

冯畅,陈伟康,黄悦等. 湘江流域典型河段河流健康评价研究[J]. 人民珠江, DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

湘江流域典型河段河流健康评价研究

冯畅¹, 陈伟康², 黄悦¹, 杨柳^{1*}, 符云娜¹

(1. 衡阳师范学院地理与旅游学院, 湖南 衡阳 421002; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 河流健康评价是了解河流健康状况的重要手段,也是河流生态系统可持续发展的基本前提。本研究针对湘江流域典型河段长沙段,构建了以面板数据为主、以遥感数据为主、耦合面板和遥感数据3种河流健康评价模式,通过模式对比分析,从河流水质、水量、生物、物理结构和社会服务五个方面评价分析了湘江长沙段的河流健康状况。结果表明:①湘江长沙段以面板数据为主、以遥感数据为主、耦合面板与遥感数据3种模式的河流健康评价结果分别为84.49、75.73和80.29,不同模式得到了不同的评价结果,耦合面板与遥感数据的河流健康评价模式更为合理;②在耦合评价模式中,湘江长沙段整体上处于健康状态,但仍有部分指标处于不健康状态或病态。其中水体透明度、藻类、湿地变化率、鱼类保有指数和岸边土地利用类型是影响研究区河流健康的制约性因素。研究成果能够在一定程度上为湘江长沙段的河流健康管理和规划提供参考。

关键词: 河流健康评价;面板数据;遥感数据;典型河段;湘江流域

中图分类号: X824;TV213.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9235(XXXX)XX-0001-11

河流具有供水、输沙、防洪和涵养水源等多种生态系统服务功能,这些功能推动了人类社会的发展,同时河流本身也具备经济、社会以及环境价值^[1]。随着社会经济快速发展,许多河流出现了水量锐减、环境污染和生态破坏等问题^[2],这不仅影响了河流的经济与社会服务功能,还损害了河流的健康发展。因此,河流健康评价得到了广泛重视和研究^[3]。

河流健康评价是开展河流生态修复、水资源保护的基本前提,需要结合河流生态系统的复杂性和多样性,采用综合评价和定量分析的方法,全面客观地反映河流生态系统的健康状况。评价指标包括水文、水质、生物、栖息地等多个方面,通过建立包含物种数量、组成、生态系统等指标的评价体系,来综合评价河流健康状态^[4-5]。美国、英国、澳大利

亚和南非等许多国家或地区^[6-8]已经建立了相对成熟的河流健康评价理论和体系,如Schofield^[9]等认为河流健康是指河流具有生态多样性及生态功能完整性等特征,Meyer^[10]等认为河流的健康不仅应包括其生态价值,还应包括其社会价值。与此同时,中国许多学者针对长江流域^[11]、黄河流域^[12]干支流等河流健康问题开展了许多相关研究,并从指标选取、评价体系和评估方法等方面^[3-4]积极推动了河流健康评价的研究和发展。在应用指导层面,中国先后发布了《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作)》和《河湖健康评价指南(试行)》^[13]等,用于指导河流健康评价的试点工作,为开展河流健康评价提供了参考依据。

传统河流健康评价指标体系中,主要采用监测点或统计资料等面板数据^[14-15]进行评价,其评价指

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2025JJ50199);湖南省教育厅科学研究项目(25A0491);衡阳市社会科学基金项目(2024D053);教育部大学生创新创业训练计划项目(S202310546003、202510546007);湖南省大学生创新创业训练计划项目(S202510546053)

收稿日期: 2025-12-31 **修回日期:** 2026-01-23

作者简介: 冯畅(1988—),男,博士,副教授,研究方向为流域水文水资源。

通信作者: 杨柳(1986—),女,博士,副教授,研究方向为城镇化下水系适应性及流域防灾减灾。

联系作者: 致信 rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

标及数据来源以河流的面板数据为主,反映的多为具体河段、区域局部或调查信息,可能相对缺乏反映整体河流及相关区域的“面”数据。然而河流健康需要评价流域或区域整体的潜在影响,应当进一步结合覆盖面更广、能够反映河流整体健康状况的遥感数据。通过增加遥感评价指标的比例^[16],并且更好地耦合面板和遥感数据来开展评价,能够使评价结果更为全面,从而更好地反映河流健康状况。

本研究针对湘江典型河段长沙段实际情况,构建了以面板数据为主、以遥感数据为主和耦合面板与遥感数据3种河流健康评价模式,并通过对比分析,评估不同评价模式的优劣势和适用性,最后根据评价结果提出相关建议。以期为河流健康的评价

指标选择提供借鉴,为湘江流域或类似流域的河流健康管理和规划提供参考依据。

1 研究区概况

湘江长沙段位于长沙市辖区(图1),在长沙市(从解放坑南端到霞凝港)全长35.3 km,平均宽度990 m,地表水系发达,有湘江干流及支流浏阳河、捞刀河、圭塘河和靳江河等水系^[17]。研究区属亚热带季风气候,年平均气温约17.5~18.5℃,年均降水量约1350~1450 mm,植被以亚热带常绿阔叶林为主。长沙市位于湘江下游,是湖南省政治经济文化中心,人口密布,经济发达,河流受人类活动影响大,且水生态环境问题日益凸显,因此选取湘江长沙段作为研究区,2021年作为研究期。

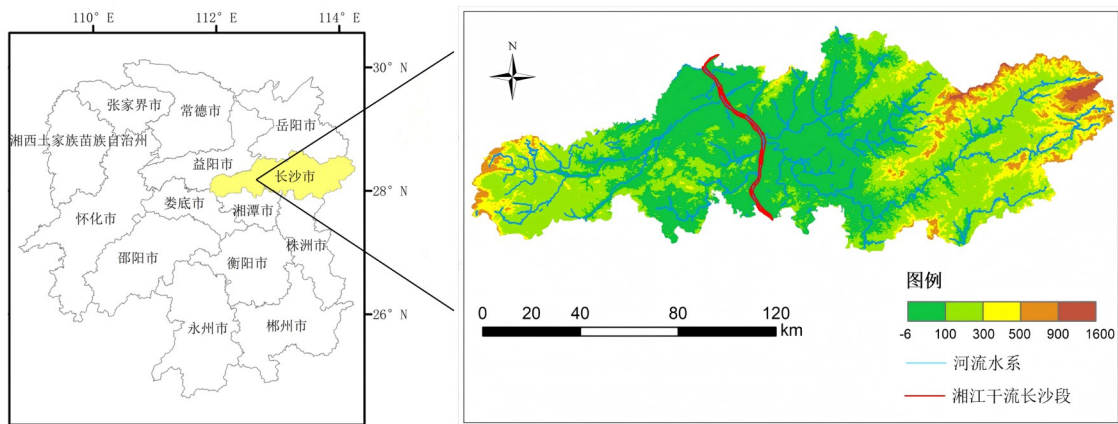


图1 湘江流域长沙段区位

Fig. 1 Location map of the Changsha section of the Xiang River Basin

2 研究方法

2.1 河流健康评价体系构建及数据来源

基于河湖健康评价相关原则^[13]等文献资料和国内外研究现状^[7,18],结合湘江长沙段水生态环境

和社会经济实际情况,综合专家评分结果,构建了以面板数据为主(评价模式1)、以遥感数据为主(评价模式2)、耦合面板与遥感数据(评价模式3)3种河流健康评价指标体系,并优选了不同评价模式下5类准则层和相应指标层(表1)。

表1 湘江长沙段3类河流健康评价指标体系

Tab. 1 Health assessment indicator system for class III rivers in the Changsha section of the Xiang River

准则层 指标分类	指标层 评价指标名称	评价指标内涵及相关说明	评价	评价	评价
			模式	模式	模式
			1	2	3
河流水量	人均用水量①	评价年流域总用水量与年流域总人口的比值		√	

(表1 湘江长沙段3类河流健康评价指标体系续表)

准则层 指标分类	指标层 评价指标名称	评价指标内涵及相关说明	评价	评价	评价
			模式 1	模式 2	模式 3
河流水质	径流变化率①	径流变化率是指在当前开发状态下,评估当年流量占多年平均流量的百分比 ^[17]	√		√
	水资源开发利用 率①	河流的流域地表水资源开发量占水资源总量的比例 $WURI = \frac{WS}{WR} \times 100$; WURI为地表水资源开发利用率,% WS、WR分别为流域内地表水供水量、资源量,万m ³	√	√	√
	湿地变化率②	以2010年湿地统计数据为标准进行对比 ^[19] 湿地变化率=(当前年份湿地面积-2010年湿地面积)/2010年湿地面积		√	√
	水面率②	水面率指的是流域水面面积占流域总面积的比值 $W_p = \left(\frac{A_w}{A}\right) \times 100\%$, W_p 为流域水面率, A_w 为流域水面面积, A 流域总面积		√	√
	水质优劣程度 ①	水质等级评价采用《河湖健康评估指南(试行)》的评价依据和赋分规则	√		√
	水体整洁程度 ①	水体整洁程度根据感官对河流域进行判断,根据嗅觉和味觉、漂浮废弃物中不同状况确定最终得分	√		
	重金属污染①	金属污染是指含有汞、镉、铬、铅及砷等生物毒性显著的重金属元素及其化合物对水的污染。根据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》确定重金属砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)赋分状况	√		√
	面源污染指数 ②	采用耕地所占流域总面积的比例进行替代		√	√
	悬浮物质②	参考GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》对湘江流域长沙段河流悬浮物质浓度进行判别。 $C_{TSS} = 119.62(b3/b2)^{6.0823}$ C_{TSS} 为总悬浮物浓度; $b2$ 和 $b3$ 分别为GF-1 WFV2图像经过辐射校正和大气校正后的第二波段和第三波段图像像元		√	
	水体透明度②	$Z_{sd} = 284.15C_{TSS}^{-0.67}$; Z_{sd} 为透明度		√	√
物理结构	河流连通状况 ②	在衡量河流连通状况时,同时计算单位河长内对其产生影响的建筑物数量,并以此为标准予以评价并打分 ^[17,20]	√	√	√
	河流形态②	河流形态 ^[17] 通过河道改变程度、河道弯曲程度、河岸稳定性三方面进行评价。该指标能更全面地反映出河流物理结构。 $RSr = \frac{RCr + RBDr + RBSr}{3}$; RSr为河流形态总得分; RCr为河岸改变状况得分; RBDr为河岸弯曲状况得分; RBSr为河岸稳定性状况得分	√	√	√
	河岸带植被覆盖程度②	湘江流域长沙段河岸带植被覆盖面积与区域总面积的比值	√		
	河岸带人工干扰程度②	评估人为活动对河流流向、泥沙堆积、健康状况及污染程度的影响,根据扣分制完成赋分		√	√
河流生物	浮游植物多样性生物性指数 ①	$H = -\sum_{i=1}^S (n_i/N) \log_2(n_i/N)$,式中 H 为 Shannon-Wiener 多样性指数; n_i 为种 i 的个体数; N 为个体总数,个/L ^[21]	√		
	浮游动物多样性生物性指数①	$H = -\sum_{i=1}^S (n_i/N) \log_2(n_i/N)$,式中 H 为 Shannon-Wiener 多样性指数; n_i 为种 i 的个体数; N 为个体总数,个/L ^[21]	√		√

(表1 湘江长沙段3类河流健康评价指标体系续表)

准则层 指标分类	指标层 评价指标名称	评价指标内涵及相关说明	评价	评价	评价
			模式 1	模式 2	模式 3
	鱼类保有指数 ①	面板数据——对比评价河流现存鱼类种类与历史鱼类种类的状况 $FOEI = \frac{FO}{FE} \times 100$; FOEI为鱼类保有指数,%; FO为通过调查等方法评估鱼类数量; FE为40 a以前评估河流的鱼类种类数量	√	√	√
	河岸带植被覆盖率②	湘江流域长沙段河岸带植被覆盖面积与区域总面积的比值		√	√
	藻类(以监测的叶绿素 a 浓度为计)②	$C_{chl-a} = 4.089(b4/b3)^2 - 0.746\left(\frac{b4}{b3}\right) + 29.733$		√	√
	河流法治建设 ①	河流法治建设从河流开发、治理和保护政策的完备性和法制保障的力度出发,对河流法治建设水平进行定性评价	√		√
	游憩及文娱活动设施①	从游憩及文娱活动设施数量角度出发判断河流社会服务功能 ^[22]	√		√
社会服务功能	公众满意度①	面板数据——利用公众调查方法评价公众对于河流水量水质、水生态环境和涉水景观等的满意程度,并通过调查表格的分数取平均值进行赋分 ^[20]	√	√	√
	岸边土地利用类型②	表示河岸带附近各种土地利用状况,单个土地利用类型得分=各土地类型面积/河岸带总面积*单个土地利用类型分值 ^[23]		√	
	水功能区达标率②	选用WCI水质模型对流域内黑臭水体进行判断 水功能区达标率=非黑臭水体/流域总面积		√	√
不同评价模式选用的评价指标总计			15	15	20

注:①表示该评价指标为面板数据;②表示该评价指标基于遥感数据,通过反演或计算而得;“■”表示纵向对应的评价模式选取了横向对应的评价指标。

一是以面板数据为主的河流健康评价指标体系。面板数据也称为“平行数据”,它是收集不同时间尺度以及不同空间截面上的数据构成的数据集^[14-15],可以通过统计年鉴、文献资料等获取。由于面板数据获取方便,它在地理学、经济学等学科广泛应用。选取并建立了与面板数据相关的15个指标层(其中河流形态、河流连通状况和河岸带植被覆盖程度3个评价指标采用遥感数据)。二是以遥感数据为主的评价指标体系。选取并建立与遥感数据反演和计算相关^[16]的15个指标层(其中公众满意度、鱼类保有指数、水资源开发利用3个指标采用面板数据)。三是耦合面板与遥感数据的评价指标体系。该模式通过权衡并耦合两类数据,一方面可以利用面板数据的灵活性和局部准确性,另一方面可以体现遥感数据的全面性和完整性,使得评价结果更为合理。因此,选取与面板和遥感数据相关

的20个指标层(评价指标包括9个面板数据和11个遥感数据)。

3类河流健康评价指标的原始遥感影像数据来自中国科学院地理空间数据云2021年高分一号WFV、2021年Landsat8影像数据、Globeland30的2010、2020年全球土地分类数据,以及欧空局哥白尼数据中心的2021年Sentinel-2影像数据等。其中,与遥感数据相关的评价指标,如悬浮物质、水体透明度、藻类(以监测的叶绿素a浓度为计)、河流形态、河流连通状况、湿地变化率等的基本原始遥感数据,通过ENVI波段运算和水质反演模型等方法解译和计算而得。河流健康评价的面板数据是基于长沙市2021年统计年鉴、水资源公报和相关文献及数据资料而得。

2.2 河流健康评价指标权重与评价标准

以面板数据为主和以遥感数据为主的河流健

康评价指标均通过分段线性赋分法将监测、统计或计算而得的评价指标值转化为0~100的得分。例如,“水资源开发利用率为20%、30%、40%、50%和60%时,分别对应赋分100、80、60、40和0分,即当其值小于等于20%时得100分,处于20%~30%时按线性插值得分从100~80分,大于等于60%时得0分;而对于“水体整洁程度”等定性指标,则依据明确的描述性等级(如“无漂浮废弃物”至“有大量成片的漂浮废弃物”)直接对应100、80、60、40、0分。然后,结合湘江长沙段现状分析和专家评价打分情况,基于YAAHP和SPSS软件,运用AHP(Analytic Hierarchy Process)层次分析法^[24]的主观权重和熵权法^[20]的客观权重相结合的综合权重计算方法,确定各指标的重要性标度赋值矩阵,计算不同评价模式下准则层、指标层的综合权重值。通过上述计算,评价模式1的河流水量、水质、物理结构、生物和社会服务功能5个准则层的综合权重分别为0.265、0.173、0.140、0.198和0.224;评价模式2各准则层的综合权重为0.180、0.161、0.144、0.230和0.285。评价模式3各准则层的综合权重为0.187、0.184、0.161、0.212和0.256。参考《河湖健康评估技术导则(SL/T 793-2020)》等数据资料^[13],并根据研究区河流健康评价状况,确定了本研究的河流健康评价等级(表2)。

3 结果分析

3.1 湘江长沙段河流健康评价结果与对比分析

湘江长沙段评价模式1、2和3在研究期的河流健康评价结果为84.49、75.73和80.29分(表3),各

表2 河流健康评价等级

Tab. 2 The river health assessment levels

等级	类型	赋分范围	说明
D1	理想状态	>80~100	与预期目标接近
D2	健康状态	>60~80	与预期目标相差较小
D3	不健康状态	>40~60	与预期目标相差较大
D4	病态	0~40	与预期目标相差大

评价指标得分见图2—4。由此可见,不同模式的评价结果(评价得分和等级)存在一定差异。一是以面板数据为主的评价结果相对最好,表明以面板数据为主的评价模式可能存在高估研究区河流健康的情况。这是由于面板数据大多采用监测数据或统计资料获取河流健康状况,可能增加了监测点选取、抽样统计对象或区域对评价结果的影响比重,例如水质监测点选在人类活动影响较小的河段,则可能显示河流健康状况较好。二是以遥感数据为主的评价结果相对较低,表明以遥感数据为主的评价模式有可能低估研究区河流健康状况。这可能是因为遥感技术将健康状况较差的河段或存在变异的点均纳入考量,从而使整体评分下降。但遥感数据在局部关键区域的精度和误差、在评价统计的解释意义和重要性判定上有着局限性,需要进一步耦合面板数据。三是耦合面板和遥感数据的评价结果介于不同评价模式之间。通过平衡并耦合不同来源数据,既保留了面板数据的灵活性和局部准确性,又反映了遥感数据的全面性,这在一定程度上可以提高评价结果的合理性。

表3 湘江长沙段的河流健康评价结果

Tab. 3 River health assessment results for the Changsha section of the Xiangjiang River

河流健康评价模式	河流水量	河流水质	物理结构	河流生物	社会服务功能	评价总分	评价等级
评价模式1	22.51	16.69	12.18	13.94	19.16	84.49	D1(理想状态)
评价模式2	15.31	12.35	16.34	14.06	17.67	75.73	D2(健康状态)
评价模式3	15.83	16.30	13.25	14.60	20.31	80.29	D1(理想状态)

3.2 以面板数据为主的河流健康评价结果

在评价模式1下,湘江长沙段的河流健康状况

整体趋向于D1理想状态,多项评价指标表现较好,尤其重金属污染状况和水质优劣程度已处于达标

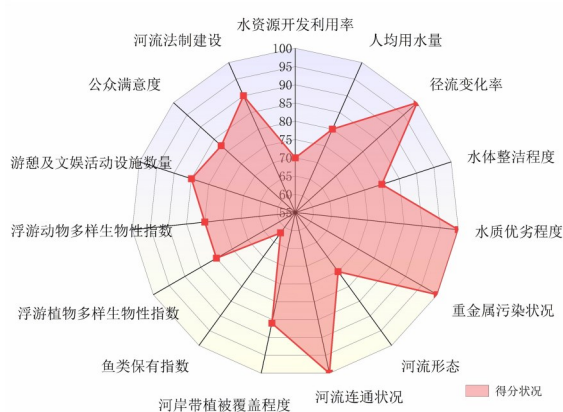


图2 以面板数据为主的河流健康评价结果

Fig. 2 Results of river health assessment based primarily on panel data

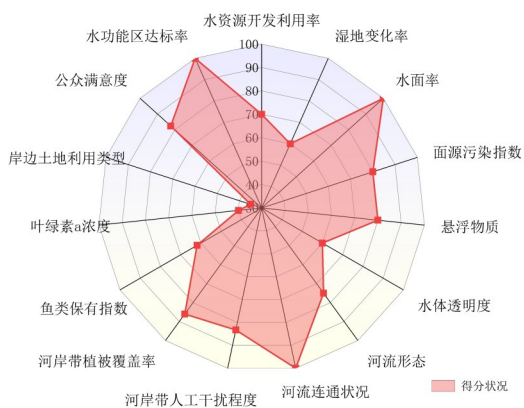


图3 以遥感数据为主的河流健康评价结果

Fig. 3 River health assessment results based primarily on remote sensing data

或理想状态。有色金属冶炼是湖南省重要产业之一,河流重金属污染问题一度成为湘江的关注热点,评价结果反映出近十多年湘江流域加强了河流重金属和水质治理^[25],且成效显著。

但是鱼类保有指数等指标显示河流健康仍存在一些弊病。鱼类保有指数已接近于D3不健康状态或亚健康状态,这反映出人类活动干扰(如水利工程建设、河流形态改造)可能间接影响并破坏了水生生境。一方面,流域水利工程建设改变了河流水系连通,导致水域环境的破碎化。至2021年,湖南省共建成并运行水库13 737座^[26],水利设施建设会阻碍湘江鱼类洄游通道,并通过改变水文

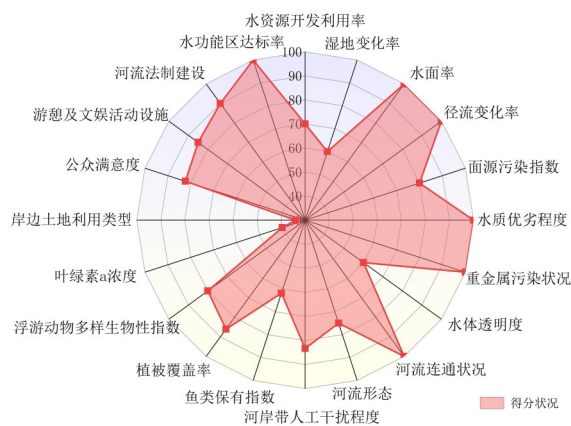


图4 耦合面板与遥感数据的河流健康评价结果

Fig. 4 River health assessment results from coupled panel and remote sensing data

情势和水质相关要素,间接影响区域的水生生态系统,以及鱼类的组成和数量。另一方面,人类过度捕捞和破坏鱼类栖息地(如城镇化建设、河流形态改造)等行为,对鱼类繁殖等产生了负面影响,导致当地鱼类资源进一步减少。从长远来看,随着2020年开始推进实施《长江十年禁渔计划》,鱼类种类和数量有望得到保护和恢复,未来鱼类保有指数的评分有望逐渐提高。

3.3 以遥感数据为主的河流健康评价结果

评价模式2显示湘江长沙段整体趋向于D2健康状态,部分指标表现良好,但湿地变化率、水体透明度和鱼类保有指数处于D3不健康状态,尤其是藻类(以监测的叶绿素a浓度为计)、岸边土地利用类型已处于D4病态。可见,以遥感数据为主与以面板数据为主的评价结果存在明显差异,评价模式2识别湘江长沙段存在一些新的限制性因素和河流健康问题。

a)湿地变化率。湿地对于环境污染物具有较强的净化作用,以及重要的生态功能和价值,是河流健康评价的重要指标。研究区2010—2020年湿地面积逐渐减小,共减少了6.73 km²,削减约51%。一方面近十年长沙城市化水平不断提升,建设用地增长762.31 km²,导致原本的湿地被侵占。另一方面人类活动对湿地的不合理利用等间接影响,使得

湿地超过了自身的承受能力,从而导致湿地萎缩。例如2021年研究区水土流失面积约946 km²,湿地的泥沙沉积物及岸边的泥沙淤积,是湿地萎缩的重要影响因素。

b) 水体透明度。结合2021年GF-1号遥感数据和水体透明度反演模型,计算得到湘江长沙段水体透明度的均值为10.28 cm(图5),属于较差的范围,

但河流中心受影响较小,水体透明度相对较高。一般而言,河流中的悬浮物质较小、较细则水体透明度较高,反之则较差^[27]。长沙市作为省会城市,人口高度集聚、生活和工业干扰加剧,导致河流水体悬浮物质增加,是2021年水体透明度相对较差的可能原因。

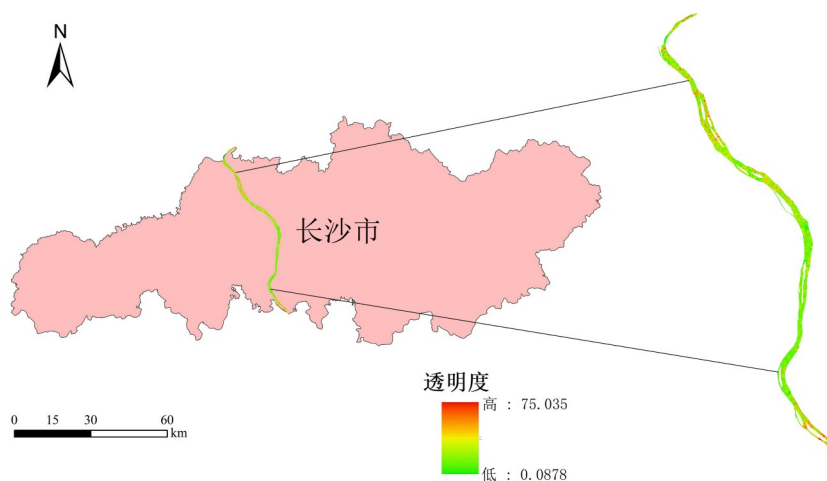


图5 湘江长沙段水体透明度

Fig. 5 Water transparency of the Xiang River in the Changsha Section

c) 藻类(以监测的叶绿素 a 浓度为计)。基于2021年GF-1号遥感数据和叶绿素 a 浓度反演模型,得到湘江长沙段叶绿素 a 浓度平均值为30.07 mg/m³,该指标已处于D4病态。一方面,城市废水、生活污水和农业面源污染^[28]是造成水体富营养化和藻类生长的重要原因。尽管2010—2020年长沙市耕地面积减少211.97 km²,区域化肥施用量有所降低,但湘江中上游的农业面源污染等排放对下游长沙段的叶绿素 a 浓度产生了重要影响。另一方面,水利工程建设等人类活动引起的水动力条件变化加剧了藻类聚集从而导致叶绿素 a 浓度升高;部分支流河段的局部河段水体富营养化,可能进一步影响干流河道;极端气候事件如高温热浪等提高了水体富营养化及藻类暴发的偶发风险。因此,湘江长沙段应该进一步重视叶绿素 a 浓度及其水体富营养化和藻类聚集问题。

d) 岸边土地利用情况。以研究区河流为中心

建立了3 km的缓冲区(图6),该指标评分仅35分,处于D4病态。这反映出长沙段两岸土地利用可能不利于河流健康的可持续发展,在河流缓冲区内主要土地类型为建设用地42.6%和耕地19.8%,而林地、草地和湿地等面积比例相对较小,生态用地较少是该指标得分较低的主要原因。随着城市人口集聚和社会经济发展,以及长沙市加快投入旅游资源和休闲娱乐等第三产业,使得建设用地和生产生活用水需求增加,导致生态用地面积萎缩、被侵占或转换成为建设用地^[29]。随着长株潭城镇化进程不断加速,短期内岸边生态用地仍可能继续减少,因此在湘江长沙段河流健康管理中应重点关注岸边土地利用规划。

3.4 耦合面板和遥感数据的河流健康评价结果

对比3种河流健康评价模式,评价模式1能够较好反映统计数据或河流监测点等基本情况,但可能难以反映河流整体状况的“面”信息,并且部分数

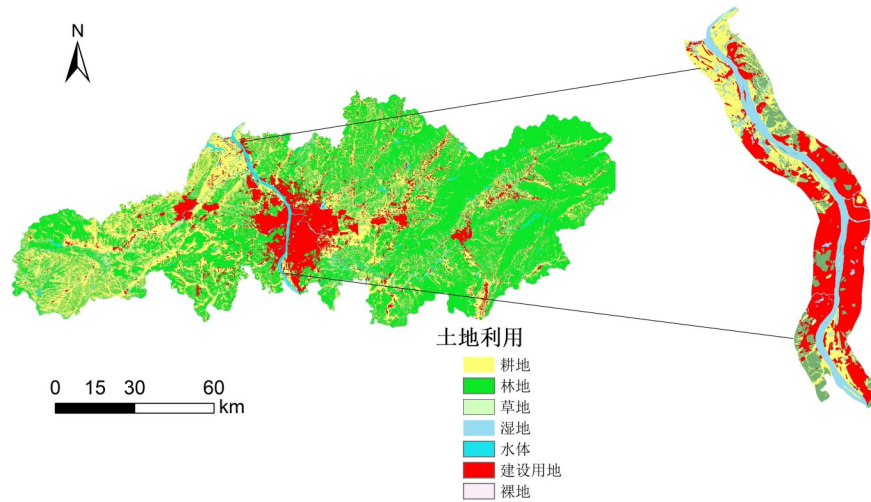


图6 湘江长沙段土地利用分类情况

Fig. 6 Land use classification of the Changsha section of the Xiang River

据如监测点信息在数据获取和共享上可能遇到阻碍,统计数据则可能带有一定统计误差,因此具有局限性。评价模式2通过遥测水体或地物,能够获取河流健康评价所需的地面缺测、难测或未统计数据,可以更为完整地反映河流的整体健康状况,但如果仅考虑遥感数据则可能在河流健康评价的关键“片段”信息上缺少稳健性。耦合评价模式3既包含了面板数据能较准确反映特定地段河流健康状况的特点,同时又包含了遥感数据能反映河流整体状况的优势,将“片段”和“面”信息相平衡与结合,从而可能得到更全面合理的评价结果。

在河流健康评价中,科学合理地选取评价指标及其数据形式尤为重要,基于不同数据计算的评价指标可能得到不同的评价结果。比较表3可知,不同评价模式下不同准则层的评分差异较大。耦合评价模式3相较于评价模式1,在河流水量、水质、物理结构、生物和社会服务功能5项准则层上差异程度分别为-42.2%、-2.4%、8.1%、4.5%和5.7%;评价模式3相比于模式2在5项准则层上差异程度分别为3.3%、24.2%、-2.3%、3.7%和13.0%。由此可见,评价模式3与评价模式1、2在河流水量、水质上评分差异较大,是3类河流健康评价模式产生评价差异的关键点;而在物理结构、河流生物和社会服务上的评分差异较小。这可能是由于对于河流

水量水质,如果仅考虑河流水量水质统计监测等面板数据有可能高估河流健康状况(如评价模式1在水量、水质准则层分别高于评价模式2约47.0%及35.1%),从而忽略了部分河段水质较差或区域水量减少的实际情况。因此,耦合面板与遥感的河流健康评价模式可能更为合理,尤其是与河流水量、水质相关的指标应重点考虑。

3.5 湘江长沙段河流健康的影响因素

不同河流健康评价模式下,处于相对低值区的评价指标存在明显差异,这些低值评价指标是制约河流健康的关键性指标。3种河流健康评价模式下分别有1项(评价模式1)、5项(评价模式2)和5项(耦合评价模式3)评价指标处于亚健康状态、D3不健康状态或D4病态。由此可见,在不同评价模式下可能得到不同的评价结果和制约性影响因素,从而反映出不同的河流健康问题。通过平衡并耦合面板和遥感数据能够更完整、合理地评价河流健康状况,有可能发现一些以往忽视的潜在问题。

从不同评价模式的指标层来看,所有指标中约78%处于健康或理想状态,14%处于亚健康或不健康状态,8%处于病态状况。这表明尽管湘江长沙段的河流生态环境整体上还算稳定,但仍然存在某些结构性异常情况,影响了河流的生态环境功能和服务价值。在耦合评价模式3下,影响湘江长沙段

河流健康的影响因素包括:水体透明度、藻类(以监测的叶绿素 a 浓度为计)、湿地变化率、鱼类保有指数和岸边土地利用类型。其中,岸边土地利用类型指标的评分最低且处于 D4 病态状况,这主要是因为研究区城市建设用地扩张较快(2010—2020 年建设用地面积增长 762.31 km²,2020 年建设用地占到研究区面积的 42.63%),并且部分生态用地被侵占或萎缩(2010—2020 年草地面积减少 102.89 km²,湿地面积减少 6.73 km²,2020 年草地和湿地仅占研究区面积的 5.38%)。这可能对当地河流及河岸附近的生态环境系统造成一定的负面影响,例如水源涵养能力降低,暴雨时更易造成洪涝灾害,从而威胁生态生产乃至生命安全。因此,在所有影响因素中岸边土地利用类型可能是制约湘江长沙段河流健康的主要因素。

4 结论

a)对比分析了以面板数据为主、以遥感数据为主、耦合面板和遥感数据 3 种河流健康评价模式,通过湘江长沙段的案例研究发现,不同河流健康评价模式可能导致不同的评价结果,评价得分由高到低依次为:以面板数据为主(84.49)、耦合面板与遥感数据(80.29)、以遥感数据为主(75.73)。以面板数据为主的评价模式有可能高估河流健康状况,以遥感为主的评价模式可能会低估河流健康状况,平衡并耦合面板与遥感数据的评价模式可能更为合理。

b)湘江典型河段长沙段河流总体上处于健康状态,但也有部分河段、区域或评价指标处于不健康或病态状况。在耦合面板和遥感数据的评价模式下,制约湘江长沙段河流健康的影响因素包括鱼类保有指数、水体透明度、藻类(以监测的叶绿素 a 浓度为计)、湿地变化率和岸边土地利用类型。其中,岸边土地利用类型的空间结构不合理可能是关键制约因素。湘江长沙段的河流健康管理中应当重点关注上述评价指标及河流健康问题。

c)研究虽然从河流水质、水量、生物、物理结构和社会服务 5 个维度构建了 3 种河流健康评价模式,但建立的评价指标体系主要针对湘江流域典型

河段特征,在面板数据评价指标选取、遥感数据评价指标选取,以及评价指标的代表性与普适性方面,仍存在一定的不确定性和局限性。因此,将本研究构建的河流健康评价指标体系应用于其他流域或地区时,可能需要根据当地实际情况进行适用性调整与验证。

参考文献:

- [1] 路旭, 连聆毓, 郭曼曼. 基于生态系统服务流的水生态安全格局构建:以辽河干流为例[J]. 水土保持学报, 2025, 39(5): 290-299.
Lu Xu, Lian Lingyu, Guomanman. Establishing a water ecological security pattern based on ecosystem service flows: a case study of the mainstream of the Liao River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 290-299. (in Chinese)
- [2] Xia Jun, Zeng Sidong, Du Hong, et al. Quantifying the effects of climate change and human activities on runoff in the water source area of Beijing, China [J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2014, 59(10): 1794-1807.
- [3] 刘昌明, 刘晓燕. 河流健康理论初探[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 683-692.
Liu Changming, Liu Xiaoyan. Preliminary exploration of river health theory [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7): 683-692. (in Chinese)
- [4] 钟志云, 刘亚军, 张海发. 廻龙河健康评价及保护对策研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(S2): 13-15.
Zhong Zhiyun, Liu Yajun, Zhang Haifa. Research on health assessment and protection strategies for Huilong River [J]. Pearl River, 2025, 46(S2): 13-15. (in Chinese)
- [5] 董哲仁. 河流健康评估的原则和方法[J]. 中国水利, 2005(10): 17-19.
Dong Zheren. Principles and methods for river health assessment [J]. China Water Resources, 2005(10): 17-19. (in Chinese)
- [6] Wang Shuo, Zhang Qian, Yang Tao, et al. River health assessment: Proposing a comprehensive model based on physical habitat, chemical condition and biotic structure [J]. Ecological Indicators, 2019, 103: 446-460.
- [7] ROWIŃSKI P M, OKRUSZKO T, RADECKI-PAWLIK A. Environmental hydraulics research for river health: recent advances and challenges [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2021, 22(2). DOI:10.1016/j.ecohyd.2021.12.003.
- [8] Zang Chao, Liu Jing, Wang Xin, et al. Evaluating water ecological health in dam-impacted river: A new approach

- framework[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 161. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111998.
- [9] SCHOFIELD N J , DAVIES P E . Measuring the health of our rivers[J]. *Water*, 1996, 23:39–43.
- [10] MEYER J L . Stream Health: Incorporating the Human Dimension to Advance Stream Ecology [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1997, 16(2): 439–447.
- [11] 邹曦, 杨荣华, 杨志, 等. 长江流域典型支流生境健康评价[J]. *水生生态学杂志*, 2021, 42(5): 29–39.
Zou Xi, Yang Ronghua, Yang Zhi, et al. Evaluation of habitat health in typical tributaries of the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Aquatic Ecology*, 2021, 42(5):29–39. (in Chinese)
- [12] 张向徐, 韩美, 徐婷, 等. 黄河干流生态健康评价研究[J]. *地理学报*, 2025, 80(3): 661–677.
Zhang Xiangxu, Han Mei, Xu Ting, et al. Ecological health assessment of the main stem of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(3): 661–677. (in Chinese)
- [13] 河湖健康评估技术导则:SL/T 793—2020 [S].
Technical guidelines for river and lake health assessment: SL/T 793—2020 [S]. (in Chinese)
- [14] 任玉芬, 方文颖, 欧阳志云, 等. 基于面板数据的我国城市水资源水环境随机前沿面分析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(7): 2638–2643.
Ren Yufen, Fang Wenying, Ouyang Zhiyun, et al. Analysis of the stochastic frontier surface for urban water resources and water environment in China based on panel data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(7): 2638–2643. (in Chinese)
- [15] 史可欣. 面板数据地理加权回归模型的研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2022.
Shi Kexin. A study on panel data geographically weighted regression models[D]. Beijing: Minzu University of China, 2022. (in Chinese)
- [16] 曹红业. 基于多源遥感数据的黄河流域地表水与渭河流域河流生态健康状态时空演变分析[D]. 西安: 长安大学, 2023.
Cao Hongye. Spatio-temporal evolution analysis of surface water and river ecological health in the Yellow River Basin and Wei River Basin based on multi-source remote sensing data [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023. (in Chinese)
- [17] 杨柳, 刘丹, 冯畅, 等. 考虑水系三维连通特征的湘江流域洪水风险评价[J]. *地理科学*, 2025, 45(3): 627–639.
Yang Liu, Liu Dan, Feng Chang, et al. Flood risk assessment in the Xiangjiang River Basin considering three-dimensional connectivity characteristics of water systems [J]. *Geographical Science*, 2025, 45(3): 627–639. (in Chinese)
- [18] 张泽中, 张欣宇, 刘旭. 基于CiteSpace的河流健康研究现状与趋势分析[J]. *人民珠江*, 2025, 46(3): 64–72.
Zhang Zezhong, Zhang Xinyu, Liu Xu. Analysis of current status and trends in river health research based on CiteSpace [J]. *Pearl River*, 2025, 46(3):64–72. (in Chinese)
- [19] Chen Hang, , Chen Lihua . Response of runoff variation to the changing environments of karst regions in southwest China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2022, 67(15): 2344–2357.
- [20] 曾雯禹. 基于AHP-熵权法和物元可拓模型的倭肯河干流健康评价研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021.
Zeng Wenyu. Health assessment of the mainstream of the Woken River based on the AHP-entropy weight method and the physical element extensional model [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2021. (in Chinese)
- [21] SHANNON C E , WEAVER W . The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, , 1963.
- [22] 席浩郡, 袁一斌, 咎晓辉, 等. 基于生态完整性和社会服务功能的柏条河-府河河流健康评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(6): 1111–1120.
Xi Haojun, Yuan Yibin, Zan Xiaohui, et al. Evaluation of river health in the Baotiao River - Fuhe River system based on ecological integrity and social service functions [J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2022, 58(6) : 1111–1120. (in Chinese)
- [23] 郑娇琦. 基于RS和GIS的辽河流域生态健康评价[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
Zheng Jiaoqi. Ecological health assessment of the Liao River Basin based on remote sensing and GIS [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015. (in Chinese)
- [24] ESKANDARI S, BEHNAMFAR K, POURGHASEMI H R, et al. Provision of eucalyptus wood farming potential map in Iran: An application of land cover, ecological, climatic, hydrologic, and edaphic analysis in a GIS-based fuzzy AHP framework [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136. DOI:10.1016/j.ecolind.2022.108621.
- [25] 吴佳玲, 毛德华. 湘江流域水体重金属污染及健康风险评价[J]. *人民珠江*, 2023, 44(3): 94–103.
Wu Jialing, Mao Dehua. Heavy metal pollution and health risk assessment of water bodies in the Xiang River Basin [J]. *Pearl River*, 2023, 44(3):94–103. (in Chinese)
- [26] 2021年湖南省水利发展统计公报[A]. 长沙, 2022[2026–01–15]. <https://slt.hunan.gov.cn/>.
2021 Statistical Bulletin on Water Resources Development in Hunan Province [A]. Changsha, 2022 [2026–01–15]. [https://](https://slt.hunan.gov.cn/)

- slt.hunan.gov.cn/. (in Chinese)
- [27] 朱利, 李云梅, 赵少华, 等. 基于GF-1号卫星WFV数据的太湖水质遥感监测[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 113-120.
Zhu Li, Li Yunmei, Zhao Shaohua, et al. Remote sensing monitoring of Taihu Lake water quality based on GF-1 satellite WFV data [J]. Remote Sensing for Land Resources, 2015, 27(1): 113-120. (in Chinese)
- [28] 刘杰, 何云川, 邓建明, 等. 基于贝叶斯网络的太湖叶绿素 a 影响因素分析[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2592-2600.
Liu Jie, He Yunchuan, Deng Jianming, et al. Analysis of factors affecting chlorophyll a in Lake Tai using Bayesian networks [J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2592-2600. (in Chinese)
- [29] 长沙市统计年鉴2021[M]. 北京:中国统计出版社, 2021.
Changsha Statistical Yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021. (in Chinese)

Study on River Health Assessment of Typical River Segments in the Xiang River Basin

FENG Chang¹, CHEN Weikang², HUANG Yue¹, YANG Liu^{1*}, FU Yunna¹

(1. College of Geography and Tourism, Hengyang Normal University, Hunan Hengyang 421002, China; 2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: River health assessment is an important method of understanding the state of a river and is fundamental to the sustainable development of river ecosystems. Traditional river health assessment frameworks primarily rely on panel data, such as monitoring points and statistical records, for evaluation, with indicators and data sources predominantly drawn from these sources. However, this type of data often reflects information from specific sections of the river, localised areas or survey points, and may lack the spatial data required to represent the river as a whole and its associated regions. More effective integration of panel and remote sensing data can provide a more comprehensive evaluation and a more accurate reflection of the actual health status of rivers. In this study, three river health assessment frameworks were applied to the Changsha section of the Xiangjiang River Basin (XRB) respectively based on panel data, remote sensing data, and a coupled approach integrating both types of data. A comparative analysis was conducted to evaluate the health of the Changsha section of the river across five dimensions: water quality, quantity, biology, physical structure and social services. This analysis yielded specific recommendations. The results show that: ① The river health assessment scores for the Changsha section of the XRB were 84.49, 75.73 and 80.29 under the panel-based, remote sensing-based and coupled frameworks, respectively. Different frameworks yielded different results, as approaches relying on either panel or remote sensing data alone may over- or underestimate the actual river health status. The coupled framework, which synthesises both panel and remote sensing data, is likely to provide a more balanced assessment. ② Under the coupled assessment framework, the overall health status of the Changsha section of the XRB is rated as healthy, while certain river segments, localised areas or specific indicators remain sub-healthy or unhealthy. The primary factors influencing river health in the study area include water transparency, algal biomass (as indicated by chlorophyll-a concentration), the rate of wetland change, the fish retention index and the types of riparian land use. Among these, an unreasonable spatial configuration of riparian land use may be a key constraint. Therefore, when managing river health in the Changsha section of the Xiangjiang River, particular attention should be paid to the aforementioned indicators and associated health issues. The findings of this study provide insights into the selection of assessment indicators for river health studies and offer a reference for the management and planning of river health in this region in the future.

Keywords: river health assessment; panel data; remote sensing data; typical river section; Xiangjiang River Basin

(责任编辑:向 飞)