

基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例^{*}

李恒鹏¹, 陈伟民¹, 杨桂山¹, 聂小飞^{1,2}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 湖库水环境保护在保障生产与生活用水、维系生态平衡、发展旅游等方面发挥着重要的作用. 水质目标管理是保护湖库水质的最佳管理办法. 本文以天目湖地区沙河水库及其流域为研究区域, 建立模型模拟沙河水库流域的水文与水质, 评估入库污染通量和主要来源; 依据水质目标测算氮、磷污染的容量和减排量, 结合土地的生态保护与开发适宜性评估, 提出氮、磷污染分区减排和土地管控的对策和措施. 研究结果表明, 沙河水库氮、磷污染物入库通量分别为 206.01 和 3.29 t/a, 面源总氮和总磷分别占总入库量的 85.7% 和 67.5%. 不同土地利用类型氮、磷输出强度有显著差异, 总氮输出强度依次为茶园 > 耕地 > 建筑用地 > 裸地 > 草地 > 退耕地 > 林地 > 河湖漫滩, 总磷输出强度与地表覆盖度有关, 依次为裸地 > 建筑用地 > 茶园 > 耕地 > 草地 > 退耕地 > 林地和河湖漫滩. 从氮、磷输移过程来看, 沙河水库流域总氮排放量为 321.64 t/a, 进入河流的为 255.53 t/a, 在河道输送过程中损失 19.4%, 最终有 206.01 t/a 进入水库; 沙河水库流域总磷排放量为 13.42 t/a, 进入河流的为 7.90 t/a, 在河道输送过程中损失 58.3%, 最终有 3.29 t/a 进入水库. 不同分区河流氮、磷滞留降解率有很大的差异, 中田河总氮、总磷滞留降解能力最强, 分别为 34.71% 和 84.31%. 2009 年的通量计算结果显示, 沙河水库总氮达到Ⅳ类水质目标需要的入湖减少量为 32.01 t/a, 入湖削减比例为 15.50%, 总氮达到Ⅲ类水质目标需要的入湖减少量为 59.66 t/a, 入湖削减比例为 29.00%; 总磷达到Ⅲ类水需要的入湖减少量为 0.682 t/a, 入湖削减比例为 20.70%, 总磷达到Ⅱ类水需要的入湖减少量为 1.479 t/a, 入湖削减比例为 44.90%. 为了实现基于土地利用的面源污染减排管控, 选定植被覆盖度、水源涵养能力、地形坡度、土地利用、氮磷分区贡献量、与道路和村落距离等指标综合评估生态保护价值和开发适宜性, 并划定禁止开发区、限制开发区和保护性开发区 3 个管理分区, 最终确定各分区的开发强度限制和管控方式.

关键词: 水质目标管理; 面源污染; 源解析; 沙河水库; 丘陵地区; 流域分区; 天目湖

Reduction of nitrogen and phosphorus emission and zoning management targeting at water quality of lake or reservoir systems: A case study of Shahe Reservoir within Tianmu Reservoir area

LI Hengpeng¹, CHEN Weimin¹, YANG Guishan¹ & NIE Xiaofei^{1,2}

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: Protecting the lake-reservoir water environment plays an important role in the water use for production and lives, maintenance of ecological equilibrium, development of tourism industry. Water quality target management is an effective way to protect the lake-reservoir water. This paper took Shahe Reservoir and its catchment within the Tianmu Reservoir area as the study area. By developing a catchment-scale hydrological and water quality model, hydrological flux and water quality in the Shahe Reservoir

^{*} 国家自然科学基金项目(41030745, 41271500)、中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点布局项目(NIGLAS2012135005)、中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-10-04)、江苏省自然科学基金项目(SBK200920953)和溧阳市沙河水库管理处科研项目联合资助. 2013-04-09 收稿; 2013-06-17 收修改稿. 李恒鹏, 男, 1973 年生, 博士, 研究员; E-mail: hpli@niglas.ac.cn.

catchment were simulated, and N and P fluxes into the Tianmuhu Reservoir and their main sources were evaluated. Based on water quality target of the Tianmuhu Reservoir, environmental capacity for N and P pollutions and the amounts required for reduction were calculated. Integrating with the ecological protection goal and suitability assessment of land for development, strategies on zoning reduction of N and P pollutions and land regulation have been explored. The results show that the amounts of N and P flowing into the Shahe Reservoir are 206.01 and 3.29 t/a, respectively, with 85.7% and 67.5% from diffuse sources. The difference in output intensity of N and P is significant between various land use types. Land use with the largest output intensity of total nitrogen is tea garden, and then followed in turn by farmland, built-up land, bare land, grassland, abandoned farmland, forests, and wetland. Output intensity of TP is closely related with the land surface coverage, from which bare land is the largest. The rest are built-up land, tea garden, farmland, grassland, abandoned farmland, forests and wetland in turn. From the perspective of N and P transportation processes, the output of TN from the whole catchment is 321.64 t/a, and input amount into the rivers is 255.53 t/a, with 19.4% loss in river channels. Ultimately 206.01 t/a of TN flowed into the Shahe Reservoir. As for TP, the total amount from the catchment is 13.42 t/a. There is 7.90 t/a entering into the rivers, with approximately 58.3% loss in the river channel, and finally 3.29 t/a flowing into the reservoir. The river retention rates of N and P vary between zones, with 34.71% for total nitrogen and 84.31% for total phosphorus, respectively. Based on the results of 2009 on calculated fluxes, the input TN should reduce 32.01 t/a (or decrease 15.50%) and 59.66 t/a (or decrease 29.00%) to meet the criterion of IV and III water quality, respectively. For TP, the input should reduce 0.682 t/a (or decrease 20.70%) and 1.479 t/a (or decrease 44.90%) to meet the criterion of type III and II water quality, respectively. To reduce the diffuse pollution via regulating land use, indexes such as plant coverage, water resource preservation, land slope, land use, N/P contribution from each zone and the distance from the road and villages, should be used to assess the ecological preservation value and exploit applicability, which can help to define the exploit levels, that is forbidden area, restricted area and preserved area.

Keywords: Water quality target measurement; diffuse pollution; source detection; Shahe Reservoir; hilly land; watershed division; Tianmuhu Reservoir

湖库是淡水资源的重要储存器和调节器,在保障生产与生活用水、减轻洪涝灾害、提供水产品、维系生态平衡、发展旅游等方面发挥着非常重要的作用^[1].流域是湖泊之源,湖泊与流域两者之间通过水循环过程与物质输移过程形成密切联系、互为反馈的动态变化系统^[2-3].自1980s以来,随着中国经济的快速发展,流域生产与生活排放的大量氮、磷等营养盐进入湖泊,致使湖库富营养化问题非常突出.据2007—2010年对东部平原湖区、东北平原与山地湖区和云贵高原湖区138个面积大于10 km²的湖泊水质调查结果,85.4%的湖泊超过了富营养化标准,其中达到重富营养化标准的占40.1%^[1].据《2011年中国水资源公报》显示,全国参与评价的455座主要水库中,已无处于贫营养水平的水库,处于中营养水平的水库占71.2%,处于富营养水平的占28.8%.湖库富营养化引发藻类水华暴发,对供水安全造成严重威胁,如:太湖、巢湖、滇池等藻类水华暴发事件已经造成严重的供水危机^[4];千岛湖、天目湖、老石坎水库等东部丘陵山区的水库近年来藻类异常增殖的趋势非常明显^[5-6],导致饮用水受到污染的风险明显增加.

欧美国家水环境治理长期实践的成功经验表明,水质改善的关键是将污染物排放量控制在河湖水体功能发挥所允许的范围之内,即“水质目标管理”.目前,多数发达国家均以“水质目标管理”作为水环境管理的基本政策,如美国的《清洁水法》与最大日负荷量管理(TMDL)是按照水体功能确定环境容量,并依据环境容量控制流域污染负荷量^[7-9];欧洲的《欧盟水框架指令》是以水生态目标和与其关联的流域污染联合控制为核心^[10-11].湖库水质目标管理的主要任务是核定环境容量、评估污染物入湖通量、确定流域污染物排放量并提出合理的管控措施.我国在湖库型流域水污染控制方面缺乏流域尺度的系统科学研究,水质目标管理的技术基础不足,多年来一直停留在设定排放目标的总量控制水平上,普遍存在流域污染控制总量与湖库水质改善目标脱节、区域限排量与湖库水环境容量不衔接、流域与湖泊污染控制指标不统一等问题,这是我国湖库水质恶化趋势一直未能扭转的重要原因之一.近年来,我国水环境有关的研究机构、学者和管理部门均非常关注水质目标管理的理论与技术发展,中国环境科学研究院结合相关领域的研究总结了水质基准的理论与方法^[12];2010年11月,国家标准《水功能区划分标准》(GB/T 50594—2010)正式颁布实施;孟伟等^[13]从水环境监控、水质基准、总量控制、污染物削减和环境经济政策5个方面总结了国外水质目标管理的技术;SWAT、HSPF、SWMM等国外水质管理常用模型近年来在国内也得到了广泛应用^[14-18].国家水环境“十

二五”(2010—2015年)规划中明确提出更加关注质量改善、贯彻总量约束和质量引导并重的原则,将水质改善目标与总量控制目标对应起来。但从湖库水环境管理的实践来看,至今体现湖库水质目标管理的实践案例还少见报道,如何建立适合我国流域基础地理信息和水环境管理模式的湖库水质目标管理技术还需要深入的探索和研究。

天目湖是溧阳市的重要水源地,2010年溧阳市政府落实国家“十二五”水环境治理战略,提出将天目湖水源地水质安全保护提升到全流域范围,依据天目湖未来的水质改善目标,确定天目湖流域的污染控制方案,制定天目湖流域的生态与环境保护规划。本文在开展天目湖水质目标管理规划研究和实践的基础上,以天目湖沙河水库及其流域为研究对象,重点围绕天目湖沙河水库水质目标管理中污染物“析源控管”的关键技术方法,从流域氮、磷污染通量模拟,污染物来源解析,减排分配和流域分区管理4个方面介绍湖库水质目标管理的决策方法,将湖库水质目标与流域土地利用管控衔接起来,非常适合东南丘陵地区湖库水质目标管理,在该区具有推广和借鉴价值。

1 研究区概况

本研究以天目湖沙河水库及其流域为研究区域。沙河水库是国家级大型水库,水库水域面积 9 km^2 ,流域面积 146 km^2 ,水库总库容为 $1.08 \times 10^8\text{ m}^3$,入库河流包括平桥河、下宋河与中田河,流域面积分别为 47.0 、 11.9 和 48.5 km^2 ,临湖地区面积为 23.2 km^2 。该区气候属于亚热带季风型气候,全年平均温度 17.5°C ,年均降水量 1149.7 mm ,主要集中在5—9月。地形以丘陵山区为主,高程为 $10 \sim 541\text{ m}$ 。据2009年流域航片植被类型解译数据,流域林地以混交林、竹林、针叶林和板栗林为主,共占 45.3% ,一般分布于山丘上;茶果园为丘陵山区主要开发类型,在沙河水库流域分布比例达到 9.4% ,山间谷地开发类型主要为耕地,约占 23.7% 。地带性土壤为黄棕壤,山间谷地、山间平原发育有渗育型水稻土。2008—2011年沙河水库水质监测结果显示,水库溶解氧和氨氮为Ⅰ~Ⅱ类水,化学需氧量(COD)全年 83% 以上为Ⅱ类水,总氮污染非常严重,为Ⅳ~Ⅴ类,其次为总磷,为Ⅱ~Ⅲ类。流域地理特征如图1所示。

2 研究方法与数据来源

2.1 水库水质目标管理的技术流程

“水质目标管理”的核心是实现“污染物科学减排”,分析和决策的步骤包括确定水质目标、测算水质目标环境容量、模拟评估污染物通量、解析污染物的来源、核定污染负荷减排量以及依据污染物来源提出污染减排的最终方案。沙河水库氨氮和COD一般能够达到Ⅱ类水源地保护目标,主要问题是总氮和总磷。确定总氮和总磷的水质目标主要依据水源地水质标准和可行性,总氮控制的近期目标设定为2015年稳定在Ⅳ类,远期2020年控制到Ⅲ类;总磷目标设定为2015年稳定在Ⅲ类,远期2020年控制到Ⅱ类。水质目标管理决策分析的技术流程如图2所示。

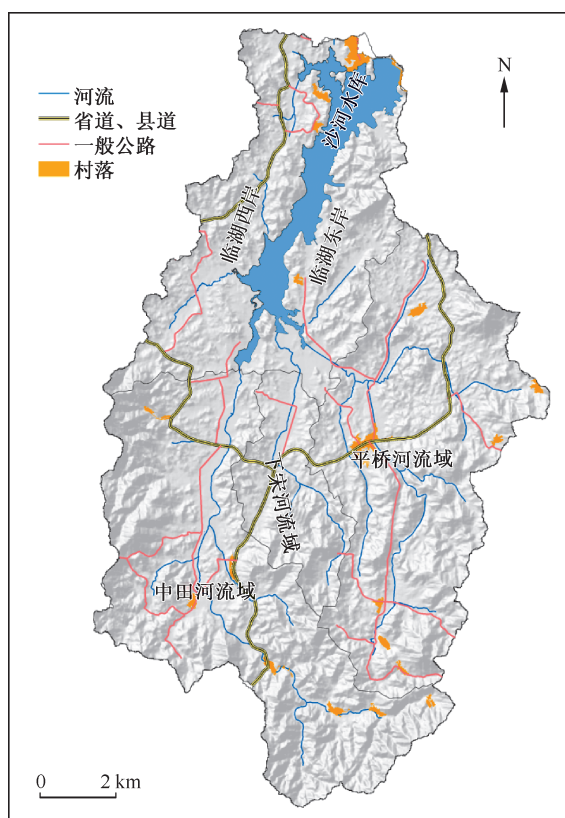


图1 沙河水库流域水系及流域结构

Fig. 1 The drainage and rivers in Shahe Reservoir watershed

① 确定水质改善的目标,布设断面开展水库及入库河流水质现状调查,收集沙河水库流域的土壤、土地利用、水文和气象等地理信息,收集国家和地方水源地保护的制度和法规文件,在以上数据资料的基础上了解沙河水库及流域的自然条件、开发方式、水质现状以及管理状况.

② 依据入库污染通量、污染来源解析的需求,建立沙河水库流域水文与水质模型、生态限制与开发适宜性评价模型,识别在水环境保护方面具有重要功能的区域,为流域污染减排量的差别化分配和管理提供依据.

③ 基于水库水质改善的目标,应用水文与水质模型,计算水库水质目标环境容量,模拟入库污染物通量,分析入库污染物的主要来源,划定流域的开发与保护分区.

④ 在污染通量和容量计算的基础上,确定污染物的减排总量,依据污染物来源的分布和效率为主的原则进行污染物减排的分区分配.

⑤ 根据开发与保护分区特点以及各分区需要削减的污染物排放量,确定不同分区的土地开发规模和限制方式.

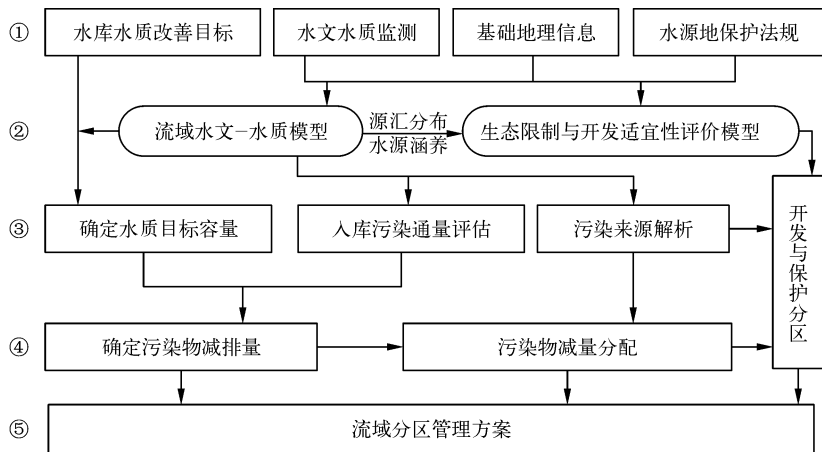


图2 沙河水库水质目标管理分析与决策流程

Fig. 2 The flow chart of water quality target management analysis and strategic decision in Shahe Reservoir watershed

2.2 污染通量模拟与来源解析模型

污染物通量模拟与来源解析是水质目标管理的关键技术,主要通过流域分布式水文水质模型来实现,应用于测算环境容量、评估入库通量和解析污染物来源等关键分析过程. 分布式水文水质模型包括基于格网的模拟和基于细分子流域的模拟. 格网模型在污染源解析方面能够很好地区分不同土地利用类型的污染排放量,但因格网剖分过细,流域内自源头、中游到河口等不同河段降解过程难以综合体现,而小流域剖分的模型对解析流域不同部位氮、磷输移降解及对入库的贡献份额方面更有优势. 本研究提出采用格网模型和子流域模型相结合的方法,既能够满足不同地块污染排放量解析,又能满足氮、磷在河流输送过程通量变化的解析,为提高污染通量模拟和污染解析的精度,要布置大量的子流域监测断面. 断面布置与模型方案具体如图3所示.

图3a是建立的基于格网的流域水文模型,水文计算采用 RHINEFLOW 模型的算法,该模型以蓄满产流为概念结构计算径流过程,适合应用于我国东南湿润区. 流域不同土地利用类型营养盐输出参数采用典型流域出口实测研究结果,SEMC 为暴雨期参数,BEMC 为枯水期参数. 模型结构为:

$$R_{(x,y,t)} = P_{(x,y,t)} + AE_{(x,y,t)} + dS_{(x,y,t)} \tag{1}$$

$$S_{(x,y,t)} = SS_{(x,y,t)} + GWS_{(x,y,t)} \tag{2}$$

$$R_{(x,y,t)} = R_{s(x,y,t)} + R_{b(x,y,t)} \tag{3}$$

$$L_{TN(x,y,t)} = A \cdot R_{s(x,y,t)} SEMC_{TN} + B \cdot R_{b(x,y,t)} BEMC_{TN} \quad (4)$$

$$L_{TP(x,y,t)} = A \cdot R_{s(x,y,t)} SEMC_{TP} + B \cdot R_{b(x,y,t)} BEMC_{TP} \quad (5)$$

式中, (x, y) 代表格网的位置, R 为径流, R_s 为地表径流, R_b 为基流, P 为降水, AE 为实际蒸发量, S 为储水量, dS 为储水量的变化, SS 为土壤含水量和浅层地下水含水量, GWS 为深层地下水含水量, $SEMC$ 为某一土地利用类型暴雨事件平均浓度, $BEMC$ 为某一土地利用类型基流的平均浓度, L_{TN} 、 L_{TP} 为某一土地利用类型总氮、总磷输出, A 、 B 为单位转换系数。

图 3b 是以河流断面剖分的子流域组成结构, 各子流域出口断面均由实测值计算出通量, 然后应用模型 (图 3a) 计算子流域不同土地利用类型污染物输出量, 同时考虑该子流域人口形成的污染负荷量, 比较子流域模型计算结果和通量实测结果, 按照公式 (6), 应用非线性拟合方法进行优化, 可以得到 3 个方面的重要参数和结果: 其一按照子流域出口断面实测值对不同土地利用类型氮、磷排放参数进行了优化, 解析出不同土地利用类型的贡献; 其二是能够计算出子流域内汇流过程的降解量和河道输送的降解量, 识别流域不同部位对入库的贡献; 其三是通过大量的子流域出口实测断面约束, 保障排放系数和降解系数的合理性。

$$Load_i = \sum_{j=1}^n (1 - R_{ij}) \cdot Load_j + (1 - R_1) \cdot U_i + (1 - R_2) \cdot P_i + (1 - R_3) \cdot D_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中, $Load_i$ 为流域出口负荷, $Load_j$ 为上游最近的流域污染负荷量, R_{ij} 为上游流域经过本子流域的降解率, n 为距离该流域最近上游子流域数量, U_i 为面源污染排放量, P 为人口生活污染排放量, D 为大气沉降排放量, R_1 、 R_2 、 R_3 分别为子流域内土地利用、人口排放和大气沉降的污染物汇集降解系数, ε_i 为拟合的误差项。

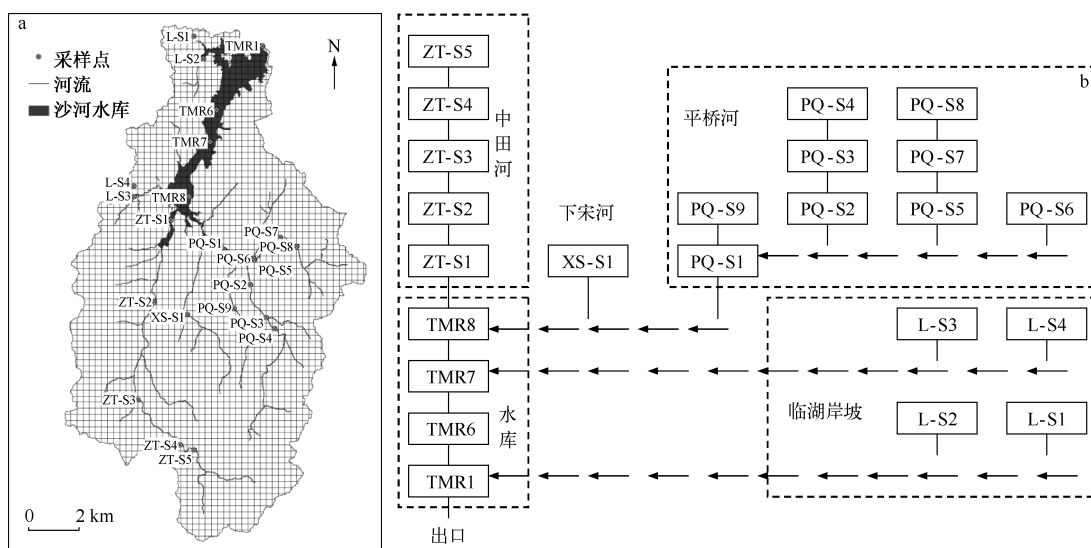


图 3 沙河水库流域水文(a)与水质(b)模型

Fig. 3 Hydrology (a) and water quality (b) models of Shahe Reservoir watershed

2.3 入湖污染源解析类型划分

污染物解析需要借助于前面建立的水文水质模型, 从 4 个方面对污染源进行分类解析, 试图回答减什么、在哪里减, 同时明确流域哪些部位对氮、磷拦截发挥着重要作用, 以便在分区管理中提出保护措施。具体解析类别如下:

1) 点、面源污染组成结构解析: 首先将污染源划分为点源和面源两类, 由于沙河水库流域内工业企业均已搬迁, 水库周边的餐馆酒店均通过污水管网输往水库下游天目湖镇污水处理厂进行处理, 不会影响水库水质, 因此本研究点源主要为流域内村落和居民点的生活污水排放, 面源为不同土地利用类型的污染

物输出.

2) 不同土地利用类型面源污染排放解析:用于污染源解析的土地利用类型包括林地、茶园、耕地、草地、退耕地、河湖漫滩、建筑用地、裸地,共8类.

3) 污染物排放和输移过程解析:为了自水库环境容量向上游追溯流域的可排放量、减排量,需要了解污染物从排放到入河直至入库的完整过程及不同环节的降解系数.

4) 不同分区污染物来源解析:在以上分析基础上按照子分区进行污染物的解析,分区主要依据流域组成结构,分为临湖地区和各支流流域.

2.4 流域污染减排总量确定与分区分配

计算污染物减排量首先需要计算水库水环境容量,公式(7)是水库物质平衡的计算公式,可用于获取水库目标水质的环境容量:

$$V \frac{dc}{dt} = \sum_{i=1}^m R_{in_i} C_r + A - \sum_{j=1}^n R_{out_j} C_{Oj} - k \cdot V \cdot C \quad (7)$$

式中, A 为大气沉降量, R_{in_i} 为第 i 条入库河流流量, C_r 为入库径流污染物浓度 (mg/L), R_{out_j} 为第 j 条出库河流流量, C_{Oj} 为出库河流水质, k 为水库污染物降解系数, V 为水库容积, C 为水库平均浓度.

当水库为稳态系统时, $\frac{dc}{dt} = 0$, 出库水质达到特定水质标准 C_s 时, 则入库污染量可以表示为:

$$\sum_{i=1}^m R_{in_i} C_r = \sum_{j=1}^n R_{out_j} C_{s_j} + k \cdot V \cdot C_s - A \quad (8)$$

如果以年为时间单位计算水库水环境容量, 可以认为水量是平衡的, 即一年总入流量等于总出流量, 特定水质目标下流域可排入最多的污染量, 即水库在该水质目标下的水环境容量 W , 可以表示为:

$$W = \sum_{i=1}^m R_{in_i} C_s + k \cdot V \cdot C_s - A \quad (9)$$

该研究中 A 为采用天目湖地区实测的大气沉降量, 因缺乏水库不同浓度下降解量的系统研究, 本次计算采用沙河水库氮、磷现状年降解量来代替.

流域污染减排总量通过入湖通量与水环境容量 W 相减求得, 污染物减排量分配以生态保护优先、兼顾效率的原则, 优先控制临湖地区、河口和上游水源涵养区的污染, 恢复自然自净功能, 在各子流域按照入库水量比例分配的原则.

2.5 流域管理分区与土地开发限制量确定

水库水源地的污染物主要来源于面源污染, 其控制需要通过土地利用的管控来实现, 因此减排量的实现需要配套的土地管理方案. 土地管理的关键是对重要污染源区进行减排, 对保障优质水量和污染自净能力的重要地段进行保护, 在开发条件优越且保护价值相对较小的地段进行优先开发, 最终确定各分区可开发的规模和方式. 为实现这一目标, 选择与流域水量、水质保护密切的关键指标, 分别从生态保护价值和开发适宜性两个方面进行评价, 采用保护价值评价与开发适宜性评价归一化比值来衡量开发和保护的适宜程度. 比值大, 说明评价地块适合保护而不适合开发; 比值小, 说明评价地块保护价值不大但开发价值大. 生态保护主要考虑指标覆盖度、水源涵养能力、土壤侵蚀风险、水源地保护法规; 适宜性主要考虑指标有现状开发强度、与道路临近性、与集镇临近性和地形坡度. 对水源地一级保护区为约束性指标, 其它指标进行归一化加权, 权重采用等权重累加.

2.6 数据来源和处理方式

本研究地形采用国家基础地理信息 25 m 数字地形数据, 流域划分应用 ArcGIS 的 Archydro 工具实现. 土地利用采用 2009 年航拍解译数据, 航拍数据分辨率为 0.5 m, 通过野外 GPS 测点和地形图进行几何纠正, 目视解译获取林地、耕地、茶园、河流、池塘、水库、道路、建设用地、退耕地等信息, 精度可以达到 1:5000. 河流和道路数据来源于 1:50000 地形图, 并采用航拍数据进行更新. 土壤质地采用溧阳市土壤普查资料和土壤志来确定. 气象数据采用溧阳气象站 1988—2012 年日降雨、气温数据. 水文数据采用沙河水库 1988—2007 年

水位和下泄流量,通过水量平衡法计算出各年流域径流量,用于模型在水量模拟的参数率定和验证. 流域内布设 19 个河流监测断面,其中平桥河布设 9 个,中田河布设 5 个,下宋河布设 1 个,临湖岸坡支流布设 4 个,按月监测 COD、总氮、氨氮、硝态氮、总磷和悬浮物等各项水质指标,监测时间为 2009—2010 年. 大气沉降采用 2009—2010 年天目湖地区实测数据. 人口分布采用天目湖镇各村落的人口调查数据,时间为 2009 年,人口按照居民地分布面积进行空间离散.

3 结果分析与讨论

3.1 水量、水质模拟结果验证

污染物输移过程与径流过程密切相关,径流的模拟效果是影响污染物通量模拟的重要因素之一. 径流过程的模拟需要大量的实测水文数据进行参数的率定和验证,目前沙河水库流域的主要入湖河流因流域面积相对较小,在国家水文站布设体系中尚未建立标准的水文测量站点,这给流域水文模拟带来困难. 目前沙河水库流域仅有的水文监测资料是水库水位变化和下泄流量,本研究首先通过水位变化和下泄流量计算水库水量平衡变化,并计算出流域的入库水量,用于率定水文模拟参数和验证径流模拟的效果. 结果表明,沙河水库年径流深模拟值与实测值吻合良好(图 4a),进一步进行误差统计分析,结果显示各年径流深误差平均为 11.8%,证实本项评估所采用的径流计算方法能够很好地描述沙河水库流域的降水—径流过程.

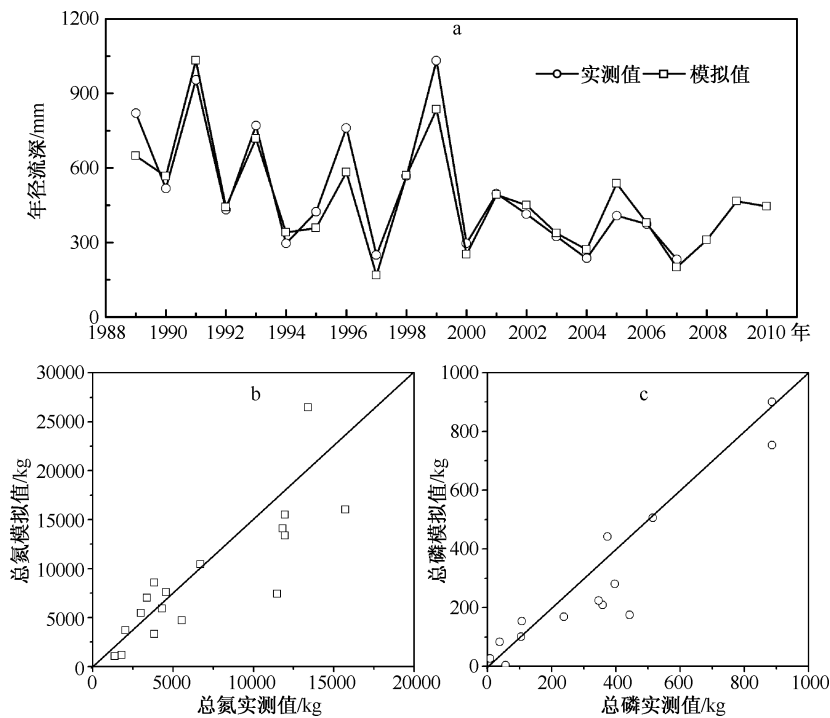


图4 沙河水库流域径流量(a)、总氮(b)与总磷(c)模拟值与实测值比较

Fig.4 The comparison between simulated and measured values of river discharge (a), nitrogen (b) and phosphorus (c) load in Shahe Reservoir watershed

污染物输移通量模拟需要输入的不同土地利用类型地表径流和基流总氮、总磷浓度参数采用本研究实施过程中获取的子流域洪水期和枯水期监测结果,城镇和裸地的产出采用类似地区的研究结果^[19];生活污水采用人均排放率计算;污染物入河量采用城镇和农村上下游控制性断面监测数据来确定,输入初始参数后用流域内 19 个监测点的逐月监测数据进行非线性优化,并最终获得不同土地利用类型的排放量、子流域汇流降解量、河流输送降解量以及最终入湖量. 利用优化参数模拟的各断面总氮、总磷输出量与实测量

的比较,如各点均沿 45°线分布,说明模拟值和实测值较为吻合,除了个别监测站点有一定差别外,多数监测站点实测值与模拟值吻合度较好(图 4b、c),证实该模型对氮、磷营养盐输出强度有较强的模拟能力,参数率定后能够很好地模拟沙河水库流域氮磷排放、输送与入湖过程。

3.2 入湖氮、磷污染通量及分类来源结构分析

依据模型模拟结果,对流域氮、磷污染来源进行解析。结果显示,沙河水库流域总氮入库量为 206.01 t/a,点源与面源分别为 29.46 和 176.55 t/a,分别占总入库量的 14.3% 和 85.7%;总磷入库量为 3.29 t/a,点源与面源分别为 1.07 和 2.22 t/a,分别占总入库量的 32.5% 和 67.5%。由此可见,沙河水库氮、磷污染主要来自于面源,面源污染是控制的重点(图 5)。

面源污染的输出强度与土地利用密切相关,依据不同土地利用类型输出参数的优化结果,总氮排放以茶园最高,为 43.90 kg/(hm²·a);其次是耕地,约为 24.96 kg/(hm²·a);排放量最低的是林地与河湖漫滩,分别为 5.00 和 2.35 kg/(hm²·a)。不同土地利用类型总氮污染排放强度的依次顺序为茶园>耕地>建筑用地>裸地>草地>退耕地>林地>河湖漫滩。总磷以颗粒态为主,排放量与地表覆盖度和土壤侵蚀有关,排放量以裸地最高,为 0.93 kg/(hm²·a);其次是建筑用地,为 0.87 kg/(hm²·a);茶园的排放量为 0.84 kg/(hm²·a);排放量最低的也是林地与河湖漫滩,均为 0.11 kg/(hm²·a)。总磷排放强度由大到小依次为裸地>建筑用地>茶园>耕地>草地>退耕地>林地和河湖漫滩。茶园是沙河水库流域丘陵开发的主要类型,因丘陵坡地土壤养分容易流失,茶园种植主要靠大量的肥料投入,据调查,该区一些茶园施用有机肥高达 18000 kg/(hm²·a),折合纯氮为 959 kg/(hm²·a),而耕地的施肥量约为茶园施肥量的一半^[20]。茶园开发表现为原林地被砍伐种植茶树,这种变化必然带来氮、磷输出大幅度增加,排放强度比较结果显示:茶园替代林地导致总氮和总磷排放量分别增加 8.8 倍和 7.6 倍。

对不同土地利用类型面源总氮和总磷的贡献量进行统计(表 1、图 6),总氮的贡献以耕地最为突出,占面源总量的 39.2%;其次是茶园,占 27.1%;而占流域 45.3% 的林地仅贡献 15.4% 的面源总氮。由此可见,沙河水库面源总氮控制应该以耕地和茶园为主,茶园一般毁林而建,因此尤其要加强茶园的控制。总磷与总氮类似,贡献也以耕地为主,约为 39.2%;其次是茶园,约占 21.5%;占流域 45.3% 的林地仅贡献 13.8% 的面源总磷。可见总磷污染控制也应当加强茶园污染控制,同时增加地表覆盖度,控制建设用地和裸地的磷输出量。

表 1 沙河水库流域土地利用组成及各用地类型氮、磷排放强度

Tab. 1 Land use structure, nitrogen and phosphorus emission intensity of different land use types in Shahe Reservoir watershed

土地利用类型	林地	耕地	茶园	草地	河湖漫滩	退耕地	建设用地	裸地
面积/km ²	65.5	34.2	13.6	14.4	3.1	0.6	7.2	3.4
氮排放强度/(kg(hm ² ·a))	5.00	24.96	43.90	11.64	2.35	11.63	22.70	15.67
磷排放强度/(kg(hm ² ·a))	0.11	0.60	0.84	0.24	0.11	0.24	0.87	0.93

3.3 氮、磷污染物输移过程通量变化与分区差异

流域氮、磷污染物自排放经历细沟汇流入河、河道输送并经过河口进入水库中,氮、磷在输送过程中因沉降、过滤、反硝化、氨挥发及生物吸收等过程而发生降解,因此流域内不同部位同样的面积开发对入湖的贡献量有很大的差异。如能解析出氮、磷污染在输送过程的变化,就能够明确流域内不同地块开发对水库氮、磷的贡献差异。模型中基于河流断面实测值可计算出各子流域汇流过程中氮、磷污染的滞留降解率,进而估算不同子流域氮、磷的入库比例。结果表明,污染入库比例最高的是临湖地区,主要和该区流程短、滞留降解量少、入库比例高有关,其次是下宋河流域和平桥河流域。各流域以中下游地区入湖比例最高,对库体污染有较大的贡献。总氮的趋势与总磷类似,但总磷滞留降解量大,中田河上游对水库磷的贡献几乎为零(图 7)。对全流域总氮和总磷从排放到入河、入库进行统计,结果显示沙河水库流域总氮排放量为 321.64 t/a,进入河流的为 255.53 t/a,在河道输送过程中损失约 19.4%,最终有 206.01 t/a 进入水库;沙河水库流域总磷排放量为 13.42 t/a,进入河流的为 7.90 t/a,在河道输送过程中损失约 58.3%,最终有 3.29 t/a 进入水库;由此可见流域对总磷有更强的拦截能力,这也是水库氮污染高于磷污染的原因。

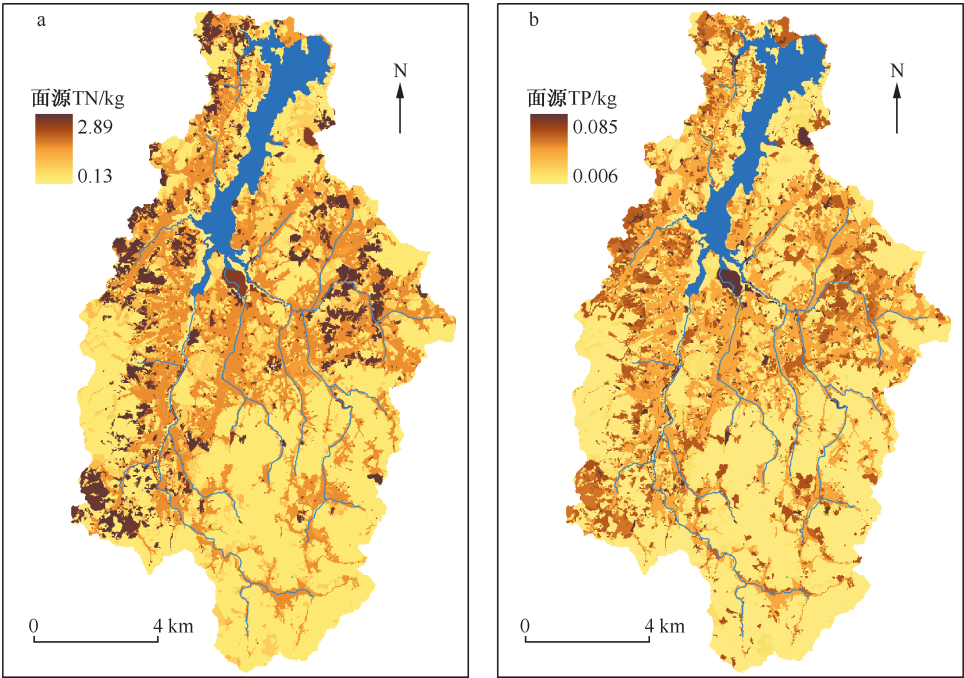


图5 沙河水库流域总氮(a)、总磷(b)面源排放强度分布
Fig.5 The distribution of non-point nitrogen (a) and phosphorus (b) emission intensity in Shahe Reservoir watershed

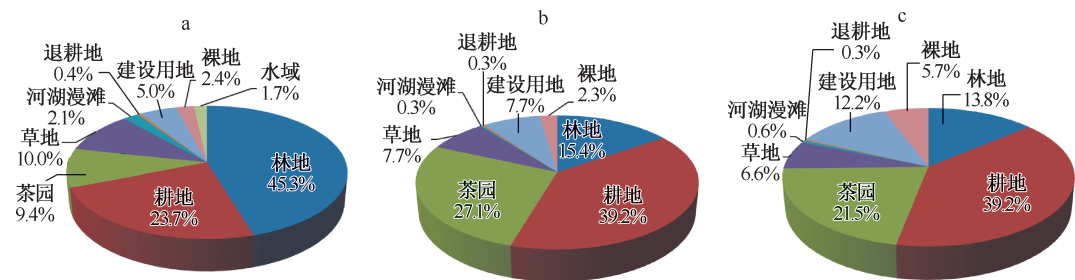


图6 沙河水库流域土地利用结构(a)及各用地类型氮(b)、磷(c)排放贡献组成
Fig.6 The land use structure (a), nitrogen (b) and phosphorus (c) emissions contribution of different land use types in Shahe Reservoir watershed

不同子流域受河流流态、河床地形、生态系统结构与功能、流程长短等众多因素影响,氮、磷污染的滞留降解率具有很大差异(表2)。就总氮而言,中田河流域削减比例最大,可达34.71%,其次是平桥河流域,约为23.81%,而临湖岸削减比例最小,临湖西岸和临湖东岸的分别为4.80%和1.27%。沙河水库流域总氮入湖量共计206.01 t/a,其中平桥河流域、中田河流域、下宋河流域、临湖西岸和临湖东岸的贡献量分别为32.56%、21.30%、8.47%、25.38%和12.29%,临湖岸坡面积占流域面积的26.28%,但入库总氮贡献量达到37.67%,由此可见控制临湖岸坡总氮具有更高的减排效率;总磷削减情况与总氮类似,中田河流域削减率最大,可达84.31%;其次是平桥河流域,为73.30%;而临湖岸削减率最小,临湖东岸和临湖西岸的削减比例分别为22.54%和23.73%。沙河水库流域的总磷入湖量共计3.29 t/a,其中平桥河流域、中田河流域、下宋河流域、临湖西岸和临湖东岸贡献量分别为22.32%、9.32%、9.32%、40.11%和18.93%,面积仅占

26.28% 的临湖岸坡贡献了 59.04% 的入库总磷,说明控制临湖岸坡总磷对入库总磷控制具有更大的意义.

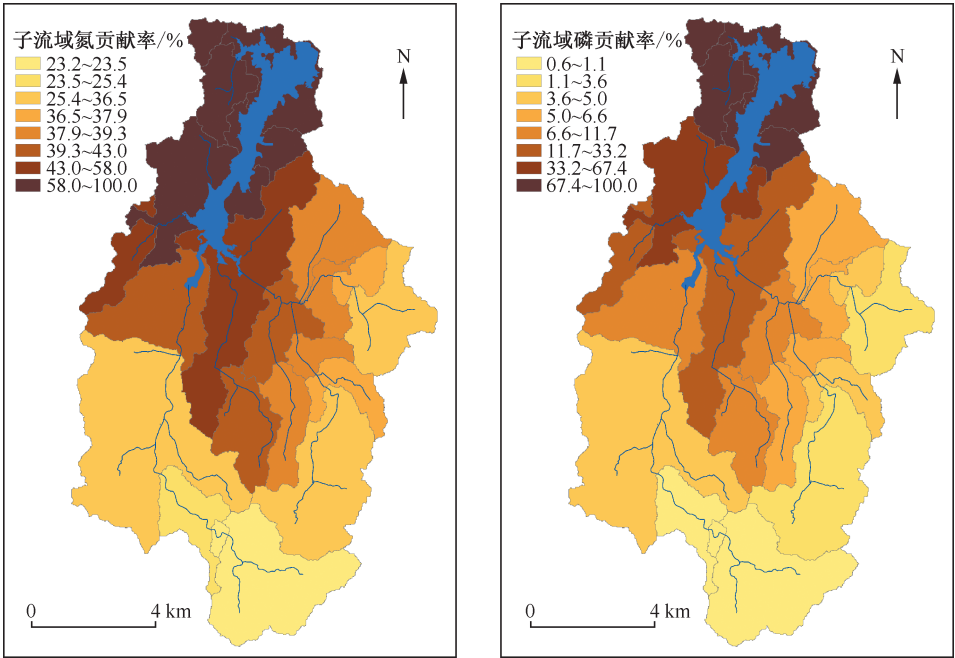


图 7 不同子流域氮、磷入库的比例

Fig. 7 The proportion of nitrogen and phosphorus emissions to the reservoir in different sub-watersheds

表 2 沙河水库流域不同分区河流氮、磷降解量及入湖量

Tab. 2 The nitrogen and phosphorus river degradation in different sub-watersheds and the finally volume into the Shahe Reservoir watershed

指标	平桥河流域	下宋河流域	中田河流域	临湖西岸	临湖东岸	全流域
面积/hm ²	4701	1186	4847	2311	1552	14597
总氮排放量/(t/a)	98.98	20.93	73.23	89.94	38.56	321.64
总氮入河量/(t/a)	89.56	19.22	67.94	55.16	23.65	255.53
总氮入库量/(t/a)	68.24	17.55	44.36	52.51	23.35	206.01
河流总氮滞留削减率/%	23.81	8.69	34.71	4.80	1.27	19.38
总磷排放量/(t/a)	4.24	0.87	2.90	3.87	1.55	13.42
总磷入河量/(t/a)	2.78	0.60	2.04	1.77	0.71	7.90
总磷入库量/(t/a)	0.77	0.31	0.32	1.35	0.55	3.29
河流总磷滞留削减率/%	72.30	48.33	84.31	23.73	22.54	58.35

3.4 不同水质目标氮、磷污染减排量及分配

水质目标容量计算的难点是确定水库的自净能力,依据图 3b 按照流域及水库断面的逐级模拟计算,平桥河、下宋河和中田河总氮在河口汇集地带降解量为 15%,在河口以下的库体因水体反硝化作用和生物降解,总氮降解量约为 42.0%;上游 3 条河流总磷在入库河口地带大幅度减少,因此这 3 条河流的总磷在水库中滞留和降解量不大,水库滞留和降解总磷主要来源于临湖岸坡和大气沉降,因总磷浓度相对较低,滞留降解率约为 28.9%.为了使容量核算更有代表性,本研究采用沙河水库多年平均入库流量,为 $8269 \times 10^4 \text{ m}^3$,采用公式(9)计算总氮Ⅳ类和Ⅲ类的水环境容量分别为 187.53 和 147.53 t/a,总磷Ⅲ类和Ⅱ类的水环境容量分别为 4.17 和 2.17 t/a(表 3).

表3 沙河水库水质目标的年绝对水环境容量测算
Tab.3 The calculation result of absolute annual water environmental capacity base on water quality objectives of Shahe Reservoir watershed

控制水质目标类别	水库入库流量/ (× 10 ⁴ m ³)	目标水质浓度/ (mg/L)	目标水质 污染负荷/t	水库大气 沉降量/t	水库自净量/t	年绝对水环境 容量/(t/a)
总氮Ⅳ类	8269	1.5	120	24.79	92.32	187.53
总氮Ⅲ类	8269	1	80	24.79	92.32	147.53
总磷Ⅲ类	8269	0.05	4	1.18	1.34	4.17
总磷Ⅱ类	8269	0.025	2	1.18	1.34	2.17

本研究采用2009年的通量计算结果,沙河水库总氮达到Ⅳ类水需要的入湖减少量为32.01 t/a,入湖削减比例为15.50%,利用河流的降解系数反推到流域排量为削减35.83 t/a;总氮达到Ⅲ类水需要的入湖减少量为59.66 t/a,入湖削减比例为29.00%,利用河流的降解系数反推到流域排量为削减68.20 t/a.沙河水库总磷达到Ⅲ类水需要的入湖减少量为0.682 t/a,入湖削减比例为20.70%,利用河流的降解系数反推到流域排量为削减0.894 t/a;总磷达到Ⅱ类水需要的入湖减少量为1.479 t/a,入湖削减比例为44.90%,利用河流的降解系数反推到流域排量为削减2.193 t/a(表4).

由前面污染源解析可知,临湖地区流程短,截流量少,入湖比例高,因此在临湖地区控制污染对水库污染的减排效率最高;对不同的流域来说,自身净化能力提升空间有限,因此,对净化能力弱的流域通过生态修复,如河口湿地建设等可以大幅度减少污染物入库量.本研究依据效率原则,同时针对入湖水水质达标的河流不再减排,对不同水质目标下流域的减排量进行分配(表4).结果显示沙河水库总氮达到Ⅳ类和Ⅲ类水质目标时,削减区域依次为临湖西岸、下宋河流域、临湖东岸、平桥河流域,而中田河因河流降解能力强,通过河口地区基本能够达到水质要求,除了河口地区为保障净化功能得以维持和增加,基本上不需要减排;沙河水库总磷达到Ⅲ类和Ⅱ类水质目标时,以控制临湖岸为主,重点保护河口地区及河流湿地对磷的滞留和净化功能.

表4 沙河水库流域不同分区河流氮、磷削减量及入湖量
Tab.4 The reduction of nitrogen and phosphorus in different sub-watersheds and the final amount flow into the Shahe Reservoir watershed

水质目标	项目	全区	临湖西岸	临湖东岸	中田河流域	平桥河流域	下宋河流域
总氮Ⅳ类水质目标	入湖限排量/(t/a)	187.53	34.56	20.34	57.9	59.84	14.89
	入湖削减量/(t/a)	32.01	17.95	3.00	0	8.40	2.66
	入湖削减比例/%	15.50	34.20	12.90	0	12.30	15.20
	流域削减排量/(t/a)	35.83	18.85	3.04	0	11.02	2.91
总氮Ⅲ类水质目标	入湖限排量/(t/a)	147.53	27.19	16.00	45.55	47.08	11.71
	入湖削减量/(t/a)	59.66	25.32	7.34	0	21.16	5.83
	入湖削减比例/%	29.00	48.20	31.40	0	31.00	33.20
	总氮削减排量/(t/a)	68.20	26.60	7.44	0	27.78	6.39
总磷Ⅲ类水质目标	入湖限排量/(t/a)	4.165	0.768	0.452	1.286	1.329	0.331
	入湖削减量/(t/a)	0.682	0.580	0.103	0	0	0
	入湖削减比例/%	20.70	43.00	18.50	0	0	0
	流域削减排量/(t/a)	0.894	0.761	0.132	0	0	0
总磷Ⅱ类水质目标	入湖限排量/(t/a)	2.165	0.399	0.235	0.669	0.691	0.172
	入湖削减量/(t/a)	1.479	0.949	0.319	0	0.074	0.137
	入湖削减比例/%	44.90	70.40	57.60	0	9.70	44.30
	流域削减排量/(t/a)	2.193	1.245	0.412	0	0.270	0.266

3.5 流域分区结构与管理方法

对丘陵山区来说,流域的氮、磷污染来源主要是面源污染,仅给出污染物的减排指标进行水环境管理在

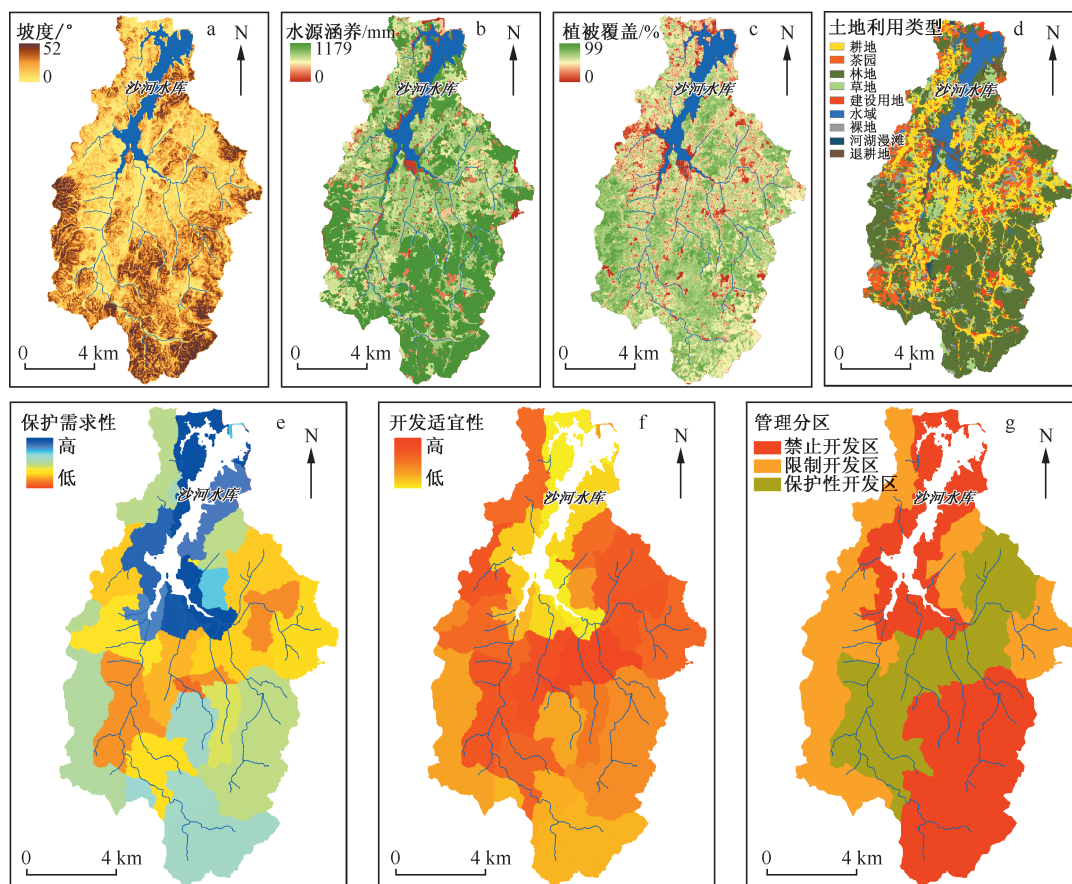


图 8 污染减排的流域管理分区评价要素与分区结果

Fig. 8 Division evaluation factors and results for pollution reduction in watershed management

现实中是难以实施的,除非能将减排指标转变为土地利用调控的指标,如限制最大开发面积、转变开发方式.为此,需要明确哪些地块是减排的重点,哪些地块是开发保护的点,这一过程则需要综合评价土地的开发和保护价值.主要选择与水源水质保护最为密切的指标,如坡度、植被覆盖度、水源涵养能力、污染排放强度和源地保护的规范等来评估其保护价值.其中,坡度采用 1:50000(25 m) 数字地形数据计算获取,该指标与土壤侵蚀有关,坡度大的地区不宜开发,应当对其进行保护管理;植被覆盖度采用 2010 年 ALOS 数据的反演获取;水源涵养能力采用基于格网的水文模型模拟,用降雨径流扣除地表产流部分来表示.各指标见图 8a~d.源地保护规范参考国家和地方的各项规范并与沙河水库实际相结合,《江苏省人民代表大会常务委员会关于加强饮用水源地保护的决议》和《江苏省集中式饮用水源地保护区划分方案》规定,省管湖泊、大中型水库以取水口为中心,半径 500 m 范围内为一级保护区;《江苏省水库管理条例》将洪水水位以下的区域作为水库管理范围,在水库管理范围内禁止宾馆、饭店、度假和疗养等开发活动;国家环境保护总局 2007 年 1 月 9 日发布的《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ/T 338—2007)明确提出,大型水库一级保护区为取水口半径 500 m 范围内的区域,二级保护区为一级保护区外径向距离不小于 3000 m 的区域,二级保护区陆域边界不超过相应的流域分水岭范围.

从沙河水库流域污染源解析和水源涵养的评估结果来看,沙河水库临湖地区是水库的重要污染来源区,尤其是对与富营养化最为密切的磷污染贡献量最大,因此大幅度减少该区的开发面积,通过生态环境保护减少污染物的负荷十分必要.另外,上游地区是沙河水库优质水的供给区域,一旦开发将改变径流过程,

导致地表径流增加、水土流失加大、枯水期流量减少、河流湿地退化等一系列问题,因此上游水源涵养区也应该予以重点保护。开发方面主要考虑已有开发分布、与道路和集镇的距离以及坡度,其中已有开发分布主要指茶园、建筑用地、农田等分布区域,与道路和集镇的距离通过 GIS 的空间分析来实现,坡度影响到开发的难易程度。

选择以上指标,利用 Idrisi 的多准则评估模块 MCE 进行归一化和等权重集成评估,获取图 8e 和图 8f,分别代表生态保护的价值和开发的适宜性,利用两个图层比值作为评估值,并按照划分的集水区统计,排序并划定 3 个分区。如果以耕地、茶园和建筑用地 3 种类型作为土地开发面积,以 3 类土地利用占全流域的比例表示开发强度,依据环境容量与减排任务,流域开发总面积不超过 26% ~ 35%,这里设置范围主要考虑未来流域减排技术应用,如 35% 的控制目标是以实施茶果园整治、河口和库湾湿地修复、农业区河流生态隔离带建设为前提的。各分区定位与土地管控措施为:

1) 禁止开发区:主要包括沙河水库临湖第一分水岭以内的湖滨、河口和主要河流上游源头水源涵养区等。保护该区能够持久性维持库体和河口湿地的环境净化功能,按照沙河水库当前氮、磷污染入库量,该区能够降解入库污染物的 40%,是保障水库优质水量的关键地带。上游涵养区对洪水期水土流失控制和枯水期生态流量的保证具有重要作用。依据环境容量测算,该区沿湖地区最大开发强度应该减少到 6% ~ 10%,水源涵养区最大开发强度应限制到 12% ~ 15%,具有重要生态功能(包括林地、草地、河湖漫滩湿地、水域)的用地面积应不低于 85%。如果实施了河道整治和河口、库湾湿地恢复过程,茶果园整治等,可以按照高值限制。该区应禁止新增一切开发活动,通过退茶造林进行污染减排。

2) 限制开发区:主要包括水库临湖第一分水岭以外的环湖地区,以及植被覆盖度高、坡度相对较大的中田河流域西部山区和杨村河流域上游山区。水库水质对该区开发活动的响应较为敏感,应坚持保护与开发协调、适度开发与加强保护相结合的原则。当前临湖地区总氮入湖比例高达 90%,总磷入湖比例高达 70%。依据环境容量测算,该区最大开发强度为 27% ~ 35%,具有重要生态功能(包括林地、草地、河湖漫滩湿地、水域)的用地面积不低于 60%。该区应实施河道整治和河口、库湾湿地恢复,茶果园整治改造,建立生态隔离带,以恢复河流湿地为主。如这些均实施可按开发面积的 40% 设置最大开发上限。

3) 保护性开发区:主要为开发条件相对较好的中游地区,该区为适宜于产业生态化发展的地区,但环境污染较为明显,需要进行生活化改造。依据环境容量测算,该区最大开发强度为 48% ~ 71%,具有重要生态功能(包括林地、草地、河湖漫滩湿地、水域)的用地面积不低于 25%。该区应按照适宜性进行开发,对已有开发方式进行生态化改造,开展河口、库湾湿地恢复工程,农业区河流生态隔离带建设,进行茶果园整治等,实现单位开发面积的减排,如果以上工程均以实施,可考虑按照 71% 的上限执行。

4 结论

综合以上研究工作,得出以下结论:

1) 本研究通过衔接单元格网水文模型与基于断面的非线性统计模型,在资料相对缺乏的流域内布设河流监测断面,模拟并评估污染物分类组成及输移、变化特征,模型方案能够很好地实现流域污染物来源分类、分区解析,适合应用于丘陵山区供水水库水质目标管理中。

2) 本研究揭示了沙河水库流域不同用地类型氮、磷排放强度。结果显示,总氮输出强度依次为茶园 > 耕地 > 建筑用地 > 裸地 > 草地 > 退耕地 > 林地 > 河湖漫滩;总磷输出强度与地表覆盖度有关,依次为裸地 > 建筑用地 > 茶园 > 耕地 > 草地 > 退耕地 > 林地和河湖漫滩。茶园因施肥量大,坡地种植造成大量的氮、磷流失,约 $43.90 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,是耕地流失量的 1.7 和 1.4 倍,是林地流失量的 8.8 和 7.6 倍,由此可见近年来该区快速的茶果、园开发对水质有较大的影响。

3) 氮、磷在河流输移过程中降解量有很大的空间差异,与流程长度、河床形态、河流生态特征等众多因素有关。水库的临湖地带因河流流程短、坡降大、河口降解量少,导致该区开发对水库具有较大的污染贡献,需要加强生态保护。河口湿地对总磷的拦截能力相对总氮更强。

4) 通过污染来源的系统解析,明确了影响水库水质的主要原因和水污染控制的方向。结果显示,沙河水库入湖氮、磷污染以面源污染为主,面源污染主要来源于耕地和茶园。总氮控制应首先控制临湖地区茶果园

开发,同时加强上游的茶果园和耕地污染控制,恢复河口湿地;而总磷主要通过控制临湖地区的茶果园、地表裸露面等污染排放,同时加强河口湿地的生态恢复。

5) 本研究测算沙河水库水质目标环境容量,模拟评估入库污染物通量,解析入库污染物的来源,核定污染负荷减少量及分区分配,依据减排分配量和土地开发保护价值确定流域不同分区的土地开发限制面积和方式,能够将湖库水质目标、流域污染物减排和土地分区管控三者统一,有利于水质目标管理的实施,这一“析源管控”的思路和方法可供其它湖库水质目标管理借鉴。研究最后划定流域开发保护分区及管理办法也可为其它丘陵地区湖库的水环境保护提供分区管理的依据。

致谢:溧阳市天目湖镇高荣平书记、溧阳市环保局天目湖分局周涛局长、沙河水库管理处刘洪保、高志勤等协助完成调研及资料收集,中国科学院南京地理与湖泊研究所的董雅文教授、朱广伟研究员、陈开宁研究员参与了研究思路讨论,在此一并表示感谢。

5 参考文献

- [1] 杨桂山,马荣华,张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.
- [2] 杨桂山,于秀波,李恒鹏等. 流域综合管理导论. 北京:科学出版社, 2004.
- [3] 李恒鹏,陈雯,刘晓玫. 流域综合管理方法与技术研究. 湖泊科学, 2004, 16(1): 85-90.
- [4] 杨桂山,朱春全,杨志刚. 长江保护与发展报告 2011. 武汉:长江出版社, 2012.
- [5] 朱广伟,陈伟民,李恒鹏等. 天目湖沙河水库水质对流域开发与保护的响应. 湖泊科学, 2013, 25(6): 809-817.
- [6] 韩晓霞,朱广伟,吴志旭等. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略. 湖泊科学, 2013, 25(6): 836-845.
- [7] 美国国家环境保护局. 美国 TMDL 计划与典型案例实施. 北京:中国环境科学出版社, 2012.
- [8] Alameddine I, Qian SS, Reckhow KH. A Bayesian change point-threshold model to examine the effect of TMDL implementation on the flow-nitrogen concentration relationship in the Neuse River basin. *Water Research*, 2011, 45: 51-62.
- [9] Bulleit KAN. Achieving sustainable development: a review of the environmental balancing act in two key clean water act regulatory programs. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3: XV-XX.
- [10] Sigel K, Klauer B, Pahl-Wostl C. Conceptualising uncertainty in environmental decision-making: The example of the EU water framework directive. *Ecological Economics*, 2010, 69: 502-510.
- [11] Graupner BJ, Benthous FC, Burger S *et al.* Implications of EU-Water Framework Directive for the East German Postmining Landscape Lausitz: Coping with a sparse knowledge of the underground. *Limnologica*, 2005, 35: 199-205.
- [12] 中国环境科学研究院. 水质基准的理论与方法学导论. 北京:科学出版社, 2010.
- [13] 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. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1345-1351.
- [14] 秦耀民,胥彦玲,李怀恩. 基于 SWAT 模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究. 环境科学学报, 2009, 29(2): 440-448.
- [15] 冯夏清,章光新,尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应. 地理科学进展, 2010, 29(7): 827-832.
- [16] 邢可霞,郭怀成,孙延枫等. 基于 HSPF 模型的滇池流域非点源污染模拟. 中国环境科学, 2004, 24(2): 229-232.
- [17] 薛亦峰,王晓燕,王立峰等. 基于 HSPF 模型的大阁河流域径流量模拟. 资源科学与技术, 2009, 32(10): 103-107.
- [18] 马晓宇,朱元励,梅琨等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算. 环境科学研究, 2012, 25(1): 95-102.
- [19] 李恒鹏,黄文钰,杨桂山等. 太湖上游典型城镇地表径流面源污染特征. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1598-1602.
- [20] 韩莹,李恒鹏,聂小飞等. 太湖上游低山丘陵地区不同用地类型氮磷收支平衡特征. 湖泊科学, 2012, 24(6): 898-906.