

基于乡村水塘的生态网络构建及优化调控

潘远珍^{1,2,3}, 袁兴中^{2,3}, 王芳^{2,3}, 周李磊⁴, 张丹^{2,3}, 余先怀⁵

(1. 贵州中贵环保科技有限公司, 贵州 贵阳 550000; 2. 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400030;
3. 重庆大学三峡库区消落区生态修复与治理研究中心, 重庆 400030;
4. 重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 5. 重庆市梁平区湿地保护中心, 重庆 405225)

摘要: 鉴于乡村水塘长期得不到重视与保护而导致水塘景观逐渐丧失的现状, 通过构建水塘景观生态网络并优化调控途径, 对区域水塘景观规划和生态保护具有重要意义。以重庆市梁平区仁贤镇为例, 基于2019年遥感影像和高程数据, 运用空间统计分析、景观格局指数、水文分析及最小累积阻力模型等方法, 探讨水塘空间分布规律并构建水塘景观生态网络。结果表明: (1) 水塘空间分布受海拔、坡度和聚落等因素影响, 集中分布于低海拔(420.00~447.74 m)、低坡度(0~6°)、邻近聚落(0~40 m)区域; (2) 构建水生态网络和生境网络以提供水塘连通性, 水塘斑块、汇水节点、自然水系及雨水径流共同构成水生态网络体系, 其中雨水径流282条, 汇水节点199个, 目前仅有40个水塘位于汇水节点处; 生境网络体系中, 潜在生态廊道351条, 主要由农田与林地构成; (3) 水塘景观生态优化调控途径可从空间配置、生态网络、生境质量及景观构成4个方面进行。研究结果可为水塘景观保护、小微湿地建设及乡村环境改善提供参考。

关键词: 乡村水塘; 景观格局; 生态网络; 优化调控; 仁贤镇

中图分类号: TU986 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2023)04-0099-08

乡村水塘一般是指分布于乡村地区, 面积小于8 hm²且一年之中至少存在4个月的小型水体(Biggs et al, 1991)。作为乡村生态系统和乡村社会重要组成部分, 水塘有农田灌溉、日常生活供水、雨洪滞蓄及维持生物多样性等生产-生活-生态价值(Chen et al, 2019)。然而, 水塘面积小且空间上难以识别、保护意识淡薄、建设用地侵占及水体污染等因素将导致水塘生态系统结构受损、面积和数量骤减甚至消失。《国际湿地公约》第十三届缔约方大会上批准了中国政府递交的《小微湿地保护与管理》决议草案(赵晖等, 2018), 我国对以塘为核心的小微湿地保护、恢复及管理给予了高度重视。重庆市梁平区政府在国际湿地城市建设中提出并实施了“全域治水、湿地润城”“城市湿地连绵体”“乡村小微湿地+”策略(蒋启波, 2020)。如何全面优化提升水塘景观对流域及乡村生态环境改善具有重要意义。

与大型湖泊、河溪等其他淡水生态系统相比, 小型水体对流域和区域生态保护的作用同样重要(Downing, 2010)。针对水塘景观优化, 国外主要以如何提高水塘生物多样性为问题导向开展了研究(Oertli & Parri, 2019; Garrett-Walker et al, 2020); 国内学者则从生态保护、景观营造及环境改善等方面探索了水塘景观优化策略(骆浩雯和李胜, 2019; 袁兴中等, 2019)。然而, 这些研究大多数集中于单个水塘景观优化, 缺乏对流域及区域水塘景观的整体生态优化调控。本文以重庆市梁平区仁贤镇为例, 基于水塘空间格局、生态网络构建并结合水塘景观现状问题, 探讨水塘生态网络构建及景观生态优化调控途径, 旨在为流域水塘景观规划、生态保护及小微湿地建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

梁平区位于重庆市东北部, 地处川东平行岭谷区, 辖区面积1 892 km², 全区呈“三山五岭、两槽一坝、丘陵起伏、六水外流”的自然景观, 形成了低山、丘陵、平坝兼有而以丘陵为主的特殊地貌。本研究区位于仁贤镇, 该镇地处梁平坝子腹心地带, 交通便利(图1)。研究区属亚热带湿润季风气候, 多年平均气温16.6℃, 极端最高气温40.1℃, 年均降雨量约为1 300 mm。境内有龙溪河、白沙河以及交错纵横的溪流、沟渠和分散的大小水塘。

收稿日期: 2021-11-21 修回日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178031); 重庆市科技兴林项目(渝林科研2020-4)。

作者简介: 潘远珍, 1996年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为大地景观规划与生态修复。E-mail: 18785074240@163.com

通信作者: 袁兴中, 1963年生, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事生态系统设计、湿地生态学、生态修复研究。E-mail: 1072000659@qq.com

仁贤镇为梁平区重要农耕区域,早期为满足农业生产需求,在平地凿池、谷口汇水处筑塘坝,就地修建灌溉水塘。研究区现有水塘 546 个,总面积为 79.06 hm²。通过查阅相关资料及实地调研发现,研究区水塘存在以下问题:(1)水塘水体被污染,主要是农药使用及肥水养鱼所致;(2)水塘植物种类单一,群落结构层次单一;(3)水塘水岸多为硬质陡岸,岸线平直;(4)水塘空间配置不合理;(5)水塘的水文连通性及生态连通性较差,因道路网络而被分隔成斑块状,导致水塘间的连通度较低,与其他自然水域连通度低。

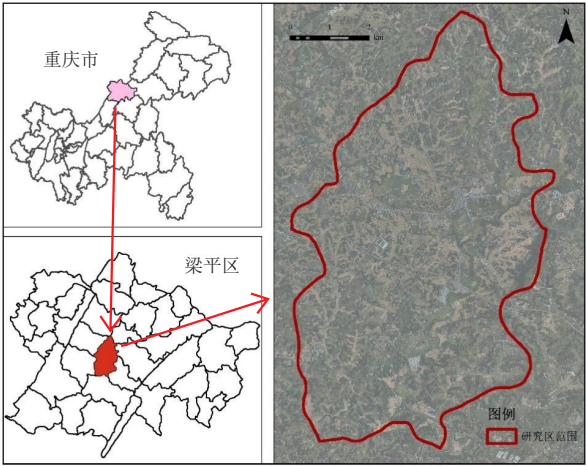


图1 研究区域位置

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源与处理

遥感影像来自 2019 年梁平区国土三调遥感影像数据,空间分辨率为 0.2 m。基于 ArcGIS10.4 软件,对遥感影像进行空间配准、裁剪等处理。通过目视解译法,提取研究区土地利用类型,并结合地面调查,获取研究区水塘数据。参照《土地利用现状分类标准》(GB/T21010-2007),按一级分类标准,将景观类型划分为七大类,即林地、耕地、水域(包括水塘)、草地、园地、建设用地及未利用地。

1.3 技术路线

通过实地调研辨识区域水塘景观现状问题,结合水塘空间分布规律并构建水塘景观生态网络,在此基础上确定该区域水塘景观优化调控目标,结合目标提出不同层面的优化调控途径(图2)。

1.4 空间统计分析

水塘空间分布受自然、生产及社会因素的影响,因此本文从 3 个方面选取代表性主导因子对水塘空间分布进行分析,并探究其空间分布与主导因子的关系(马晓燕等,2016)。考虑数据采集的可行性和

定量分析的可操作性,选取高程、坡度因子作为自然因素,与农田分布关系作为生产因素,离居民点距离、与聚落组合形式作为社会因素;此外,本研究采用景观指数分析水塘景观空间格局(苏常红和傅伯杰,2012)。基于景观指数间的相关性(布仁仓等,2005),并结合研究区实际景观特征,从类型水平上选取景观指数斑块面积(CA)、斑块所占百分比(PLAND)、斑块数(NP)、斑块密度(PD)、斑块形状指数(LSI)。

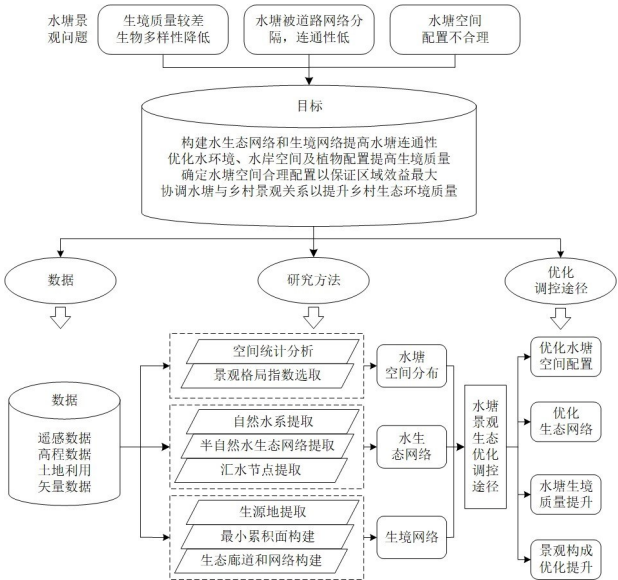


图2 水生态网络构建技术路线

Fig.2 Technical roadmap of water ecological network construction

1.5 水生态网络构建

水生态网络由雨水径流构成的半自然水生态网络和沟-渠-河-塘构成的自然水生态网络共同组成(陆明和柳清,2016)。水塘在水生态网络中扮演重要角色,水塘景观是重要的农业生态基础设施,与水塘相连接的沟渠在农田疏洪排涝中起到重要作用;此外,水塘景观发挥着雨洪管理、维持生物多样性等多种生态系统服务(袁兴中等,2017;姜芊孜,2018)。水生态网络连通区域水塘斑块,具有实现乡村水文循环、生态连通及维持生态健康的功能(徐婧,2015),构建步骤如下。

1.5.1 半自然水生态网络提取 借助 ArcGIS 的 hydrology 工具提取研究区半自然水生态网络,提取过程参考程峥等(2011)。结合研究区实际情况,选取汇流临界值 3 000;在此基础上,采用 Strahler 分级法对区域雨水径流进行等级划分。

1.5.2 汇水节点提取 通过分析半自然水生态网络

结构生成汇水节点,包含地理位置特征和水文信息,在水生态网络中对水文循环控制起重要作用(徐婧,2015)。上游汇水节点以调蓄洪水、控制径流速度及改善水质等功能为主,而中下游汇水节点主要功能是提供生物栖息场所、改善区域生态环境(许乙青等,2017)。

1.6 生境网络构建

水塘景观是鱼类、水生昆虫、两栖类及鸟类的重要栖息场所,也是生境网络的生态源。生境网络将分散、孤立的小微湿地生境斑块连通,为生物迁移、繁衍及交流提供通道,进而有效提升生境空间类型的多样化及生物多样性,构建步骤如下。

1.6.1 生态源地提取 生态源地是指促进生态过程发展的景观组分。乡村水塘景观是多种生物栖息地,将其看作生物的潜在繁殖地,选取研究区所有水塘作为生态源,并合并距离较近的水塘。

1.6.2 确定阻力面 景观阻力是指物种在不同景观单元间迁移的难易程度(刘晓阳等,2021)。参考相关研究并结合区域实际情况,选取影响较大因素作为阻力因子并对其赋值(Joly & Morand, 2003; Decout et al,2012);此外,采用层次分析法(AHP)确定其指标权重。

1.6.3 构建潜在生态廊道 最小累积阻力模型(MCR)是计算物种从“源”经过不同阻力景观类型所耗费的模型(李航鹤等,2020)。在提取生态源及确定景观阻力面基础上,运用MCR模型计算生态源到其他景观单元累计距离。基于ArcGIS10.4软件平台支持,借助Linkage Mapper工具模拟潜在生态廊道,生态廊道和生态源共同构成生境网络。

2 结果与分析

2.1 景观空间分布特征

2.1.1 水塘分布与自然因素的关系 由表1可知,随着高程增加,水塘的斑块总面积(CA)、斑块所占景观比重(PLAND)、斑块数(NP)、斑块密度(PD)及景观形状指数(LSI)均呈下降趋势,均在420.00~447.74 m高程区间取得最大值,分别为43.11 hm²、3.27%、240个、14.57个/hm²、16.61,说明该区间水塘数量最多、面积最大且破碎程度较其他高程区间的高。

随着坡度增加(表2),水塘的CA、PLAND、NP、PD及LSI均呈下降趋势。水塘集中分布于坡度0~6°的区域,水塘数量及面积分别占研究区水塘总数及总面积的95.23%和96.34%。PD、LSI在0~2°坡度区间取得最大值,分别为16.78、19.74。

表1 研究区高程与水塘分布状况

Tab.1 Pond distribution at different elevation ranges in the study area

高程/m	斑块总面积/hm ²	斑块占景观比/%	斑块数/个	斑块密度/个·hm ⁻²	景观形状指数
420.00~447.74	43.11	3.27	240	14.57	16.61
447.75~458.82	19.95	1.29	194	12.30	14.60
458.83~471.67	13.66	1.55	117	12.60	11.58
471.68~496.93	2.19	0.63	35	10.10	6.84
496.94~547.00	0.15	0.28	2	3.69	1.81

表2 研究区坡度与水塘分布状况

Tab.2 Pond distribution at different slope ranges in the study area

坡度/°	斑块总面积/hm ²	斑块占景观比/%	斑块数/个	斑块密度/个·hm ⁻²	景观形状指数
0~2	51.94	2.88	301	16.78	19.74
2~6	24.32	1.37	219	15.94	18.66
6~15	2.69	0.54	23	10.09	7.79
15~25	0.11	0.19	3	5.07	1.91
>25	0.00	0.00	0	0.00	0.00

2.1.2 水塘分布与生产因素的关系 水塘分布于农田集中区,西部及中部的水塘较为密集,北部和南部水塘零星分布且数量较少。块状水塘沿河流分布且多数为养殖塘,水田、水浇地周围水塘数量较多,而旱地附近水塘相对较少。低山丘陵区域存在独特的丘区结构(刘杨靖等,2017);水塘通常位于丘区结构不同位置,发挥不同的功能,其主要功能是灌溉农田和削减洪峰。

2.1.3 水塘分布与社会因素的关系 水塘空间分布影响区域水资源分配,为方便村民取水、发展水产养殖业,水塘常位于房前屋后,区域内水塘集中分布于居民点周围0~40 m(图3)。由此,水塘与居民点(聚落)形成不同的组合形式,包括边缘式、内嵌式和穿插式(图4),边缘式是区域内水塘与聚落的主要空间组合方式。

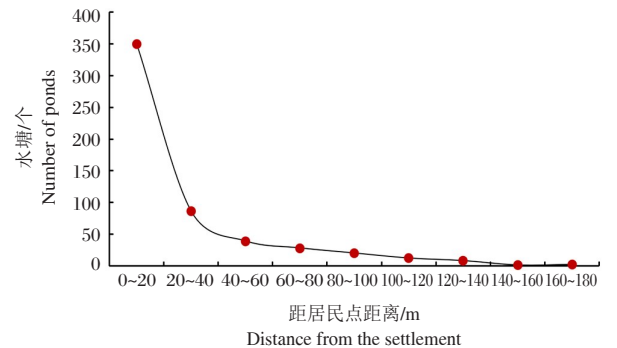


图3 研究区水塘分布状况

Fig.3 Distance between settlements and pond distribution in the study area



图 4 水塘与聚落的空间关系

Fig.4 Spatial relationship between pond distribution and settlements

2.2 乡村水塘景观生态网络

2.2.1 水生态网络 水生态网络体系中,雨水径流共 282 条,径流量最大地方位于东南部地区。汇水节点共有 199 个;其中,有 40 个水塘处于汇水节点,位于源头节点、汇水节点、出口节点的水塘分别为 38 个、1 个、1 个(图 5)。汇水节点反映区域雨水径流量的空间分布规律,说明处于汇水节点上的水塘是最初级的汇集雨水净化单元。

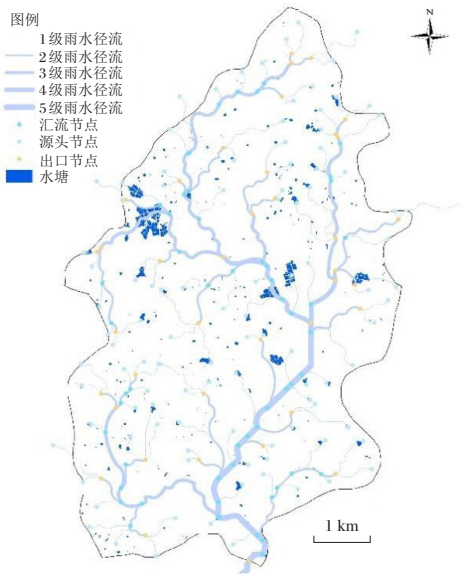


图 5 雨水径流等级划分及汇水节点

Fig.5 Rainwater runoff classification and catchment nodes

2.2.2 生境网络 潜在生态廊道共 351 条,主要分布于中西部。选取 10~60 m 作为生态廊道识别宽度(朱强等,2005),基于 ArcGIS 平台对不同宽度的生态廊道建立缓冲区(表 3)。当生态廊道宽度为 10 m 时,农田是构建廊道的主要景观类型,占廊道总面积的 58.58%;其次为林地,占廊道总面积的 24.86%,表明农田和林地对物种迁移和扩散起促进作用。生态廊道中草地占比为 4.79%,园地仅占 0.59%,建设用地在

物种迁移过程中起着较大的阻碍作用,在生态网络中占 6.34%,未利用地占 0.17%。

随着廊道宽度增加,廊道中的农田和林地占比呈下降趋势。当廊道宽度由 10 m 增至 60 m,农田、林地占比呈下降趋势,建设用地比例反而上升。建设用地面积占比不断增加,不利于物种在生态源之间的迁移和扩散并增加生态廊道建设难度。因此,生态廊道规划时,不仅考虑适宜生物活动的廊道宽度,还应考虑生态廊道宽度增加带来的建设难度及建设成本。

3 讨论

研究区水塘景观存在空间配置不合理、水体富营养化、植物种类单一、结构层次简单、水岸硬质化、水塘连通性较低等问题,影响水塘生态服务功能发挥和乡村景观生态环境质量。本文从水塘的空间配置、生态网络、生境质量以及景观构成 4 个方面提出水塘景观生态优化调控途径。

3.1 水塘空间格局优化策略

区域水塘形成主要与地形地貌、水资源分布、营建目的及农业生产活动等因素相关。地形地貌是水塘景观形成的基础条件,高海拔区域一般为山区,高坡度区域的土质稳定性差,水塘建设条件较差。研究区大多数水塘分布靠近水源、低海拔水田集中区及居民点周围。水塘空间格局优化配置应遵循以下原则:(1)以原地形为主,辅以微地形设计;(2)为使生态服务功能最大化,新建水塘一般位于现有水塘 75 m 范围外(吕明权,2018);(3)考虑到水塘稳定性,新建水塘不能建在坡度 $\geq 25^\circ$ 的位置。

研究表明,水生态网络连通性较差,仅少数水塘位于汇水节点。为提高水塘雨水径流拦截能力及自然水系间连通性,应对原有水塘位置进行适当调整。本文以实现水文调控为主导功能并结合水塘空间格局优化原则,综合考虑地形、农田、建造成本及难易程度等因素,新建水塘宜布设于低坡度、雨水汇集处

表3 生态廊道景观组分面积及比例

Tab.3 Area and percentage of each landscape component in the ecological corridor

廊道宽度/m	指标	林地	水域	建设用地	草地	园地	农田	未利用地	总和
10	面积/hm ²	17.39	3.28	4.43	3.35	0.41	40.98	0.12	69.95
	占比/%	24.86	4.68	6.34	4.79	0.59	58.58	0.17	100
20	面积/hm ²	33.13	8.51	10.54	6.97	0.82	83.31	0.27	143.55
	占比/%	23.08	5.93	7.35	4.86	0.57	58.03	0.18	100
30	面积/hm ²	48.37	14.23	17.88	10.90	1.23	126.14	0.44	219.19
	占比/%	22.07	6.49	8.16	4.97	0.56	57.55	0.20	100
40	面积/hm ²	63.32	19.72	25.79	15.00	1.62	169.51	0.65	295.61
	占比/%	21.42	6.67	8.72	5.07	0.55	57.34	0.22	100
50	面积/hm ²	78.31	24.77	33.93	19.11	2.02	213.30	0.87	372.32
	占比/%	21.03	6.65	9.11	5.13	0.54	57.29	0.23	100
60	面积/hm ²	93.38	29.30	42.46	23.35	2.42	256.98	1.06	448.94
	占比/%	20.80	6.53	9.46	5.20	0.54	57.24	0.24	100

及水系交汇的汇水节点处(图6),以充分发挥水塘水文调节功能。本文水塘空间优化目标单一且优化结果仅为理论分析,在今后的研究中,应结合当地村民现实需求、现实情况(如实际用途等)及当地人文景观(如用水习俗等),以实现多目标优化。

次是结合半自然水生态网络以提高自然水生态网络连通性;同时,根据区域实际水文情况实施生态修复,提高地表径流与河流、沟渠及水塘的水系连通。

基于潜在生态廊道景观组成(表3),提出疏通生态廊道合理建议,针对不同景观要素类型主导的生态廊道应明确优化侧重点。以农田为主的潜在生态廊道,构建农田防护绿地以确保生态廊道的稳定性(高宇等,2019);以林地或草地为主的潜在生态廊道,应通过“林-草-湿”一体化建设优化生态廊道结构;以水域为主的潜在生态廊道,通过种植水生植被等方式,为廊道内物种迁移提供更多可能性。

Chen等(2017)对水塘景观连通性的研究为完善水塘生态网络提供了思路。随着生态空间规划对生态系统服务提升提出新的要求,生态网络从单一生物保护目标向多目标复合方向发展,需考虑结构和功能因素来优化生态网络。本文基于镇域尺度,从生物、水文过程角度分别构建生境网络、水生态网络,基于 ArcGIS 空间叠加,形成水塘的生态网络。水生态网络与生境网络紧密结合,实现塘间的有效连通,使生态系统整体稳定发挥功能。

3.3 水塘生境质量提升途径

生境质量影响乡村生物多样性、乡村生态环境质量。水环境是影响水塘景观质量的核心要素;水岸及植物是生物繁殖、躲避捕食者或不利天气条件、觅食以及在水生和陆地栖息地间迁移的场所(Oertli & Parris,2019)。因此,生境质量提升应从水环境、水岸空间及植物配置三方面进行改善。

针对区域内的养殖污水、农业面源污染及生活污染问题,应控制渔业养殖肥料及农药的使用,通过设置生态塘组合处理系统,以改善水塘水质;针对水

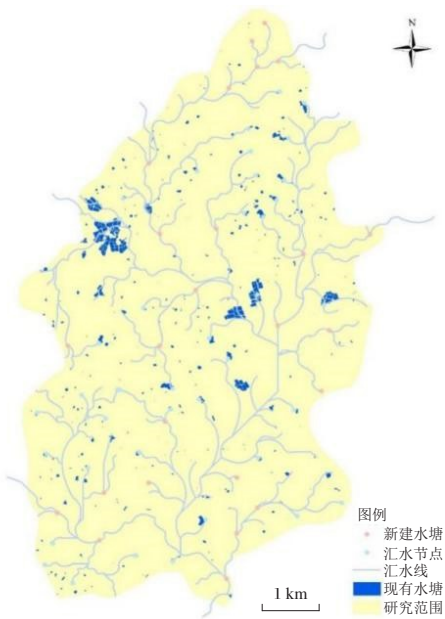


图6 研究区优化后的水塘空间分布格局

Fig.6 Optimized spatial distribution pattern of ponds in the study area

3.2 生态网络优化建议

生态网络是景观格局中的骨架,提高水系廊道及生态廊道的连通性是恢复区域生态资源的基础。针对水生态网络连通性较差问题,应疏通水网结构。首先是疏浚现有灌溉沟渠或开挖新的连通沟渠;其

岸硬化问题,在优化过程中应秉承柔性设计理念,通过种植植物软化水岸,植物可为鱼类、两栖类提供栖息地(李波等,2014);针对一些养殖塘的硬质陡岸,可在改造过程中将岸坡放缓,通过水岸植被构建进行生态化改造;针对水塘植物种类单一问题,应尽可能选择净水能力强、耐污能力强、观赏性好、后期维护简单、维护成本低的多种本土植物(袁兴中等,2021;李燕彬,2021);在植物种植设计上,应分区种植,水岸区域以湿生草本植物和挺水植物为主,在水塘中种植沉水植物(熊元武等,2016)。

3.4 景观构成及优化提升途径

水塘景观与周围树林、农田、聚落及水系构成独特的乡村景观风貌。水塘景观优化时,应注重与周边的自然、农业、聚落景观紧密衔接。区域内林、田、河、沟、渠、溪、塘景观组合形式多样,而集中式水塘与周围自然水系存在水文连通,易形成小微湿地群模式(图7)。相同区域内小微湿地群比同等面积的湖泊能够发挥更大的生物多样性维持作用(Oertli et al, 2002; Williams et al, 2004)。构建小微湿地群,确保了水塘之间的内部结构连通。



图7 乡村景观中的小微湿地群模式

Fig.7 Small and micro wetland group model for rural landscapes

结合丘区乡村景观结构,提出“坡顶生态保护林-坡面农田-坡底塘渔”的景观模式、“坡顶蓄水塘-坡面农田-坡底净化塘”的梯塘农业景观模式(图8)。模式中的水塘除了灌溉功能外,水塘中的植物、微生物还能起到净化农业面源污染的作用(李玉凤等,2018);生态保护林则提高了景观异质性,为生物提供生境。因此,水塘景观优化时,应保留水塘周围的杂木林、灌草丛并设置水流暗沟,以实现水塘、沟渠及水田间的连通,构建多水塘系统景观。

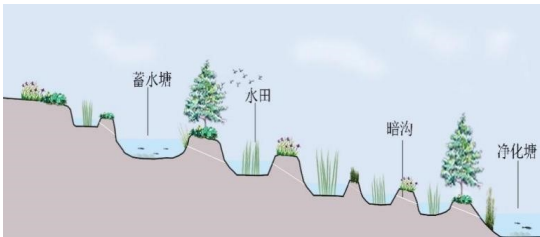


图8 梯塘景观模式剖面

Fig.8 Landscape profile of cascaded ponds

不同类型聚落与水塘景观构成不同单元结构,可发展“丘-塘-林-田-居”模式(图9)。丘区的水塘功能主要有供水调控、污染净化作用,在雨洪季节还起着滞洪缓流作用。此模式的组团型聚落,可与水塘构成内嵌式单元结构;聚落外部旱地种植蔬菜、果树,实行果-蔬间种方式;以景观美化为导向对聚落内部原有水塘空间改造,塘基上种植乡土果树等,塘内部种植水生植物;该模式的集中型、带状型、散布型聚落易与水塘构成边缘式或穿插式单元结构,针对这种结构优化提升,将水塘改造成多功能耦合的景观型水塘;通过对水塘基底进行微地形重塑以增加生境异质性,从而丰富水塘生物多样性。



图9 “丘-塘-林-田-居”模式

Fig.9 Mound-pond-forest-field-residential landscape pattern

4 结论

- (1)水塘空间分布受海拔、坡度、聚落及农田分布共同影响,集中分布于低海拔(420.00~447.74 m)、低坡度(0~6°)、邻近聚落(0~40 m)及农田区域。
- (2)水生态网络体系中,雨水径流网络为282条;汇水节点共199个,目前仅有40个水塘位于汇水节点处。生态廊道和源地共同构成区域生境网络,区域潜在生态廊道351条,主要由农田与林地构成。
- (3)空间配置合理、生境质量优良、连通性高是优化水塘景观的重要途径,可提高水塘景观生态系统服务功能,营造生态环境质量优良的乡村水塘景观。

参考文献

- 布仁仓,胡远满,常禹,等,2005. 景观指数之间的相关分析[J]. 生态学报, (10):2764-2775.
- 程峥,李永胜,高微微,2011. 基于 ArcGIS 的 DEM 流域划分[J]. 地下水, 33(6):128-130.
- 高宇,木皓可,张云路,等,2019. 基于 MSPA 分析方法的市域尺度绿色网络体系构建路径优化研究——以招远市为例[J]. 生态学报, 39(20):7547-7556.
- 姜芊孜,俞孔坚,王志芳,2018. 基于 SWMM 的陂塘系统雨洪调蓄能力及应用研究[J]. 中国给水排水, 34(11):132-138.
- 蒋启波,2020. 重庆市梁平区小微湿地建设现状及对策研究[J]. 农业与技术, 40(13):174-175.
- 李波,杜春兰,袁兴中,等,2014. 反季节水位变动背景下的护岸功能型生态结构设计研究[J]. 风景园林, (6):69-73.
- 李航鹤,马腾辉,王坤,等,2020. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 36(8):1036-1045.
- 李燕彬,2021. 城市小微湿地景观植物配置技术初探——以北京市北辰中心花园小微湿地为例[J]. 现代园艺, 44(15):26-31.
- 李玉凤,刘红玉,刘军志,等,2018. 农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响[J]. 环境科学, 39(11):4999-5006.
- 刘晓阳,魏铭,曾坚,等,2021. 闽三角城市群生态网络分析与构建[J]. 资源科学, 43(2):357-367.
- 刘杨靖,米珊珊,袁嘉,等,2017. 丘区涵养湿地生态设计研究——以三峡库区垫江县迎凤湖为例[J]. 三峡生态环境监测, 2(2):45-52.
- 陆明,柳清,2016. 基于 Archydro 水文分析模型的城市水生态网络识别研究——以“海绵城市”试点济南市为例[J]. 城市发展研究, 23(8):26-32.
- 骆浩雯,李胜,2019. 传统池塘淡水鱼类养殖场景观化探索[J]. 建筑与文化, (2):180-181.
- 吕明权,2018. 三峡库区池塘系统的环境效应及空间配置研究[D]. 重庆:中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院).
- 马晓燕,王玉宽,傅斌,等,2016. 三峡库区典型流域塘库服务功能类型及空间分布[J]. 人民长江, 47(17):36-41.
- 苏常红,傅伯杰,2012. 景观格局与生态过程的关系及其对生态系统服务的影响[J]. 自然杂志, 34(5):277-283.
- 熊元武,王中玉,何晨凤,等,2016. 城郭河曹庄煤矿塌陷坑人工湿地工程设计[J]. 中国给水排水, 32(8):63-67.
- 徐婧,2015. 基于地表自然径流保护的南方丘陵地区雨水廊道规划设计[D]. 长沙:湖南大学.
- 许乙青,刘博,黄娇,2017. 南方丘陵地区城市规划地域性应对策略[J]. 规划师, 33(11):85-93.
- 袁兴中,杜春兰,袁嘉,2017. 适应水位变化的多功能基塘系统:塘生态智慧在三峡水库消落带生态恢复中的运用[J]. 景观设计学, 5(1):8-21.
- 袁兴中,杜春兰,袁嘉,等,2019. 自然与人的协同共生之舞——三峡库区汉丰湖消落带生态系统设计与生态实践[J]. 国际城市规划, 34(3):37-44.
- 袁兴中,袁嘉,胡敏,等,2021. 顺应高程梯度的山地梯塘小微湿地生态系统设计[J]. 中国园林, 37(8):97-102.
- 赵晖,陈佳秋,陈鑫,等,2018. 小微湿地的保护与管理[J]. 湿地科学与管理, 14(4):22-26.
- 朱强,俞孔坚,李迪华. 2005. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, (9):2406-2412.
- Biggs J, Walker D, Whitfield M, et al, 1991. Pond Action: Promoting the Conservation of Ponds in Britain[J]. Freshwater Forum, 1(2):114-118.
- Chen C, Meurk C D, Jia Z, et al, 2017. Incorporating Landscape Connectivity into Household Pond Configuration in a Hilly Agricultural Landscape[J]. Landscape & Ecological Engineering, 13(1):1-16.
- Chen W, He B, Nover D, et al, 2019. Farm ponds in southern China: Challenges and solutions for conserving a neglected wetland ecosystem[J]. The Science of the Total Environment, 659:1322-1334.
- Decout S, Manel S, Miaud C, et al, 2012. Integrative approach for landscape-based graph connectivity analysis: a case study with the common frog (*Rana temporaria*) in human-dominated landscapes[J]. Landscape Ecology, 27(2): 267-279.
- Downing J A, 2010. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot[J]. Limnetica, 29(1):9-24.
- Garrett-Walker J, Collier K J, Daniel A, et al, 2020. Design features of constructed floodplain ponds influence water-bird and fish communities in northern New Zealand[J]. Freshwater Biology, 65(12):2066-2080.
- Joly P, Morand C, 2003. Habitat fragmentation and amphibian conservation: building a tool for assessing landscape matrix connectivity[J]. Comptes Rendus Biologies, 326(1): 132-139.
- Oertli B, Joye D A, Castella E, et al, 2002. Does size matter? The relationship between pond area and biodiversity[J]. Biological Conservation, 104(1):59-70.
- Oertli B, Parris K M, 2019. Review: Toward management of urban ponds for freshwater biodiversity[J]. Ecosphere, 10(7):1-10.
- Williams P, Whitfield M, Biggs J, et al, 2004. Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England[J]. Biological Conservation, 115(2):329-341.

Construction and Optimal Regulation of a Rural Pond Ecological Network

PAN Yuan-zhen^{1,2,3}, YUAN Xing-zhong^{2,3}, WANG Fang^{2,3}, ZHOU Li-lei⁴, ZHANG Dan^{2,3}, YU Xian-huai⁵

- (1. Guizhou Zhonggui Environmental Protection Technology Co. Ltd, Guiyang 550000, P. R. China;
- 2. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;
- 3. Research Center for Ecological Restoration and Control of Water Level Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;
- 4. Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;
- 5. Chongqing Liangping Wetland Protection Center, Chongqing 405225, P. R. China)

Abstract: A long-term lack of attention and protection of ponds has led to their gradual loss. It is therefore important to delineate ecological networks of ponds and propose an optimal regulatory path for regional pond landscape planning and protection. In this study, Renxian Town in Liangping district of Chongqing City was selected for a case study, and we explored the spatial distribution of ponds in the area and delineated the ecological network of ponds using spatial statistical analysis, landscape pattern indexing, hydrological analysis, landscape gradient analysis and a minimum consumption distance model. On this basis, a pond landscape ecological regulation approach was optimized for each pond, along with the current situation of the pond. The study was based on remote sensing imagery and elevation data in 2019 of Liangping district, and factors from nature, production and society aspects were selected for the analysis of the spatial distribution of the ponds. Results show that: (1) The spatial distribution of ponds was deeply influenced by factors such as elevation, slope and settlements, and the ponds were concentrated in areas of low elevation (420.00–447.74 m), low slope (0–6°) and adjacent settlements (0–40 m); (2) The construction of an aquatic ecological and habitat network aimed to provide water pond connectivity. Pond patches, catchment nodes, natural water systems and stormwater runoff together constituted the water ecological network. There were 282 rainwater run-offs and 199 catchment nodes in the ecological network, and only 40 ponds were in the catchment nodes at present. In the habitat network system, there were 351 potential ecological corridors, primarily made up of agricultural land and woodland; (3) The ecological regulation of pond landscapes should be optimized from four aspects: reasonable spatial configuration, ecological network connectivity, high quality habitat and landscape composition. Our research results provide a reference for managing and protecting pond landscapes, constructing micro-wetlands and improving the rural environment.

Key words: rural pond; landscape pattern; ecological network; optimized regulation; Renxian Town