

不同干扰强度下昆明高原湿地“格局-功能”耦合与差异化修复

Landscape Pattern – Function Coupling and Differentiated Restoration of Kunming Plateau Wetlands under Varying Levels of Disturbance

何雨璐 唐文*

HE Yulu, TANG Wen*

摘要

城市湿地公园生态修复需因地制宜,但现有研究对同一流域内不同干扰强度下湿地“格局-功能”耦合机制的对比分析不足,导致修复策略缺乏针对性。以昆明滇池区域受到高强度干扰的王官湿地公园与受到中度干扰的斗南湿地公园为例,基于2016—2024年遥感影像和实地调研数据,构建“格局-功能”双维评价体系,运用景观指数分析、当量因子法、相关性分析、空间叠加分析和耦合协调度模型,系统对比2个湿地“格局-功能”耦合特征。研究发现,王官湿地景观破碎化程度高,格局对功能的抑制作用突出,处于中级协调阶段;斗南湿地自然斑块持续增加,格局与功能协同性较好,达到良好协调阶段。基于此,提出王官湿地以格局修复为先导、斗南湿地以功能优化为核心的差异化修复策略。

Abstract

Urban wetland park ecological restoration should be tailored to local conditions; however, existing research lacks a comprehensive comparative analysis of the 'pattern-function' coupling mechanisms across wetlands under different levels of disturbance within the same watershed, resulting in restoration strategies that lack specificity. Taking the Wangguan Wetland Park (subject to high-intensity disturbance) and the Dounan Wetland Park (subject to moderate disturbance) in the Dianchi Lake area of Kunming as examples, this study constructs a two-dimensional 'pattern-function' evaluation system based on remote sensing imagery and field survey data collected between 2016 and 2024. Utilizing landscape index analysis, the equivalent factor method, correlation analysis, spatial overlay analysis, and a coupling coordination degree model, the study systematically compares the 'pattern-function' coupling characteristics of the two wetlands. The findings indicate that the Wangguan Wetland has a fragmented landscape, which is associated with a lower estimated ecosystem service value, placing it at an intermediate coordination stage; in contrast, the Dounan Wetland has seen a continuous increase in natural patches and shows better alignment between its landscape pattern and estimated ecosystem service value, reaching a higher modeled coordination level. Based on these findings, this study proposes differentiated restoration strategies: for the Wangguan Wetland, a restoration approach prioritizing spatial pattern rehabilitation; for the Dounan Wetland, a strategy centered on functional optimization.

文章亮点

1) 构建了“格局-功能”双维评价体系,创建 $LPDI$ 与 $EFDI$ 差异指数,实现不同干扰强度湿地间差异的定量刻画。2) 识别出“格局制约型”与“功能转型型”2种耦合模式,揭示高强度干扰区景观破碎化对功能的抑制效应显著强于中度干扰区。3) 提出“诊断-设计-评估”闭环范式及差异化修复策略,为高原湖滨湿地分类施策提供科学依据。

关键词

景观格局; 生态系统服务功能; 耦合协调度; 差异化修复; 湿地

Keywords

Landscape pattern; Ecosystem service function; Coupling coordination; Differentiated restoration; Wetland

收稿日期: 2026-03-19

修回日期: 2026-06-09

湿地被誉为“地球之肾”，其在水质净化、水文调节、生物多样性维持等方面的作用不可替代^[1]。在快速城镇化背景下，城市湿地面临景观破碎化、生态功能退化等压力，如何科学诊断与修复湿地已成为景观生态学与恢复生态学的重要课题^[2]。

景观格局与生态系统服务功能的耦合是景观生态学的核心议题。国际上，佛罗里达大沼泽地(The Everglades)的修复^[3]证实了恢复水文连通性可增强水质净化与栖息地服务功能；荷兰瓦登海湿地(Wadden Sea)修复实践^[4]表明成片的植被斑块具备更高的碳埋藏潜力。从景观生态学的规律来看，斑块聚集度与湿地碳汇功能呈显著正相关^[5]。国内针对鄱阳湖、洞庭湖^[6]的研究揭示，围垦和水文调控导致的景观破碎化抑制了服务功能。基于此，景观生态学的“格局-过程-功能”耦合理论可为湿地修复提供核心框架：景观格局通过调控水文、生物地球化学循环等关键过程，影响生态系统服务供给能力^[7]。将格局与功能关联分析，不仅能诊断湿地结构完整性，更能从机理上解释功能变化，为功能修复提供依据^[8]。

然而，当前研究仍存在不足：一是现有成果多集中于平原湖泊或滨海湿地^[9-10]，针对高原湖滨湿地的“格局-功能”耦合研究较为缺乏。高原湖滨湿地具有显著特殊性：海拔高、紫外线强、气温日较差大，水文节律受干湿季交替影响强烈，生态系统更脆弱；同时，作为截留城市面源污染、保护高原湖泊水质的最后一道屏障，其功能对空间格局的敏感度极高。二是现有研究多聚焦单一流域或单个湿地，缺乏对同一流域内、自然本底相似但干扰强度不同的湿地间“格局-功能”耦合机制的系统对比，导致修复策略缺乏针对性。三是“诊断-设计-评估”的完整研究闭环尚未完善。

基于此，为探究不同城市化干扰强度下高原湖滨湿地的景观格局与生态系统服务功能之间的耦合特征差异，研究以昆明滇池区域城市化梯度差异显著的王官湿地公园与斗南湿地公园为案例，

构建“格局-功能”二维评价体系，揭示两园格局演变与服务价值变化特征；并通过相关性分析、空间叠加和耦合协调度模型，定量对比两园“格局-功能”耦合机制；最后基于耦合诊断结果，提出差异化的生态修复策略。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

王官湿地公园位于昆明市官渡区环湖东路，占地面积约47.67 hm²（图1）。其作为滇池湖滨带生态修复与保护体系的重要组成部分，是连接滇池水体与陆地生态系统的关键过渡区域。该湿地被城市道路与建设地块切割，景观破碎化程度较高，面临水质污染、生物栖息地退化等典型生态问题（表1）。

斗南湿地公园位于昆明市呈贡区斗南街道，规划总面积约73.93 hm²（图1）。公园北接环湖东路，南邻王官湿地，西临滇池外海，东靠斗南花卉市场。该湿地较好保留了自然岸线与斑块连续性，在适度旅游开发背景下，生态功能部分衰减，但结构尚存（表1）。

王官湿地受城市建成区扩张、市政路网建设及高强度休闲活动的综合影响，500 m缓冲区内建设用地比例约为46.3%，道路密度为

2.1 km/km²，经多源公开信息综合估算，年均游客量约85.6万人次，整体干扰强度处于较高水平；斗南湿地受滇池生态保护红线管控更为严格，外围以生态缓冲带和农田为主，建设用地比例仅为21.7%，道路密度为1.5 km/km²，综合估算年游客量约42.3万人次，受干扰强度处于中等水平。两者在建设用地比例、道路密度及游客活动强度上差异显著，王官湿地受干扰强度高于斗南湿地，构成典型的“高-中”干扰对比案例。

尽管研究仅选取2处湿地开展分析，但这2处湿地处于同一湖盆，具有相同的本底条件，且恰好代表了滇池东岸的2种最典型的开发状态：一种是被城市道路深度切割的王官湿地，另一种是处于城市边缘与农田交界地带的斗南湿地。两者作为对比案例，能有效控制气象、水文等环境变量，突出人为干扰梯度对湿地的影响。

1.2 数据来源与处理

数据包括：1) Google Earth 2016年3月、2020年2月及2024年11月共3期的高分辨率遥感影像，空间分辨率为0.5 m；2) 2024—2025年多次实地调研记录的各类信息数据；3) 粮食产量、价格等社会经济数据^[11]。经遥感解译精度验证，3期土地利用分

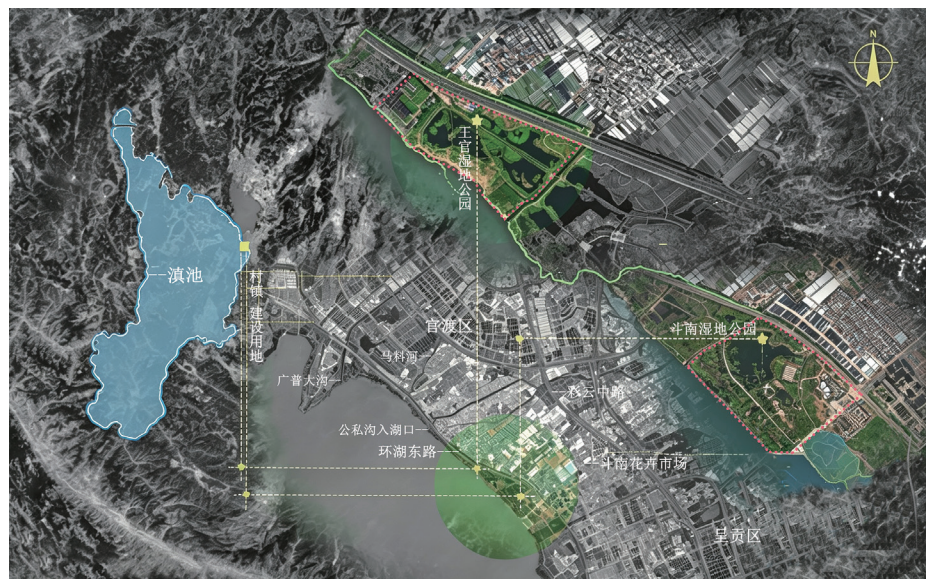


图1 王官湿地和斗南湿地区位示意图

Fig.1 Wangguan Wetland and Dounan Wetland location map

类的总体精度均达到 90% 以上, Kappa 系数均大于 0.85, 满足精细尺度研究要求。

数据处理方面, 研究首先采用目视解译法, 结合实地验证, 在 ArcGIS10.7 中生成 3 期土地利用图; 接着借鉴李哲惠等^[12] 的景观图示演变方法, 将透水性较强景观视为自然节点, 透水性较差景观视为人工节点, 节点间连线分为自然、人工和半自然网络; 最后基于分类结果, 运用 Fragstats 4.2 计算景观格局指数, 采用当量因子法评估生态系统服务价值 (Ecosystem Services Valuation, ESV)。

2 研究方法

为揭示昆明高原湿地景观格局与生态系统服务功能间的耦合关系, 研究构建“格局-功能”二维评价体系。首先评价景观格局和生态系统功能, 接着通过相关性、空间叠加和耦合协调度模型揭示其关联, 最后采用指数量化 2 个湿地的差异。

2.1 景观格局评价指标

景观格局评价指标是定量化描述湿地空间结构特征, 揭示其生态过程的关键工具。本文借鉴前人研究成果并结合高原湿地景观特征, 初步选取 10 个常用指数。通过文献 Meta 分析, 并结合对 2 个湿地 2016—2024 年的敏感性检验, 最终选取斑块个数、斑块密度、景观形状指数、景观连通性指数、蔓延度、香农多样性指数 6 个核心指数 (表 2), 分别从破碎化、形状复杂度、连通性、聚集度和多样性 5 个维度刻画格局特征, 较全面地反映湿地生态系统结构完整性。

2.2 生态系统服务功能评价指标

为量化湿地公园生态系统服务价值, 并识别不同干扰强度下其结构特征及演变趋势, 研究采用当量因子法进行评估, 原因包括: 数据可从土地利用图直接获取, 成本低; 该方法已在国内湿地研究中广泛应用, 便于进行横向对比, 适合 2016—2024 年 3 期数据的快速回顾性评估。

该方法基于全国尺度生态系统服务价值评估开发, 直接应用于昆明高原湿地可能存在偏差。为此, 从 3 个方面提升其适用性: 1) 高原湿地植被生物量通常低于全国平均水平, 为有效反映高原较低的初级生产力水平, 研究采用云南省生物量因子 (0.64)^[13] 修正全国当量价值。2) 高原湿地的核心服务功能是水文调节, 但其水文调节当量系数远高于其他地类, 为避免主观性, 研究在区域修正时保留相对关系, 未对单项服务额外加权。

基于联合国千年生态系统评估 (Millennium Ecosystem Assessment, MA) 分类框架, 研究将生态系统服务划分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务 4 个一级指标和 11 个二级指标 (表 3)^[14]。

首先, 计算 1 个生态系统服务价值当量因子的经济价值 E_a , 公式如下:

$$E_a = (S_a \times V_a) \times \frac{1}{7} \tag{1}$$

式中 S_a 为年均粮食产量, V_a 为年均粮食价格。为

消除物价波动和通货膨胀的干扰, 统一以云南省 2000—2020 年平均粮食产量 (1 645.24 kg/hm²) 和平均粮食价格 (2.28 元/kg) 为基准, 计算标准当量值 E_a 为 535.88 元/hm²。这可保证不同年份的生态系统服务价值对比是基于生态空间结构本身的变化, 而非经济市场波动。

其次, 采用具有昆明高原地域适用性的云南省生物量因子 0.64 对价值系数进行修正, 计算各用地类型单位面积生态系统服务价值单价, 公式如下:

$$C = E_a \times E_b \tag{2}$$

式中 C 为单位面积生态系统服务价值单价, E_b 为经地区修订后的生态服务价值当量。

最后, 计算生态系统服务总价值及各单项价值, 公式如下:

$$E_{sv} = \sum (S_m \times N_{cm}) \tag{3}$$

$$E_{svi} = \sum (S_m \times N_{cik}) \tag{4}$$

表 1 王官湿地与斗南湿地基本特征对比
Tab.1 Comparison of basic characteristics between Wangguan Wetland and Dounan Wetland

对比维度	王官湿地公园	斗南湿地公园
区位特征	官渡区环湖东路	呈贡区环湖东路
城市化程度	高 (周边开发强度大)	中 (周边开发适度)
占地面积	47.67 hm ²	73.93 hm ²
湿地面积占比	约 14.8%	约 15.9%
水体来源	滇池补给为主	滇池与捞鱼河补给
主要植被	芦苇 <i>Phragmites australis</i> 、 香蒲 <i>Typha orientalis</i> 、水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i> 、 四蕊朴 (滇朴) <i>Celtis tetrandra</i>	莲 <i>Nelumbo nucifera</i> 、芦苇、 垂柳 <i>Salix babylonica</i> 、湿 生草本
生态问题	水质污染、景观破碎、栖息地退化	功能局部衰减, 旅游干扰
研究代表性	高强度干扰下湿地修复典型	中强度干扰下湿地保育典型

表 2 景观格局指数与生态学意义
Tab.2 Landscape pattern index and ecological significance

指标	缩写	生态学意义
斑块个数	NP	景观中某类斑块总数, 反映景观破碎化程度
斑块密度	PD	单位面积斑块数量, 反映景观异质性与破碎度
景观连通性指数	CONNECT	同类斑块间功能连接程度
景观形状指数	LSI	斑块类型形状复杂程度
蔓延度	CONTAG	不同斑块类型聚集程度或延展趋势
香农多样性指数	SHDI	景观异质性、结构复杂度及斑块类型丰富性

式中 E_{sv} 为生态系统服务总价值, S_m 为景观类型 M 的面积, N_{cm} 为景观类型 M 的单位面积生态系统服务价值单价; E_{svi} 为第 i 项服务功能价值, N_{cik} 为景观类型 M 的第 i 项单位面积生态系统服务价值单价。

当量因子法适用于宏观尺度, 用于小尺度城市湿地时主要反映土地利用面积变化对服务价值的贡献, 难以精确刻画内部生态过程的真实功能增强。因此, 本研究的 ESV 变化应理解为“潜在服务供给能力”, 而非实际生态功能的直接测量。

2.3 耦合分析方法

在获得景观格局指数和生态系统服务价值的基础上, 研究从统计相关、空间分布、系统协同 3 个层面逐层深入, 揭示“格局-功能”的耦合特征。

2.3.1 相关性分析

研究主要采用 Pearson 相关系数, 分析景观格局指数与生态系统服务总价值的相关关系, 识别哪些格局因子对功能具有促进或抑制作用。

因每个湿地仅有 3 期数据, 其检验效力不足, 研究将各湿地划分为水域核心区、过渡带、人工设施区 3 个生态亚区, 每期获取 3 个亚区数据, 共 9 个样本; 同时计算 Spearman 秩相关系数进行稳健性验证。

研究运用 SPSS26.0 软件, 分别计算王官和斗南 2 个湿地 18 个样本的景观格局指数与 ESV 的 Spearman 和 Pearson 相关系数。研究以相关系数的大小和正负为主要判断依据, 观察趋势一致性, 避免过度依赖 P 值。

2.3.2 空间耦合分析

相关性分析只揭示整体统计关系, 因此需通过 GIS 空间叠加分析, 直观识别需重点修复或保护的位置, 为差异化修复提供空间落点。

表 3 湿地生态系统服务评估指标体系

Tab.3 Wetland ecosystem service assessment indicator system

生态系统服务类型	功能类型	具体定义
供给服务	食物生产	生态系统向人类提供各类产品, 包括食品、木材、遗传资源、淡水等
	原料生产	
	水资源供给	
调节服务	气体调节	生态系统对气候、水文等过程的调节作用, 包括气候调节、水质净化、水文调节、气体调节、净化环境、土壤保持、防风固沙、病虫害控制等
	气候调节	
	净化环境	
	水文调节	
支持服务	土壤保持	维持其他服务所需的基础生态过程, 包括土壤形成、养分循环、生物多样性维持、栖息地提供等
	维持养分循环	
	生物多样性	
文化服务	美学景观	生态系统为人类提供非物质惠益, 包括休闲游憩、美学欣赏、精神慰藉、文化遗产等

研究在 ArcGIS 10.7 中将 2024 年 2 个湿地的景观格局与生态系统服务功能综合指数空间分布图进行像元级叠加, 采用自然断点法将其划分为高、低 2 类, 叠置得到 4 类耦合单元: 核心保育区(高格局-高价值)、潜力提升区(高格局-低价值)、优先恢复区(低格局-高价值)、人工干预区(低格局-低价值)。

2.3.3 耦合协调度模型

为定量评价景观格局与生态系统服务功能子系统之间的协调发展水平及 2016—2024 年的动态演变, 研究引入耦合协调度模型, 弥补相关性分析仅揭示“是否相关”的不足。

在计算耦合协调度之前, 需先计算景观格局综合指数和生态系统服务功能综合指数, 公式如下:

$$LPCI = \sum_{i=1}^n (W_{Li} \times N_{Li}) \quad (5)$$

$$EFCI = \sum_{j=1}^m (W_{Fj} \times N_{Fj}) \quad (6)$$

式中 $LPCI$ 为景观格局综合指数, 值越高表示景观格局越优; W_{Li} 为第 i 个景观格局指标的权重, N_{Li} 为第 i 个指标归一化后的值, n 为景观格局指标总数。 $EFCI$ 为生态功能综合指数, 值越高表示生态功能越强; W_{Fj} 为第 j 个生态功能指标的权重, N_{Fj} 为第 j 个指标归一化后的值, m 为生态功能指标总数。

接着计算综合协调指数 T , 需设定景观格局子系统权重 α 和生态功能子系统权重 β 。在湿地的“格局-功能”协同演化中, 二者具有同等重要性, 因此参考相关研究成果^[15-16], 采用等权重赋值 ($\alpha=\beta=0.5$)。为进一步量化 2 个湿地景观格局与生态系统服务功能的协同发展水平, 计算耦合协调度, 公式如下:

$$C = \left\{ \frac{LPCI \times EFCI}{\left(\frac{LPCI + EFCI}{2} \right)^2} \right\}^2 \quad (7)$$

$$T = \alpha \times LPCI + \beta \times EFCI \quad (8)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (9)$$

式中 C 为耦合度, 反映两系统相互作用强度; T 为综合协调指数; D 为耦合协调度, 反映两系统协同发展水平。根据 D 值大小, 将其划分为严重失调 ($0 \leq D < 0.3$)、中度失调 ($0.3 \leq D < 0.4$)、濒临失调 ($0.4 \leq D < 0.5$)、勉强协调 ($0.5 \leq D < 0.6$)、初级协调 ($0.6 \leq D < 0.7$)、中级协调 ($0.7 \leq D < 0.8$)、良好协调 ($0.8 \leq D < 0.9$)、优质协调 ($0.9 \leq D \leq 1.0$) 8 个等级^[17], D 值越高表示格局与功能越趋向协同发展。

2.4 双园对比分析方法

对比分析是为了量化王官与斗南湿地在景观格局和生态系统服务功能 2 个维度的整体差异, 验证两者是否属于“不同类型”, 为差异化修复提供前提性证据。

研究借鉴景观相异度指数和 β 多样性指数, 自主构建

景观格局差异指数 $LPDI^{[18]}$ 和生态系统服务功能差异指数 $EFDI^{[19]}$ ，通过计算多个指标在 2 组样本间的平均绝对差异量化整体相异程度，公式如下：

$$LPDI = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (10)$$

$$EFDI = \frac{\sum_{j=1}^m |X_j - Y_j|}{m} \quad (11)$$

式中 X_i 和 Y_i 分别为王官和斗南湿地第 i 个景观格局指数归一化后的值， X_j 和 Y_j 分别为 2 个湿地第 j 个生态功能指标归一化后的值， n 和 m 为指数个数。指数的取值范围均为 $[0,1]$ ，值越大差异越大。目前尚无公认的 $LPDI$ 和 $EFDI$ 分级标准，本研究参考 Bray-Curtis 相异度指数^[19]的常用阈值：指数小于 0.2 为轻微差异，0.2~0.4 为中等差异，大于 0.4 为显著差异。

$LPDI$ 和 $EFDI$ 的优势在于：1) 直接面向湿地格局与功能 2 个维度，具有较强的生态指向性；2) 计算采用相等权重，避免了主观赋权带来的偏差，便于多案例横向比较；3) 采用归一化的值平均差异，避免了单一指标偏差；4) 将 $LPDI$ 、 $EFDI$ 与总面积进行 Spearman 相关性检验，结果显示 P 大于 0.1，无显著相关，说明指数主要反映结构差异而非规模差异。

3 结果与分析

3.1 景观格局演变与对比

3.1.1 王官湿地景观格局演变

2016—2024 年，王官湿地斑块组成类型变化显著（图 2）。自然网络与透水性良好的自然斑块先增后减：2016—2020 年公园场地整治与植被补植促使自然类斑块数量上升；2020—2024 年随着生态修复推进，零散细碎的小型自然斑块整合归并，斑块数量减少，但有利于形成更大规模连续生境。林地斑块先增后减，可能与林地向草地或水体转化有关。道路斑块增加，反映公园可达性的提升。未利用地斑块于 2024 年首次出现，可能与局部生态修复工程实施有关。

从斑块结构来看（表 4），透水性良好的自然斑块先增后减，整体减少 1 个；透水性较差的人工斑块持续增加，占比由 18.2% 升至 33.3%，反映公园基础设施建设力度加大。网络结构方面，自然网络先增后减，人工网络和半自然网络持续增加，反映次生湿地生境不断发育，网络结构向多核心复合渔网型演变。

3.1.2 斗南湿地景观格局演变

斗南湿地斑块组成类型变化同样显著（图 3）。斑块总数持续增加，公共设施用地斑块先增后减；其他绿地斑块先增后减，可能与其他绿地向林地、草地转化有关；林地斑块

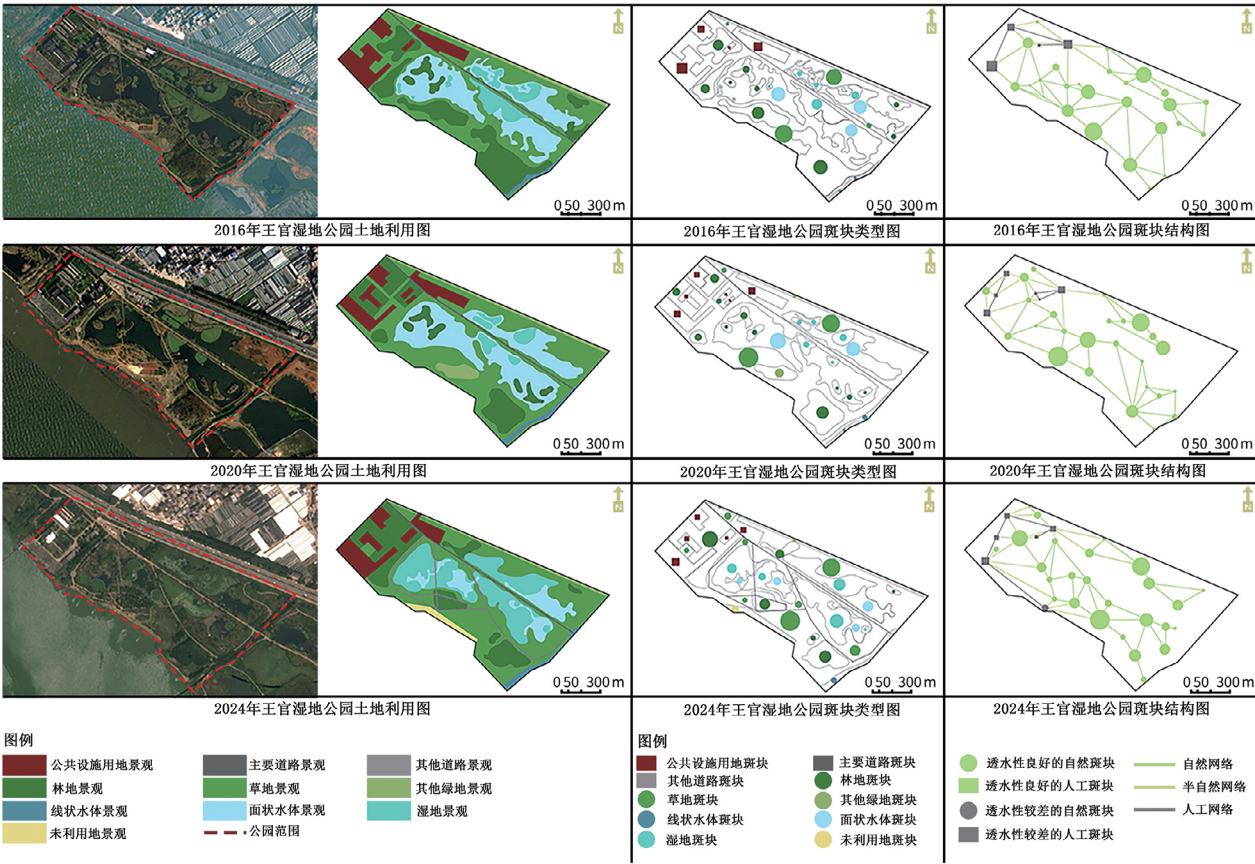


图 2 王官湿地公园 2016—2024 年土地利用、斑块变化图
Fig.2 Land use and patch change map of Wangguan Wetland Park from 2016 to 2024

和草地斑块持续增长，反映植被覆盖度显著提升；道路斑块总数由 1 个增至 6 个，说明公园的可达性提升；未利用地斑块在 2024 年首次出现。

从斑块结构来看（表 5），透水性良好的自然斑块持续增加，透水性较差的人工斑块先增后稳，占比由 24.3% 升至 24.5%。网络结构方面，自然网络斑块数量先增后降，2016—2020 年斑块数量明显提升，2020—2024 年细碎斑块发生整合，数量有所回落；人工网络先增后稳，半自然网络

持续增加，呈现自然网络主导、半自然网络协同的特征。

3.1.3 双园格局演变对比

计算获得 *LPDI* 为 0.31，表明 2 个湿地在空间结构上存在差异。王官湿地呈“水域核心－道路切割”的破碎化格局，人工斑块持续增加；斗南湿地呈“水域－林地双核心”的优化格局，自然斑块持续增加。高强度干扰区（王官湿地）对生态空间的挤压效应更显著，而中度干扰区（斗南湿地）则为自然斑块恢复提供更多空间。

表 4 王官湿地公园斑块类型结构统计

Tab.4 Statistical of patch type structure in Wangguan Wetland Park

单位：个

年份 / 类型	透水性良好的自然斑块	透水性较差的自然斑块	透水性良好的人工斑块	透水性较差的人工斑块	自然网络	半自然网络	人工网络
2016	27	0	0	6	45	16	5
2020	32	0	0	11	47	27	7
2024	26	1	0	13	25	28	20

表 5 斗南湿地公园斑块类型结构统计

Tab.5 Statistical of patch type structure in Dounan Wetland Park

单位：个

年份 / 类型	透水性良好的自然斑块	透水性较差的自然斑块	透水性良好的人工斑块	透水性较差的人工斑块	自然网络	半自然网络	人工网络
2016	28	0	0	9	42	20	10
2020	36	0	0	13	58	28	18
2024	38	2	0	13	50	35	18

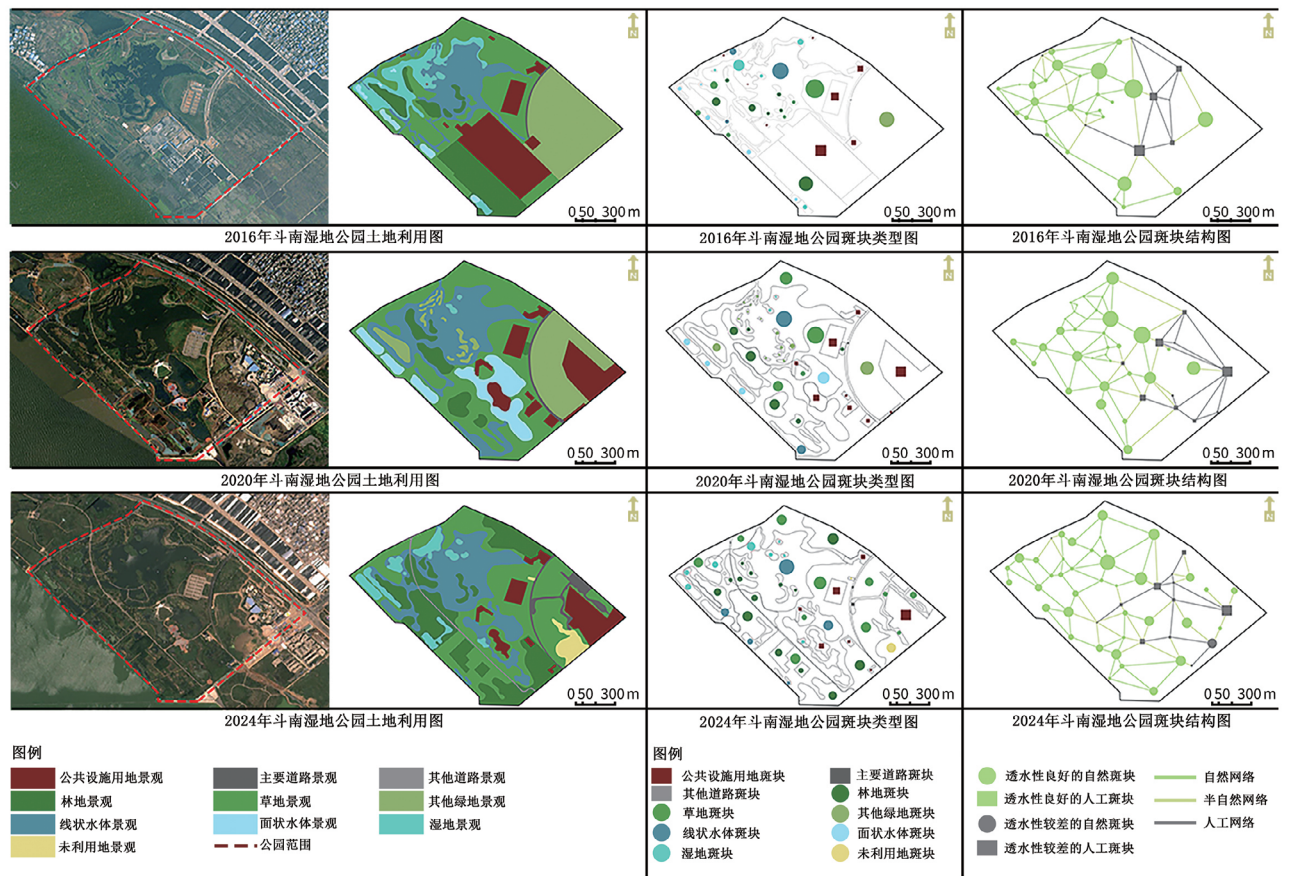


图 3 斗南湿地公园 2016—2024 年土地利用、斑块变化图

Fig.3 Land use and patch change map of Dounan Wetland Park from 2016 to 2024

3.2 生态系统服务价值变化与对比

3.2.1 价值总量变化

2016—2024 年，2 个湿地的 ESV 均显著增长（图 4）。王官湿地由 10.16 万元增至 20.86 万元，增幅为 105.3%；斗南湿地由 32.51 万元增至 71.14 万元，增幅为 118.8%。2 个湿地价值总量的显著提升，充分反映湿地建设对区域生态系统服务功能的改善成效。

从变化阶段来看，2016—2020 年为快速增长期：王官湿地增长 64.5%，斗南湿地增长 131.7%，得益于退耕还林还草等政策，水域、林地等生态用地面积增加；2020—2024 年为结构调整期：王官湿地继续增长 24.8%（水域持续扩大），斗南湿地小幅回落 5.6%（草地价值下降、林地价值恢复性增长）。

3.2.2 主要景观类型价值贡献

从价值结构来看（图 4），2 个湿地呈现显著差异。王官湿地为“水域主导型”。水域价值由 5.43 万元增至 16.28 万元，占比由 53.4% 升至 78.0%；草地价值先增后降，占比由 20.2% 降至 7.5%；林地价值先降后升，但占比由 26.4% 降至 14.3%。水域主导地位持续增强，反映水域在湿地生态系统服务供给中的核心作用。

斗南湿地为“水域-林地复合型”。水域价值由 10.86 万元增至 51.18 万元，占比由 33.4% 升至 71.9%；草地价值持续下降，占比由 55.6% 降至 12.0%；林地价值先降后升，占比由 11.0% 升至 16.0%。草地下降、林地上升的结构性转换，反映斗南湿地生态修复过程中的植被演替规律。

从不同景观类型生态系统服务价值变幅来看（图 5），快速增长阶段（2016—2020 年）2 处湿地的水域价值均出现极高涨幅；进入结构调整阶段（2020—2024 年），王官湿地草地呈现负向变幅，斗南湿地林地保持较高正向增长，

进一步印证 2 处湿地在 2 个研究阶段的景观与生态价值差异化演变特征。

3.2.3 服务功能结构对比

从服务功能类型来看（表 6），调节服务在 2 个湿地中均占绝对主导地位：王官湿地由 7.89 万元增至 17.38 万元（增幅为 120.3%）；斗南湿地由 23.60 万元增至 58.22 万元（增幅为 146.7%）。供给、支持和文化服务价值占比较小但增长趋势显著。

从单项服务价值来看，水文调节是贡献最大的服务功能，占 2 个湿地总价值的比例分别达 67.7%（王官）和 63.9%（斗南），气候调节、净化环境共同构成湿地生态系统调节服务的主体；作为支持服务的生物多样性服务价值同样较高。2 个湿地的生态系统服务功能差异指数 *EFDI* 为 0.42，说明两者在功能结构具有显著差异。

3.2.4 单位面积服务价值对比

为消除 2 个湿地总面积不同对生态系统服务价值比较的影响，研究进一步计算单位面积 ESV（表 7）。结果显示，斗南湿地不仅在价值总量上领先，其单位面积服务价值亦显著高于王官湿地。因此在排除面积因素后，斗南湿地更高的空间利用效率和更优的景观结构使其生态系统服务功能显著强于王官湿地。

3.3 “格局-功能”耦合关系对比

3.3.1 相关性分析

Spearman 及 Pearson 相关性分析结果（表 8）显示：
1) 破碎化指数 NP、PD 和景观形状指数 LSI 与 ESV 呈稳定负相关，表明景观破碎化程度越高，斑块形状越复杂，生态系统服务价值越低。王官湿地负相关程度更强，表明在高强度城市化区域，景观破碎化对功能的抑制作用更明显。
2) 多样性指数 SHDI 与 ESV 呈正相关，说明景观多样性越

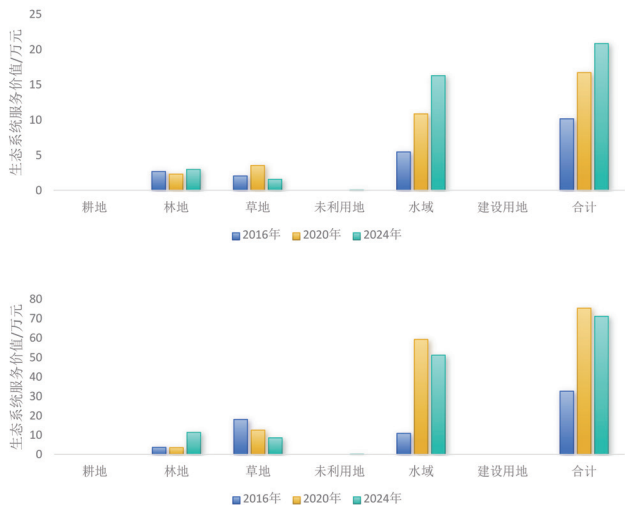


图 4 湿地公园生态系统服务价值对比

Fig.4 Comparison of ecosystem service values in wetland parks

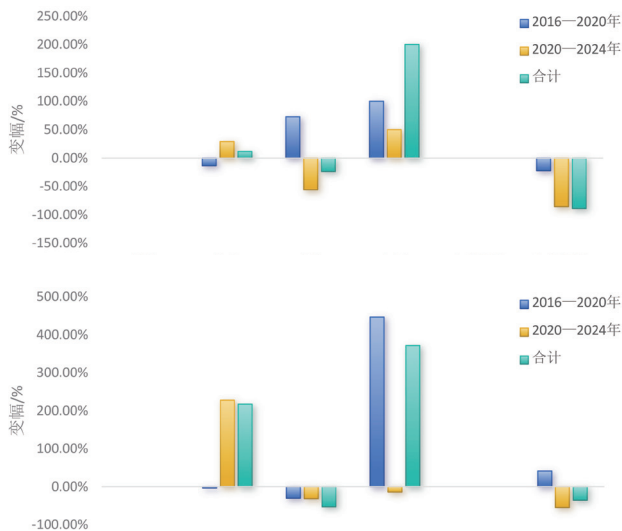


图 5 2016—2024 年湿地公园不同景观类型生态系统服务价值变幅

Fig.5 Variation rate of ecosystem service values of different landscape types in wetland parks from 2016 to 2024

高，越可能支持更多样的生态系统服务功能。3) 连通性指数 CONNECT 和蔓延度 CONTAG 与 ESV 呈正相关，与理论预期一致。连通性越高，物种迁移、物质交换和能量流动越顺畅，生态系统服务价值越高。由于样本量有限 (n=9)，上述相关系数主要指示变量间关联趋势，而非严格的统计推断，结论需结合空间耦合协调度分析综合判断。

3.3.2 空间耦合分析

基于 GIS 空间叠加分析，将 2 个湿地的 2024 年格局指数与服务价值空间分布图叠置，识别 4 类耦合单元 (图 6)。

王官湿地呈“水域核心-道路切割”格局，核心保育区主要分布在公园中部水域，是水文调节的核心供给区；人工干预区集中在公园入口、管理用房、停车场及道路两侧；潜力提升区位于湖滨植被带，景观格局较连续但服务价值中等。

斗南湿地呈“水域-林地双核心”格局，核心保育区主要分布在公园西部水域，是水文调节的核心供给区；潜力提升区分布在东部林地 (格局稳定、价值提升) 和北部草地过渡区 (价值持续下降，处于结构转型期)；优先恢复区位于湖滨生态交错区，水体与植被界面的形态复杂，景观多样性高；人工干预区集中在公园入口及管理设施区，占比低于王官湿地。

两者存在差异的核心原因在于人为干扰方式不同。王官湿地被城市干道深度穿插，人工设施的负面溢出效应沿着道路形成“低价值走廊”，破坏生境连续性；而斗南湿地完整保留了自然岸线和连片的林草交错带，因此核心保育区和潜力提升区呈现面状和块状的连续分布。

3.3.3 耦合协调度演变

耦合协调度计算结果显示 (表 9)：2016—2024 年，2 个湿地的 D 值持续提升。王官湿地 D 值由 0.706 (中级协调) 上升至 0.787 (中级协调)，提升 0.081，增幅 11.5%；斗南湿地 D 值由 0.747 (中级协调) 上升至 0.842 (良好协调)，提升 0.095，增幅 12.7%。

从演变趋势看，2 个湿地的耦合协调度均持上升态势，反映湿地公园建设对格局与功能协同性起正向促进作用。斗南湿地耦合协调绝对水平始终高于王官湿地，凸显中度干扰环境下湿地生态保护与功能提升的综合优势；王官湿地受高强度人类干扰，尽管协调水平整体偏低，但仍保持稳定增长，证实高强度干扰区生态修复对格局与功能的协同性同样具备改善效应。

3.4 小结

综上，2 个湿地存在本质差异：王官湿地为“格局制约型”，景观破碎化程度高，人工切割显著，格局对功能的抑制作用突出，整体处于中级协调阶段；斗南湿地为“功能转型型”，植被结构处于演替期，草地向林地价值转换，格局与功能协同性较好，已经迈入良好协调阶段。研究结论为差异化修复提供直接依据。

3.5 参数敏感性分析

为检验当量因子法关键参数 E_a 和 E_b 对核心结论的稳健性，研究开展敏感性分析。以 2024 年 2 个湿地的 ESV 为基

准情景，对参数进行 $\pm 20\%$ 的数值调整，生成 4 个替代情景：分别为 $E_a \pm 20\%$ (对应粮食价格或产量的增减)，以及 $E_b \pm 20\%$ (对应高原植被生产力高于或低于预期)。研

表 6 2016—2024 年湿地公园生态系统服务价值变化

Tab.6 Changes in comprehensive ecosystem service value of wetland parks from 2016 to 2024

单位：万元

生态系统服务	王官湿地公园			斗南湿地公园		
	2016 年	2020 年	2024 年	2016 年	2020 年	2024 年
供给服务	0.69	1.17	1.48	2.16	5.41	5.00
调节服务	7.89	13.38	17.38	23.60	62.73	58.22
支持服务	1.28	1.70	1.55	5.52	5.53	6.19
文化服务	0.31	0.45	0.46	1.22	1.67	1.73

表 7 两园单位面积 ESV 对比

Tab.7 Comparison of ESV per unit area between the two parks

年份	王官湿地公园		斗南湿地公园	
	总价值 / 万元	单位面积 ESV/ (万元 /hm ²)	总价值 / 万元	单位面积 ESV/ (万元 /hm ²)
2016	10.16	0.213	32.51	0.440
2024	20.86	0.438	71.14	0.963

表 8 景观格局指数与生态系统服务价值相关性分析

Tab.8 Correlation analysis between landscape pattern index and ecosystem service value

格局指数	王官湿地公园 ESV		斗南湿地公园 ESV	
	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson
NP	-0.88	-0.87	-0.79	-0.79
PD	-0.91	-0.90	-0.82	-0.81
LSI	-0.73	-0.72	-0.69	-0.68
CONNECT	0.89	0.89	0.86	0.85
CONTAG	0.77	0.76	0.81	0.80
SHDI	0.65	0.64	0.71	0.71

表 9 王官、斗南湿地公园耦合协调度演变

Tab.9 Evolution of coupling coordination degree between Wangguan and Dounan Wetland Park

年份	王官湿地公园			斗南湿地公园		
	LPCI	EFCI	D	LPCI	EFCI	D
2016	0.52	0.48	0.706	0.61	0.52	0.747
2020	0.58	0.52	0.739	0.69	0.68	0.828
2024	0.63	0.61	0.787	0.72	0.70	0.842

究计算得到各情景下 ESV 总量、价值结构类型、2 个湿地的差异指数 *EFDI* 后, 将结果与基准情景进行对比 (表 10)。

结果显示: 1) 王官湿地 ESV 变化幅度为 -12.7%~+14.2%, 斗南湿地变化幅度为 -13.5%~+15.1%, 但所有情景下斗南湿地 ESV 始终高于王官湿地。2) 所有替代情景中, 王官湿地水域占比高于 72%, 仍属“水域主导型”; 斗南湿地林地占比高于 14%, 水域占比 75%, 仍属“水域-林地复合型”, 结构分类未改变。3) 替代情景下 *EFDI* 在 0.40~0.44 变化, 相对变化在 $\pm 5\%$ 以内, 表明参数变动会引起价值量波动, 但功能结构差异程度保持稳定。总体来看, 参数变动下, 核心结论均未改变, 说明采用当量因子法具有较强的稳健性。

4 讨论

4.1 不同干扰强度下湿地格局与功能耦合响应

研究表明, 不同城市化梯度下湿地“格局-功能”耦合特征差异显著。高强度干扰的王官湿地呈“水域核心-道路切割”格局, 破碎化格局对生态功能的抑制作用突出; 受中度干扰的斗南湿地呈“水域-林地双核心”格局, 较高的连通性对生态功能的促进作用更为显著。

从“格局-过程-功能”耦合理论看^[2]: 王官湿地的“道路切割”格局阻断了水文连通性和物种迁移, 削弱了水质净化等服务功能; 斗南湿地“水域-林地”复合格局为水文过程和生物迁徙提供了通道, 促进服务协同提升。这与佛罗里达大沼泽地修复中“提升水文连通性可促进水体交换与营养循环”的结论一致^[20]。王官湿地为水域单一主导型结构, 而斗南湿地的景观多样性更高, 能够支撑更均衡的生态服务结构, 充分体现了景观多样性对服务多功能性的支撑作用。

4.2 基于耦合诊断的差异化修复策略

研究基于 2 个湿地“格局-功能”耦合特征, 提出差异化的修复策略。

王官湿地的核心瓶颈是景观破碎化制约功能, 策略以“格局修复”为主: 1) 修复水系连通性^[21], 在道路切割节点建设生态廊道, 拆除硬质驳岸, 恢复自然岸线; 2) 构建生态廊道, 在主要道路两侧增加植被缓冲带, 次要道路降级为生态步道, 提升景观连通性指数; 3) 整合小型破碎斑块, 增加生态“踏脚石”, 减少人工干预区面积。

斗南湿地的核心任务是推动植被结构转型, 策略以“功能优化”为主: 1) 优化植被结构, 在北部草地过渡区规划“草地-林地”演替带, 形成“水域核心-林地斑块-草地过渡”的梯度格局; 2) 恢复自然缓坡岸线, 构建水陆交错带; 3) 融合文化功能, 依托斗南花市资源规划花卉文化体验园, 提升文化服务价值。

4.3 结论适用性与推广边界

本文基于昆明滇池东岸王官、斗南湿地 (海拔约 1 880 m, 亚热带季风气候) 进行对比研究, 所得结论可推广至自然本底相似的高原湖滨湿地, 如滇池、洱海、抚仙湖等流域海拔相近、城市化梯度分明的区域。但适

用性存在边界条件: 1) 本研究适用于海拔约 1 800~1 900 m 的区域, 高于 3 000 m 或气候类型不同的湿地, 格局与功能的耦合关系差异大, 需谨慎外推。2) 研究聚焦于城市化驱动干扰, 对于农业面源污染、旅游过度开发、水利工程调控等主导干扰的湿地, 响应机制可能有所不同。3) 研究对象为中小型城市湿地公园 (面积小于 200 hm²), 大型高原湖滨带或更大尺度的湿地可能存在尺度效应, 适用性有待验证。建议后续在更多高原湖滨湿地 (如不同海拔梯度、不同干扰组合) 中开展多案例比较或跨区域验证, 以检验和丰富本研究提出的耦合类型框架。

5 结语

本研究以昆明滇池区域王官、斗南湿地公园为对比案例, 构建“格局-功能”双维评价体系, 揭示 2 个湿地的演变特征与耦合差异。研究发现, 在格局演变方面, 2016—2024 年王官湿地人工斑块占比显著提升, 呈“水域核心-道路切割”破碎化格局; 斗

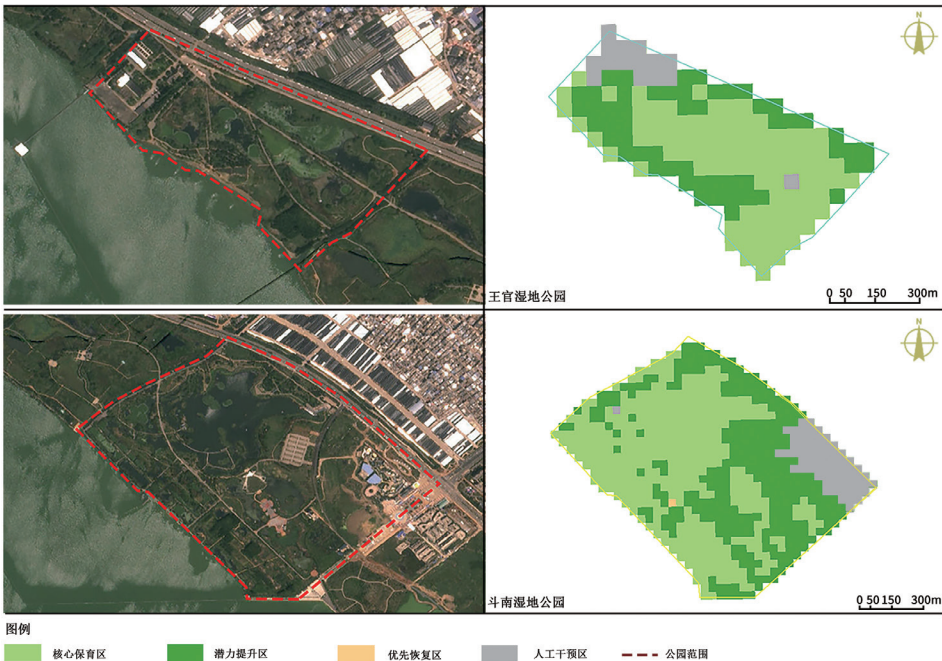


图 6 湿地公园景观格局与生态系统服务空间耦合分布图

Fig.6 Spatial coupling distribution map of landscape pattern and ecosystem services in wetland park

表 10 参数敏感性分析
Tab.10 Parameter sensitivity analysis

情景	参数 变动	王官湿地公园		斗南湿地公园		EFDI	结构分 类是否 改变
		ESV/ 万元	变化幅 度 /%	ESV/ 万元	变化幅 度 /%		
基准	-	20.86	-	71.14	-	0.42	-
情景 1	$E_a+20\%$	23.82	+14.2	81.88	+15.1	0.44	否
情景 2	$E_a-20\%$	18.21	-12.7	61.55	-13.5	0.40	否
情景 3	$E_b+20\%$	22.31	+6.9	75.89	+6.7	0.43	否
情景 4	$E_b-20\%$	19.59	-6.1	66.39	-6.7	0.41	否

南湿地自然斑块持续增加，形成“水域－林地双核心”优化格局。在功能结构方面，王官湿地为“水域主导型”，斗南湿地为“水域－林地复合型”；调节服务（尤其水文调节）在 2 个湿地中均占主导地位。在格局与功能相关性方面，破碎化指数与 ESV 呈显著负相关，连通性指数与 ESV 呈显著正相关。在空间耦合与协调性方面，王官湿地属于格局制约型，景观破碎化程度高，人工切割对格局约束突出；斗南湿地属于功能转型型，植被群落处于演替阶段，草地向林地发生生态价值转换，格局条件更优；2 处湿地耦合协调度均持续提升，王官湿地为中级协调，斗南湿地由中级协调提升至良好协调。在差异化修复策略方面，王官湿地以“格局修复”为先导，聚焦水系连通、生态廊道构建与斑块整合；斗南湿地以“功能优化”为核心，聚焦植被演替、水陆交错带修复与文化服务融合。

研究对同一流域内自然本底相似但干扰强度不同的高原湖滨湿地进行系统的格局与功能耦合对比，丰富了高原湿地修复的理论框架；在方法上构建“诊断－设计－评估”的研究范式，将耦合协调度模型、空间叠加分析与差异指数相结合，实现格局与功能耦合的多层次定量诊断；在实践方面提出针对不同干扰强度区域的差异化修复策略，为同流域内湿地优化提供可操作技术路径。

研究存在以下局限：结论的普适性受限于海拔、气候、湿地规模及干扰类型等边界条件，推广至更高海拔、不同气候区、大型湿地或其他干扰类型时需谨慎验证；其次，当量因子法适用于宏观尺度，用于小尺度湿地时主要反映“潜在服务供给能力”，而非实际生态功能；相关性分析样本量较小，结论需结合空间耦合与协调度综合判断。未来研究需延长监测序列，揭示格局与功能耦合的长时序演变规律及潜在阈值效应，可引入 INVEST 等过程模型进行精细评估，并加强社会维度分析，以进一步完善高原湿地精准修复的理论框架。

注：图片均由作者自绘。

参考文献：

[1]MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and

human well-being: wetlands and water synthesis[R]. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.

[2] 王书明, 张志华. 景观格局 - 生态过程 - 生态系统服务的系统耦合——傅伯杰景观生态学思想述评 [J]. 鄱阳湖学刊, 2017 (2) : 78-83, 127.

[3]DAVIS S M, OGDEN J C. Everglades: The Ecosystem and Its Restoration[M]. Delray Beach: St. Lucie Press, 1994.

[4]MOHR V, SCHRUM C, ZHANG W. Limited Blue Carbon Potential of Intertidal Seagrass Meadows in the Wadden Sea – A Case Study in a Tidal Basin[EB/OL] (2026-02-11) [2026-06-09]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2026-616>.

[5] 范育蕾, 夏哲一, 魏雪, 等. 四个时期长江经济带湿地生态系统服务对景观格局响应研究 [J]. 湿地科学, 2024, 22 (1) : 139-147.

[6] 刘娜, 王克林, 段亚锋. 洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (15) : 4641-4650.

[7] 邹建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[8] 龚燕. 跨区域视角下的蓝绿生态网络构建及优化研究: 以长三角生态绿色一体化示范区为例 [D]. 上海: 华东理工大学, 2025.

[9] 吴娇, 刘春霞, 李月臣. 三峡库区 (重庆段) 生态系统服务价值变化及其对人为干扰的响应 [J]. 水土保持研究, 2018, 25 (1) : 334-341.

[10] 刘世梁, 安南南, 尹艺洁, 等. 广西滨海区域景观格局分析及土地利用变化预测 [J]. 生态学报, 2017, 37 (18) : 5915-5923.

[11] 昆明市统计局. 昆明统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.

[12] 李哲惠. 昆明市主城区滨水空间景观格局演变研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.

[13] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. 自然资源学报, 2015, 30 (8) : 1243-1254.

[14] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值 [J]. 资源科学, 2015, 37 (9) : 1740-1746.

[15] 廖柳文, 秦建新. 环长株潭城市群湿地生态安全研究 [J]. 地球信息科学学报, 2016, 18 (9) : 1217-1226.

[16] 朱颖, 吴颖茜, 李欣. 协调发展视角下沙家浜国家湿地公园质量评价 [J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37 (3) : 432-438.

[17] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例 [J]. 热带地理, 1999 (2) : 76-82.

[18] 王兴华. 关于群落的相似系数 [J]. 杭州大学学报 (自然科学版), 1987 (3) : 259-264.

[19]RICOTTA C, PODANI J. On some properties of the Bray-Curtis dissimilarity and their ecological meaning[J]. Ecological Complexity, 2017, 31: 201-205.

[20]DAVIS S, NAJA M, ARIK A. The heart of everglades restoration[J]. The environmental forum, 2015, 32 (4) : 22-27.

[21] 岳思言. 基于生态系统服务的滨海山地城市蓝绿空间系统优化研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2025.

作者简介：

何雨璐 /1999 年生 / 女 / 四川广安人 / 昆明理工大学建筑与城市规划学院 (昆明 650500) / 在读硕士研究生 / 专业方向为景观设计

唐文 (* 通信作者) /1966 年生 / 男 / 四川成都人 / 学士 / 昆明理工大学建筑与城市规划学院 (昆明 650500) / 教授 / 研究方向为风景园林设计 /E-mail: 341740935@qq.com