

九曲溪流域景观格局演变对水质的影响及 差异化保护策略

周 雄^{1,2}, 张嘉宏³, 郑 芳^{4,5}, 郑 融⁵, 苏 凯^{1,3}, 林春欣⁶, 范水生³

(1. 福建农林大学安溪茶学院; 2. 福建卫生职业技术学院; 3. 福建农林大学乡村振兴学院;
4. 福建农林大学国际菌草学院; 5. 福建农业职业技术学院; 6. 闽侯县人民政府办公室)

摘要:为揭示南方丘陵山地流域景观格局演变对水质的影响,基于武夷山九曲溪流域的水质监测数据,运用景观格局指数和 InVEST 模型解析了景观要素特征和景观异质性的时空演变及其与水质指标的响应关系,并评估了水源涵养与水质净化服务的时空分异性。结果表明:研究区植被以针阔混交林、常绿阔叶林和竹林为主,景观多样性较低,水质呈上游优、中下游劣的格局;2010—2020 年茶园面积扩大,景观破碎度上升,水质指标恶化,景观破碎度与粪大肠菌群、悬浮物呈显著负相关关系;InVEST 模型模拟结果显示上游单位面积水源涵养量增加,中游为氮磷污染核心区。建议强化全流域生态监测与数字化管理,保护天然植被;针对上中下游进行差异化保护,上游严格生态红线,中游管控农业面源污染,下游完善城市雨洪管理系统。

关键词:景观格局;InVEST 模型;水质响应;差异化保护策略;九曲溪流域

Impacts of landscape pattern evolution on water quality in the Jiuqu Creek Basin and differential protection strategies//Zhou Xiong^{1,2}, Zhang Jiahong³, Zheng Fang^{4,5}, Zheng Rong⁵, Su Kai^{1,3}, Lin Chunxin⁶, Fan Shuisheng³
(1. Anxi College of Tea Science, Fujian Agriculture and Forestry University; 2. Fujian Health College; 3. College of Rural Revitalization, Fujian Agriculture and Forestry University; 4. International College of Junciao Science, Fujian Agriculture and Forestry University; 5. Fujian Vocational College of Agriculture; 6. General Office of Minhou County People's Government)

Abstract: To reveal the impact of landscape pattern evolution in the hilly mountainous regions of Southern China on water quality, this study analyzed the spatiotemporal changes in landscape element characteristics and landscape heterogeneity, as well as their response relationships with water quality indicators, using landscape pattern indices and the InVEST model based on water quality monitoring data from the Jiuqu Creek Basin in Wuyi Mountain. The spatiotemporal differentiation of water source conservation and water purification services were also be assessed. The results indicate that the vegetation in the study area is primarily composed of mixed coniferous and broad-leaved forests, evergreen broad-leaved forests, and bamboo forests, with relatively low landscape diversity. The water quality exhibits a pattern of superior conditions in the upstream and deteriorating conditions in the mid-to-lower reaches. From 2010 to 2020, the area of tea gardens expanded, landscape fragmentation increased, and water quality indicators deteriorated. Landscape fragmentation was significantly negatively correlated with fecal coliforms and suspended solids. The simulation results of the InVEST model show that the upstream unit area water conservation capacity increases, and the middle reaches are the core area of nitrogen and phosphorus pollution. It is suggested that ecological monitoring and digital management throughout the entire watershed to protect natural vegetation should be strengthened. Differentiated protection should be implemented for the upstream, midstream, and downstream, with strict ecological red lines in the upstream, control of agricultural non-point source pollution in the midstream, and improvement of urban stormwater management systems in the downstream.

Key words: landscape pattern; InVEST model; water quality response; differential protection strategies; the Jiuqu Creek Basin

景观格局与生态过程的互动机理是景观生态学的核心研究命题^[1],也是当今景观生态学的核心领

域之一^[2-3]。广义的景观格局指不同形态和大小的景观要素在空间上的组合,涵盖斑块类型、数量、空

基金项目:福建省财政科教专项项目(K8119A01A);特色现代农业“产业小院”的科技集成与机制项目(K8120K01a)

作者简介:周雄(1976—),男,教授,硕士,主要从事农村区域发展、生态管理与绿色经济研究。E-mail:zhouxiong@fjwzy.edu.cn

通信作者:范水生(1977—),男,教授,博士,主要从事农村区域发展、生态管理与绿色经济研究。E-mail:348694206@qq.com

间配置及时空动态特征,既是景观异质性的空间映射,也是气候、地形、植被与人类活动等多尺度生态过程交互作用的结果^[4-5];狭义上则表现为大小、形状及性质各异的景观要素(如林地、茶园、耕地)在空间上的镶嵌组合形式^[6]。景观格局不仅是景观异质性的综合体现与直观映射,更通过调控物质流、信息流、能量流等传输路径^[7],成为陆地生态系统与水生生态系统至关重要的纽带,对河流汇水区的水质演变产生显著影响^[8-9],同时决定着水源涵养、水质净化等生态功能的发挥程度^[10]。在我国社会经济快速发展的背景下,污染物大量排入水体,导致水体水质下降,可用水资源减少^[11]。因此,深入解析景观格局的时空演变特征,有助于揭示自然与人为干扰下景观要素的重组规律^[12],评估生态系统稳定性具有重要意义。

部分研究者聚焦于景观格局与水质的多尺度响应机制,如韩黎阳等^[13]发现三峡库区内土地利用驱动的景观破碎化程度可显著解释河流水质指标的空间变异;谈娟娟等^[14]引入景观生态健康的概念,基于景观生态学的视角构建景观结构与过程或现象的关联,借助对景观生态环境现状的评估反映了流域景观生态结构和功能的健康状况;王明浩等^[15]基于 Landsat 8 OLI 数据从斑块与景观双水平分析景观格局指数与水质的相关性,揭示了不同景观要素的污染贡献差异;张大伟等^[16]则指出区域景观格局与水质显著相关,其中香农多样性指数、香农均匀度指数与污染指标呈负相关关系,蔓延度指数与污染指标呈正相关关系,凸显景观连通性对污染物扩散的调控作用;McDonnell 等^[17]指出土地利用的空间配置特征(如斑块离散度、密度)是解析水质-水文过程的关键;欧洋等^[18]梳理了多种景观格局与水质关系的研究方法,并指出基于多空间尺度的自然地理特征来划分景观单元是当前主要研究思路;Sliva 等^[19]证实了城镇用地扩张与林地缩减对水质的协同影响;郭玉静等^[20]利用多年 Landsat 影像和水质数据,通过 Spearman 分析,发现普者黑湖滨带的景观格局对水质的影响随缓冲区距离减小而增强;胡和兵等^[21]从类型与景观双水平发现流域内多数景观类型与 NH_4^+-N 、TP、TN 等水质指标显著相关;池明^[22]基于苏子河流域证实水质主要指标与景观格局指数存在不同程度相关性;谢雨欣等^[23]剖析了长江流域不同距离缓冲区土地利用类型及土地覆被景观格局与河流水质间的关联,结果表明边缘密度与污染物浓度呈正相关关系,而聚合度与污染物浓度呈负相关关系。这些研究共同表明,景观格局通过调控土地利用类型的空间分布与人类活动强度,成为驱动河流

水质变化的核心生态因子^[24]。然而,现有研究仍存在以下局限:①区域尺度的特异性不足,多集中于单一功能区(如库区、城市流域),缺乏对兼具自然与文化遗产价值区域的针对性分析;②时空动态与生态服务的耦合缺失,多聚焦景观格局对水质的单向影响,较少结合水源涵养、水质净化等生态服务的时空分异特征进行分析;③差异化保护策略的科学支撑不足,尚未形成基于景观格局演变规律的精准化管理方案。

武夷山作为我国“三屏四带”国家生态安全战略的重点区域,是国家级风景名胜区和世界自然与文化双遗产地核心区域,旅游业发达且人类活动频繁。其核心水系九曲溪发源于西部森林茂密区,九曲溪生态保护区林种丰富且破碎度较高^[25],近年来,九曲溪流域内人类活动加剧,2010—2020 年茶园面积扩张 133%,景观破碎度上升 25%,TP 等核心水质指标同步恶化,景观格局与水质的矛盾日益突出。

鉴于此,本文基于 2010 年和 2020 年武夷山九曲溪流域的水质监测数据,运用景观格局分析和 InVEST 模型等方法,解析林地、茶园等景观要素的时空演变特征,量化其与水质指标的响应关系,评估水源涵养与水质净化服务的时空分异,以期为世界双遗产地的生态管理提供“格局-过程-服务”的综合调控路径。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

武夷山市地处福建省西北部、闽赣两省交界处,地理坐标为 $27^{\circ}32'36''\text{N}\sim 27^{\circ}55'15''\text{N}$ 、 $117^{\circ}24'12''\text{E}\sim 118^{\circ}02'50''\text{E}$,西邻光泽县,南接建阳区,东连浦城县,北与江西省铅山县毗邻,面积为 $2\,798\text{ km}^2$ 。武夷山市境内水网密布,是建溪水系的上游,崇阳溪、黄柏溪和九曲溪 3 条河流均发源于此,形如树枝般延伸。九曲溪为武夷山风景区的核心河流,发源于桐木关,流经中部生态保护区与东部丹霞地貌,以“九曲风光”为核心特色,具有极高的生态价值(完整的中亚热带原生性森林生态系统)与文化价值(千年茶文化与人文景观),最终在武夷宫汇入崇阳溪^[26]。九曲溪全长约 62.8 km ,景区段长约 9.5 km ,流域面积为 534.3 km^2 ,景区段面积为 18.3 km^2 (图 1)。该河流的河床坡降大,水流湍急,从桐木关(海拔约 $1\,200\text{ m}$)至三港(海拔约 760 m)段比降为 0.05 ,三港至黄竹垌(海拔约 350 m)段比降为 0.03 ,黄竹垌至武夷宫(海拔约 200 m)段比降为 0.005 。

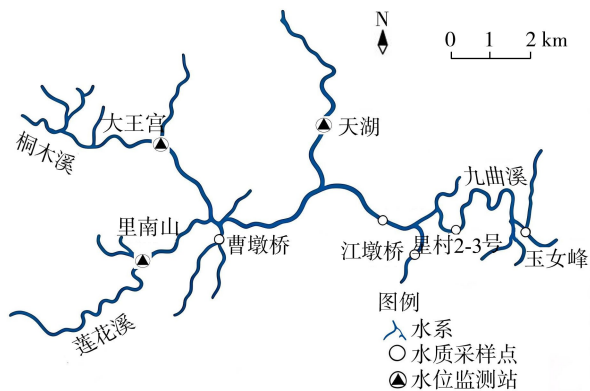


图1 九曲溪流域水系分布

Fig. 1 Water system of the Jiuqu Creek Basin

1.2 数据来源

采用武夷山自然保护区边界矢量文件(.shp格式)确定研究区范围和空间分析基准。采用2001年编制的1:200 000《武夷山自然保护区植被分布图》(.jpg格式)作为植被景观分类的基础图件,该图依据植被群落结构、优势物种组成及景观形态特征,将植被划分为针阔混交林、常绿阔叶林、竹林等9类(图2)。其中,针阔混交林、常绿阔叶林、竹林以及针叶林构成了流域内最主要植被类型,面积占流域总植被的90%以上;中山草甸用于反映高海拔区域的植被特征;茶园未单独列类,归属于人工植被范畴;落叶阔叶林面积积极小、零星分布,合并入常绿阔叶林类别。土地利用类型分布数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)(.tif格式)。利用《武夷山国家公园总体规划(2023—2030年)》提供功能区划和管理现状等基础信息。空间数据通过ArcGIS 10.2软件进行数字化处理和空间分析,为景观格局分析提供支撑。

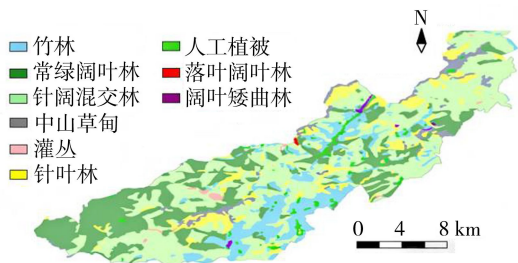


图2 九曲溪流域植被类型

Fig. 2 Vegetation type of the Jiuqu Creek Basin

2 研究方法

2.1 水质指标监测

溶解氧(DO)采用HACH HQ40d便携式溶解氧仪测定;化学需氧量(COD_{Mn})依据GB 11892-89《水质高锰酸盐指数的测定》使用沸水浴加热-高锰酸钾氧化法测定;采用HJ 505—2009《五日生化需氧量

(BOD₅) 稀释与接种法》测定BOD₅(型号:WTW OxiTop © IS6);采用GB 11893-89《钼酸铵分光光度法》测定TP(型号:Shimadzu UV-2600);粪大肠菌群(F_c)依据HJ/T 347—2007《多管发酵法》,使用恒温培养箱(型号:Thermo Scientific Heratherm OGS 160)培养计数;pH值通过pH计(型号:Mettler Toledo FiveEasy Plus FE28)测定;悬浮物(SS)依据GB11901-89《水质悬浮物的测定重量法》,采用0.45 μm混合纤维素滤膜过滤后,103~105℃烘干至恒重称量测定。

沿九曲溪流域上中下游布设5个监测断面(曹墩桥、漫水桥、星村2-3号码头、江墩桥、玉女峰),具体位置如图3所示,采样点均位于河道中泓线,水深1.0 m处,每个断面采集3个平行样,混合后测定平均值以减少误差。2010—2020年每季度(3月、6月、9月、12月)采集水样,采样时间为每月上旬(5—10日),确保覆盖丰水期(6—9月)与枯水期(12至次年3月)的水质变化特征。

应用ArcGIS软件进行分析,基于提取的九曲溪流域边界,结合九曲溪流域的数字高程模型(DEM),进行水流方向的确定、汇水区域积累量的计算以及河流网络的构建。参考张玉等^[27]的九曲溪流域水环境监测断面布设方案划分九曲溪流域的子流域(图3)。

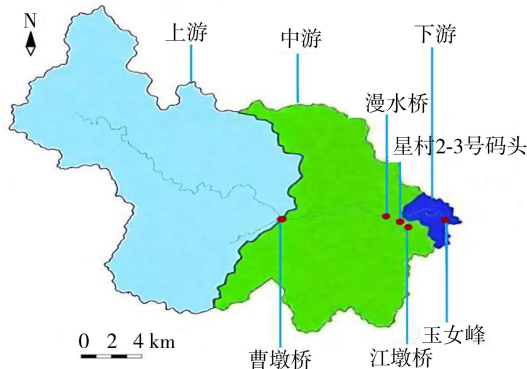


图3 子流域的划分及监测点分布

Fig. 3 Sub-basin division and monitoring point distribution

2.2 景观格局量化

利用两类指标量化景观格局:景观要素特征指标包括斑块数量 N_p 、斑块面积 A_p 、斑块周长 E_p ;景观异质性指标包括斑块密度 P_D 、分维数 F_D 、破碎度 D_p 、聚集度 C 、景观形状指数(LSI)、最大斑块指数(LPI)、香农—维纳多样性指数 H 、香农—维纳均匀度指数 E ^[28]。其中,斑块密度指单位面积内的斑块数量,数值越大代表景观破碎化程度越高;分维数表征景观斑块及整体格局的复杂程度,理论取值范围为1.0~2.0,数值越高则景观格局越复杂;破碎度聚焦景观斑块的分割特征与空间结构复杂性,数值越

大表明景观破碎化程度越高,斑块稳定性越弱;聚集体度反映不同景观类型的团聚水平,是描述景观空间分布的关键指标,数值较高时景观由团聚分布的少量大型斑块构成,数值较低时则由零散分布的小型斑块组成;景观形状指数刻画景观斑块的形状不规则程度与边缘效应,数值越大表示斑块形状越复杂;最大斑块指数指最大斑块面积占景观总面积的比例,表征优势斑块的主导程度,数值越高代表景观优势度越明显;香农多样性指数用以揭示区域内景观类型分布的复杂化与均匀化程度,突出稀有景观类型斑块的信息贡献,数值越大说明景观要素类型越丰富;香农均匀度指数为香农多样性指数与给定景观丰富度下的最大多样性指数(假设所有景观类型均匀分布)的比值,反映不同景观类型在空间上的分布均匀性。

2.3 基于 InVEST 模型的水生态系统服务评估

InVEST 模型是由斯坦福大学、大自然保护协会等机构联合开发的生态系统服务量化评估模型^[29],以栅格数据为基础,可实现对多种生态系统服务的空间化、量化核算与权衡分析。该模型通过整合土地利用、气象、土壤、地形等数据,能够精准模拟水源涵养、水质净化、土壤保持、碳储存、生境质量等关键生态系统服务功能,具有数据需求适中、空间表达直观、适用性强等优势。本文的水源涵养服务评估基于 InVEST 模型的年产水量模块进行,该模块依据水量平衡的原理,考虑降水、蒸散发等关键水文因素,可以评估不同土地利用类型的水源涵养能力;水质净化服务评估基于 InVEST 模型的养分输送比模块进行,将水文传输过程与土地利用空间特征进行整合,以此量化流域内氮、磷非点源污染物的产生、迁移与输出负荷^[30]。

2.4 综合污染指数计算

参考关伯仁^[31]的研究,结合特定水环境功能区的水质标准计算综合污染指数:

$$I_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{pi} \tag{1}$$

其中

$$I_{pi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{\rho_{si}}$$

式中: I_p 为综合污染指数; n 为水质参数总数,本文 $n=56$; I_{pi} 为污染物 i 的污染指数; ρ_i 为污染物 i 的平均质量浓度; ρ_{si} 为污染物 i 的评价标准值。根据综合污染指数的取值,可将水质划分为 6 个等级^[32]: ≤ 0.20 表示水质好(多数指标未检出或符合标准); $>0.2 \sim 0.4$ 表示水质较好(所有检出指标均达标); $>0.4 \sim 0.70$ 表示水质轻度污染(存在个别指标超标); $>0.7 \sim 1.0$ 表示水质中度污染(有 2 项指

标超标); $>1.0 \sim 2.0$ 表示水质为重污染(超过 2 项指标超标); >2.0 表示水质达到严重污染程度(多项指标大幅超出标准)。

2.5 相关性分析

基于 Spearman 秩相关分析法,运用 SPSS 26.0 软件,对景观格局指数与水质指标开展非参数相关性检验,显著性水平设置为 $\alpha < 0.05$ (双侧检验)。根据相关系数划分相关性等级:0.9~1 为高度相关;0.7~<0.9 为强相关;0.4~<0.7 为中度相关;0.2~<0.4 为弱相关;0~<0.2 为极弱相关或无相关性。

3 结果与分析

3.1 九曲溪流域景观格局

表 1 为九曲溪流域植被景观要素特征。由表 1 可见,九曲溪流域植被景观斑块呈现出复杂多样的空间格局与结构特征。九曲溪流域植被景观斑块总类为 354,总周长为 2209.9 km,总面积为 573.83 km²,反映出流域植被分布的离散性与复杂性。斑块平均面积为 1.62 km²,表明多数斑块规模中等,但少数大型斑块可能对生态过程起主导作用。深入分析植被景观类型发现,针阔混交林、常绿阔叶林和竹林占据主导地位,这与武夷山亚热带季风气候及酸性红壤条件高度适配。其中,针阔混交林凭借多层次结构提升碳汇能力,而竹林作为速生植被,对水土保持贡献显著,二者合计占比超 60%,构成流域生态安全的核心屏障。相比之下,针叶林因单一树种结构易引发病虫害,中山草甸受海拔梯度限制分布零散,人工植被(如茶园、果园)虽面积占比 12%,但其集约化经营模式加剧了景观破碎化。灌丛与阔叶矮曲林因生态敏感性高、分布局限,在生态系统服务功能中扮演辅助角色。这些结构差异表明,九曲溪流域植被景观既承载自然生态价值,也受人类活动的深刻影响,为后续生态保护与可持续利用策略制定提供了关键依据。

进一步分析可知,针阔混交林与常绿阔叶林共同构成景观基质,两者的面积总和占比高达 69.54%。在武夷山自然保护区,各类植被的斑块平均面积从大到小依次为:针阔混交林、常绿阔叶林、竹林、针叶林、中山草甸、人工植被、灌丛、阔叶矮曲林。其中,针阔混交林和常绿阔叶林显示出较低的景观破碎度,而人工植被则表现出最高的破碎度。在斑块数量方面呈现明显差异:竹林景观斑块数量最多,高达 78,占比 22.03%;针叶林和常绿阔叶林分别为 74 和 59,占比 20.90%和 16.67%。各植被景观斑块数量由多到少依次为:竹林、针叶林、常绿

表 1 九曲溪流域植被景观要素特征

Table 1 Characteristics of vegetation landscape elements in the Jiuqu Creek Basin

植被类型	N_p		A_p		E_p		斑块平均面积/ km^2
	数值	占比/%	数值/ km^2	占比/%	数值/ km	占比/%	
灌丛	18	5.08	5.76	1.00	36.86	1.79	0.32
针阔混交林	43	12.15	250.20	43.60	737.48	33.37	5.82
常绿阔叶林	59	16.67	147.38	25.68	486.76	22.03	2.50
竹林	78	22.03	80.26	13.99	369.19	16.71	1.03
针叶林	74	20.90	53.01	9.24	304.07	13.76	0.72
中山草甸	31	8.76	24.14	4.21	156.18	7.07	0.78
人工植被	46	12.99	11.55	2.01	101.94	4.61	0.25
阔叶矮曲林	5	1.41	1.53	0.27	17.42	0.66	0.31

阔叶林、人工植被、针阔混交林、中山草甸、灌丛、阔叶矮曲林。研究区各植被类型的周长排序与面积排序完全一致。其中,针阔混交林与常绿阔叶林的周长占比合计 55.40%,这一比例显著高于区内其他植被类型。反观人工植被类型,斑块周长占比仅 4.61%,且斑块平均面积普遍较小。

九曲溪流域植被景观水平异质性指数的分析结果揭示了区域生态系统的结构特征。景观分维数为 1.15,接近理想几何图形,表明流域内植被斑块整体形状较为规则,缺乏自然生态系统常见的复杂边界形态。这一特征可能源于人类活动的干扰,如规则化的茶园开垦、人工林种植等,致使景观的自然复杂性降低,削弱了其生态服务功能。香农—维纳多样性指数为 1.46,与理论最大值 2.20 存在明显差距,结合香农—维纳均匀度指数仅为 0.70 的结果,进一步凸显了植被类型分布的不均衡性。高聚集度 (98.18%) 说明研究内植被斑块呈现高度聚集状态,少数优势植被类型(如针阔混交林、常绿阔叶林)占据主导地位,其他植被类型分布零散,这种格局限制了物种多样性的发展,降低了生态系统的稳定性与抗干扰能力。斑块密度和平均斑块面积不仅反映了景观的异质性,其值与斑块破碎度也呈一定的相关关系。破碎度 (0.64) 虽处于中等水平,但结合较低的香农多样性指数与香农均匀度指数,表明九曲溪流域植被景观存在结构单一、空间分布不均的问题,亟须通过生态修复与合理规划,优化植被类型布局,提升景观多样性与生态服务功能。

3.2 水质时空变化特征

3.2.1 空间变化

表 2 为九曲溪流域不同监测断面的水质指标均值。由表 2 可见,研究区水质呈现上游优、中下游劣的空间格局。上游曹墩桥断面以林地占比 94.4% 为主导,受人类活动干扰极小,其 DO 平均值为 8.66 mg/L,TP 质量浓度低至 0.014 mg/L,综合污染指数为 0.32,水质等级达较好。中游星村 2-3 号码头断面 TP 质量浓度为 0.027 mg/L,粪大肠菌群数

量高达 3 135 个/L,综合污染指数 0.67,属于轻度污染;江墩桥断面 TP 质量浓度 0.025 mg/L,综合污染指数 0.51,同样处于轻度污染范畴。下游玉女峰断面 TP 质量浓度 0.018 mg/L,综合污染指数 0.44,其水质介于上游与中游之间,依然属于轻度污染。这一格局表明,不同土地利用类型主导的各断面,因人类活动类型与强度差异,呈现出差异化的污染特征,凸显了景观格局与水质之间的紧密关联。

表 2 不同监测断面的水质指标均值

Table 2 Average values of water quality indicators at different monitoring sections

监测断面	$\rho_{\text{DO}}/$ (mg/L)	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}/$ (mg/L)	$\rho_{\text{BOD}_5}/$ (mg/L)	$\rho_{\text{TP}}/$ (mg/L)	$F_c/$ (个/L)	pH 值
曹墩桥	8.66	1.17	1.01	0.014	240	6.97
漫水桥	8.52	1.20	1.09	0.021	732	6.95
2-3 号码头	8.25	1.26	1.16	0.027	3 135	6.82
江墩桥	8.46	1.55	1.08	0.025	1 101	6.79
玉女峰	8.50	1.18	1.05	0.018	810	6.94

3.2.2 时间变化

2010—2020 年九曲溪流域的水质与土地利用格局呈现显著动态变化,其核心指标的演变特征反映出人类活动与生态系统的交互影响。从水质数据来看,TP 质量浓度由 0.012 mg/L 升至 0.015 mg/L (增幅 25%), COD_{Mn} 质量浓度从 1.32 mg/L 升至 1.65 mg/L (增幅 25%),氮、磷输出量分别增加 15% 和 16%。这一趋势与研究区茶园面积的剧烈扩张形成强相关性,期间茶园面积从 1.84 km^2 增至 4.30 km^2 (增幅 133%),伴随景观破碎度从 0.008 升至 0.010 (增幅 25%),显示出农业开发对生态格局的结构性扰动。

3.3 景观格局指数与水质指标相关性

景观关键点的水质状况对流域生态系统稳定性至关重要^[33]。表 3 为九曲溪流域景观格局指数与水质指标的相关系数。由表 3 可见,景观格局指数中仅破碎度与粪大肠菌群和悬浮物呈现显著负相关关系,高破碎度意味着流域内景观破碎化程度加剧,生态系统的完整性遭到破坏,不同生态功能区之

表 3 景观格局指数与水质指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between landscape pattern indexes and water quality indexes

景观格局指数	DO	COD _M	BOD ₅	TP	pH 值	F _C	NH ₃ -N	SS
N _P	-0.665	0.446	-0.529	0.202	0.502	-0.597	0.615	-0.602
A _P	-0.410	0.448	0.265	-0.305	-0.501	0.401	-0.156	-0.098
P _D	-0.668	0.446	-0.529	0.201	0.503	-0.601	0.614	-0.597
LSI	-0.669	0.673	-0.104	-0.098	-0.201	0.201	0.206	-0.198
LPI	-0.414	0.446	0.263	-0.302	-0.502	0.402	-0.155	-0.097
F _D	-0.669	0.672	-0.104	-0.101	-0.201	0.202	0.203	-0.195
D _P	-0.156	-0.226	0	-0.202	0.402	-0.901*	0.053	-0.902*

注：* 表示在双侧 0.05 置信度水平下显著。

间的物质、能量交换受阻,导致其对污染物的截留和净化能力下降,进而使水质恶化,具体表现为粪大肠菌群与悬浮物含量上升。可见在九曲溪流域,景观破碎度是影响水质变化的关键指标之一,当景观被分割成更多细碎的斑块时,生态系统的服务功能减弱,污染物难以得到有效控制^[34]。其他景观格局指数与水质指标未呈现明显相关性,可能是由于多种因素的综合作用。例如,斑块数量、景观总面积等指数虽能反映景观的部分特征,但在九曲溪流域的环境背景下,其对水质的直接影响可能被其他更主导的生态过程或人类活动所掩盖。此外,造成这种现象的原因还可能包括:①人类活动主导干扰,2010—2020 年九曲溪流域茶园面积扩张 133%,农业面源污染和旅游开发等人类活动对水质的直接影响强于景观格局的间接效应;②模型尺度局限性,现有景观指数多在斑块或景观水平计算,未能充分捕捉污染物在子流域尺度上的迁移转化过程;③水质指标的多元响应,DO、COD_{Mn}、BOD₅ 等指标受水温、流速、微生物活动等多种因素影响,单一景观指数难以解释其变异;④采样时间、监测点位分布等因素也可能影响相关性分析的结果。

3.4 水生态系统服务评估

3.4.1 水源涵养服务

2020 年九曲溪流域上游单位面积水源涵养量为 1772.72 mm,较 2010 年增加 147.25 mm,增幅 9.1%,中游增加 18.3 mm,下游增加 5.75 mm,这与 3.1 节中上游景观格局的分析结论相吻合。上游林地占比高达 94.4%,且植被构成以针阔混交林和常绿阔叶林为主,其完整的垂直植被结构显著提升了水源涵养能力。同时,九曲溪流域单位面积水源涵养量呈梯度分布的特点与水质上游优、中下游劣的空间格局相匹配。高水源涵养量通过增加径流量稀释污染物,使得上游 DO 质量浓度达 8.70 mg/L、TP 质量浓度低至 0.016 mg/L。可见,九曲溪流域上游水源涵养量占全流域 45%,氮磷输出仅为中游 1/3,呈典型“高水源涵养+低污染输出”特征,应严格执

行生态红线的保护策略。

3.4.2 水质净化服务

氮磷输出量与土地利用类型紧密相关。九曲溪流域中游因茶园和耕地集中,单位面积氮输出量为 1.23 kg/hm²、磷输出量为 0.36 kg/hm²,分别为上游的 3 倍和 4 倍。这与 3.2 节中 2010—2020 年九曲溪流域茶园面积扩张 133%、景观破碎度上升 25% 导致 TP 等水质指标恶化的结论一致,形成“景观破碎化—农业面源污染—生态服务衰退”的因果链,解释了中游水质为轻度污染的机制;下游因茶园(11.5%)和建设用地(1.4%)分散分布,氮磷输出量介于上中游之间,印证了下游水质受农业与城市面源污染共同影响的特征。九曲溪流域中游 TP 质量浓度为 0.028 mg/L、粪大肠菌群为 3135 个/L 的高值区与氮磷输出量的高值区完全重合,证实了农业面源污染是水质恶化的直接原因;而仅景观破碎度与部分水质指标显著相关的局限性,通过中游氮磷输出量与茶园占比的强相关性得以补充,表明景观格局通过改变生态服务强度间接影响水质。可见,九曲溪流域中游呈“高氮磷输出+中度污染水质”特征,应管控农业面源污染;下游建设用地虽占比较低但氮磷输出较上游增加 63%~100%,应完善城市雨洪管理系统。

4 结论与建议

4.1 结论

a. 九曲溪流域水质呈现上游优、中下游劣的空间格局。上游曹墩桥断面以林地为主导,受人类活动干扰极小,综合污染指数为 0.32,水质等级为较好。中游星村 2-3 号码头断面综合污染指数为 0.67,水质等级为轻度污染;江墩桥断面综合污染指数为 0.51,水质等级为轻度污染。下游玉女峰断面综合污染指数为 0.44,其水质状况介于上游与中游之间,水质等级为轻度污染。不同土地利用类型主导的各断面,因人类活动类型与强度差异,呈现差异化污染特征,凸显了景观格局与水质之间的紧密关联。

b. 九曲溪流域的景观格局指数中只有破碎度与粪大肠菌群和悬浮物呈现显著负相关关系,表明景观格局可通过改变水源涵养能力和污染物传输路径间接影响水质。其他景观格局指数与水质指标的相关性未达显著水平,说明人类活动的干扰和模型尺度的局限性可能掩盖了景观格局对水质的直接影响。

c. 九曲溪流域上游林地凭借完整的垂直植被结构具备高涵养能力,需实施严格的生态红线管控以维持其生态功能;中游因茶园面源污染集中爆发导致高氮磷输出,需通过生态工程与管理措施降低污染输出;下游受建设用地影响,需构建包含绿色屋顶、滞留塘等设施的城市雨洪管理系统,实现污染产生到处理各环节的全程防控。

4.2 建议

a. 强化全流域生态监测与数字化管理是应对流域时空分异特征的关键举措,构建覆盖全流域的智能化监测网络,利用物联网技术实时采集水质、景观格局及生态服务数据,实现污染风险的精准预警。

b. 立足实际情况,科学规划土地利用,同时对流域资源进行高效管理。上游严格坚守生态红线,将茶园面积控制在流域 15% 以内,并设置超过 200 m 的缓冲区,全面禁止新开垦,确保高水源涵养能力;中游的茶园集中区以 25% 茶园面积上限和 50~100 m 缓冲带为刚性要求,优先推进超 25° 陡坡的退茶还林,把人工纯林改造成复层混交异龄林,同步嵌入“退茶碳汇”机制;下游则实行“零新增”茶园政策,按每年 2% 的面积持续退茶,构建 20~30 m 滨岸植被带,辅以破碎化人工植被连通性提升工程,降低粪大肠菌群等致病菌的相关风险。

c. 聚焦旅游活动对下游的污染加剧效应,构建全民参与智能监管的协同机制。开发集成水质监测、问题上报、生态科普功能的 App,引导公众监督中游农业面源污染与下游城市面源污染;定期组织“流域生态巡查官”活动,邀请市民参与上游曹墩桥断面的水质检测与林地抚育;设立生态保护贡献奖,形成政府监管与公众监督的闭环管理体系。

d. 科学规划旅游线路与生态敏感区。主干道避开上游林地核心区,次干道与游步道采用生态铺装并控制摊点密度,减少地表硬化对雨洪径流的影响;对玉女峰等景观破碎化区域,拆除多余旅游设施并设立警示牌,降低人类活动对河流水质的干扰;对中游山村码头等游客密集区实施预约制,避免过度旅游加剧农业面源污染与植被破坏。

参考文献:

[1] Wu Jianguo, Hobbs R. Key issues and research priorities

in landscape ecology: an idiosyncratic synthesis [J]. Landscape Ecology, 2002, 17(4): 355-365.

[2] 王耕, 常畅, 韩冬雪, 等. 老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1910-1922. (Wang Geng, Chang Chang, Han Dongxue, et al. Temporal-spatial changes of landscape pattern and habitat quality in Laotieshan nature reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1910-1922. (in Chinese))

[3] Li Xiang, Lin Yuying. Do high-voltage power transmission lines affect forest landscape and vegetation growth: evidence from a case for southeastern of China [J]. Forests, 2019, 10(2): 162.

[4] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1135-1142. (Chen Wenbo, Xiao Duning, Li Xiuzhen. The characteristics and contents of landscape spatial analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 1135-1142. (in Chinese))

[5] 陈利顶, 吕一河, 傅伯杰, 等. 基于模式识别的景观格局分析与尺度转换研究框架[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 663-670. (Chen Liding, Lu Yihe, Fu Bojie, et al. A framework on landscape pattern analysis and scale change by using pattern recognition approach[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 663-670. (in Chinese))

[6] 肖东洋, 牛海鹏, 闫弘轩, 等. 1990—2018 年黄河流域(河南段) 土地利用格局时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 271-281. (Xiao Dongyang, Niu Haipeng, Yan Hongxuan, et al. Spatiotemporal evolution of land use pattern in the Yellow River Basin (Henan section) from 1990 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 271-281. (in Chinese))

[7] Allan J D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35: 257-284.

[8] 段少琼, 安艳玲, 苏孝良, 等. 三岔河流域不同尺度土地利用对水质的影响[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 525-529. (Duan Shaoqiong, An Yanling, Su Xiaoliang, et al. Effects of multi-scale land use on water quality in Sancha River [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(5): 525-529. (in Chinese))

[9] Lee S, Hwang S, Lee S, et al. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 92(2): 80-89.

[10] 胡秋凤, 陈娟, 戴文远, 等. 快速城镇化下旅游海岛景观格局梯度分析: 以福建省平潭岛为例[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 109-116. (Hu Qiufeng, Chen Juan, Dai Wenyan, et al. Gradient analysis of landscape pattern of tourism island with rapid urbanization: a case study of Pingtan island[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition),

- 2019,35(2):109-116. (in Chinese))
- [11] 周琦,池飞,逢勇,等.可利用水资源量正逆向联合计算方法[J].水资源保护,2016,32(5):42-46. (Zhou Qi, Chi Fei, Pang Yong, et al. A combined forward and reverse method for available water resources calculation[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 42-46. (in Chinese))
- [12] 张党玉,孙志高,陈冰冰,等.近十年来福建兴化湾湿地景观格局及其驱动力分析[J].福建师范大学学报(自然科学版),2020,36(1):104-116. (Zhang Dangyu, Sun Zhigao, Chen Bingbing, et al. Variations of wetland landscape pattern in the Xinghua bay of Fujian Province in recent ten years and its driving factors [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2020, 36(1): 104-116. (in Chinese))
- [13] 韩黎阳,黄志霖,肖文发,等.三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J].环境科学,2014,35(3):1091-1097. (Han Liyang, Huang Zhilin, Xiao Wenfa, et al. Effects of land use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 1091-1097. (in Chinese))
- [14] 谈娟娟,董增川,付晓花,等.流域景观生态健康演变及其驱动因子贡献分析[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):107-113. (Tan Juanjuan, Dong Zengchuan, Fu Xiaohua, et al. Analysis of watershed landscape ecological health evolution and contribution of driving factors [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(2): 107-113. (in Chinese))
- [15] 王明浩,王文杰,冯宇,等.湖南水府庙水库流域景观格局与水质特征关系分析[J].环境工程技术学报,2015,5(4):333-340. (Wang Minghao, Wang Wenjie, Feng Yu, et al. Relationship of landscape pattern and river water quality in Shuifumiao Reservoir Watershed in Hunan Province [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(4): 333-340. (in Chinese))
- [16] 张大伟,李杨帆,孙翔,等.入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J].环境科学,2010,31(8):1775-1783. (Zhang Dawei, Li Yangfan, Sun Xiang, et al. Relationship between landscape pattern and river water quality in Wujingang Region, Taihu Lake Watershed [J]. Environmental Science, 2010, 31(8): 1775-1783. (in Chinese))
- [17] McDonnell M J, Pickett S T A, Groffman P, et al. Ecosystem processes along an urban-to-rural gradient[J]. Urban Ecosystems, 1997, 1(1): 21-36.
- [18] 欧洋,王晓燕.景观对河流生态系统的影响[J].生态学报,2010,30(23):6624-6634. (Ou Yang, Wang Xiaoyan. Review of the influence of landscapes on stream ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6624-6634. (in Chinese))
- [19] Sliva L, Dudley Williams D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality [J]. Water Research, 2001, 35(14): 3462-3472.
- [20] 郭玉静,王妍,刘云根,等.普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J].生态学报,2018,38(5):1711-1721. (Guo Yujing, Wang Yan, Liu Yungen, et al. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei karst lake wetland littoral zone on water quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1711-1721. (in Chinese))
- [21] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等.南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响[J].环境科学,2012,33(3):794-801. (Hu Hebing, Liu Hongyu, Hao Jingfeng, et al. Influence of spatial difference on water quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing [J]. Environmental Science, 2012, 33(3): 794-801. (in Chinese))
- [22] 池明.苏子河流域景观格局指数对流域水质的影响[J].水利规划与设计,2017(5):21-23. (Chi Ming. Impacts of landscape pattern indices on watershed water quality in the Suzi River Basin [J]. Water Resources Planning and Design, 2017(5): 21-23. (in Chinese))
- [23] 谢雨欣,蒲俊兵,张琼,等.长江流域(重庆段)土地利用构成和景观格局对河流水质的多时空尺度影响[J/OL].环境科学,1-19. [2025-06-16]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202503160>. (Xie Yuxin, Pu Junbing, Zhang Qiong, et al. Effects of land use composition and landscape pattern on river water quality at multi-temporal and spatial scale in the Yangtze River Basin (Chongqing Section) [J/OL]. Environmental Science, 1-19. [2025-06-16]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202503160>. (in Chinese))
- [24] 方国华,赵文萃,李鑫,等.南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J].水资源保护,2023,39(4):1-8. (Fang Guohua, Zhao Wencui, Li Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 1-8. (in Chinese))
- [25] 何思源,苏杨,王大伟.以保护地役权实现国家公园多层空间统一管控[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2020,22(4):61-69. (He Siyuan, Su Yang, Wang Dawei. Realization of multi-faceted spatial control of national park through conservation easement [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2020, 22(4): 61-69. (in Chinese))
- [26] 张春英,林从华,洪伟,等.武夷山自然保护区景观格局指数的尺度效应分析[J].浙江林学院学报,2009,26(6):877-883. (Zhang Chunying, Lin Conghua, Hong Wei, et al. Scale effect of landscape pattern indices for the Wuyishan Nature Reserve [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(6): 877-883. (in Chinese))

(下转第 58 页)

waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 41-47. (in Chinese))

[15] Van Oorschot V, Slootweg M, Remme R P, et al. Optimizing green and gray infrastructure planning for sustainable urban development [J]. NPJ Urban Sustainability, 2024, 4(1): 41.

[16] Iqbal A, Soni L, Qazi A W, et al. Utilizing remote sensing for sponge city development: enhancing flood management and urban resilience in Karachi [J]. Remote Sensing, 2025, 17(11): 1818.

[17] 程涛, 黄本胜, 邱静, 等. 基于 UAV 精细化地表数据的城市洪涝模拟与分析: 以济南市海绵城市示范区为例 [J]. 水力发电学报, 2021, 40(5): 110-124. (Cheng Tao, Huang Bensheng, Qiu Jing, et al. Urban flood simulation and analysis using UAV-based refined surface data: case study for sponge city pilot area of Jinan City [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(5): 110-124. (in Chinese))

[18] 李伶杰, 胡庆芳, 王银堂, 等. 快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空分布特征 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1289-1298. (Li Lingjie, Hu Qingfang, Wang Yintang, et al. Spatiotemporal pattern of water yield changes over the Taihu Basin during the rapid urbanization process [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(5): 1289-1298. (in Chinese))

[19] Zhang Haijia, Liu Jiahong, Zhou Jinjun, et al. Quantitative assessment of exacerbating effect on urban inundation when river flood encounters heavy rainfall in an urbanized watershed [J]. Science China Technological Sciences, 2025, 68(9): 1920703.

[20] 胡向阳, 刘佳明, 吴家阳, 等. 长江中下游沿江泵站排涝对干流防洪的影响分析 [J]. 人民长江, 2020, 51(12): 172-178. (Hu Xiangyang, Liu Jiaming, Wu Jiayang, et al. Influence of drainage of pumping stations along middle and lower reaches of Yangtze River on flood control of main stream [J]. Yangtze River, 2020, 51(12): 172-178. (in Chinese))

[21] Chen Gang, Wang Chuanhai, Fang Xing, et al. Distributed-framework basin modeling system: IV. application in Taihu Basin [J]. Water, 2021, 13(5): 611. (收稿日期: 2025-09-29 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 39 页)

[27] 张玉, 李灵, 俞建安, 等. 武夷山风景名胜区水资源变化特征及可持续规划 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2010, 30(5): 62-67. (Zhang Yu, Li Ling, Yu Jian'an, et al. Changing characteristics and Sustainable planning of water resources from Wuyishan Scenic Area [J]. Journal of Yunnan Normal University, 2010, 30(5): 62-67. (in Chinese))

[28] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究 [J]. 应用生态学报, 2002(1): 121-125 (Chen Wenbo, Xiao Duning, Li Xiuzhen. Classification, application, and creation of landscape indices [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002(1): 121-125. (in Chinese))

[29] 陈启慧, 纪璐, 李琼芳, 等. 伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响 [J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 90-99. (Chen Qihui, Ji Lu, Li Qiongfang, et al. Influence of water resources condition changes on landscape pattern evolution in the Ili River Delta [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 90-99. (in Chinese))

[30] 吕乐婷, 乔皓, 郑德凤, 等. 太子河流域景观格局时空演变及其对水源涵养的影响 [J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 111-120. (Lyu Leting, Qiao Hao, Zheng Defeng, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the Taizi River Basin and its impact on water conservation [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 111-120. (in Chinese))

[31] 关伯仁. 水污染指数的综合问题 [J]. 环境污染与防治, 1980, 2(5): 11-14. (Guan Boren. The comprehensive issues of water pollution index [J]. Environmental Pollution & Control, 1980, 2(5): 11-14. (in Chinese))

[32] 尹海龙, 徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733. (Yin Hailong, Xu Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 729-733. (in Chinese))

[33] 刘洋, 李江, 陈诚, 等. 基于模糊隶属度分布函数的博斯腾湖景观适宜水位确定 [J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 116-124. (Liu Yang, Li Jiang, Chen Cheng, et al. Identification of landscape suitable water levels in Bosten Lake based on fuzzy membership degree distribution function [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 116-124. (in Chinese))

[34] 衣鹏, 纪源, 钱睿智, 等. 2012—2023 年南水北调东线水源区水质演变趋势 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 40-49. (Yi Peng, Ji Yuan, Qian Ruizhi, et al. Evolution trend of water quality in water source area along eastern route of South-to-North Water Diversion Project from 2012 to 2023 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 40-49. (in Chinese)) (收稿日期: 2025-07-24 编辑: 王芳)