

湖泊流域水环境-经济系统耦合模拟方法研究

张百川^{1,2} 张扬² 李政² 刘阎霄² 郭怀成^{2,†}

1. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: guo_hc@pku.edu.cn

摘要 为探索湖泊流域水污染治理、水资源节约与社会经济发展之间的冲突与协同关系, 提出水环境-经济系统耦合模拟方法, 并在异龙湖流域开展应用研究。基于情景分析结果, 得出如下结论: 1) 在经济社会可承受的范围内, 通过流域水污染控制, 可将异龙湖的入湖营养物负荷削减到IV类水质目标对应的水环境容量水平; 2) 实施工业搬迁或严格的规模限制对流域经济总量的增长和城镇化极为不利, 对异龙湖水环境的保护作用并不显著; 3) 规划期水污染防治的重点应是改变高水高肥的农业种植模式, 治理农村生活污水, 推行污水回用, 同时减少污水向外流域的转移; 4) 依据模拟结果, 给出的优化方案在规划期末可减少45%的外调水, 陆源TN和TP年入湖负荷分别降低26.6%和18.5%, 湖泊TN和TP污染负荷分别降低20.7%和17.5%, GDP损失仅7%。

关键词 湖泊流域; 耦合; SWAT模型; SD模型

Study on Coupling Simulation Method of Environmental-Economic System at Lake Watershed

ZHANG Baichuan^{1,2}, ZHANG Yang², LI Zheng², LIU Yanxiao², GUO Huaicheng^{2,†}

1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001; 2. College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: guo_hc@pku.edu.cn

Abstract In order to explore the internal conflict and synergy among water pollution control, water conservation and socio-economic development, a system of coupling simulation for the aquatic environmental-economic system of lake watershed was constructed and applied at Yilong Lake Watershed. Based on the scenario analysis, the following conclusions are drawn. 1) Under the condition of economic and social affordability, the nutrient load of Yilong Lake can be reduced to the level of aquatic environmental capacity corresponding to Grade IV water quality through the measures of controlling the pollution. 2) The implementation of industrial relocation or very strict scale restriction is extremely unfavorable for gross domestic product (GDP) growth and urbanization of the watershed, but does not play a significant role in protecting the aquatic environment of Yilong Lake. 3) The critical measures in the planning period are to change the planting practices of high water-consuming and heavy fertilizer-using, treat rural domestic sewage more effectively, promote sewage reuse, and reduce the transfer of sewage. 4) According to the simulation results, the optional scheme selected by the approach proposed here would reduce the water diversion demand by 45%, and cut down the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) discharged into the lake from the land surface by 26.6% and 18.5% respectively, and eliminate the TN and TP load of the lake by 20.7% and 17.5% respectively, but only at a cost of 7% of GDP at the end of the planning period.

Key words lake watershed; coupling; soil and water assessment tool (SWAT); system dynamics model (SDM)

湖泊流域可以视为人与自然构成的复合系统,包含复杂的人-水互馈关系^[1],如社会经济与水资源、水环境之间冲突与协同的动态反馈关系等。理解这种关系是优选水污染治理、节水与社会经济协同发展方案的必要前提。目前普遍采用的“非点源负荷模拟+关键源区识别+空间布局优化”方法没有考虑水资源节约利用与水污染防治之间的协同性,也缺少对水污染防治和流域社会经济状态之间反馈效应的分析,与当前国内湖泊流域普遍出现的水资源短缺以及部分经济欠发达流域仍然旺盛的发展诉求相矛盾。

目前主流的流域水文水质模拟方法是采用分布式水文水质模型,如 Hydrologic Simulation Program Fortran (HSPF)^[2], Soil and Water Assessment Tool (SWAT)^[3-5], Storm Water Management Model (SWMM)^[6-7]和 System Hydrological European (SHE)^[8]等。环境经济领域的社会经济模拟常用方法有可计算一般均衡模型^[9-10]、投入产出分析^[11-12]、系统动力学模型(System Dynamics Model, SDM)^[13-16]和基于Agent的建模方法(Agent-based Model, ABM)^[17-19]等。从近15年公开发表的文献来看,综合运用分布式水文水质模型与社会经济动态模型来构建流域水环境-经济模拟工具的研究并不多见。Prodanovic

等^[20]应用SDM和水文模型,研究泰晤士河上游流域水资源可用性与社会经济发展之间的联系,但其研究重点未包含水质变化。刘慧等^[16,21]利用SDM研究滇池流域水环境经济系统模拟方法,但对流域水文水质变化采用集总式模拟,未直接体现流域下垫面的空间异质性。

本研究采用SWAT和SDM,构建湖泊流域水环境-经济系统耦合模拟方法,在此基础上开展多情景分析,探索不同情景下系统演化的过程与结果,并在异龙湖流域开展案例研究,检验所提方法的适用性,以期揭示流域水环境与经济协同演化机制提供新的方法。

1 材料与方法

1.1 研究区域

异龙湖是云南九大湖泊之一,湖面面积为31.0 km² (水位达到1414.20 m时),属浅水湖泊,蓄水量为1.16亿m³。异龙湖水环境功能区划类别为III类,2016—2018年水质总体为劣V类,2019年达到V类,属中度富营养状态。流域面积为360.4 km²,全域在石屏县境内(图1),兼有山区和平原坝区地貌。该流域涉及异龙、宝秀和坝心3个乡镇,石屏县城现辖异龙镇。2017年,流域总人口为142759人,其中城

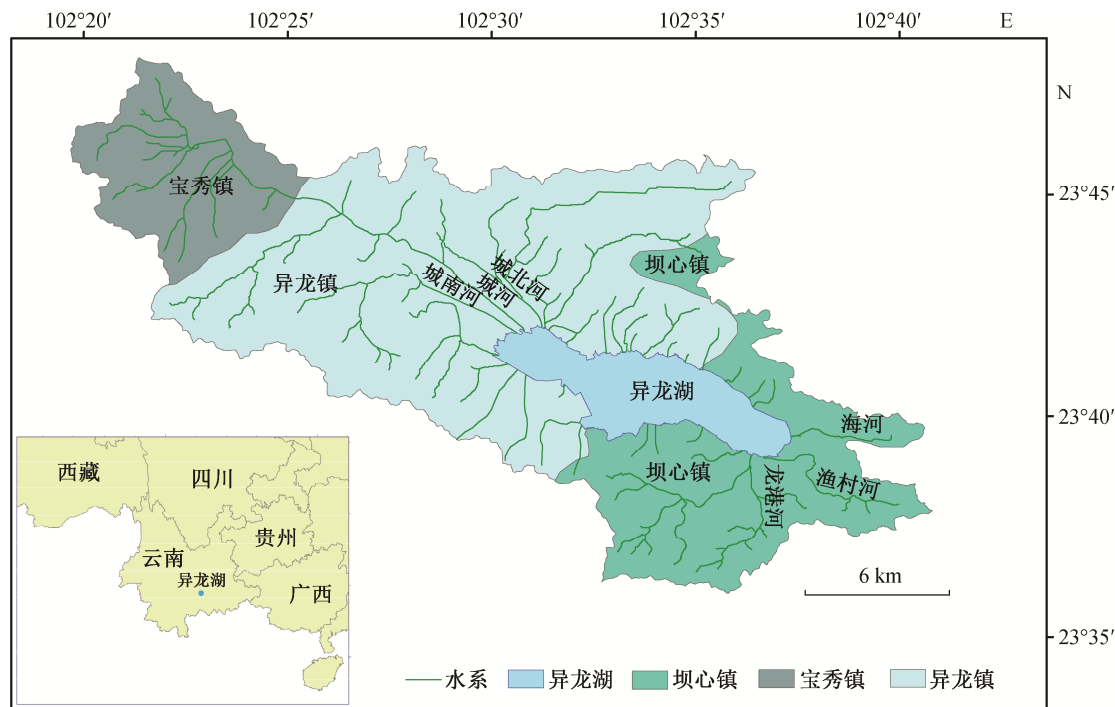


图1 异龙湖流域地理位置
Fig. 1 Location of Yilong Lake Watershed

镇人口27967人,农村人口114792人。流域生产总值(gross domestic product, GDP)约为43.7亿元,人均GDP约为3万元。异龙湖流域的工业主要是农副食品加工业,以豆制品加工业为特色。流域人均水资源量为329 m³,属于极度缺水地区。为缓解水资源紧张,流域内建设多个补水工程,输送的水资源除部分供给流域内用水外,还大量用于异龙湖的生态补水和湖水置换,以便加快改善异龙湖水质。依据《异龙湖流域保护与利用总体规划(2018—2035)》,异龙湖流域拟在“十四五”时期投资建设污水处理厂,实施尾水深度净化循环利用工程,并逐步加大城镇和园区污水处理厂的尾水回用率。

1.2 数据来源

本研究所用数据包括流域社会经济统计数据、水文水质观测数据、土地利用数据和自然地理数据等。社会经济统计数据来自红河州或石屏县的各类统计公报与规划,其中规划主要指水资源专项规划和异龙湖治理与保护利用的专项规划等。由于很多社会经济数据是石屏县的县域统计数据,因此需要视数据性质,通过土地面积比例、人口比例或经济规模比例,近似地折算为异龙湖流域的值。水文水质观测数据主要是流域范围的径流流量、水环境监测数据和水污染点源监测数据,由云南省生态环境科学研究院提供。流域土地利用数据是基于石屏县自然资源局提供的土地利用矢量数据切割得到。

异龙湖流域的数字高程数据(digital elevation model, DEM)来自中国科学院计算机网络信息中心(<http://www.gscloud.cn/>)公开发布的ASTER GDEM 30 m分辨率数字高程数据。

土壤数据来自国家地球系统科学数据平台寒区旱区科学数据中心(<http://bdc.casnw.net/>)提供的世界土壤数据库土壤数据集(v1.2)。中国区的数据源自1995年全国第2次土地调查成果中的1:1000000土壤数据。

异龙湖流域历史气象数据来自中国农业大学资源与环境学院中国气象同化数据(China Meteorological Assimilation Datasets, CMADS)工作组提供的CMADS-V1.0数据集。该数据集全称为SWAT模型中国大气同化驱动集,是一种采用数据同化技术和模型预测的气象再分析数据。本研究下载并提取异龙湖流域2008—2018年共计11年的气象数据,其中所含要素包括日平均温度、日最高气温、日最低气温、日累计24小时降水量、日平均气压、日

比湿度、日相对湿度和日平均风速等。

1.3 研究方法

构建湖泊流域SWAT和水环境-经济SDM,并进行多情景的设计以及模拟分析(图2),具体步骤如下。

1) 在对湖泊流域进行调研和数据收集的基础上,识别流域和湖泊目前存在的水污染问题,分析流域水污染特征、主要污染来源和用水特征,结合流域污染防治规划,合理地确定水污染防治方案中应包含的主要措施。

2) 构建SWAT,利用历年的流域水环境监测数据,进行参数率定和结果验证。抽选代表性水文响应单元(hydrologic response units, HRUs),通过调整施肥参数来模拟治理措施(如农田节水和生态种植)下的非点源控制效果。

3) 依据初步确定的流域水污染防治方案,确定湖泊流域SDM的边界和应包含的子系统 and 变量,并根据SWAT的非点源模拟结果,对SDM中的非点源源强表函数进行赋值。利用收集的湖泊流域社会经济数据对SDM进行检验。依据治理方案的不同措施组合,进行SDM的多情景模拟,依据模拟结果对情景的优劣进行讨论,筛选出最佳情景(图2中的优化情景)。

4) 优化情景对应的社会经济状态由SDM模拟结果给出,但SDM模拟得到的流域污染负荷没有经过空间布局优化的过程,故需要利用SWAT结果对流域关键源进行地理空间分析,将优化情景对应的治理措施在流域内进行空间布局,并在SWAT基准期模型中改动对应的土地管理参数。另外,利用SDM预测优化情景下由人口和产业规模导致的点源排放的变化,并相应改动SWAT中子流域点源输入文件,生成SWAT规划期模拟条件,得到优化情景下的流域污染负荷预测数据。

1.3.1 流域水文水质模拟

本研究采用ArcSWAT 2012软件构建异龙湖水文水质模型。在构建SWAT时,根据异龙湖流域农田施肥的实际情况设定施肥管理的参数。在建模完成后,需要对模拟结果进行统计,得到异龙湖流域不同土地利用方式的非点源负荷值年度值,该数据将作为流域水环境经济SDM的输入数据。另外,在实施各类污染治理措施的情况下,规划期非点源负荷的变化用SWAT进行模拟。

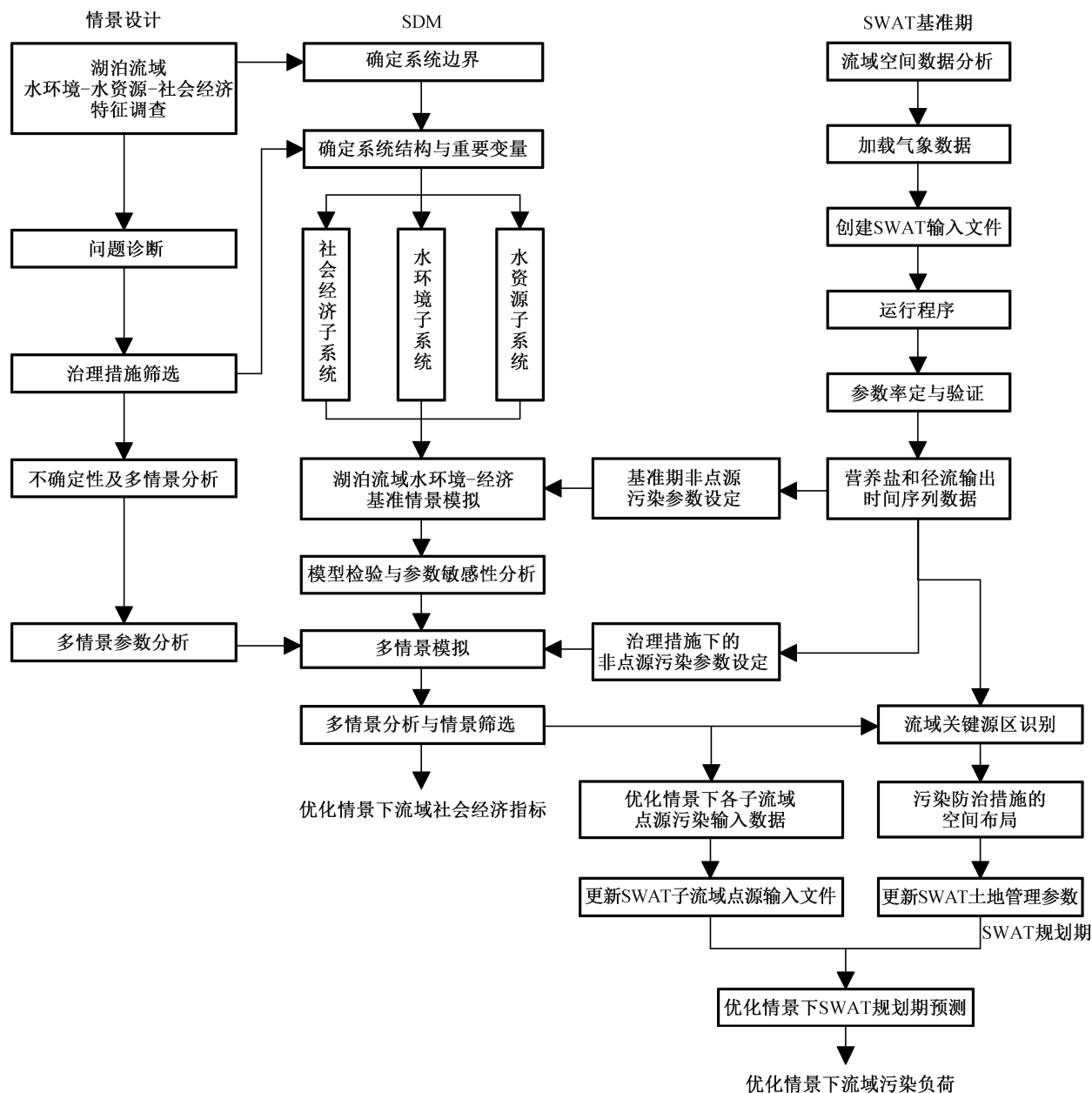


图2 湖泊流域水环境-经济系统耦合模拟方法体系

Fig. 2 Framework for coupling simulation method of environmental-economic system at lake watershed

在SDM多情景分析得到优化情景后,要依据SWAT基准期的模拟结果对流域关键源区进行识别,按照对湖泊的污染贡献或者污染物沿程的衰减情况,在流域空间内对流域污染防治措施进行优化布局,据此更新SWAT的土地管理参数,并结合点源文件的更新,对规划期优化情景下的流域污染负荷进行模拟预测。

1.3.2 流域水环境经济系统模拟

对异龙湖流域的水环境经济系统采用SDM进

行模拟。将流域水环境系统划分为社会经济、水资源和水环境3个子系统,并以水环境为核心。对3个子系统的关键过程进行识别,社会经济子系统的关键过程是人口、建设用地、经济总量和产业结构的变化,水环境子系统的关键过程是点源与非点源的水污染物产生与排放,水资源子系统的关键过程是流域水量平衡过程。异龙湖流域涉及的行业类别相对简单,产业用水特征和水污染特征趋同,经济过程按产业分析即可满足需要。水污染过程分为点

源和非点源,点源主要来自城镇生活、工业、服务业和纳入收集处理系统的农村污水。这些污水集中处理后,大部分经截污管道排向流域外,小部分进入异龙湖。非点源来自城市地面的雨水径流、农田径流、无组织排放的农村生活污水,最终进入异龙湖。水资源主要关注流域层面的用水和外流域的引水,另外,考虑到情景分析的需要,点源排水设置回用措施,其去向是农田灌溉(图3)。

1.3.3 SWAT 与 SDM 之间的耦合

本研究将 SWAT 和 SDM 进行耦合,实现单一的 SDM 或 SWAT 无法实现的水环境-经济系统模拟功能,因此耦合关系的实现是本方法的关键。本研究设计的 SDM 和 SWAT 数据交换方式主要包含 SWAT 基准期模拟为 SDM 提供非点源参数以及 SDM 优化情景模拟为规划期 SWAT 提供点源负荷预测数据(图4),具体描述如下。

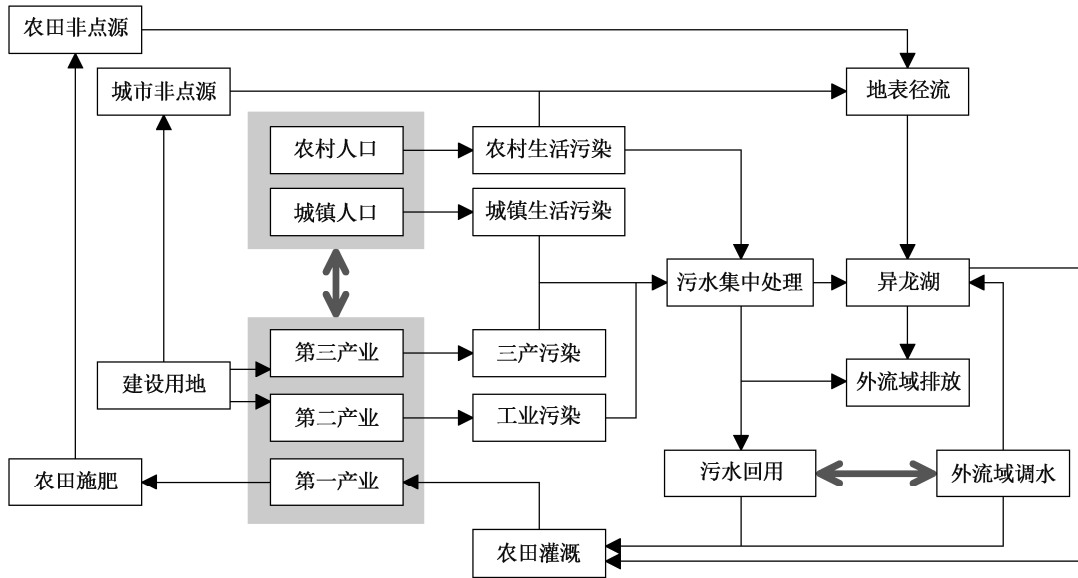


图3 异龙湖流域水环境系统作用过程示意图(在文献[21]的基础上修改)

Fig. 3 Schematic diagram of water environment system at Yilong Lake Watershed (modified from Ref. [21])

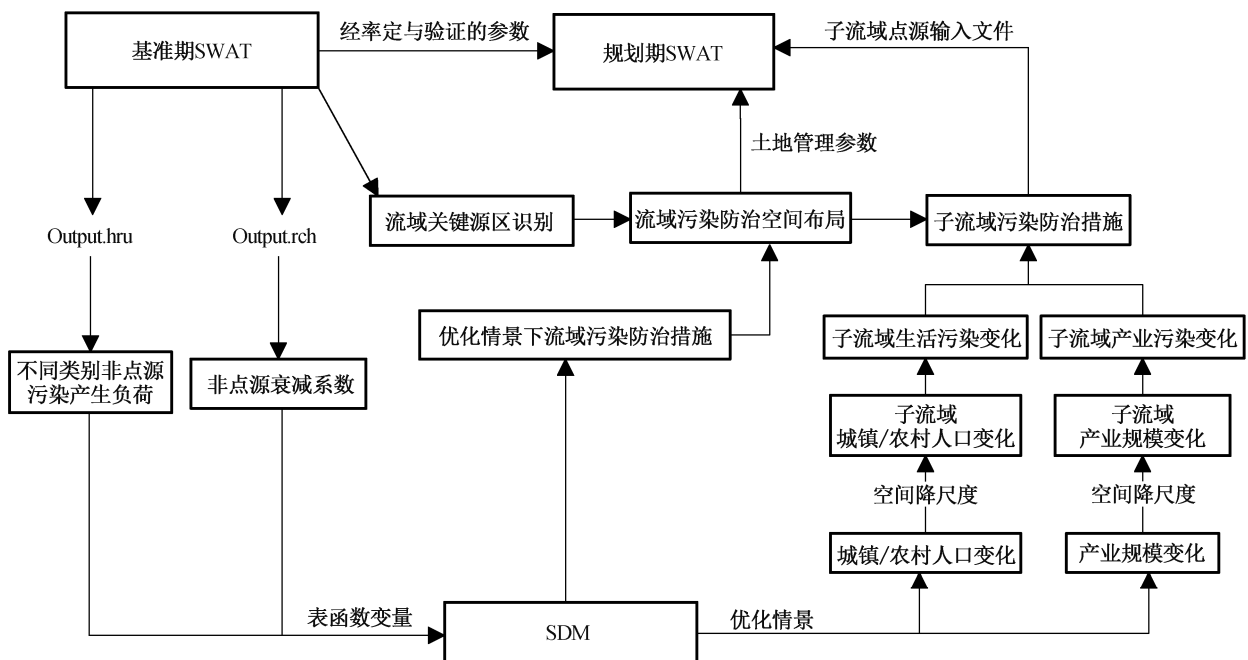


图4 SWAT 与 SDM 之间的耦合关系实现方式

Fig. 4 Implementation of the coupling relationship between SWAT and SDM

1) 基准期 SWAT 为 SDM 提供非点源负荷模拟 SDM 模型构建时, 主要需要非点源数据。由于非点源受气象因素和土地利用方式的影响太大, 不能用核算的平均数据来模拟和预测不同时间节点的源强以及对湖泊的影响。SWAT 是模拟流域水文和非点源的专用模型, SWAT 的输出结果中包含不同土地用途、土壤类型和坡度的非点源源强以及所有模拟河段的入湖污染负荷, 因而可以满足 SDM 对非点源源强的数据需求。受限于流域社会经济统计数据的时间尺度, 流域水环境经济 SDM 的时间步通常为年, 而本研究使用的 ArcSWAT 2012 可以输出日、月、年 3 种时间尺度的模拟结果, 故可提取年度结果(年内平均值), 然后按下述步骤对结果进行统计分析。

① 对于 SWAT 输出文件 output.hru, 按照不同土地利用类型统计各年度的非点源源强, 以玉米田的 TN 源强为例, 即汇总流域内所有玉米田 HRUs 各年度输出至河段的各类形式氮元素(output.hru 中 ORGN, NSURQ, NLATQ 和 NO₃GW 字段值之和)。

② 对于 SWAT 输出文件 output.rch, 统计各年度各子流域河段的 TN 输入值(output.rch 中 ORGN_IN, NO₃_IN, NH₄_N 和 NO₂_IN 字段值之和)。

③ 对于 SWAT 输出文件 output.rch 中的临湖河段, 统计各年度 TN 输出值(output.rch 中的 TOT_N 字段值)。

将统计完成的非点源源强以表函数的形式输入 SDM, 然后结合不同用地的地块面积, 就可以在 SDM 中模拟非点源污染负荷的结果。对于不同非点源治理措施(如农田节水和生态种植模式)的减污效果, 使用 SWAT 模拟后得到的比例, 在 SDM 内进行折算。

步骤②和③是为了核算流域内 HRUs 的非点源源强在入湖前的衰减系数, 计算方法如下:

$$TN_{Lak}Coef(Time) = \frac{\sum_{k=1}^K output.rch_TN_{kt}}{\sum_{n=1}^N output.rch_TN_{nt}}, \quad (1)$$

式中, TN_{Lake}Coef 代表非点源源强入湖前的衰减系数, n 为子流域代码, N 为子流域数目, 本研究中 $N=75$; k 为邻湖河段代码, K 为入湖河口数目, 本研究中 $K=19$; t 为模型时间步; output.rch_TN_{nt} 代表 output.rch 文件中第 t 时间步第 n 个子流域内河段的 TN 输入值(output.rch 中 ORGN_IN, NO₃_IN, NH₄_N

和 NO₂_IN 字段值之和); output.rch_TN_{kt} 为 output.rch 文件中第 t 时间步第 k 个入湖口的 TN 输出值(即 output.rch 中临湖河段的 TOT_N 字段值)。为了便于输入 SDM, 所有依据 SWAT 模拟结果得到的年度变量均设计成随时间变化的表函数。采用得到的源强数据和衰减系数, 非点源从产生到入湖的过程都可以在 SDM 中概化表达。

2) SDM 为规划期 SWAT 提供点源负荷数据。SWAT 模型中各子流域生活污染物排放数据由人口数量和排污系数核算而来。在构建规划期 SWAT 预评估模型时, 子流域的人口变化数据由 SDM 提供, 整个过程如下。

① 由 SDM 给出流域人口数量变化的时间序列数据。

② 由流域总人口变化估算各子流域的人口变化。各子流域内的人口分布情况由流域农村人口统计数据、流域城镇人口统计数据、低密度居住用地面积和城镇居住用地面积进行降尺度估算得到。

③ 由产污系数估算各子流域生活污水和污染物的产生量。

④ 根据时空布局优化方案中各子流域污水处理参数, 计算各子流域生活污染物排放量。

1.3.4 多情景分析

结合异龙湖流域的实际情况和相关规划, 本研究设计 4 种情景: 基准(BAU)、限制工业发展、污染控制和节水控污。BAU 情景是延续现有的社会经济发展趋势, 维持基准年(2017年)已有的各类水污染控制方案, 不再加大力度或新增措施。污染控制情景延续现有的社会经济发展趋势, 同时对农业非点源和污水点源加大治理力度。限制工业发展情景着力于控制工业水污染和水资源消耗, 在对农业非点源和污水点源加大治理力度的同时, 将工业发展限制在 2021 年的规模不再新增, 并对处理后的工业废水进行回用。节水控污情景同步关注污染控制和提高水资源利用效率, 加大节水和废水回用的力度, 减少污水的外流域排放比例。每种情景的设计参数如表 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 情景分析结果

本研究分析各情景下的人口变量、主要经济变量、主要水资源和水环境变量在预测期的变化过程(图 5 和 6), 并总结如下。

表 1 异龙湖流域预测情景参数
Table 1 Parameter assignment of scenarios at Yilong Lake Watershed

参数名称	BAU	限制工业发展	污染控制	节水控污
二产增加值期望增长率	时间序列表函数	0	时间序列表函数	时间序列表函数
农村废水回用率	0	0	0	0~0.3
城镇废水回用率	0	0	0	0~0.3
工业废水回用率	0	0~0.3	0	0~0.3
休耕比例(所有农作物)	0	0~0.15	0~0.15	0~0.15
节水种植比(所有农作物)	0	0~0.15	0~0.15	0~0.25
生态种植比(所有农作物)	0	0~0.15	0~0.15	0~0.15
城镇污水处理厂 TN 削减率	0.65	0.65~0.75	0.65~0.75	0.65~0.75
城镇污水处理厂 TP 削减率	0.7	0.7~0.8	0.7~0.8	0.7~0.8
农村污水处理站 TN 削减率	0.5	0.5~0.6	0.5~0.6	0.5~0.6
农村污水处理站 TP 削减率	0.5	0.5~0.6	0.5~0.6	0.5~0.6
工业废水处理站 TN 削减率	0.7	0.7~0.75	0.7~0.75	0.7~0.75
工业废水处理站 TP 削减率	0.7	0.7~0.8	0.7~0.8	0.7~0.8
城镇污水收集率	0.8	0.8~0.85	0.8~0.85	0.8~0.85
农村污水收集率	0.32	0.32~0.65	0.32~0.65	0.32~0.65
城镇污水外流域排放比例	0.7	0.7	0.7	0.7~0.35
工业废水外流域排放比例	0.9	0.9~0.6	0.9	0.9~0.6

1) 各情景中人口指标预测变化。

BAU、污染控制和节水控污3种情景下的流域总人口没有明显的差别,说明污染控制和节水措施不会显著地影响人口变化的趋势,但在限制工业发展情景下,人口数量明显低于其他情景(图5(a))。在BAU、污染控制和节水控污3种情景下,城镇化率缓步上升,农村人口比例和绝对数量下降,而限制工业发展情景下农村人口增加,城镇人口和城镇化率基本上不变(图5(b)~(d))。综合4个人口变量的变化情况可知,严格限制工业发展,会减少流域的人口增长速度,由于城市建设活动缺少经济支撑,增长的基本上是农村人口。之所以出现这种效应,是由于目前阶段异龙湖流域经济发展仍然主要靠工业驱动,限制工业会导致流域经济规模停滞不前,而人口的集聚效应和城镇化本质上是经济驱动的(不考虑政策驱动),经济的停滞会导致人口增长放缓和城镇化降速。

2) 各情景中经济指标预测变化。

BAU、污染控制和节水控污3种情景下的GDP(未考虑贴现)差别不大(图5(e)),说明污染控制和节水措施对经济总量的影响较小,经济总量增长的总体趋势不变。在限制工业发展情景下,流域的经济总量出现停滞状态。

由于BAU情景没有采取强有力的农业非点源治理措施,农业生产的成本基本上不变,第一产业增加值稳步增长(图5(f))。对于其他3种情景,随着非点源治理的规模不断扩大,农业生产成本不断增加,成本的增长最终超过农业产值的增长,导致农业增加值在2028年后开始下降,并在2035年降低至预测期起始水平,之后加速下滑。

由于采取冻结第二产业增加值期望增长率的措施,限制工业发展情景下,第二产业的增长停滞(图5(g)),其他情景下第二产业则在20年的预测时段内增加约5.5倍。

按照目前的经济统计惯例,外流域引水成本纳入第三产业成本中,导致4种情景下的第三产业增加值变化出现明显的差别(图5(h))。限制工业发展情景的第三产业增加值稳步增长,而其他情景下,第三产业增加值在预测期后期下滑。限制工业发展情景能保持第三产业增加值的增长,主要是因为工业发展停滞(工业水耗不增加),农业水耗降低(因节水措施),同期人口数量相对小(生活水耗相对小),导致此情景下的流域用水量显著低于其他情景,从而降低引水总成本,即第三产业成本下降。对于BAU情景,情况正好相反,没有任何节水和回用措施,引水量不断升高,导致第三产业增加值在2033

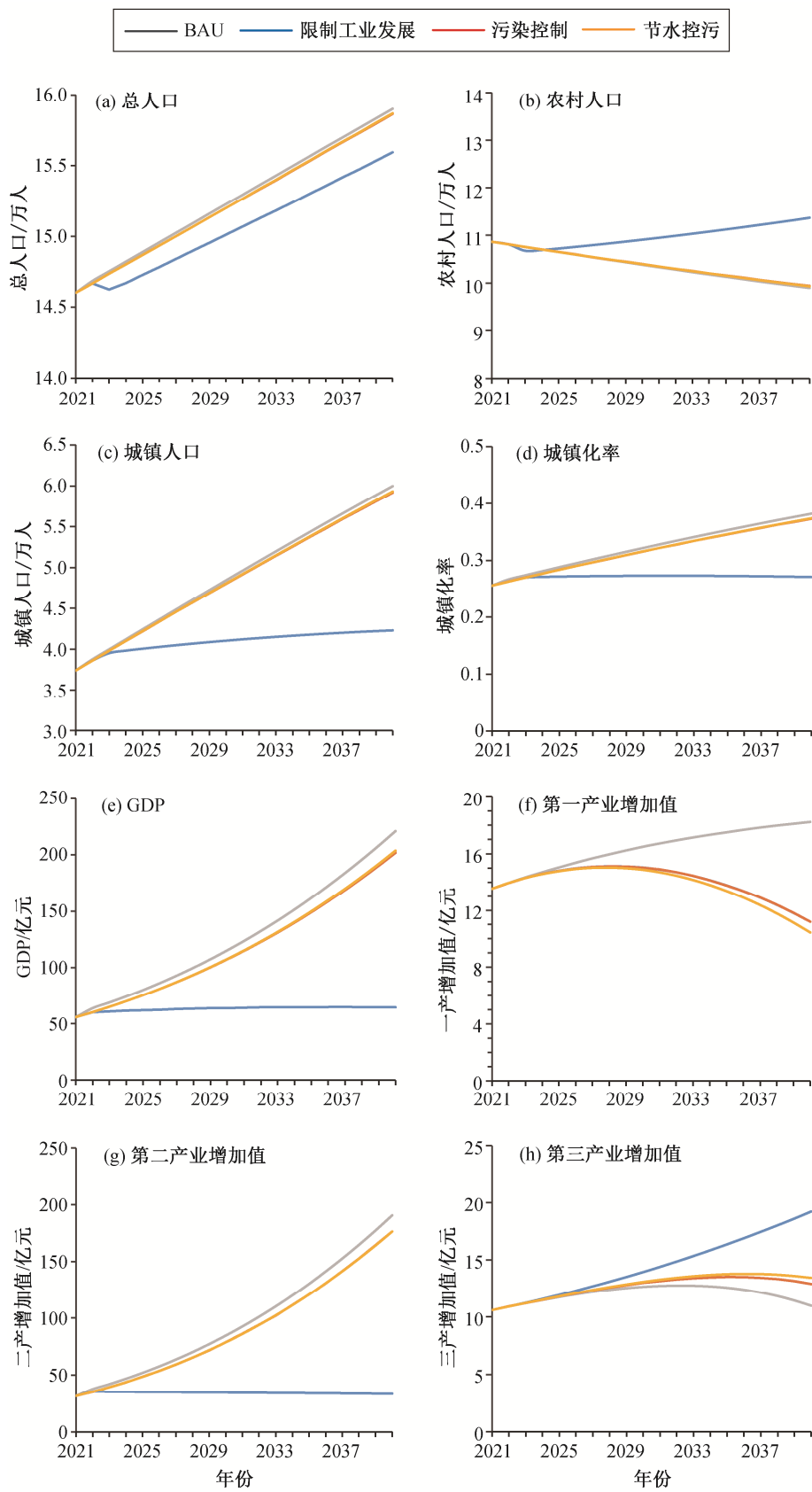


图 5 异龙湖流域各情景下的人口和经济指标

Fig. 5 Performance of demographic and economic parameters in four scenarios of Yilong Lake Watershed

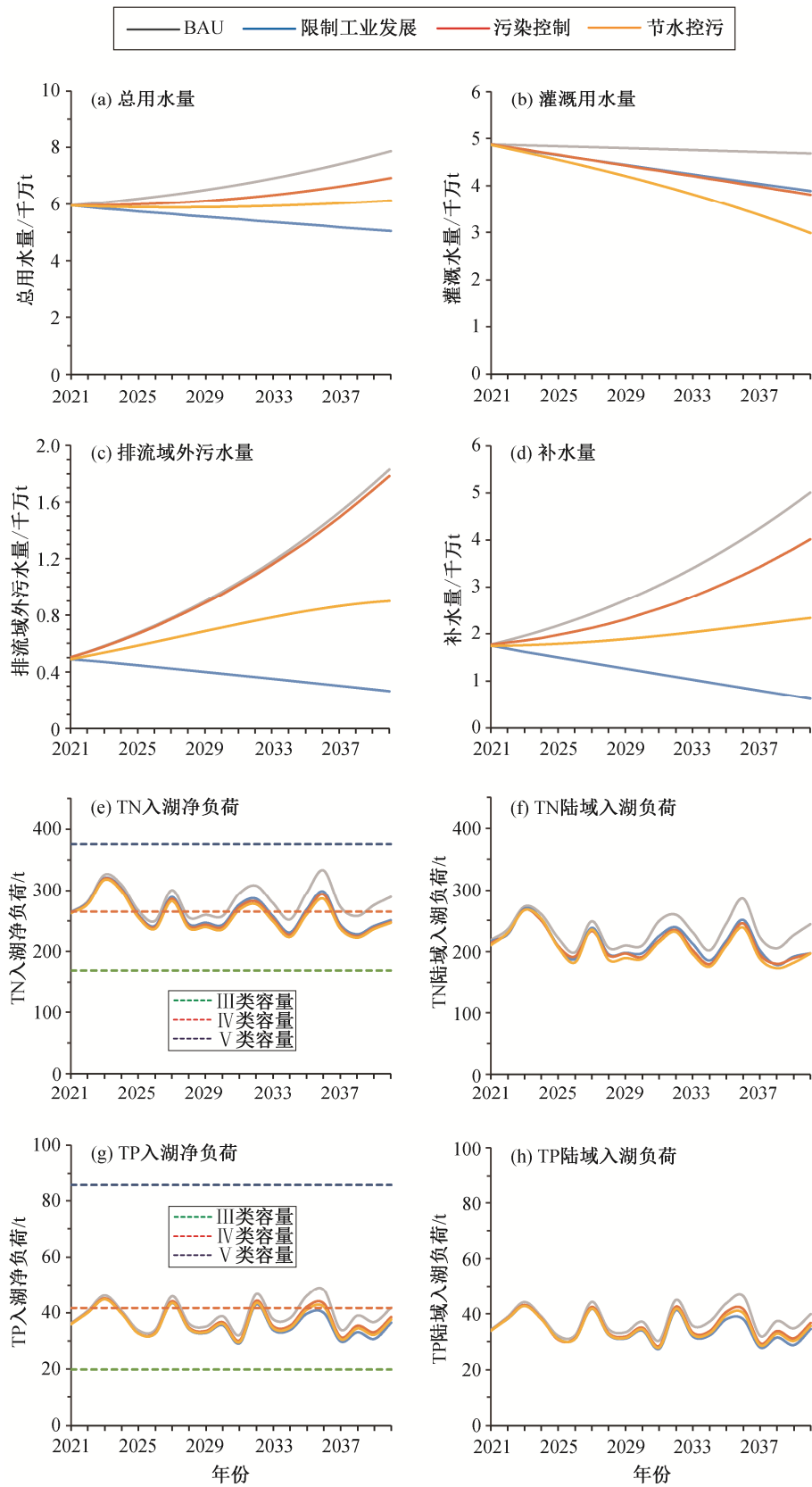


图 6 异龙湖流域各情景下的水资源和入湖污染负荷指标

Fig. 6 Performance of water resources and land-sourced pollution load parameters in four scenarios of Yilong Lake Watershed

年达到拐点,之后缓步下滑。

3) 各情景中水资源指标预测变化。

4种情景下流域的总用水量有明显的差别(图6(a)),由于工业、农业和生活水耗均较小,限制工业发展情景下的总用水量最小。节水控污情景采取废水回用措施和强力的节水措施,用水量低于污染控制情景。BAU情景的总用水量最大。

灌溉用水是异龙湖流域最大的用水类型。虽然BAU情景没有采取农业节水措施,但由于建设用地的增加,耕地被占用,使得灌溉用水随着时间的推移有微弱的降低(图6(b));其他情景因实施农业节水而使得灌溉用水量明显降低。其中,节水力度最大的节水控污情景中,灌溉用水量明显低于污染控制和限制工业发展情景。

为了保护异龙湖,当地将处理后的大部分工业废水和城镇生活污水通过截污管道向外流域转移。在限制工业发展情景下,由于工业发展停滞和城镇人口不再增长,工业废水和城镇生活污水产生量不再增加,加上流域外排放比例的降低,导致流域外排放废水逐年减少(图6(c))。在节水控污情景下,工业废水量和城镇生活污水产生量持续增加。另一方面,流域外排放比例有所降低,最终的效果是流域外排放废水量缓慢增加。BAU情景和污染控制情景中,由于没有控制污水向外流域的转移,同时工业废水量和城镇生活污水产生量持续增加,导致污水转移量迅速增加。

BAU情景下,用水量和转移废水量同步增加,因而需要从外流域大量调水才能维持流域的水量平衡(图6(d))。相对而言,由于采取农业节水措施,污染控制情景中所需补水量低于BAU情景。节水控污情景采取控制污水转移、废水回用和强力的节水措施,其所需补水量比污染控制情景大幅减少,但仍随时间增加。限制工业发展情景中,由于经济总量增长和城镇人口增长的停滞,加上同样采取节水、废水回用和控制污水转移等措施,其所需补水量最小,且随时间快速降低。

4) 各情景中入湖污染负荷预测变化。

异龙湖流域各情景下的TN和TP污染负荷年度值都在剧烈波动(图6(e)~(h)),主要是由于非点源负荷随气象驱动因素波动。TN和TP的入湖净负荷在IV类水环境容量上下波动(依据《异龙湖保护治理规划2018—2035》中提供的水环境容量模拟数据),TP入湖净负荷处于IV类水环境容量以下的频

率高于TN。TN是限制性污染因子。

BAU情景下,异龙湖入湖净TN负荷有缓慢增长的趋势,其余3种情景下则有缓慢下降的趋势,净TN负荷最小的是节水控污情景(图6(e))。所有情景均不能确保TN入湖负荷达到IV类水环境容量。从曲线的波动状态来看,随时间推移,BAU情景曲线位于IV类容量线之上的比例在加大,代表该情景下的年度负荷达到容量控制的概率越来越小;其他3类情景达到IV类容量值的概率逐渐增加。陆源入湖TN负荷的波动情况与净TN负荷几乎相同(图6(f)),说明陆源负荷的波动是TN负荷波动最重要的驱动因素。

BAU情景下,异龙湖入湖净TP负荷有缓慢增长的趋势(图6(g)),其余3种情景下有缓慢下降的趋势,净TP负荷最小的是限制工业发展情景。所有情景均不能确保TP入湖负荷达到IV类水环境容量,但限制工业发展情景自2033年起持续达到IV类TP容量要求。从曲线的波动状态来看,随时间推移,BAU情景达IV类容量的概率越来越小,其他3类情景达到IV类容量值的概率显著增加。陆源入湖TP负荷的波动情况与净TP负荷几乎相同(图6(h)),说明陆源负荷的波动也是TP负荷波动最重要的驱动因素。

对比TN与TP的曲线形状可知,两者既有相似之处,也有明显差别,且最小负荷对应的情景并不相同,说明TN与TP的污染源结构和非点源负荷的变化不完全相同。另外,就达到IV类水环境容量而言,TN的压力显著大于TP,考虑到营养盐负荷的控制具有一定程度的协同性,宜将TN指标作为规划治理措施的主要依据。

综合对比所模拟的4种情景,节水控污情景的经济社会、水资源和水环境各项指标均优于BAU和污染控制情景,但与限制工业发展情景相比则各有优势。限制工业发展情景的总用水量、输送流域外的污水量和补水量均低于节水控污情景,但其经济社会指标的表现明显落后于节水控污情景。在入湖污染负荷方面,节水控污情景与限制工业发展情景的表现差别不明显,原因在于异龙湖流域目前已将90%的工业废水输移至流域外,不进入异龙湖,在此情况下限制工业规模并不能显著地削减湖泊的污染物负荷。总体来讲,节水控污情景的表现更好,可将其作为优化情景,在此基础上进行治理措施的时空布局优化,并预测优化方案的陆源污染负荷。

2.2 治理措施优化布局结果

本研究对流域非点源治理的时空布局优化是基于SWAT的预测结果计算子流域和水文响应单元对湖泊污染的贡献强度,并据此确定治理的优先级,再用节水控污情景的治理措施规模时间序列确定选址的时空方案(下面称优化方案)。其中,对农村生活污水收集治理是在子流域层次进行时空布局的优化,对农业非点源治理是在HRUs层次进行时空布局的优化。

按照所获取的优化方案,异龙湖流域应在规划期逐步对1200 hm²农田实施节水改造,对4200 hm²农田实施生态农业,对330 hm²农田实施休耕,并逐步提高农村污水的收集处理率至65%;逐步增加废水回收利用量,规划期回用于农田灌溉的废水量年均值不低于290万t;对流域内约300 hm²裸地进行水土流失治理。

根据预评估结果,比较优化方案与BAU情景在规划期末的预测值。与BAU情景相比,优化方案的GDP降低7%,城镇化率降低2%,流域外调水量减少45%,陆源TN和TP入湖负荷分别降低26.6%和18.5%,湖泊容纳的TN和TP净污染负荷分别降低20.7%和17.5%,可以有效地降低流域污染防治(尤其是非点源污染防治)的决策风险。优化方案的实施会改变流域的经济结构,农业生产成本会显著上升,并使第一产业增加值在规划期内由增长变为下降。

3 结论

当前湖泊流域水环境治理优化方法中较少考虑水资源节约与水污染防治的协同性,也很少分析水污染防治行为与流域整体社会经济状态之间的反馈效应。本研究构建湖泊流域水环境-经济系统耦合模拟与优化方法体系,在上述两方面对现有方法有所改进,并以异龙湖流域作为案例开展方法应用,检验实际效果,主要结论如下。

1) 异龙湖目前的污染负荷主要来自农村生活污水和农业非点源。产生这种情况的重要原因是流域近年来采取的污水转移措施,使约70%的点源污染物不再进入异龙湖,导致非点源的重要性相对上升。污水转移措施虽然减少了异龙湖的污染负荷,降低了污染风险,但也加剧了流域水资源的短缺。

2) 在经济社会可承受的范围内,通过流域水污染控制,到规划期末,可将异龙湖的入湖TN和TP

负荷削减到IV类水环境容量水平,为异龙湖稳定达到IV类水质创造良好条件。本研究未发现满足III类水环境容量要求的可行方案。

3) 实施工业搬迁或严格的工业规模限制对流域经济总量的增长和城镇化极为不利,对异龙湖水环境保护的作用并不显著。规划期水污染治理重点应该是转变种植业高水高肥的模式,治理农村生活污水和构建污水回收利用体系,以便同步实现流域水资源节约与水污染治理双目标。

4) 优化方案可在基本上维持流域目前经济增长趋势的情况下,使异龙湖在规划期末的水质达到IV类,调水规模不超过3000万t/a。与BAU情景规划期末的预测值相比,优化方案的GDP降低7%,流域外调水量减少45%,陆源TN和TP入湖负荷分别降低26.6%和18.5%,湖泊容纳的TN和TP净污染负荷分别降低20.7%和17.5%。优化方案的实施会改变流域的经济结构,农业生产成本会显著上升,并使第一产业增加值在规划期内由增长变为下降。同时,由于节水降低用水成本,有利于第三产业增加值保持增长趋势。总的来说,优化方案用较小的社会经济代价取得良好的资源环境效益,提升流域的可持续发展水平,达到预期目标。

参考文献

- [1] 赖锡军. 流域水环境过程综合模拟研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1123-1135
- [2] 李兆富, 刘红玉, 李燕. HSPF水文水质模型应用研究综述. 环境科学, 2012, 33(7): 2217-2223
- [3] 温切尔, 斯里尼瓦桑, 卢齐奥, 等. ArcSWAT 2009 用户指南. 邹松兵, 等, 译. 郑州: 黄河水利出版社, 2012
- [4] 尼奇, 阿诺德, 基尼瑞, 等. SWAT 2009理论基础. 龙爱华, 等, 译. 郑州: 黄河水利出版社, 2012
- [5] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: model use, calibration, and validation. Trans ASABE, 2012, 55: 1491-1508
- [6] Tobio J A S, Maniquiz-Redillas M C, Kim L H. Optimization of the design of an urban runoff treatment system using stormwater management model (SWMM). Desalination and Water Treatment, 2015, 53(11): 3134-3141
- [7] Yuan L, Tadesse S, Kenneth J F. Review of watershed-scale water quality and nonpoint source pollution models. Geosciences, 2020, 10(1): 1-36

- [8] Danish Hydraulic Institute. MIKE 21 & MIKE 3 hydrodynamic and transport scientific documentation [EB/OL]. (2017) [2021-02-20]. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2020/Coast_and_Sea/MIKE_FM_ELOS_2D.pdf
- [9] 王佳邓, 孙启宏, 李小敏, 武琛昊. 环境保护税对经济和碳排放影响研究——以江苏省为例. *生态经济*, 2021, 37(5): 51-56
- [10] Wu X, Deng H, Li H, et al. Impact of energy structure adjustment and environmental regulation on air pollution in China: simulation and measurement research by the dynamic general equilibrium model. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 172(1): 121010
- [11] 余锦如, 王远, 余凡, 等. 基于“水-能-碳”消费视角的福建省资源环境与经济增长脱钩关系. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3845-3855
- [12] Avelino A F T, Lamers P, Zhang Y, et al. Creating a harmonized time series of environmentally-extended input-output tables to assess the evolution of the US bioeconomy — a retrospective analysis of corn ethanol and soybean biodiesel. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128890
- [13] 王其藩. *系统动力学*. 上海: 上海财经大学出版社, 2009
- [14] 高伟, 刘永, 和树庄. 基于SD模型的流域分质水资源承载力预警研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 673-679
- [15] Zhong Yiming, Jia Jin, Wang Weijun, et al. Water environment safety degree assessment based on system dynamics approach // 2012 International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management. Lanzhou, 2012: 13117017
- [16] Liu H, Benoit G, Liu T, et al. An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 2015, 155: 11-23
- [17] 倪建军. *复杂系统多Agent建模与控制的理论及应用*. 北京: 电子工业出版社, 2011
- [18] Wilensky U, Rand W. *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. London: MIT Press, 2015
- [19] Macal C M. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 2016, 10(2): 144-156
- [20] Prodanovic P, Simonovic S P. An operational model for support of integrated watershed management. *Water Resources Management*, 2010, 24(6): 1161-1194
- [21] 刘慧. 滇池流域水环境经济系统综合模拟及应用研究[D]. 北京: 北京大学, 2011