

长沙县典型丘陵区小流域水面率优化调控策略研究

何琪琳^{1,2}, 余冬立^{1,2}, 陈卫连³, 张 鹏^{1,2}

(1. 河海大学水土保持学院; 2. 河海大学农业科学与工程学院; 3. 江苏山水环境建设集团股份有限公司)

摘要:为精准识别丘陵区县域现状水面率与多功能需求之间的差异化调控路径,选取长沙县 56 个典型丘陵区小流域作为空间分析单元,基于遥感解译与功能目标设定,从流域尺度系统评估了现状水面率与抗旱、防洪及生态环境功能需求的匹配关系,并构建了防洪-生态优先型、现状保持优先型和综合均衡型 3 类管理情景,明确了最适水面率配置目标及其空间分异特征。结果表明:研究区小流域现状水面率为 0.70%~12.38%,均值为 $(4.90 \pm 2.36)\%$,整体呈南部及部分中部高、北部及西北部低的空间格局;抗旱功能水面率达标率高达 98%,防洪功能仅 7% 的小流域接近达标状态(差距小于等于 2%),生态环境功能水面率达标率为 27%,另有 41% 处于接近达标状态,表明不同小流域现状水面率与功能需求存在偏离;3 类管理情景空间格局总体一致,但目标水面率差异明显,其中防洪-生态优先型均值最高(6.31%),综合均衡型次之(5.14%),现状保持优先型最低(4.91%)。

关键词:丘陵区小流域;水面率;多目标优化;空间调控;长沙县

Study on optimized regulation strategies of water surface ratio in typical small hilly watersheds of Changsha County//He Qilin^{1,2}, She Dongli^{1,2}, Chen Weilian³, Zhang Peng^{1,2} (1. College of Soil and Water Conservation, Hohai University; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University; 3. Jiangsu Shanshui Environmental Construction Group Co., Ltd.)

Abstract: To accurately identify differentiated regulation pathways linking current water surface ratio and multi-functional demands in hilly county regions, this study takes Changsha County as the research area and selects 56 typical small hilly watersheds as spatial analysis units. Based on remote sensing interpretation and functional target formulation, it systematically evaluates the matching relationship between existing water surface ratios and the demand for drought resistance, flood control and environmental functions at watershed scale. Three management scenarios: flood control-ecology priority, status quo maintenance priority, and comprehensive balance, are constructed to clarify optimal allocation targets of water surface ratio and their spatial differentiation characteristics. The results reveal that current water surface ratio of small watersheds in study area ranges from 0.70% to 12.38%, with an average value of $(4.90 \pm 2.36)\%$. Spatially, the ratio is generally high in southern and partial central areas, while low in northern and northwestern regions. The compliance rate of water surface ratio for drought resistance reaches as high as 98%, whereas merely 7% of small watersheds nearly meet the flood control standard (with a gap less than or equal to 2%). The compliance rate for environmental functions stands at 27%, and an additional 41% are close to meeting the standard, indicating mismatches between the existing water surface ratio and functional demands across individual small watersheds. Three management scenarios share generally consistent spatial patterns yet differ markedly in target water surface ratios. Flood control-ecology priority scenario boasts the highest average ratio (6.31%), followed by comprehensive balance scenario (5.14%), and status quo maintenance priority scenario records the lowest average value (4.91%).

Key words: small hilly watershed; water surface ratio; multi-objective optimization; spatial regulation; Changsha County

丘陵区是我国重要的农业生产区和人口集聚区,其水资源配置直接关系到区域粮食安全、生态安全与经济社会的可持续发展。受地形起伏、降雨时空分布不均及人类活动的影响,丘陵区水资源呈现明显的时空异质性特征^[1]。水面率作为反映区域地

表水体面积占比的重要指标,不仅表征水资源空间分布格局,也直接影响流域径流调节、水资源供给保障、水生态系统维持及污染物削减能力^[2-3]。科学合理的水面率配置有助于增强区域防洪减灾和抗旱保供能力,提高水资源调蓄利用效率,并促进生态系统

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD1700300);中央高校基本科研业务费专项(B250201075, B250201072)

作者简介:何琪琳(1995—),女,讲师,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:heqilin@hhu.edu.cn

通信作者:余冬立(1980—),男,教授,博士,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究。E-mail:shedongli@hhu.edu.cn

服务功能的提升^[4-5]。

丘陵区受地形破碎、水系发育不均及人类活动干扰等因素影响,水体规模普遍较小且空间分布离散,不同小流域之间的水资源调蓄能力呈现显著的空间差异^[6]。随着城镇化进程加快和土地利用结构调整,部分地区坑塘、湿地等小微水体持续萎缩,削弱了流域防洪、抗旱和生态保障功能^[7],并制约生态系统服务功能的发挥。近年来,遥感监测与地理信息技术的发展为区域水体识别和水面率评估提供了有效的技术手段^[8-9],相关研究主要围绕水面变化的驱动机制、生态环境效应及防洪抗旱功能展开,多聚焦于平原地区或大型流域尺度^[10-12],对丘陵区小流域的关注相对不足;研究目标也主要侧重单一功能优化,缺乏兼顾防洪、抗旱和生态环境需求的水面率协同配置研究及相应的优化调控方案^[13-14]。

长沙县(28°14′57.1″N,113°4′29.4″E)位于湘江下游东岸,地貌以低丘岗地为主,境内河塘密布、农业活动频繁,是长江中下游丘陵农业区的典型代表^[15]。随着城镇化进程加快及土地利用结构调整,部分小流域现状水面率与防洪、抗旱及生态环境功能需求之间的偏离日益突出,制约了区域水资源调蓄能力和生态系统服务水平的提升^[16]。基于此,本文系统识别长沙县小流域现状水面率的空间格局,结合防洪、抗旱与生态环境3类功能目标,构建水面率优化配置模型,探索差异化的空间优化与管理策略,以期为丘陵区小流域水资源高效配置、水安全保障与生态保护协同提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

长沙县位于湖南省长沙市,隶属长江流域洞庭湖水系。根据水利普查资料,全县共有河流51条,总长度为704.21 km,其中流域面积超过200 km²的主要河流包括浏阳河、捞刀河、金井河和白沙河,合计河长169.29 km;县域内湖泊与水库共计145座。长沙县地形总体呈北、东、南部较高,中西部相对低平的空间格局,地貌类型以丘陵为主,占全县面积的89.6%,平原和山地分别占7.4%和3.0%^[17]。本文结合县域水系分布与地形特征,将长沙县划分为53个小流域作为基本单元,如图1所示。全县森林覆盖率为41.5%,低山与深谷区域主要分布针阔叶混交林,其余区域以马尾松、杉木和油茶等人工林为主。农业生产粮食作物和经济作物并重,其中主要粮食作物包括水稻、小麦、玉米、红薯和豆类等,经济作物以油菜、茶叶、柑橘、花生、芝麻和向日葵等为主^[15]。

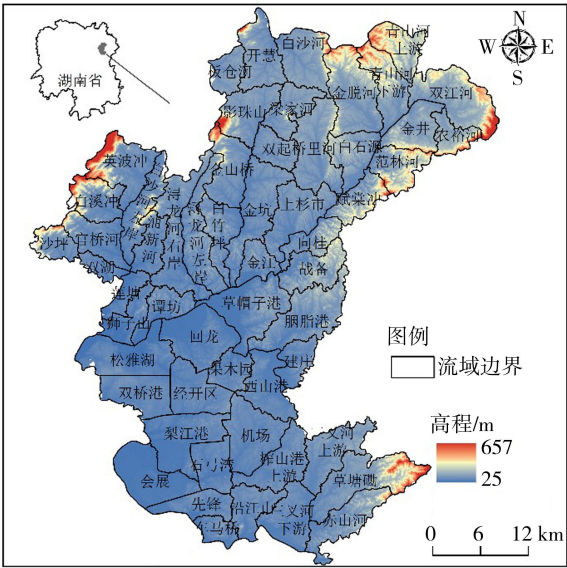


图1 研究区概况

Fig. 1 Location of study area

1.2 研究方法

研究过程主要包括水面率现状识别、功能目标确定和优化配置3个环节:①基于高分辨率遥感影像提取长沙县典型丘陵区小流域塘库、沟渠等水体信息,获取现状水面率及其空间分布特征;②从抗旱、防洪和生态环境功能需求出发,综合考虑农业灌溉需水、洪峰调蓄能力及污染物稀释需求,分别计算各小流域的抗旱、防洪和生态环境水面率,确定功能目标水面率;③基于非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)构建多目标水面率优化框架^[18],设置防洪-生态优先、现状保持优先和综合均衡3类管理情景,筛选不同情景下的最优水面率方案,并结合相关性分析识别影响水面率的关键因子。

1.2.1 数据来源

遥感影像数据来源于 Google Earth Engine 平台,采用2023年 Landsat 8 OLI/TIRS 地表反射率产品,空间分辨率为30 m。为反映全年水体分布特征,分别选取3月、6月、9月和12月影像开展分析。经云掩膜预处理后,利用改进归一化水体指数提取水体信息,并结合多时相影像识别稳定水体范围。在此基础上,统计各小流域稳定水体面积,计算水面率,即稳定水体面积占小流域总面积的比例。

1.2.2 防洪、抗旱及生态环境水面率计算

根据不同功能需求,将水面率划分为抗旱水面率、防洪水面率和生态环境水面率,并分别提出相应的计算方法,用以量化各小流域在不同功能目标约束下的水面率需求水平。

a. 抗旱水面率。反映典型干旱时期现有水体保障农业灌溉需水的能力,计算公式为:

$$R_1 = \frac{S_1}{A} \quad (1)$$

其中

$$S_1 = \frac{W}{H}$$

$$W = \frac{\sum (E_i F_i) D}{\eta}$$

式中: R_1 为抗旱水面率; S_1 为抗旱所需水体面积; A 为小流域面积; W 为作物总灌溉需水量; H 为平均蓄水深度,参考 GB/T 33130—2024《高标准农田建设评价规范》,取 1.0 m; E_i 为作物 i 日耗水量,参考 FAO-56 作物需水计算方法^[19],并结合国内遥感反演结果^[20],确定水稻、玉米和小麦分别为 6.0、5.5、4.5 mm; F_i 为作物 i 种植面积; D 为抗旱保障时间,取 30 d; η 为灌溉水利用系数,依据《“十四五”水安全保障规划》,推荐值取 0.65。

b. 防洪水面率。反映水体对暴雨洪峰径流的调蓄能力,计算公式为:

$$R_2 = \frac{S_2}{A} \quad (2)$$

其中

$$S_2 = \frac{V}{H_1} \quad V = \frac{1}{2}(Q - q)t$$

$$Q = \frac{C(PK)}{T^{0.8}}A \quad q = \varepsilon B \sqrt{2gh}^{1.5} \quad T = \frac{ML}{\sqrt{J}}$$

式中: R_2 为防洪水面率; S_2 为防洪所需水体面积; V 为洪峰调蓄库容; H_1 为附加调蓄深度,依据 SL 44—2006《水利水电工程设计洪水计算规范》和 GB 50288—2018《灌溉与排水工程设计标准》,取 2.0 m; Q 为洪峰流量; q 为下泄流量; C 为产流系数; P 为 24 h 设计暴雨量; K 为洪峰模比系数,取 0.8; T 为汇流历时; M 为汇流参数,取 0.5; L 为主沟长度; J 为坡度; t 为调蓄历时; ε 为综合流量系数,取 0.4; B 为堰顶宽度,取 6.0 m; h 为堰上水头,取 3.0 m; g 为重力加速度,取 9.81 m/s²。

c. 生态环境水面率:反映水体对污染物(COD、NH₃-N、TP)的削减与净化能力:

$$R_j = \frac{P_j}{k_j G_j H_2 \rho A} \quad (j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

其中

$$P_1 = \sum (F_j \alpha) \times 10^5$$

$P_2 = \sum (F_j \beta \lambda_1) \times 10^5 \quad P_3 = \sum (F_j \gamma \lambda_2) \times 10^5$

式中: R_j 为污染物 j 所需水面率; P_j 为污染物 j 年入流负荷; k_j 为污染物 j 水质综合衰减系数; G_j 为污染物 j 目标质量浓度限值; H_2 为平均水深,取 1.2 m; ρ 为水体密度,取 1 000 kg/m³; α 为 COD 排放强度; β 为氮肥施用量; γ 为磷肥施用量; λ_1 、 λ_2 分别为氮、磷流失系数; $j=1、2、3$ 分别表示 COD、NH₃-N 和 TP。

参考《全国水环境容量核定技术复核要点》(2004)及相关文献^[21-22],COD、NH₃-N 和 TP 对应的 k_j 分别取 0.05、0.10、0.02 d⁻¹,对应的 G_j 分别取 30、1.5、0.3 mg/L, λ_1 、 λ_2 分别取 0.07、0.04。

1.2.3 多目标水面率优化框架

为协调防洪调蓄、生态环境需求与现状水面率配置之间的关系,基于 NSGA-II 构建多目标水面率优化框架^[18],以小流域水面率作为决策变量,在满足抗旱功能目标的前提下,同时考虑防洪目标、生态环境目标和现状水面率之间的协调关系,通过多目标优化获得各小流域的帕累托最优解集。在优化过程中,决策变量的取值范围由抗旱功能目标水面率和研究区观测最大水面率共同限定,即优化结果不得低于抗旱需求,也不能超过研究区现有最高水面率水平。随后分别计算优化结果与防洪目标、生态环境目标与现状水面率之间的相对偏离程度,并以此作为多目标优化的评价依据。采用 NSGA-II 对上述目标进行同步优化。算法参数设置为:种群规模 100,迭代次数 100,目标函数数目 3,决策变量数目 1。每个小流域独立运行优化过程,获得对应的多目标帕累托解集。

考虑不同管理目标下对防洪、生态环境和现状保持需求的侧重差异,设置防洪-生态优先型、现状保持优先型和综合均衡型 3 类管理情景(表 1)。对各小流域获得的帕累托解集,根据不同情景赋予防洪目标、现状目标和生态环境目标不同权重,并计算综合评价指标 E :

$$E = w_1 e_1 + w_2 e_2 + w_3 e_3 \quad (4)$$

式中: e_1 、 e_2 、 e_3 分别为优化结果与防洪目标、现状目标和生态环境目标之间的相对偏离程度; w_1 、 w_2 、 w_3 分别为对应目标权重。

表 1 3 类管理情景及对应的目标权重

Table 1 Three management scenarios and assigned target weights			
管理情景	防洪权重	现状权重	生态环境权重
防洪-生态优先型	0.60	0.10	0.30
现状保持优先型	0.20	0.60	0.20
综合均衡型	1/3	1/3	1/3

为识别不同管理情景下水面率配置的主要影响因素,采用皮尔逊相关分析计算各变量与最优水面率之间的相关关系,并筛选相关性较高的关键变量。防洪、抗旱、生态环境水面率的计算,多目标优化分析及相关性分析均在 R4.6.0 软件环境下完成,结果绘制采用 ggplot2 软件包实现,空间数据处理与制图在 ArcMap10.8.2 平台完成。

2 结果与分析

2.1 水面率

a. 长沙县 56 个典型丘陵区小流域现状水面率为 0.70% ~ 12.38%, 平均值为 (4.90 ± 2.36)% (图 2(a), 图中数值为各小流域的水面率)。在空间分布上, 高值区(>8%) 零散分布于县域中南部及部分中部小流域, 局部水面率接近或超过 10%, 主要集中在草帽子港、建庄、松雅湖、回龙、沿江山、谭坊、莲塘和石弓湾等邻近城区、河网密集的小流域; 中值区(4%~8%) 主要分布于中部偏西地区及东南沿河地带; 低值区(<4%) 则集中于北部和东部山地丘陵区的小流域。

b. 抗旱水面率目标介于 0.26% ~ 3.23%, 平均

值为(1.41 ± 0.56)%, 高值区主要分布于流域中南部及西南部, 整体呈相对连片的空间格局(图 2(b)); 达标的小流域占比达 98%, 表明研究区现有水利工程体系对旱季农业与生活供水具备较好的支撑能力。

c. 防洪水面率目标范围为 8.30% ~ 13.51%, 平均值为(11.10 ± 1.26)%。其高值区主要集中于流域西南部、中部偏东及东南部, 空间分布呈现明显的不连续特征(图 2(c))。仅有少数小流域接近防洪目标值(差距小于等于 2%), 包括草帽子港、建庄、沿江山和莲塘等小流域, 占研究区总数的 7%。

d. 生态环境水面率目标介于 1.13% ~ 14.40%, 平均值为(5.96 ± 2.39)%。高值区主要分布于流域西南部及中部局部区域(图 2(d)), 其中

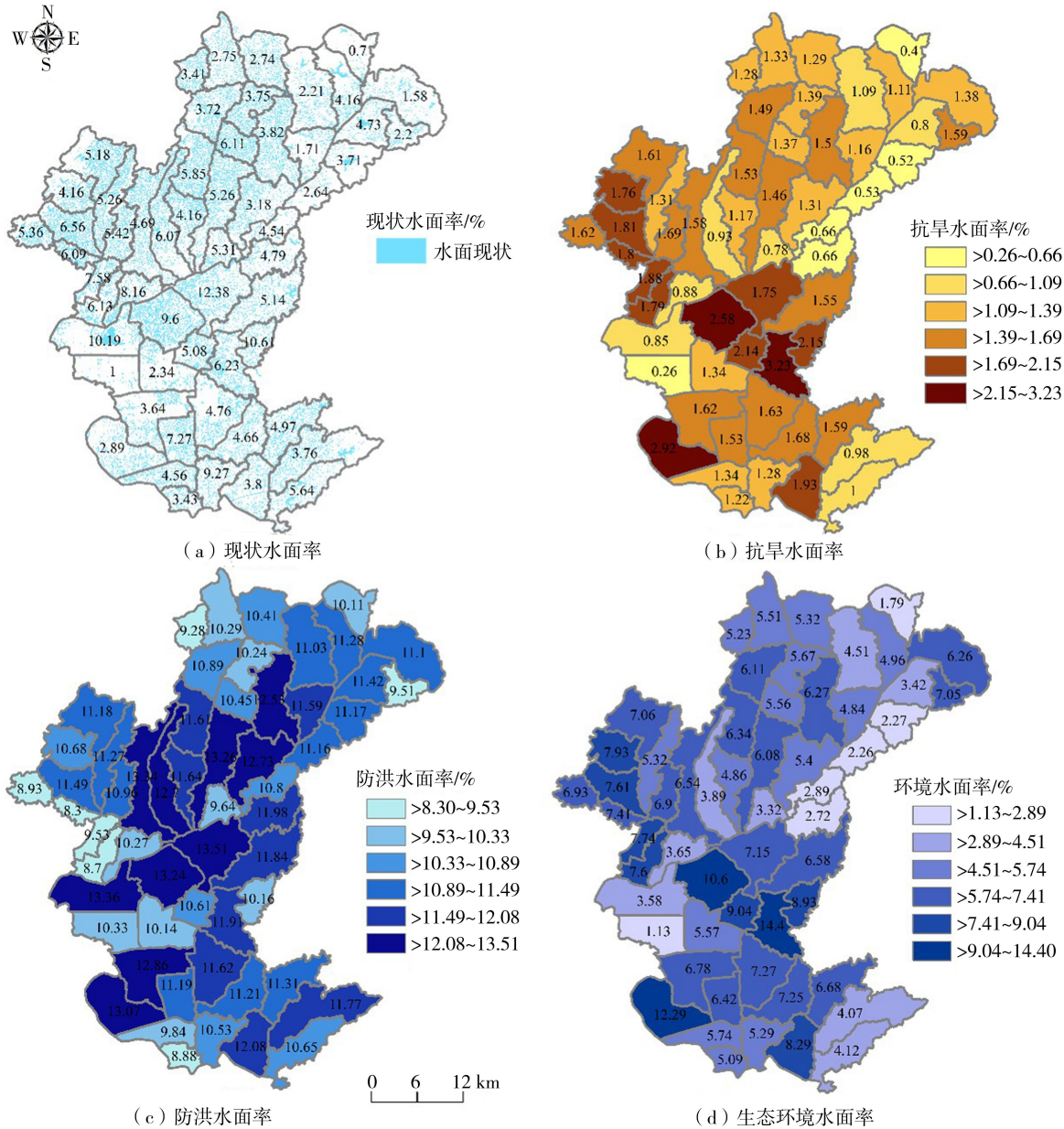


图 2 小流域水面率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of water surface ratio in small watersheds

达到生态环境水面率目标的小流域共 15 个,占比为 27%;另有 23 个小流域的现状水面率接近目标值(差距小于等于 2%),占比为 41%。

总体而言,现状水面率与防洪、抗旱及生态环境等多重功能目标在多个区域存在明显偏离,表明不同小流域间水面率配置与功能需求不协调,亟须在功能约束下开展针对性的空间优化与调控。

2.2 最适水面率情景

防洪-生态优先型、现状保持优先型和综合均衡型 3 类管理情景下最适水面率在空间分布特征上存在明显差异。

a. 防洪-生态优先型情景(图 3(a))最适水面率整体水平最高,其取值范围为 1.13%~12.38%,均值为(6.31±2.65)%。其中,中南部稻田集中分布的小流域(如会展、回龙、草帽子港和西山港等)

水面率普遍达 11.91%~12.38%,高于县域平均水平,表明在同时强化洪峰调蓄与污染物稀释功能的情景约束下,对水体面积配置提出了更高要求。

b. 现状保持优先型情景(图 3(b))水面率范围为 0.71%~12.38%,均值为(4.91±2.36)%。高值区仅零散分布于中南部少数小流域,反映出该情景更侧重于维持现有水体格局,在优化过程中强调现实可行性与经济成本约束。

c. 综合均衡型情景(图 3(c))水面率空间分布特征介于上述两类情景之间,取值范围为 0.71%~12.38%,均值为(5.14±2.52)%。中南部及部分西南部小流域仍保持较高水面率水平(>9%),同时北部和南部部分流域水面率有所提升。相较于现状保持优先型,该情景在空间配置上更体现多功能目标之间的权衡与协调。

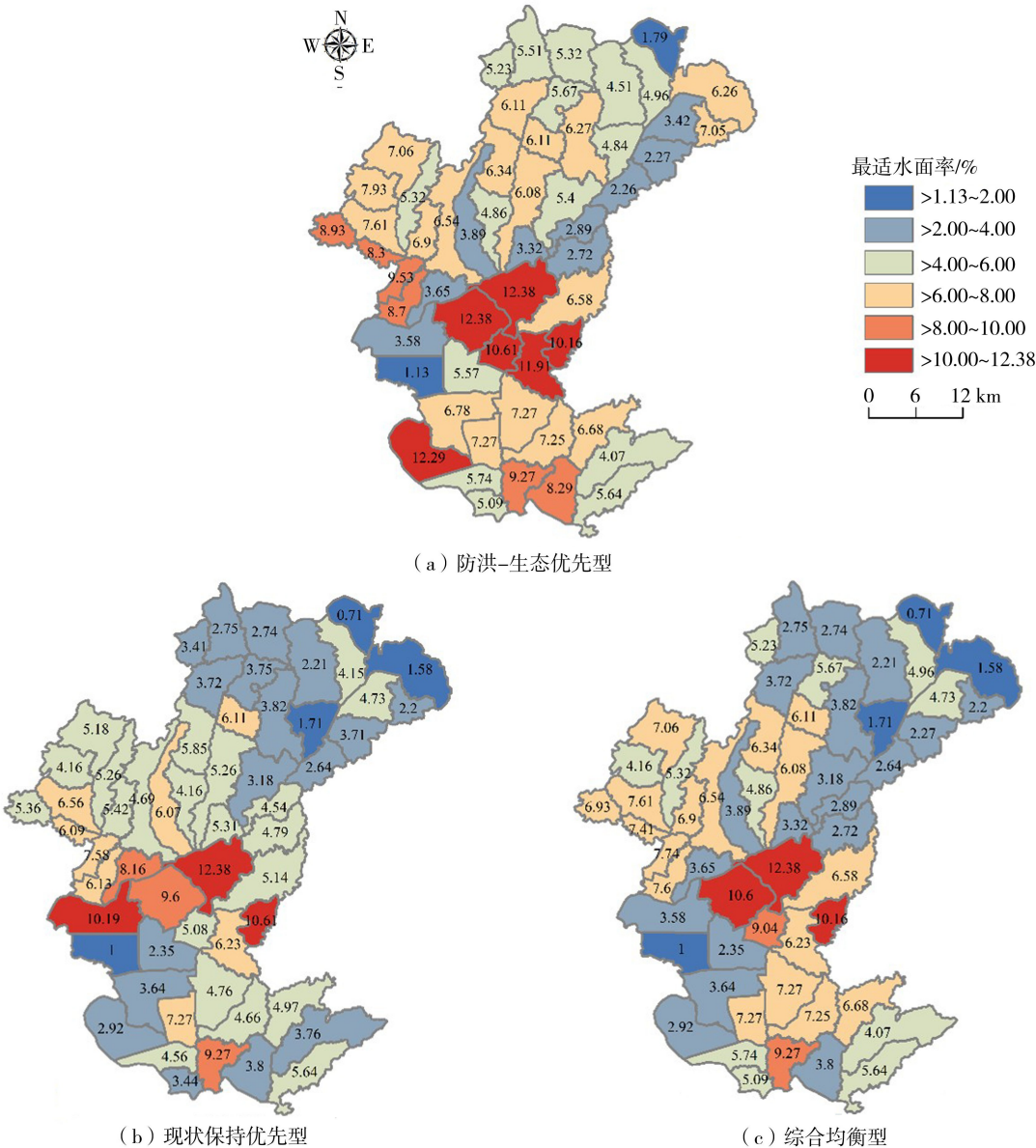


图 3 小流域不同管理情景下最适水面率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of optimal water surface ratio under different management scenarios in small watersheds

2.3 最适水面率情景的影响因素

相关性热力图结果(图4)表明,水面率计算参数与3类管理情景水面率之间的相关关系存在显著差异。在防洪-生态优先型情景中,COD、NH₃-N和TP等水质指标与最优水面率之间的相关系数均超过0.90,表明水质改善需求与防洪调蓄目标之间具有显著的协同关系。相比之下,在现状保持优先型情景中,水质指标与水面率之间的相关性整体减弱,而调蓄时间(相关系数为0.50)、汇流时间(0.50)、洪峰流量(-0.50)、主排水沟渠长度(0.42)等水文过程以及沟渠结构变量与水面率的相关性明显增强。综合均衡型情景的相关结构与水面率的相关关系介于上述两类情景之间。COD、NH₃-N和TP等水质指标对应的水面率相关系数介于0.50~0.56之间,同时坡度(-0.46)和洪峰流量(-0.31)等地形与水动力因子在水面率配置中亦表现出较高的重要性。

3 讨论

流域作为自然水文过程与人类活动耦合的基本单元,能够综合反映水体分布、水文调蓄及生态供给等功能特征,是开展水面率评估与优化的重要空间单元^[23]。长沙县丘陵区小流域密集,水体分布呈现明显的碎片化特征^[15],若采用行政区或区域均值进行评价,容易掩盖局地差异及潜在治理短板^[5,24]。

长沙县丘陵区现状水面率均值为4.90%(图2(a)),略高于长株潭地区2017年的平均水平

(4.43%)^[3],但显著低于长江三角洲典型城市流域及大型平原灌区,如江苏滩沭河灌区(15.16%)^[25]、宿迁市中心城区(9.03%)^[5]以及阳澄淀泖、杭嘉湖、秦淮河和鄞东南流域(15.20%、8.76%、7.52%、5.77%)^[10-11]。这一差异既反映了丘陵区在地形条件、水系结构及天然调蓄空间等方面的限制^[26],也表明长沙县的水体资源配置与综合利用水平存在一定的优化提升空间。

从功能需求角度分析,适度提升水面率有助于增强流域水文调蓄能力、降低洪涝风险并提升生态系统服务功能^[2,25]。本文确定的防洪功能目标水面率均值为11.10%(图2(c)),虽低于部分平原高风险区提出的12%控制阈值,但与昆山市南部防洪分区域城镇圩区(5.50%~9.80%)及农村圩区(6.50%~14.00%)的实际水面率范围基本一致^[12]。生态环境功能目标水面率均值为5.96%(图2(d)),与丁继辉等^[2]针对丘陵区蔡桥镇提出的3.50%~7.00%合理区间较为接近,表明本文确定的功能目标值不仅在数值上与区域实测和经验阈值一致,也在功能匹配上具备较强的适用性。

从区域适用性角度看,防洪-生态优先型情景适用于中南部稻田密集区及城郊结合带,如回龙、草帽子港和果木园等小流域(图3(a)),建议将水面率控制在8%~12.38%,重点强化洪峰调蓄、水质净化与生态功能;现状保持优先型适情景用于水面率已接近合理水平且新增水体建设受制于空间或经济成本的区域,如双桥港、经开区和梨江港等近城区小流

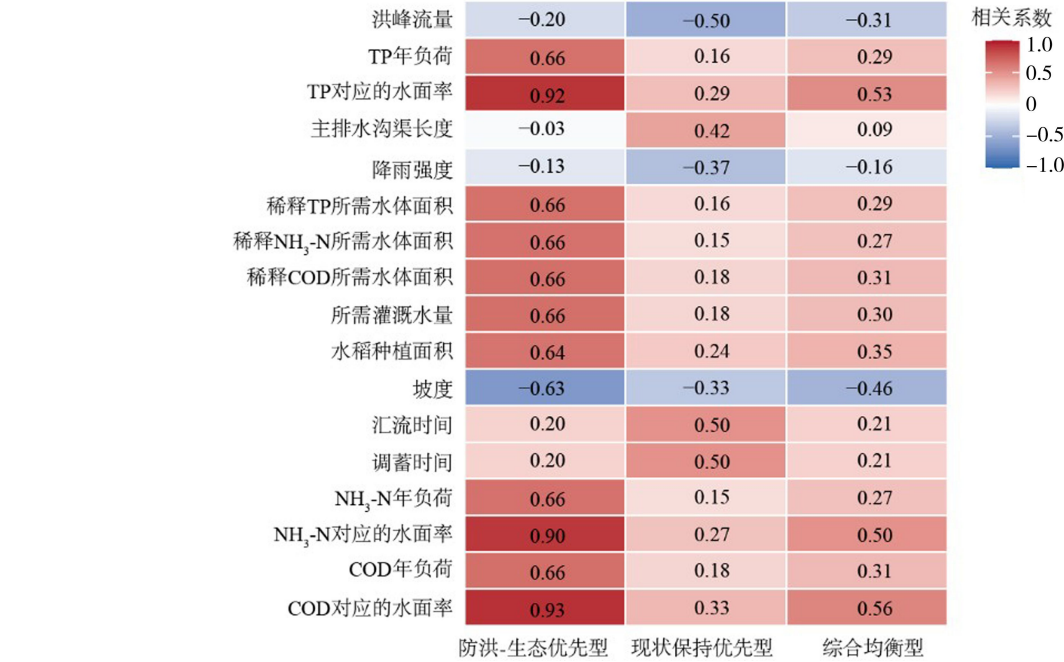


图4 水面率计算参数与不同管理情景水面率之间的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients between calculation parameters of water surface ratio and water surface ratios under different management scenarios

域(图3(b))^[4],应以维持现有水文格局与生态功能为主^[10];综合均衡型则更适用于功能需求多样、具有过渡带特征的小流域,如北部丘陵与岗地分布区(图3(c)),建议将水面率优化至5.14%,以实现防洪、生态环境与用水需求之间的协同平衡。未来水面率优化应充分结合流域自然条件与多功能需求^[13],在通过工程措施提升调蓄能力的同时,加强自然水系连通和湿地修复^[4,12],以协同提升防洪安全、水质改善与生态系统服务功能。

4 结 论

a. 小流域水面率空间上呈现南部及部分中部高、北部及西北部低的分布格局;不同功能目标差异显著,抗旱功能达标率为98%,防洪功能和生态环境功能在多数小流域仍存在提升空间。

b. 3类管理情景下最适水面率的空间格局总体一致,但目标值存在明显差异,其中防洪-生态优先型在中南部稻田密集区需求最高,综合均衡型在维持高值区优势的同时优化了北部与南部部分小流域配置,体现出多功能权衡与空间均衡特征。

c. 丘陵区县域水系治理应结合流域特征与多功能需求,因地制宜选择差异化优化策略,通过工程性调蓄设施建设与自然水系连通、湿地恢复相结合,实现防洪安全、水质改善与生态服务功能的协同提升。

参考文献:

[1] 郭玉雪,江梓欣,许月萍,等. 基于电导率质量守恒的南方丘陵山区基流分割研究[J]. 水资源保护,2025,41(6):105-112. (Guo Yuxue, Jiang Zixin, Xu Yueping, et al. Research on baseflow separation in southern hilly and mountainous areas based on conductivity mass balance [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 105-112. (in Chinese))

[2] 丁继辉,俞双恩,宋静茹. 土地整理项目区适宜水面率模型[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(2):180-184. (Ding Jihui, Yu Shuang'en, Song Jingru. A suitable water surface ratio of land consolidation project areas [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(2): 180-184. (in Chinese))

[3] 刘文博,宋文杰,石林,等. 长株潭地区水域现状及水面率需求分析[J]. 湖南水利水电,2020(1):46-49. (Liu Wenbo, Song Wenjie, Shi Lin, et al. Current status of water bodies and water surface ratio demand in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region [J]. Hunan Hydro & Power, 2020(1): 46-49. (in Chinese))

[4] 程吉林,徐兢,汪靓,等. 兼顾排涝标准与水质净化要求的农业圩区最优水面率确定[J]. 农业工程学报,2022,

38(3): 47-54. (Cheng Jilin, Xu Jing, Wang Liang, et al. Determining the optimal water surface ratio in agricultural polder areas considering drainage standard and water quality requirements [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(3): 47-54. (in Chinese))

[5] 夏成亮,王露,许生,等. 海绵城市建设背景下江苏宿迁市中心城区水面率与内涝关系研究[J]. 中国防汛抗旱,2024,34(8):6-10. (Xia Chengliang, Wang Lu, Xu Sheng, et al. Study on the relationship between water body rate and waterlogging in the central urban area of Suqian City of Jiangsu Province under the background of sponge construction [J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(8): 6-10. (in Chinese))

[6] 周亮广,金菊良,周玉良,等. 基于集对分析的江淮丘陵区农业水土资源匹配分析[J]. 水资源保护,2023,39(4):118-125. (Zhou Lianguang, Jin Juliang, Zhou Yuliang, et al. Matching of agricultural water and soil resources in Jianghuai hilly area based on set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 118-125. (in Chinese))

[7] 肖雪玲,向小华,吴晓玲. 嘉兴市城市防洪包围圈下垫面变化对洪水风险的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):26-31. (Xiao Xueling, Xiang Xiaohua, Wu Xiaoling. Impact of underlying surface changes of urban flood control encirclement of Jiaxing City on flood risk [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 26-31. (in Chinese))

[8] 张珂,吴星宇,吴南,等. 基于高分一号遥感影像的水体提取方法对比分析与改进[J]. 水资源保护,2024,40(4):9-16. (Zhang Ke, Wu Xingyu, Wu Nan, et al. Comparative analysis and improvement of water body extraction methods based on GF-1 remote sensing imagery [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 9-16. (in Chinese))

[9] 陶洁,任磊,梅晓敏,等. 基于混合指数算法的黄河流域水体面积变化及归因分析[J]. 水资源保护,2025,41(4):79-86. (Tao Jie, Ren Lei, Mei Xiaomin, et al. Analysis of water surface area changes and attribution in the Yellow River Basin based on hybrid index algorithm [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 79-86. (in Chinese))

[10] 徐光来,许有鹏,王柳艳. 近50年杭-嘉-湖平原水系时空变化[J]. 地理学报,2013,68(7):966-974. (Xu Guanglai, Xu Youpeng, Wang Liuyan. Temporal and spatial changes of river systems in Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain from 1960s to 2000s [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7): 966-974. (in Chinese))

[11] 韩龙飞,许有鹏,杨柳,等. 近50年长三角地区水系时空变化及其驱动机制[J]. 地理学报,2015,70(5):819-827. (Han Longfei, Xu Youpeng, Yang Liu, et al.

- Temporal and spatial change of stream structure in Yangtze River Delta and its driving forces from 1960s to 2010s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70 (5): 819-827. (in Chinese))
- [12] 周可婧,孔繁花,庄雪颖,等.平原圩区水系结构与功能特征及其影响机制:以昆山南部为例[J]. *生态学报*, 2024, 44 (8): 3268-3279. (Zhou Kejing, Kong Fanhua, Zhuang Xueying, et al. Structure and function of river network and the influence mechanism in plainpolder area: a case study of southern flood district in Kunshan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (8): 3268-3279. (in Chinese))
- [13] 翁硕,林明财,林建锋,等.基于多目标优化的敖江流域梯级水库水资源调度研究[J]. *水利水电科技进展*, 2026, 46 (2): 46-54. (Weng Shuo, Lin Mingcai, Lin Jianfeng, et al. Research on water resources operation of cascade reservoirs in the Aojiang River Basin based on multi-objective optimization [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2026, 46 (2): 46-54. (in Chinese))
- [14] 唐丽云.流域协调机制的功能定位与制度完善[J]. *水利经济*, 2025, 43 (2): 108-116. (Tang Liyun. Function orientation and system improvement of river basin coordination mechanism [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2025, 43 (2): 108-116. (in Chinese))
- [15] 尹兴.长沙县水资源优化配置研究[D].长沙:长沙理工大学,2010.
- [16] 王元元,蔡梅,江宸宇,等.跨区域水系协同治理规划与思考[J]. *水利经济*, 2025, 43 (2): 23-28. (Wang Yuanyuan, Cai Mei, Jiang Chenyu, et al. Planning and thinking of cross-regional collaborative governance of river-lake system [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2025, 43 (2): 23-28. (in Chinese))
- [17] 卢正新.基于信息量法的湖南长沙县地质灾害易发性评价[D].湘潭:湖南科技大学,2022.
- [18] 黄显峰,王宁,刘志佳,等.基于改进NSGA-II算法的梯级水库多目标优化调度[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44 (4): 51-58. (Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44 (4): 51-58. (in Chinese))
- [19] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56) [R]. Rome:FAO, 1998.
- [20] 卢静,蒋敏,郑超磊,等.遥感估算中国三大粮食作物蒸散耗水时空变异特征[J]. *遥感学报*, 2025, 29 (5): 1123-1139. (Lu Jing, Jiang Min, Zheng Chaolei, et al. Spatial and temporal variability of evapotranspiration water consumption of three staple crops in China from remote sensing estimation [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29 (5): 1123-1139. (in Chinese))
- [21] 孙铖,周华真,陈磊,等.农田化肥氮磷地表径流污染风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (7): 1266-1273. (Sun Cheng, Zhou Huazhen, Chen Lei, et al. The pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland fertilizer [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (7): 1266-1273. (in Chinese))
- [22] 杨旺鑫,夏永秋,姜小三,等.我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估算[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (2): 319-325. (Yang Wangxin, Xia Yongqiu, Jiang Xiaosan, et al. Influencing factors and estimation of total phosphorus runoff from farmlands in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (2): 319-325. (in Chinese))
- [23] 李曦亭,王磊之,商守卫,等.流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52 (2): 12-18. (Li Xiting, Wang Leizhi, Shang Shouwei, et al. Flood-waterlogging feedback effects under changing operation conditions and dispatching of flood control projects at basin, regional and urban scales [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52 (2): 12-18. (in Chinese))
- [24] 安莉娜,范国福,吴迪,等.基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51 (2): 35-41. (An Lina, Fan Guofu, Wu Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51 (2): 35-41. (in Chinese))
- [25] 赵振江,曾广泉,丁继辉.濉汴河灌区适宜水面率分析[J]. *水利建设与管理*, 2023, 43 (8): 65-70. (Zhao Zhenjiang, Zeng Guangquan, Ding Jihui. Analysis of suitable water surface ratio of Suibianhe Irrigation Area [J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2023, 43 (8): 65-70. (in Chinese))
- [26] 刘子萌,贺新光.长沙市水体冷岛效应的季节变化及其影响因素[J]. *遥感信息*, 2022, 37 (5): 85-92. (Liu Zimeng, He Xinguang. Seasonal variations of water cooling island effect in Changsha City and its influencing factors [J]. *Remote Sensing Information*, 2022, 37 (5): 85-92. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-08 编辑:胡新宇)