龙桥河流域	1 330.77	58.88	508.41	57.71	95.77	58.88	271.28	58.40
2	谢家棚河流域	393.21	17.40	159.08	18.06	28.49	17.52	81.86	17.62
3	西南村河流域	224.97	9.95	89.14	10.12	16.18	9.95	46.62	10.04
4	西村河流域	113.20	5.01	44.92	5.10	8.11	4.99	23.52	5.06
5	杨家坝河流域	70.58	3.12	27.31	3.10	4.94	3.04	14.69	3.16
6	王家山河流域	66.41	2.94	26.15	2.97	4.70	2.89	13.85	2.98
7	后吕河流域	32.16	1.42	14.23	1.62	2.37	1.45	6.89	1.48
8	四古凹河流域	28.67	1.28	11.73	1.32	2.10	1.28	5.81	1.26

3.3.3 污染排放量分布计算结果的验证

按照不同污染物来源及相应的入库系数,计算出不同河流小流域污染入库量及贡献率。结果显示按照排放量及入库系数计算出来的 COD、TN、TP、NH₃-N 年入库量分别为:903.99 t、88.10 t、14.60 t、41.60 t。青龙桥河流域对 COD、TN、TP、NH₃-N 贡献率最大,分别达到了 58.88%、57.71%、58.88%、58.40%;其次为谢家棚河,其 4 种污染物的贡献率分别为 17.40%、18.06%、17.52%、17.62%。同时,按照实际监测数据及入库水量计算出来的 COD、TN、TP、NH₃-N 年入库量分别为:1 000.33 t、95.63 t、14.15 t、45.41 t。此种计算方法下仍然是青龙桥河流域对 COD、TN、TP、NH₃-N 贡献率最大,分别达到了 57.40%、51.74%、54.35%、50.21%;其次为谢家棚河,其 4 种污染物的贡献率分别为 18.23%、16.49%、13.55%、20.13%。

从各条入库河流的贡献率结果比较中可以看出(图 4),与实际监测数据计算结果相比,用污染排放总量计算出的入库河流污染负荷入库量与其较为吻合,只有贡献率较小的几条河流结果稍有不同,但是相差不大,用污染排放量总量计算出的 COD、TN、TP、NH₃-N 总入库量分别相差 10%、8%、3% 和 8%。

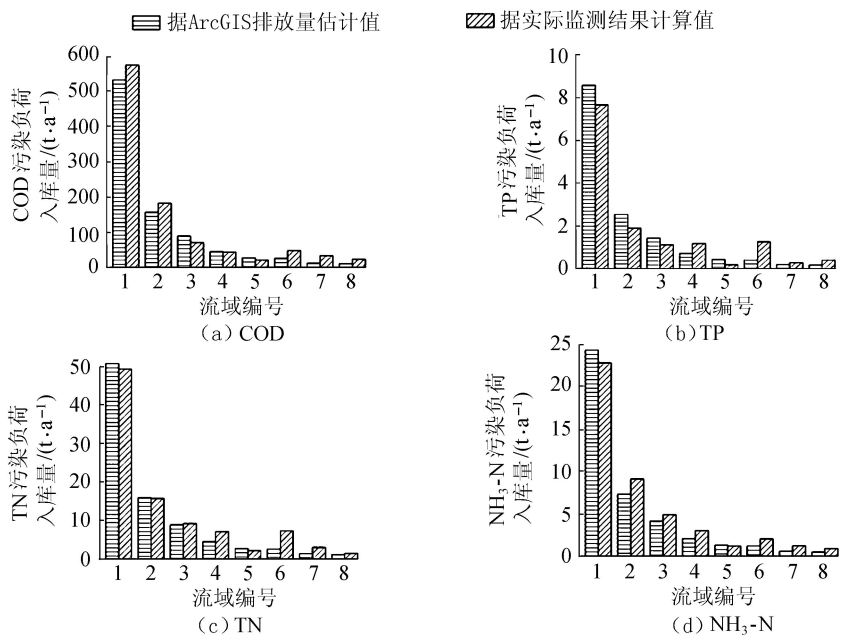


图4 不同算法下污染入库量比较

Fig.4 Comparison of pollution storage under different algorithms

4 结 论

- a. 在方便水库8条主要入库河流中,青龙桥河的汇水面积最大,其次为谢家棚河和西南村河。方便水库各类污染源中,面源污染所占比例最大,其对COD、TN、TP、NH₃-N污染负荷的贡献率分别达97.60%、99.67%、98.10%、98.71%。
- b. ArcGIS模拟的污染排放量分布结果显示:污染负荷排放量最大的区域主要集中在青龙桥河流域和谢家棚河流域,其次为西村河流域和西南村河流域。位于水库南边的青龙桥河流域对COD、TN、TP、NH₃-N贡献率最大,分别达到了58.88%、57.71%、58.88%、58.40%。污染物入库量的估算值和实测值的误差范围在10%以内,进而说明用ArcGIS模拟计算污染源强空间分布具有一定的可行性和准确度。

参考文献:

[1] 冉飞. 湖库型饮用水水源地水环境生态管理和保护[J]. 山西建筑,2011,37(34): 184-186. (RAN Fei. The water environment ecosystem management and protection to the drinking water source areas of lakes and reservoirs type[J]. Shanxi Architecture,2011,37(34): 184-186. (in Chinese))

[2] 边博,朱伟,李冰,等. 太湖流域西部地区面源污染特征及其控制技术[J]. 水资源保护,2015,31(1): 48-55. (BIAN Bo, ZHU Wei, LI Bing, et al. Characteristics and control techniques of non-point pollution in the western region of Taihu Basin[J]. Water Resources Protection,2015,31(1): 48-55. (in Chinese))

[3] 郑丙辉,付青,刘琰. 中国城市饮用水源地环境问题与对策[J]. 环境保护,2007(19): 59-61. (ZHENG Binghui, FU Qing, LIU Yan. Environmental problems and countermeasures of urban drinking water sources in China[J]. Environmental Protection,2007(19): 59-61. (in Chinese))

[4] 唐访良,张明,徐建芬,等. 千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学,2014,35(5): 1735-1741. (TANG Fangliang, ZHANG Ming, XU Jianfen, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (ocps) in the water of Lake Qiandao and its major input rivers[J]. Environmental Science,2014,35(5): 1735-1741. (in Chinese))

[5] 李晓燕,李璧成,安韶山. 基于GIS的小流域坡耕地调查方法探讨[J]. 水土保持通报,2001,21(5): 37-40. (LI Xiaoyan, LI Bicheng, AN Shaoshan. Sloping farmland investigation method in small watershed based on GIS[J]. Bulletin of Soil and Water Consercation,2001,21(5): 37-40. (in Chinese))

[6] 周超,高乃云,赵世焜,等. 上海青草沙水库水质调查与评价[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(6): 894-899. (ZHOU Chao, GAO Naiyun, ZHAO Shijia, et al. Evaluation of water quality in Qingcaosha Reservoir of Shanghai[J]. Journal

- of Tongji University(Natural Science), 2012,40(6): 894-899. (in Chinese))
- [7] 卫丹,万梅,刘锐,等. 嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究[J]. 环境科学,2014,35(7): 2650-2657. (WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, et al. Study on the quality of digested piggery wastewater in large-scale farms in Jiaxing[J]. Environmental Science,2014,35(7): 2650-2657. (in Chinese))
- [8] 邓必平,严恩萍,洪奕丰,等. 基于GIS和DEM的东江湖流域水文特征分析[J]. 湖北农业科学,2013,52(15): 3531-3536. (DENG Biping, YAN Enping, HONG Yifeng, et al. Hydrological characteristic analysis of Dongjiang Lake Watershed Based on GIS and DEM[J]. Hubei Agricultural Science,2013,52(15): 3531-3536. (in Chinese))
- [9] 仇天宇,周成虎,邵全琴. 海洋GIS数据模型与结构[J]. 地球信息科学, 2003,5(4): 25-29. (ZHANG Tianyu, ZHOU Chenghu, SHAO Quanqin. Ocean GIS data model and structure[J]. Journal of Geo-Information Science,2003,5(4): 25-29. (in Chinese))
- [10] 王云鹏,闵育顺,傅家谟,等. 水体污染的遥感方法及在珠江广州河段水污染监测中的应用[J]. 遥感学报,2001,5(6): 460-465. (WANG Yunpeng, MIN Yushun, FU Jiamo, et al. Remote sensing method of water pollution and application on water pollution monitoring in Guangzhou Section of Pearl River[J]. Journal of Remote Sensing,2001,5(6): 460-465. (in Chinese))
- [11] 王光明,梁秀娟,肖长来,等. GIS技术在水文水资源领域中的应用现状与发展趋势[J]. 吉林水利,2009(6): 1-5. (WANG Guangming, LIANG Xiujian, XIAO Changlai, et al. The status of the application of GIS technology in the field of hydrology and water resources and development trend[J]. Jilin Water Resources,2009(6): 1-5. (in Chinese))
- [12] KHALIL A, HANICH L, HAKKOU R, et al. GIS-based environmental database for assessing the mine pollution: a case study of an abandoned mine site in Morocco[J]. Journal of Geochemical Exploration,2014, 144: 468-477.
- [13] 周慧平,葛小平,许有鹏,等. GIS在非点源污染评价中的应用[J]. 水科学进展, 2004,15(4): 441-444. (ZHOU Huiping, GE Xiaoping, XU Youpeng, et al. Application of GIS to nonpoint source pollution evaluation[J]. Advances in Water Science, 2004,15(4): 441-444. (in Chinese))
- [14] 王晓燕,王振刚,王晓峰. GIS支持下密云水库石匣小流域非点源污染[J]. 城市环境与城市生态, 2003(增刊1):29-31. (WANG Xiaoyan, WANG Zhengang, WANG Xiaofeng. A GIS-based study on loss of non-point sourcepollutions from Shixia Small Watershed, Miyun Reservoir[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003 (Sup1):29-31. (in Chinese))
- [15] 温兆飞,吴胜军,陈吉龙,等. 三峡库区农田面源污染典型区域制图及其研究现状评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(12): 1684-1692. (WEN Zhaofei, WU Shengjun, CHEN Jilong, et al. Typical region mapping of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area: pattern analysis and status evaluation[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin,2014, 23(12): 1684-1692. (in Chinese))
- [16] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 李晶,张征,朱建刚,等. 基于DEM的太湖流域水文特征提取[J]. 环境科学与管理,2009,34(5): 138-142. (LI Jing, ZHANG Zheng, ZHU Jiangang, et al. Hydrological feature extraction of Taihu Lake Basin based on DEM[J]. Environmental Science and Management,2009,34(5): 138-142. (in Chinese))
- [18] 顾用红,舒振文,张火青. DEM在流域水文特征分析中的应用[J]. 人民珠江,2001,22(4): 5-6. (GU Yonghong, SHU Zhenwen, ZHANG Huoqing. Application of DEM method to analysis of hydrological features in the water basin[J]. Pearl River, 2001,22(4): 5-6. (in Chinese))
- [19] OMRAN A, DIETRICH S, ABOUELMAGD A, et al. New ArcGIS tools developed for stream network extraction and basin delineations using Python and java script[J]. Computers & Geosciences, 2016, 94: 140-149.

(收稿日期:2017-09-01 编辑:刘晓艳)