

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.01.09

基于GIS技术的方便水库面源污染控制方案研究

朱亮^{1,2}, 刘畅^{1,2}, 陈琳^{1,2}, 金梦婷^{1,2}, 邱云鹏^{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)

摘要:以南京市溧水区方便水库为研究对象,运用GIS技术并结合RS技术对整个汇水区域进行污染源的解析,确定污染关键因素以及重点污染区域,在此基础上,提出符合该水源地现状的最优保护方案。结果表明:在整个汇水区域中,耕地面积所占比例最大,且主要集中在青龙桥河、谢家棚河和西南村河3个水库主要来水河流流域内。青龙桥河和谢家棚河流域是污染负荷排放量最大的区域,其次是西村河和西南村河流域。在兼顾污染物去除率和成本的前提下,生态沟渠-生态塘技术是最优农田径流污染控制技术,其次为生态拦截缓冲带技术;生物接触氧化-人工湿地处理技术是农村生活污水最优控制技术。

关键词:湖库型水源地;子流域;面源污染;污染负荷;总量控制;GIS技术

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)01-0050-08

Study on control scheme for non-point source pollution in Fangbian Reservoir based on GIS technology

ZHU Liang^{1,2}, LIU Chang^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, JIN Mengting^{1,2}, QIU Yunpeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes,

Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the Fangbian Reservoir in Lishui District of Nanjing as the research object, GIS technology, combined with RS technology, was applied to analyze the pollution source of the whole catchment and determine the key pollution factors and key pollution areas. And the optimal protection scheme was proposed based on the study. The results show that the main land-use type of the whole catchment is the cultivated land, which is mainly distributed in the sub-basins of Qinglongqiao River, Xiejiapeng River, and Xinancun River. The Qinglongqiao River and Xiejiapeng River sub-basins are the largest pollution load areas, followed by the Xicun River and Xinancun River sub-basins. Under the premise of considering pollutant removal rate and cost, the technology of ecological ditch and ecological pond is the best technology for the farmland runoff pollution control, followed by the technology of ecological interception buffer belt. Biological contact oxidation-artificial wetland treatment technology is the optimal control technology for rural domestic sewage.

Keywords: lake-reservoir type water source area; sub-basin; non-point source pollution; pollution load; total amount control; GIS technology

湖库型水源地是我国饮用水源的重要类型之一,在我国各类型地表水源地中,湖库型水源地的比

例达40%左右^[1-2]。《2007年中国水资源公报》调查表明,我国湖库型水源地水质不达标情况比较严

重,且存在各种程度的水体富营养化现象。湖库型水源地由于其自身特点,水体流速缓慢,导致其污染物降解速率较慢,容易形成污染物的累积,故其存在较高的水源地安全风险。

面源污染是我国湖库型水源地污染最重要的原因。面源污染传统的调查主要采用野外采样、区域入户调查、水质监测分析、查阅统计资料等手段和方法^[3-4]。污染源调查统计所需的地方统计数据往往不便获取,且缺乏流域范围、人口数量、径流量、土地利用类型等基础资料;而且获得资料的时效性和可信度也较差。在湖库型水源地污染评价中,尤其是面源污染评价中,应用 GIS 技术可以有效地获取模型计算参数,提高数据的输入效率及准确可信度,同时,结合 RS 技术可根据土地类型和利用状况等时空因素的变化进行模拟^[5]。GIS 特有的空间分析工具及可视化特性增加了数据的直观性,可以把掩盖在大量数据中的空间特征和内在规律表现出来,有助于识别污染的主要来源和迁移途径,预报污染的负荷、变化趋势及其对水体的影响,有针对性地制定出减少污染负荷的措施方案,为水源地保护提供决策依据。

近年来,GIS 技术应用于面源污染研究已成为一大趋势。从 20 世纪 80 年代中期开始,美、日等发达国家在面源污染研究领域相继引入了信息技术和专家系统^[6-9]。Behrendt 等^[10]利用 GIS 空间建模功能建立模型,在对易遭受磷元素污染的地区进行监测和调查的基础上,研究不同类型土壤对磷的吸收能力。也有学者在密歇根州农业流域的土壤侵蚀与 N、P 流失情况的研究^[11-12]中引入了 GIS 技术,并由此提出了农业的最佳管理措施。目前,我国对 GIS 技术在非点源污染分析中的应用也越来越广泛。贾海峰等^[12-13]在研究密云水库石匣小流域非点源污染的过程中,运用 GIS 技术对土地利用数据和实验监测结果进行分析,确定流域内非点源污染的分

布规律和重点控制区;在太湖流域非点源污染研究中,郑强^[14]运用 GIS 的空间分析功能,对污染物入河量的时空分布规律进行分析,发现其污染物入河量的时间高峰期为汛期,空间高峰区域主要集中在环太湖地区。

目前,GIS 技术主要应用于非点源污染的分析过程,而基于 GIS 技术的面源污染控制方案的研究仍然比较缺乏。笔者以南京市溧水区的方便水库为例,研究了 GIS 技术在水库面源污染解析及控制过程中的实际应用,可为水源地保护方案的制定提供科学依据。

1 研究区域概况

研究范围为整个方便水库汇水区域,总面积为 77.1 km²,具体由方便水库小流域组成,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、后吕河等 8 条河流。

方便水库主要面源污染包括农村生活污水、农田径流、农村固废、水土流失以及分散式禽畜养殖等。方便水库保护区面源污染排放量及贡献率统计见表 1。

方便水库汇水区域内各类面源污染中,第一大污染源来自于农田径流污染,其 COD、TN、TP、NH₃-N 排放量对汇水区总量的贡献率分别为 75.87%、79.08%、84.61%、78.48%。其次为农村生活污水,其 COD、TN、TP 和 NH₃-N 的贡献率分别为 9.24%、7.10%、4.19% 和 8.89%。

2 研究方法

2.1 饮用水源地污染控制措施评价决策指标选取

评价指标体系是水源地污染控制技术优选中十分重要的部分,该体系的建立应遵循科学、全面、适用和可操作性等原则。在设计评价指标时,要兼顾

表 1 方便水库保护区面源污染排放量及贡献率统计

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/ %
生活污水	222.83	9.24	62.37	7.10	6.67	4.19	43.62	8.89
农田径流	1830.12	75.87	694.36	79.08	134.68	84.61	385.14	78.48
农村固废	190.33	7.89	59.73	6.80	7.01	4.40	34.22	6.97
水土流失	165.20	6.85	60.79	6.92	10.40	6.53	27.47	5.60
分散畜禽养殖	3.84	0.15	0.79	0.10	0.41	0.27	0.32	0.06
合计	2412.32	100	878.04	100	159.17	100	490.77	100

污染物削减等环境指标和经济成本指标。本研究从方便水库污染源时空分布特征等方面考虑,从环境和经济效益两个方面对评价指标进行选择。选取 TN、TP、NH₃-N 和 COD 削减率 4 个指标作为环境效益指标,选取建设成本、运行成本等技术投资作为经济成本指标。

2.2 饮用水源地保护方案评价决策模型选取

运用层次(AHP)-灰色度关联法(GRAP)对饮用水源地污染控制措施进行优选。由 AHP 法构建层次结构关系,根据技术指标分析结果,构造判断矩阵,计算出准则层、子准则层和方案层中各评价指标的相对权重。然后,利用 GRAP 法计算关联度,关联度系数最大的措施即为最优措施 AHP-GRAP 法既对复杂系统的各层次子系统进行评价,又在子系统的基础上进行综合评价,较好地克服了以往只进行定性分析和对评价因素主次不分的不足。

3 结果与讨论

3.1 基于 GIS 技术的污染控制方案的布局

3.1.1 子流域划分结果

水库流域范围内各入库河流子流域的划分完成后,利用 GIS 软件,计算出各入库河流的汇水面积。各入库河流的汇水面积及来水量占入库水量比例计算结果见表 2(水库周边塘坝忽略不计),方便水库汇水区河网分布见图 1。

表 2 各入库河流的汇水面积及来水量占入库水量比例

入库河道	汇水面积/km ²	来水量占入库水量比例/%
四古凹河	1.177	1.81
西南村河	6.592	10.16
西村河	2.781	4.28
杨家坝河	1.614	2.49
谢家棚河	11.625	17.91
青龙桥河	35.617	54.87
王家山河	3.617	5.57
后吕河	1.883	2.91
合计	64.906	100

由表 2 可见,青龙桥河是汇入方便水库的主要河流。该河流自溧水区共和山区汇流至方便水库,来水量占总入库水量的 50% 以上。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%。

3.1.2 土地利用方式调查结果

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。除水域外共有土地面



图 1 方便水库汇水区河网分布

积 66.88 km²,方便水库汇水区域内土地利用状况见表 3。

表 3 方便水库汇水区域内土地利用状况

用地类型	一级保护区		二级保护区		整个汇水区	
	面积/ km ²	百分比/ %	面积/ km ²	百分比/ %	面积/ km ²	百分比/ %
耕 地	4.25	72.41	33.06	54.17	37.31	55.77
林 地	0.69	11.75	20.00	32.80	20.69	30.95
草 地	0.24	4.09	0.74	1.21	0.98	1.47
城乡、工矿、居民用地	0.69	11.75	6.94	11.38	7.63	11.41
未利用土地	0	0	0.27	0.44	0.27	0.40
合 计	5.87	100	61.01	100	66.88	100

由表 3 可见,方便水库水源地一级保护区内大部分为耕地,比例高达 72.41%,其次为林地和城乡、工矿和居民用地,所占比例均为 11.75%。二级保护区内所占比例最高的仍为耕地,其次为林地,所占比例分别为 54.17% 和 32.80%。从综合整个汇水区域来看,耕地占总面积的 55.77%,水源保护区内耕地和城乡、工矿、居民用地比例过高,而林地和草地所占比例偏低。结合水库汇水区域内各类型土地利用方式所占比例可知,水源保护区内耕地和城乡、工矿、居民用地比例较高,与污染源调查结果中显示的农田径流污染和农村生活污水污染比重所占比例较大的结果相一致。

3.1.3 基于 GIS 模拟的污染排放量分布结果

在子流域划分、土地利用方式调查和点面源污染调查的基础上,运用 GIS 对流域内污染排放量分布情况进行模拟,根据不同土地利用类型污染排放系数,得到方便水库保护区污染物年排放量分布(图 2)。

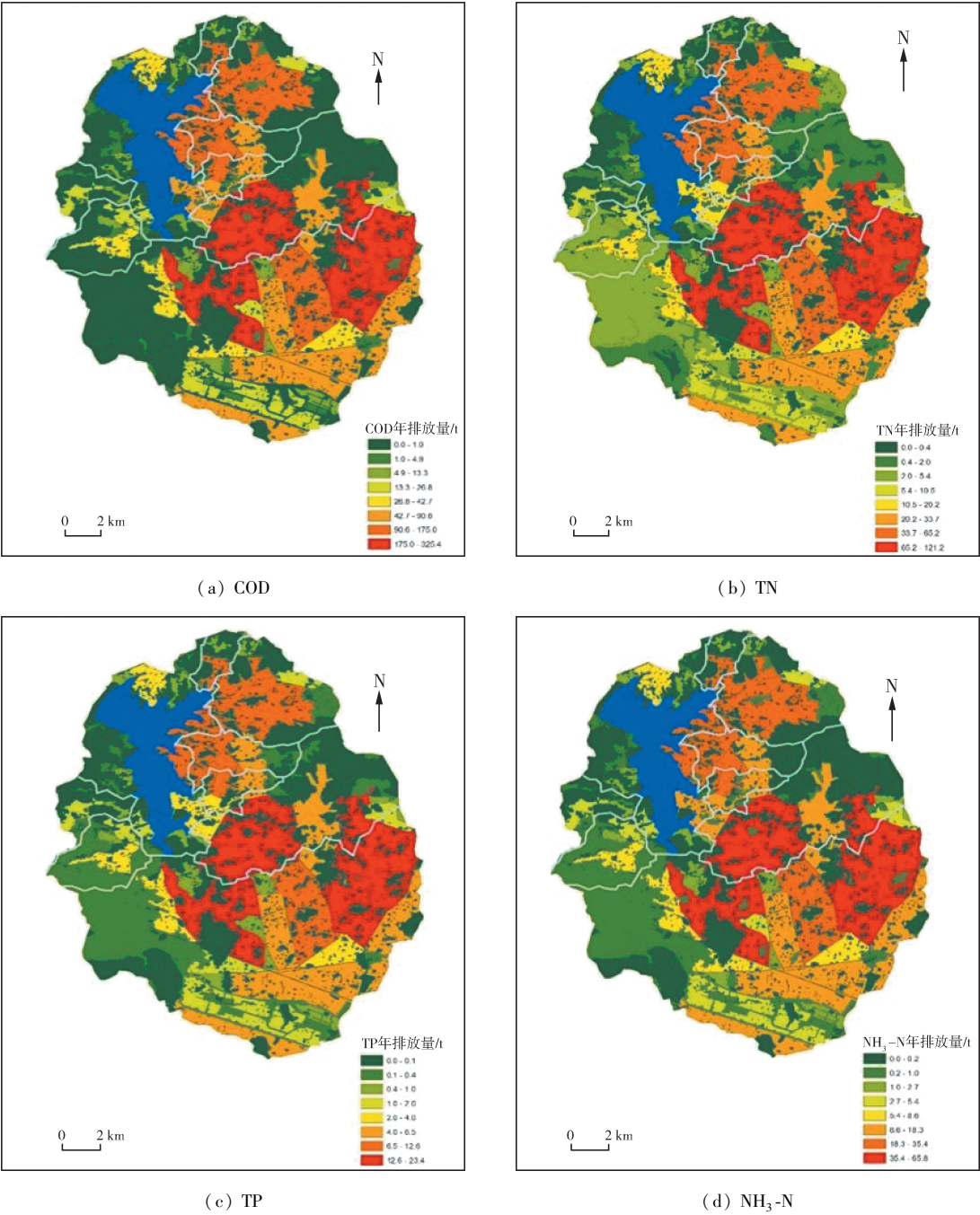


图2 方便水库保护区污染物年排放量分布

由图2可见,COD、TN、TP 和 NH₃-N 污染排放量分布情况基本一致。不同的入库河流小流域其污染物排放量有明显差异。图2(a)~(d)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 18.3~35.4 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

绿色和浅绿色色块,可见这两个流域污染负荷年排放量较小。

运用 GIS 的矢量剪切功能计算出各入库河流汇水面积内的污染排放量,方便水库保护区入库河流小流域污染排放量及贡献率统计如表4所示。

青龙桥河流域对 COD、TN、TP 和 NH₃-N 污染负荷的贡献率均最大,分别达到了 58.89%、57.70%、58.87% 和 58.41%;其次为谢家棚河流域,对各污染负荷的贡献率分别为 17.40%、18.06%、17.52% 和 17.62%。

青龙桥河流域及谢家棚河流域污染负荷产生量较大的主要原因:一方面是二者的流域汇水面积较

表 4 方便水库保护区入库河流小流域污染排放量及贡献率统计

入库河流 小流域	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/ %
青龙桥河	1 420.37	58.89	506.72	57.70	94.52	58.87	286.61	58.41
谢家棚河	419.74	17.40	158.57	18.06	27.54	17.52	86.47	17.62
西南村河	240.03	9.95	88.86	10.12	15.64	9.95	49.27	10.04
西村河	120.86	5.01	44.78	5.10	7.83	4.98	24.83	5.06
杨家坝河	75.26	3.12	27.22	3.10	4.78	3.04	15.51	3.16
王家山河	70.92	2.94	26.08	2.97	4.54	2.89	14.62	2.98
后吕河	34.25	1.42	14.22	1.62	2.29	1.46	7.26	1.48
四古凹河	30.89	1.27	11.59	1.33	2.03	1.29	6.20	1.25
合计	2 412.32	100	878.04	100	159.17	100	490.77	100

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 54.87% 和 17.91%; 另一方面,处在这两条河流汇水区域内的农田及人口也较多,且苗木种植也在这两个流域范围内,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均较大。

3.1.4 污染控制工程布局

根据 GIS 对方便水库汇水区域土地坡度分析结果,保护区内不存在 25° 以上坡耕地,结合 HJ/T338—2007《饮用水源保护区划分技术规范》《饮用水源保护区污染防治管理规定》(2010 年 12 月 22 日修正版)的相关要求,对方便水库保护区实施人口搬迁和退耕还林工程。方便水库人口搬迁及退耕还林工程布局见图 3。

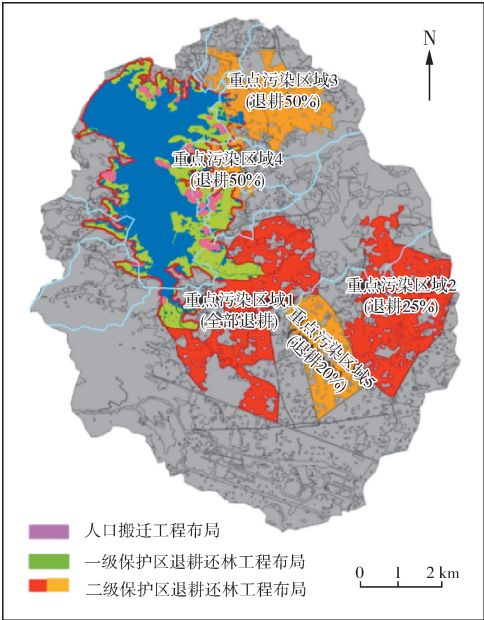


图 3 方便水库人口搬迁及退耕还林工程布局

方便水库人口搬迁及退耕还林工程量见表 5。人口搬迁工程实施后,COD、TN、TP 和 NH₃-N 污染负荷分别可削减 31.53 t/a、9.61 t/a、0.857 t/a 和 7.69 t/a;退耕还林工程实施后,COD、TN、TP 和 NH₃-N

污染负荷分别可削减 660.15 t/a、245.95 t/a、47.38 t/a 和 133.58 t/a。合计削减:COD 污染负荷 691.68 t/a, TN 污染负荷 255.56 t/a, TP 污染负荷 48.24 t/a, NH₃-N 污染负荷 141.27 t/a。

表 5 方便水库人口搬迁及退耕还林工程量

保护区等级	污染区域	人口搬迁/人	退耕还林/hm ²
一级保护区		5 230	424.93
	重点污染区域 1	0	497.60
	重点污染区域 2	0	122.27
二级保护区	重点污染区域 3	0	141.93
	重点污染区域 4	0	50.73
	重点污染区域 5	0	42.13
合计		5 230	1 279.59

3.2 典型污染控制技术分析

根据方便水库污染源以及污染排放量分布的分析可知,农田径流污染为面源污染中最主要的污染源,其次为农村生活污水。由于农田径流污染和农村生活污水污染负荷总和占总污染负荷的 85% 以上,故将其列为重点控制污染源。

3.2.1 农田径流污染控制技术优选

根据相关技术指南和文献资料^[13-15]统计,优选出适用于方便水库的农田径流污染控制技术,各污染物削减率指标和技术投资指标如表 6 所示。

表 6 农田径流各污染物削减率指标和技术投资指标

处理技术	污染物削减率/%				技术投资/ (元·m ⁻²)
	COD	TN	TP	NH ₃ -N	
生态拦截缓冲带	35.90	41.50	47.60	39.50	51.30
生态沟渠-生态塘	39.00	53.00	60.00	45.00	85.50
人工湿地	43.20	53.80	61.10	48.60	150.00
生态田埂	5.90	10.20	15.30	9.30	10.60

在最优技术决策过程中,设置的标准技术 B₀,对 COD、TN、TP 和 NH₃-N 的去除率均为 100%,技

术投资为 10 元/m²。经 AHP-GRAP 法计算各指标的权重及各污染控制技术相对标准技术的灰色关联度系数 μ ,结果如表 7 所示。

表 7 农田径流各指标权重及相对标准方案的

灰色关联度系数						
处理技术	污染权重				技术成本权重	μ
	COD	TN	TP	NH ₃ -N		
生态拦截缓冲带	0.1624	0.2625	0.3107	0.0824	0.1820	0.5765
生态沟渠-生态塘	0.1624	0.2625	0.3107	0.0824	0.1820	0.6745
人工湿地	0.1624	0.2625	0.3107	0.0824	0.1820	0.4944
生态田埂	0.1624	0.2625	0.3107	0.0824	0.1820	0.3872

由表 7 可见,在以 COD、TN 和 TP 去除率为主,兼顾技术成本的情况下,生态沟渠-生态塘复合技术的灰色关联度系数最大,为 0.674 5,其次为生态拦截缓冲带,灰色关联度系数为 0.576 5,生态田埂虽然技术投资少,但去除率相应也低,故其灰色关联度系数仅 0.387 2,所以在方便水库水源地农田径流污染控制中应该以生态沟渠-生态塘复合技术和生态拦截缓冲带技术为主,同时因地制宜地辅以人工湿地技术。

3.2.2 农村生活污水控制技术优选

根据相关技术指南和文献资料统计,优选出适用于方便水库的农村生活污水控制技术,各污染物削减率指标和技术投资指标^[14-18]如表 8 所示。

表 8 农村生活污水各污染物削减率指标和技术投资指标

处理技术	污染物削减率/%				建设成本/(元·m ⁻³)	运行费用/(元·m ⁻³)
	COD	TN	TP	NH ₃ -N		
沼气池	35.00	35.00	25.00	45.30	1500	0.25
生物接触氧化池	52.00	63.50	54.60	58.80	4050	0.30
潜流式人工湿地	49.00	76.00	75.52	74.44	3350	0.25
生物接触氧化-人工湿地	77.00	85.00	90.00	89.35	6580	0.55

在最优技术决策过程中,设置的标准技术 C_0 ,对 COD、TN、TP 和 NH₃-N 的去除率均为 100%,建设成本 1 000 元/m³,运行成本为 0.2 元/m³。经 AHP-GRAP 法计算各指标的权重及各污染控制技术相对标准技术的灰色关联度系数 μ ,结果如表 9 所示。

由表 9 可见,在农村生活污水污染控制技术中生物接触氧化-人工湿地处理技术的灰色关联度系数最大为 0.712 6,可见在兼顾 COD、TN、TP 和 NH₃-N 去除率以及技术成本的前提下,生物接触

氧化-人工湿地处理技术是适用于农村生活污水控制的最优技术。

表 9 农村生活污水各指标权重及相对标准方案的灰色关联度系数

处理技术	污染物权重				建设成本权重	运行费用权重	μ
	COD	TN	TP	NH ₃ -N			
沼气池	0.1305	0.2483	0.2683	0.0605	0.1462	0.1462	0.5629
生物接触氧化池	0.1305	0.2483	0.2683	0.0605	0.1462	0.1462	0.5551
潜流式人工湿地	0.1305	0.2483	0.2683	0.0605	0.1462	0.1462	0.6826
生物接触氧化-人工湿地	0.1305	0.2483	0.2683	0.0605	0.1462	0.1462	0.7126

3.3 水源地污染物总量控制方案

3.3.1 水环境容量的计算

以方便水库饮用水源地一级保护区Ⅱ类水质要求为污染物总量控制目标,根据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,当水源地达到Ⅱ类水质标准时,COD、TN、TP 和 NH₃-N 的临界值分别为 15 mg/L、0.5 mg/L、0.025 mg/L 和 0.5 mg/L。

a. COD 和 NH₃-N 水环境容量计算模型。根据 GB 3839—83《制定地方水污染物排放标准的技术原则与方法》,湖泊水库 COD 和 NH₃-N 的水环境容量采用完全混合模型^[19],其计算公式为

$$W_1 = 365 \left[(\rho_s - \rho_0) V_0 / T + K V_0 \rho_s + (\rho_s - \rho_0) q_{out} \right] \tag{1}$$

式中: W_1 为方便水库 COD 或 NH₃-N 的水环境容量, t/a; ρ_s 为方便水库水环境控制目标质量浓度, mg/L; ρ_0 为方便水库水环境背景质量浓度, mg/L; V_0 为方便水库设计安全水量, m³; T 为维持其设计水量的天数,可按 30 计; K 为方便水库水体污染物的综合降解系数, a⁻¹; q_{out} 为从方便水库排泄出的水量, m³/d。

b. TN 和 TP 的水环境容量计算模型。方便水库 TN 和 TP 的水环境容量采用吉柯奈尔-迪龙模型^[20],其计算公式为

$$W_2 = \rho_s q H A / (1 - R) \tag{2}$$

其中

$$q = Q_1 / V$$
$$R = 0.426 \exp(-0.271 q_s) + 0.571 \exp(-0.00949)$$
$$q_s = Q / A$$
$$Q = 365 q_{out}$$

式中: W_2 为方便水库 TN、TP 的水环境容量, t/a; Q_1 为方便水库输入水量, m³/a; q 为水力冲刷速率, a⁻¹; R 为氮、磷滞留系数; Q 为年出库水量, m³/a; V 为水库库容, m³; H 为方便水库的平均水深, m; A 为方便水库的湖水表面积, m²; q_s 为面积水负荷, m/s。

根据相关计算模型及方便水库相关计算参数,

方便水库各污染指标水环境容量、现状负荷及削减率计算结果如表 10 所示。

表 10 方便水库各污染指标水环境容量、现状负荷及削减率

指标	水环境容量/ (t·a ⁻¹)	现状负荷/ (t·a ⁻¹)	削减量/ (t·a ⁻¹)	削减率/ %
COD	537.49	903.99	366.50	40.54
TN	41.67	88.10	46.43	52.70
TP	5.42	14.60	9.18	62.88
NH ₃ -N	31.57	41.60	10.03	24.11

由表 10 可见,NH₃-N 的削减率较小,COD、TN 和 TP 削减率较大。其中 COD、TN 和 TP 污染负荷分别超过其环境容量 366.50 t/a、46.43 t/a 和 9.18 t/a,削减比例达到 40.54%、52.70% 和 62.88%。根据各污染指标的削减率和现状排放量可计算出 COD、TN、TP 和 NH₃-N 需削减的排放量分别为 916.19 t/a、464.26 t/a、102.02 t/a 和 111.93 t/a。

由退耕还林和人口搬迁实施后污染负荷的削减量可知,NH₃-N 已达到削减要求,COD 排放量还需削减 224.51 t/a,TN 排放量还需削减 208.70 t/a,TP 排放量还需削减 53.79 t/a。保护区内剩余农田 2794.93 hm²,人口 31268 人。污染治理的工程措施主要针对 TN 和 TP 的去除。

3.3.2 总量控制方案的生成和选择

根据方便水库水源地水环境质量现状,制订 3 套方案 A、B 和 C。基础方案 A:水源地污染源控制保持基准年水平,不采取新的措施。基本治理情景方案 B:进行农田径流污染源的控制,先治理青龙桥河和谢家棚河等重点流域,然后对各其他入库河流小流域进行控制,建立 1 个方案。污染控制情景方案 C:在农田径流污染控制的基础上,进行农村生活污水的治理,建立 C1~C4 4 个方案。方便水库面源污染控制方案见表 11。

表 11 方便水库面源污染控制方案

备选方案	农田径流治理率/%	农村生活污水治理率/%
A	0	0
B	94.79	0
C1	92.48	25
C2	90.17	50
C3	87.87	75
C4	85.56	100

对生成的 6 个备选方案,通过污染物削减量分析和经济比较,并考虑其他影响进行优选。保护区内农田径流污染控制采用生态拦截缓冲带和生态沟渠-生态塘复合技术,同时辅以测土配方施肥等科学种植技术,对 COD、TN、TP 和 NH₃-N 的去除率分别可达 41%、56%、65% 和 50%,平均投资 4500 元/hm²。农村生活污水治理采用生物接触氧化-人工湿地技

术,对 COD、TN、TP 和 NH₃-N 的去除率分别可达 77%、85%、90% 和 89%,农村生活污水集中处理厂建设投资 50 万元/座,规模为 50 m³/d,运行费用 0.55 元/(m³·d),人工湿地造价 140 元/m²。各方案对污染负荷的削减量及投资费用见表 12。

表 12 各方案对污染负荷的削减量及投资费用

方案	削减量/(t·a ⁻¹)				投资/ 万元	是否 达标
	COD	TN	TP	NH ₃ -N		
A	0	0	0	0	0	否
B	454.70	238.03	53.79	119.23	3576.58	是
C1	480.44	243.44	53.79	123.45	4667.88	是
C2	506.18	248.85	53.79	127.67	5759.18	是
C3	531.98	254.28	53.79	131.91	6850.86	是
C4	557.72	259.70	53.79	136.13	7942.17	是

在综合考虑污染物削减量以及投资费用情况下,方案 B 为最优方案,即仅对农田径流污染进行治理。结合人口搬迁和退耕还林工程对采用方案 B 污染负荷进行削减,对 COD 的削减量为 1145.78 t/a,对 TN 的削减量为 493.59 t/a,对 TP 的削减量为 102.02 t/a,对 NH₃-N 的削减量为 260.50 t/a,符合污染负荷削减率要求。

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,来水量占入库总量的 54.87%;其次为谢家棚河和西南村河。在整个汇水区域中,耕地面积所占比例最大,达 55.77%,且大量耕地集中在青龙桥河、谢家棚河和西南村河 3 条水库主要来水河流域内。污染负荷排放量最大的区域主要集中在青龙桥河和谢家棚河流域,其次为西村河和西南村河流域。青龙桥河流域对 COD、TN、TP、NH₃-N 污染负荷贡献率最大,均在 50% 以上;其次为谢家棚河流域。

b. 在兼顾污染物去除率和成本的前提下,生态沟渠-生态塘技术是最优农田径流污染控制技术,其次为生态拦截缓冲带技术;生物接触氧化-人工湿地处理技术是农村生活污水最优控制技术。

c. 在总量控制前提下,方便水库 COD、TN、TP 和 NH₃-N 污染负荷削减率分别为 40.54%、52.70%、62.88% 和 24.11%,因此,方便水库水污染控制主要是对 COD、TN 和 TP 污染负荷的控制。在方便水库实施人口搬迁和退耕还林的基础上,NH₃-N 已可达削减要求,COD、TN 和 TP 污染负荷削减量分别占需削减总量的 75.50%、54.98% 和 47.28%。对剩余农田径流污染和农村生活污水进行治理时,在削减量全部达标的前提下,当仅对农田径流污染控制时,方案投资最小。

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] 谢艾玲, 徐枫, 向龙, 等. 环太湖主要入湖河流污染负荷量对太湖水质的影响及趋势分析[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2017, 45(5): 391-397. (XIE Ailing, XU Feng, XIANG Long, et al. Trend analysis for pollutant load of major rivers around Taihu Lake and its impact on water quality in Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 391-397.

[3] 谢飞, 吴俊锋, 任晓鸣. 新形势下对太湖流域水环境治理的思考[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 153-156. (XIE Fei, WU Junfeng, REN Xiaoming. Thoughts on water environmental management in Taihu Basin under new conditions[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 153-156. (in Chinese))

[4] 王羽辉, 谢三桃, 骆克斌, 等. 现代农业灌溉减排模式的建立与应用[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 161-166. (WANG Yuhui, XIE Santao, LUO Kebin, et al. Establishment and application of modern agricultural irrigation reduction model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 161-166. (in Chinese))

[5] 颜梅春, 陈贝贝, 李致家, 等. 基于土壤地形指数和下垫面水文分区的流域模型参数率定[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2015, 43(3): 197-202. (YAN Meichun, CHEN Beibei, LI Zhijia, et al. Parameter calibration for watershed hydrology model based on soil topography index and hydrological partition of underlying surface [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(3): 197-202. (in Chinese))

[6] BHUYAN S, MARZEN L, KOELLIKER J, et al. Assessment of runoff and sediment yield using remote sensing, GIS, and AGNPS [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 57(6): 351-364.

[7] BOURAOUI F, VACHAUD G, HAVERKAMP R, et al. A GIS integrated distributed approach for nonpoint source pollution modeling [C]//IAHS Publications International Commission on Water Systems. Sustainability of water resources under increasing uncertainty. Tokyo: IAHS Publication, 1997: 377-384.

[8] CORWIN D L, WAGENET R. Applications of GIS to the modeling of nonpoint source pollutants in the vadose zone: a conference overview [J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(3): 403-411.

[9] DENNIS L, CORWIN K. Non-point pollution modeling based on GIS [J]. Soil and Water Conservation, 1998(1): 75-88.

[10] BEHRENDT H, LADEMANN L, PAGENKOPF WG, et al. Vulnerable areas of phosphorus leaching-detection by GIS-analysis and measurements of phosphorus sorption capacity [J]. Water Science and Technology, 1996, 33(4/5): 175-181.

[11] COOKE W H, GRALA K, WALLIS R C. Avian GIS models signal human risk for West Nile virus in Mississippi [J]. International Journal of Health Geographics, 2006, 5(1): 36.

[12] 贾海峰. GIS 强化的水库水质模拟及其在密云水库中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.

[13] 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 source pollutions from Shixia small watershed, Miyun Reservoir [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003 (Supl) 29-31. (in Chinese))

[14] 郑强. 太湖流域非点源污染物入河量估算及其时空分布研究[D]. 南京: 南京大学, 2006.

[15] 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))

[16] 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 Zhaoifei, 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))

[17] 李飞霞. 基于灰色关联度的区域环境影响评价指标分析[J]. 牡丹江师范学院学报 (自然科学版), 2008(1): 51-52. (LI Feixia. A grey correlation-based study on the analysis of the regional environmental impact assessment indicators [J]. Journal of Mudanjiang Teachers's College (Natural Sciences Edition), 2008 (1): 51-52. (in Chinese))

[18] VOLLENWEIDER R A. Input-output models [J]. Schweizerische Zeitschrift Für Hydrologie, 1975, 37(1): 53-84.

[19] 黄真理, 李玉梁, 李锦秀, 等. 三峡水库水环境容量计算[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 7-14. (HUANG Zhenli, LI Yuliang, LI Jinxiu, et al. Water environmental capacity for the reservoir of Three Gorges Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(3): 7-14. (in Chinese))

[20] 邱卫国, 唐浩, 王超. 水稻田面水氮素动态径流流失特性及控制技术研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 740-744. (QIU Weiguo, TANG Hao, WANG Chao. Rule of lose of nitrogen in the surface water of rice fields and the control technology [J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2004, 23(4): 740-744. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-03-26 编辑: 徐 娟)