Forestry and Environmental Science

基于冗余分析 (RDA) 的红树林水鸟物种组成特征 及影响因子研究*

屈 明¹ 刘源志弘² 邓诗泉¹ 刘曦庆³ 梁惠玲³ 杨锡涛⁴ 于冬梅²

(1. 广东省林业调查规划院,广东广州 510520; 2. 广东省科学院 动物研究所/广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广东广州 510260; 3. 广东省动物学会,广东广州 510260; 4. 希言自然资源科技(广州)有限公司,广东广州 510300)

摘要 在红树林生态系统中,水鸟多样性被认为是衡量红树林生态系统健康的重要指标。水鸟对环境因子的敏感性不同会导致其栖息地选择的差异,这些差异共同影响了红树林水鸟的物种多样性。开展红树林水鸟多样性及其影响因子分析,从景观尺度研究影响水鸟多样性的因子,可为广东省红树林生态系统健康评估及水鸟保护提供重要参考。文章分析了广东省红树林水鸟物种组成及动态变化,并应用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)方法探讨了影响红树林水鸟多样性的因子及相关性。结果如下: (1)广东红树林水鸟物种数、国家重点保护物种数和香农指数分别由2018年的56种、10种和2.4921提升至2022年的88种、23种和2.7423; (2) RDA检验显示水鸟类群各典型轴对物种-景观因子关系方差的累积解释均超过96%,且蒙特卡罗排列检验具有显著性(p<0.05),说明前两个典型轴可以很好地解释水鸟物种与景观因子变量之间的相关性;(3) RDA分析表明红树林面积、滩涂面积和水产养殖池面积是影响水鸟多样性的正向因子,人为干扰因子如道路和建设用地面积是影响水鸟多样性的负向因子。

关键词 红树林;水鸟;物种组成;影响因子;冗余分析

中图分类号: S718.63 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2023) 06-0011-09

Study on Species Composition Characteristics and Influence Factors of Mangrove Waterbirds Based on Redundancy Analysis (RDA)

QU Ming¹ LIU Yuanzhihong² DENG Shiquan¹ LIU Xiqing³ LIANG Huiling³ YANG Xitao⁴ YU Dongmei²

(1. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou, Guangdong 510520, China;

Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences/Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangzhou, Guangdong 510260, China;
Guangzhou, Guangzhou, Guangdong 510260, China;
Xiyan Natural Resources Technology (Guangzhou) Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510300, China)

Abstract Waterbird diversity is considered an important indicator to measure the health of mangrove ecosystems. The sensitivity of different waterbirds to environmental driving factors results in differences in habitat

^{*}**基金项目**: 2022 年度自然资源事务管理—生态林业建设专项资金项目:广东省林业科技创新项目 (2023KJCX028),生物多样性专项 (2022GDASZH-2022010105),广东省科学院科技发展专项 (2022GDASZH-2022010106)。

第一作者: 屈明 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事湿地资源调查监测、湿地保护与修复等研究, E-mail: 46237038@ qq. com。

通信作者:杨锡涛(1986—),男,助理研究员,主要从事野生动物保护与动物生态研究工作,E-mail: 1024807242@qq.com。

于冬梅 (1981—), 女, 助理研究员, 研究方向为动物学、保护生物学, E-mail: yudongmei50@163.com。

selection, which in combination affect waterbird diversity. The analysis of species diversity and its impact factors from the landscape scale can provide an important reference for the health assessment of the mangrove ecosystem and waterbird conservation in Guangdong Province. This study analyzed the species composition and dynamic changes of waterbirds and further explored the factors affecting the diversity of mangrove waterbirds by redundancy analysis (RDA). The results show that: 1) From 2018 to 2023, the number of bird species increased from 56 to 88, among which, the number of national key protected species increased from 10 to 23, the Shannon-wiener index increased from 2.492 1 to 2.742 3; 2) The cumulative interpretation of the variance of the species-landscape factor relationship for each canonical axis of waterbird taxa exceeded 96%, and the Monte Carlo permutation test was significant (p < 0.05), the first two canonical axes can well explain the correlation between waterbird species and landscape factors; 3) Mangrove area, beach area, and aquaculture pool area are positive factors affecting the diversity of waterbirds, and human disturbance factors such as road and construction land area are negative factors affecting the diversity of waterbirds.

Key words mangrove; waterbirds; species composition; influence factors; redundancy analysis

红树林湿地具有高光合率、高呼吸率和高归还率的特点^[1],是维持生物多样性和资源生产力有特别价值的生物活动高度集中区^[2]。受人类干扰和环境变化等多重因素影响,我国红树林资源曾遭受了严重损失^[3-7],为遏制红树林资源的损失,我国开始了红树林的保护与修复工程,以促进红树林生态系统功能的恢复。

水鸟是湿地生态系统重要的组成部分,其物种组成和多样性的动态直接反应湿地生态系统的变化,可作为监测湿地环境变化的一项客观生物指标^[8]。开展红树林湿地水鸟多样性监测及分析影响其多样性的因子对红树林生态系统质量的提升具有重要意义^[89]。为此,人们对红树林水鸟多样性进行了长期监测并进行多样性分析,如北仑河口国家级自然保护区^[10]、海南东寨港红树林^[11-12]、深圳福田红树林^[13-16]、雷州半岛红树林^[11-12]、湛江红树林保护区^[19-22]、淇澳岛^[23]等。然而,这些研究多以多样性为重点,鲜有分析影响水鸟多样性的景观因子。因此,有必要在红树林水鸟监测的基础上,探讨影响其多样性的景观因子,有助于推进红树林的保护与恢复。

广东省有红树林 1.06 万 hm², 占全国红树林 地面积的 39.11%, 是我国红树林分布面积最大的 省份^[24-25], 也是全国红树林种类最丰富的地区之一, 在全国红树林保护恢复体系中占据重要地位。 开展广东省红树林水鸟监测及影响因子分析对我 国红树林的保护具有重要意义。本研究在广东省 红树林水鸟监测基础上, 分析不同监测年度红树 林水鸟物种组成及珍稀鸟类的现状与动态变化,

并探讨了影响水鸟多样性的景观因子,以期为红 树林生态系统的保护与恢复提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

广东省地处中国大陆最南部,珠江口东西两侧分别与香港、澳门特别行政区接壤,西南部雷州半岛隔琼州海峡与海南省相望。全境位于北纬20°13′~25°31′和东经109°39′~117°19′之间。广东沿海分布有红树植物共18科24属27种,分布东起潮州市饶平县柘林港、西至湛江市徐闻县五里镇;此外,广东省又位于"东亚—澳大利亚西亚"候鸟迁徙路线的中端位置,适合水鸟中途停留和取食,是水鸟迁徙途中的重要栖息地^[8-9]。

1.2 鸟类调查

1.2.1 样方与样线设置 利用 ArcGIS 10.8 软件将广东省沿海区域划分成 10 km×10 km 的单元格。将全省红树林矢量数据与划定的单元格相叠加,共有58个单元格中分布有红树林。将这58个单元格作为红树林水鸟重点监测区(图1)。在每个单元格内设置1条鸟类调查样线,每条样线长度6 km,共58条。

1.2.2 鸟类调查 于 2018 年 4 月—2019 年 3 月和 2022 年 4 月—2023 年 3 月在鸟类繁殖期 (3—5月) 和越冬期 (10—12 月) 的上午 (7:00—11:30) 或下午 (3:00—6:30) 开展调查。以步行为主,速度保持在 1~2 km/h 左右,调查控制在低潮时进行^[8-9]。野外鉴定参考《中国鸟类野外手册》^[26],分类系统、居留型和区系参考《中国鸟

类分布与分布名录 (第三版)》^[27], 并根据水鸟的 觅食习惯和形态, 将水鸟分为 4 个类型: 滨鸟、涉禽、开阔水域水鸟和游禽^[9,28-29]。

1.3 影响因子数据来源

由中国科学院资源与环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)下载研究时段的遥感土地利用/土地覆盖数据(1:10)和道路数据。并利用 ArcGIS 10.8 软件解析,获得样方内红树林面积、滩涂面积、水域面积、水产养殖场面积、道路长度和建设用地面积等景观因子数据。

1.4 数据分析

1.4.1 水鸟多样性 (1) 香农-威纳 (Shannon-Wiener) 多样性指数^[30], 公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} P_i \log P_i$$

其中, H'为物种多样性指数; S 为物种数, P_i 为物种 i 的个体数与所有物种个体总数的比值, 如 总个体数为 N, 第 i 种个体数为 n_i , 则 $P_i = n_i/N$ 。

(2) 鸟类群落均匀性[31]

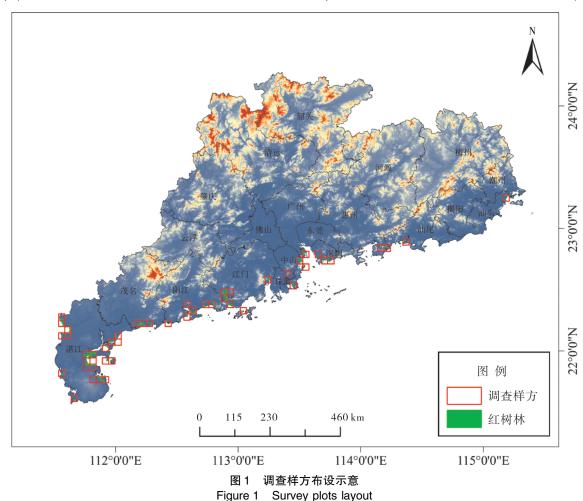
Pielou 均匀度指数: $J = H'/H_{\text{max}}$ 式中, $H_{\text{max}} = \ln S$, S 为物种数。

1.4.2 鸟类多样性影响因子分析 为了筛选出影响水鸟多样性的景观因素,采用冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 检验水鸟与影响因素的相关性,这种方法被广泛应用于水鸟多样性与环境因子相关性研究中^[9]。该分析主要在 CANOCO 5.0 版本中进行,分析红树林面积、滩涂面积、水域面积、水产养殖场面积、道路长度和建设用地面积等景观因子与水鸟多样性的相关性及其影响程度。

2 结果与分析

2.1 物种多样性变化

2.1.1 物种组成及变化 2018—2019 年红树林鸟类监测共记录到水鸟 5 目 10 科 56 种, 共计 83 296 只,其中雁形目 1 科 9 种、鹤形目 1 科 1 种、鸻形目 5 科 32 种、鲣鸟目 1 科 2 种、鹈形目 2 科 12 种; 2022—2023 年记录到 7 目 13 科 88 种,共计



130 347 只,其中雁形目 1 科 14 种、䴙䴘目 1 科 2 种、鹤形目 1 科 3 种、鸻形目 6 科 49 种、鲣鸟目 1 科 2 种、鹈形目 2 科 13 种、佛法僧目 1 科 5 种。2022—2023 年监测记录到的水鸟 88 种,占我国水鸟物种数(230 种)的 38.26%。这些水鸟可划分为 4 个类群,其中滨鸟 39 种、涉禽 14 种、开阔水

域水鸟8种、游禽27种(表1)。

2018—2023 年红树林湿地鸟类物种从 56 种增加到 88 种,个体数量从 83 296 只增加到 130 347只,表明广东红树林鸟类物种数和个体数量均呈现出增长趋势(图 2-3)。

表 1 水鸟组成

Table 1 Composition of waterbirds

类群 Group	物种名 Specie name
滨乌 Shorebirds	蛎鹬 Haematopus ostralegus、黑翅长脚鹬 Himantopus himantopus、反嘴鹬 Recurvirostra avosetta、风头麦鸡 Vanellus vanellus、灰头麦鸡 Vanellus cinereus、金鸻 Pluvialis fulva、灰鸻 Pluvialis squatarola、长嘴剑鸻 Charadrius placidus、金眶鸻 Charadrius dubius、环颈鸻 Charadrius alexandrinus、蒙古沙鸻 Charadrius mongolus、铁嘴沙鸻 Charadrius leschenaultii、丘鹬 Scolopax rusticola、黑尾塍鹬 Limosa melanuroides、斑尾塍鹬 Limosa lapponica、中杓鹬 Numenius phaeopus、白腰杓鹬 Numenius arquata、大杓鹬 Numenius madagascariensis、鹤鹬 Tringa erythropus、红脚鹬 Tringa totanus、泽鹬 Tringa stagnatilis、青脚鹬 Tringa nebularia、小青脚鹬 Tringa guttifer、白腰草鹬 Tringa ochropus、林鹬 Tringa glareola、翘嘴鹬 Xenus cinereus、矶鹬 Actitis hypoleucos、翻石鹬 Arenaria interpres、大滨鹬 Calidris tenuirostris、红腹滨鹬 Calidris canutus、三趾滨鹬 Calidris alba、红颈滨鹬 Calidris ruficollis、勺嘴鹬 Calidris pygmeus、青脚滨鹬 Calidris temminckii、弯嘴滨鹬 Calidris ferruginea、黑腹滨鹬 Calidris alpina、红颈瓣蹼鹬 Phalaropus lobatus、海鸬鹚 Phalacrocorax pelagicus、普通燕鸻 Glareola maldivarum
涉禽 Wading birds	普通鸬鹚 Phalacrocorax carbo、黄斑苇鳽 Ixobrychus sinensis、栗苇鳽 Ixobrychus cinnamomeus、夜鹭 Nycticorax nycticorax、绿鹭 Butorides striatus、印度池鹭 Ardeola grayii、池鹭 Ardeola bacchus、牛背鹭 Bubulcus ibis、苍鹭 Ardea cinerea、草鹭 Ardea purpurea、大白鹭 Ardea alba、白鹭 Egretta garzetta、中白鹭 Ardea intermedia、黄嘴白鹭 Egretta eulophotes
开阔水域水鸟 Open-water birds	红嘴鸥 Chroicocephalus ridibundus、黑嘴鸥 Saundersilarus saundersi、黑尾鸥 Larus crassirostris、红嘴巨燕鸥 Hydroprogne caspia、白额燕鸥 Sternula albifrons、普通燕鸥 Sterna hirundo、灰翅浮鸥 Chlidonias hybrida、白翅浮鸥 Chlidonias leucopterus
游禽 Waterfowl	栗树鸭 Dendrocygna javanic、小天鹅 Cygnus columbianus、翘鼻麻鸭 Tadorna tadorna、赤麻鸭 Tadorna ferruginea、赤膀鸭 Mareca strepera、赤颈鸭 Mareca penelope、绿头鸭 Anas platyrhynchos、斑嘴鸭 Anas zonorhyncha、针尾鸭 Anas acuta、绿翅鸭 Anas crecca、琵嘴鸭 Spatula clypeata、白眉鸭 Spatula querquedula、斑背潜鸭 Aythya marila、凤头潜鸭 Aythya fuligula、小䴙䴘 Tachybaptus ruficollispoggei、凤头䴙䴘 Podiceps cristatus、针尾沙锥 Gallinago stenura、大沙锥 Gallinago megala、扇尾沙锥 Gallinago gallinago、白骨顶 Fulica atra、黑水鸡 Gallinula chloropus、白胸苦恶鸟 Amaurornis phoenicurus、赤翡翠 Halcyon coromanda、白胸翡翠 Halcyon smyrnensis、蓝翡翠 Halcyon pileata、普通翠鸟 Alcedo atthis、斑鱼狗 Ceryle rudis

- 2.1.2 水鸟多样性指数变化 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数可以用来反映鸟类群落结构的稳定性,多样性指数越大、均匀度指数越高,说明群落结构越稳定。2018—2019 与2022—2023 年水鸟 Shannon-Wiener 指数、均匀度指数变化表明广东省红树林水鸟多样性水平呈现稳步提升态势(表 2)。
- 2.1.3 珍稀濒危物种 对比 2018—2019 年与 2022—2023 年两期红树林鸟类监测记录到的珍稀 濒危鸟类物种数量,其变化表明广东省红树林湿 地鸟类中珍稀濒危物种数量呈现出增长的态势

(表3)。

2.2 水鸟多样性影响因子

2.2.1 水鸟多样性影响因子相关性 景观因子对水鸟多样性影响程度 RDA 排序结果 (表4)显示,对所有水鸟而言,各典型轴对物种—景观因子关系方差的累积解释为 94.75%;所有正轴的蒙特卡罗排列检验有显著性 (F=3.8, P=0.007);前两个正轴的特征值远高于其他轴,表明这两个轴为主要解释轴,约44.12%和71.70%的变异分别由1轴和2轴解释,前两个典型轴可以很好地解释物种与环境变量之间的关系。同样对滨鸟、涉禽、开阔

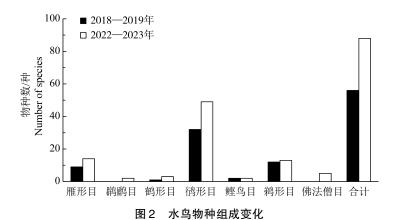


Figure 2 Species composition changes of waterbirds

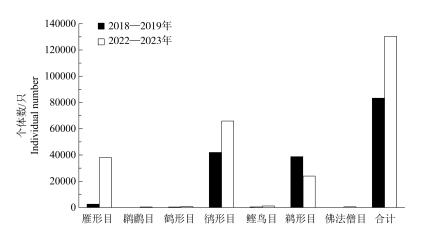


Figure 3 Population composition changes of waterbirds

水鸟数量组成变化

水域水鸟和游禽,各典型轴对物种—景观因子关系 方差的累积解释均超过96%,蒙特卡罗排列检验具 有显著性 (p < 0.05), 且前两个典型轴均可以很好 地解释物种与景观因子变量之间的关系。

表 2 水鸟多样性指数变化

Table 2 Diversity Index variation of waterbirds

年度 Year	物种数/种 Number of species	个体数/只 Number of individuals	香农 – 威纳指数 Shannon-Wiener Index	均匀度指数 Pielou's Evenness Index
2018—2019	56	83 296	2. 492 1	0. 619 1
2022—2023	88	130 347	2. 742 3	0. 612 5

表 3 珍稀濒危鸟类动态变化

Table 3 Variation of rare and endangered wildlife resources of waterbirds

年度 Year	国家重点保护物种 National key protectedspecies		广东省重点 保护物种 Key protected	中澳候鸟 保护协定 CAMBA	中日候鸟 保护协定 ACJMB	CITES 附录物种 CITES Appendix species	
	一级 level one	二级 level two	species in Guangdong	Species	Species	附录 I Appendix I	附录Ⅱ Appendix Ⅱ
2018—2019	4	6	16	24	41	0	1
2022—2023	6	17	25	30	56	1	11

	0.51	轴 Axis				所有轴 All axis	
类群 Group	统计量 Statistics	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4	F值 Value F	P值 Value P
	特征值	0. 099 7	0.062 3	0. 030 3	0. 021 8		0.007
所有水鸟	解释累计变量	9. 97	16. 20	19. 23	21. 41	2.0	
All waterbirds	Pseudo-canonical 相关性	0.484 2	0.6498	0.822 2	0.759 2	3. 8	
	解释了变化量	44. 12	71. 70	85. 11	94. 75		
	特征值	0. 110 1	0.054 6	0.0344	0. 026		0. 007
滨鸟	解释累计变量	11. 01	16. 46	19. 90	22. 50		
Shorebirds	Pseudo-canonical 相关性	0. 453 4	0.8184	0.746 9	0.8526	3. 7	
	解释了变化量	47. 83	71. 55	86. 48	97.77		
	特征值	0. 155 3	0.0547	0.045 9	0.0109		0.009
涉禽	解释累计变量	15. 53	21.00	25. 59	26. 68		
Wading birds	Pseudo-canonical 相关性	0. 547 9	0. 541 8	0.503 0	0. 627 3	3. 5	
	解释了变化量	57. 68	78.00	95.06	99. 11		
	特征值	0. 141 4	0.039 3	0.0066	0.005 3		0.008
开阔水域水鸟	解释累计变量	14. 14	18. 07	18. 73	19. 25		
)pen-water birds	Pseudo-canonical 相关性	0. 454 9	0.6922	0. 226 8	0. 326 3	3. 6	
	解释了变化量	73. 26	93. 62	97. 04	99. 78		
	特征值	0. 108 7	0. 056 8	0. 030 5	0. 014 9		
游禽	解释累计变量	10. 87	16. 56	19. 61	21. 09		
が高 Waterfowl	Pseudo-canonical 相关性	0. 572. 2	0. 585 3	0.409.5	0.602.3	3. 7	0.008

表 4 水鸟类群与景观因子间的 RDA 排序结果

2.2.2 水鸟多样性影响因子分析 冗余分析 (RDA) 结果 (图 4) 中红色箭头表示环境因子, 蓝色线表示物种因子, 箭头连线的长短表示水鸟的多样性与该环境因子相关性的大小, 箭头连线与排序轴夹角的大小表示环境因子与排序轴相关性的大小, 夹角小说明相关性大, 箭头所在的象限表示方位环境因子与排序轴的正负相关性。

Pseudo-canonical 相关性

解释了变化量

Waterfowl

由图 4a 可知, 红树林面积、滩涂面积、水域面积和水产养殖场面积是影响水鸟多样性的正向因子, 道路长度和建设用地面积是影响水鸟多样性的负向因子。

由图 4b 可知, 红树林面积、滩涂面积是影响 滨鸟多样性的主要正向因子, 水域面积和水产养 殖池面积是影响滨鸟的次要正向因子, 道路长度 和建设用地面积是制约滨鸟多样性的负向因子。

89.47

0.6023

96. 26

0. 572 2 0. 585 3 0. 409 5

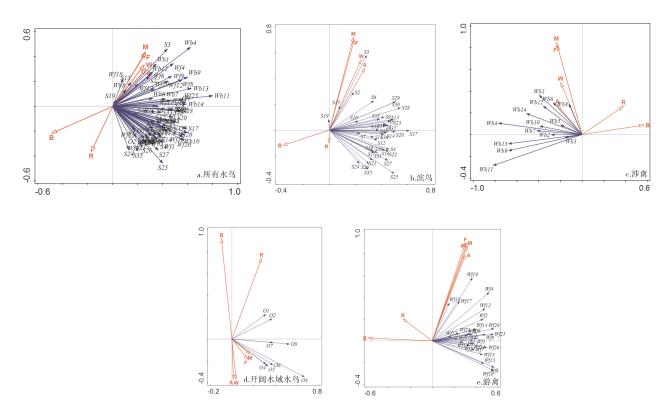
75.55

49.63

由图 4c 可知, 红树林面积、滩涂面积是影响 涉禽多样性的主要正向因子, 水域面积和水产养 殖池面积是影响涉禽的次要正向因子, 道路长度 和建设用地面积是制约滨鸟多样性的负向因子。

由图 4d 可知, 水域面积和水产养殖池面积是影响开阔水域水鸟多样性的重要因子, 红树林面积、滩涂面积是影响开阔水域水鸟多样性的次要因子, 道路长度和建设用地面积是制约开阔水域水鸟多样性的负向因子。

由图 4e 可知, 红树林面积、滩涂面积、水域面积和水产养殖池面积对游禽多样性的影响具有同等作用, 道路长度和建设用地面积是制约开阔水域水鸟多样性的负向因子。



注:解释变量: M-红树林面积 (hm^2) 、F-滩涂面积 (hm^2) 、W-水域面积 (hm^2) 、A-水产养殖池面积 (hm^2) 、R-道路长度 (km)、B-建筑物面积 (hm^2) 。

滨鸟: S1-蛎鹬、S2-黑翅长脚鹬、S3-反嘴鹬、S4-凤头麦鸡、S5-灰头麦鸡、S6-金鸻、S7-灰鸻、S8-长嘴剑鸻、S9-金眶鸻、S10-环颈鸻、S11-蒙古沙鸻、S12-铁嘴沙鸻、S13-丘鹬、S14-黑尾塍鹬、S14-斑尾塍鹬、S15-中杓鹬、S17-白腰杓鹬、S18-大杓鹬、S19-鹤鹬、S20-红脚鹬、S21-泽鹬、S22-青脚鹬、S23-小青脚鹬、S24-白腰草鹬、S24-林鹬、S25-翘嘴鹬、S27-矶鹬、S28-翻石鹬、S29-大滨鹬、S30-红腹滨鹬、S31-三趾滨鹬、S32-红颈滨鹬、S33-勺嘴鹬、S34-青脚滨鹬、S35-弯嘴滨鹬、S36-黑腹滨鹬、S37-红颈瓣蹼鹬、S38-普通燕鸻、S39-海鸬鹚。

涉禽: Wb1-普通鸬鹚、Wb2-黄斑苇鳽、Wb3-栗苇鳽、Wb4-夜鹭、Wb5-绿鹭、Wb6-印度池鹭、Wb7-池鹭、Wb8-牛背鹭、Wb9-苍鹭、Wb10-草鹭、Wb11-大白鹭、Wb12-中白鹭、Wb13-白鹭、Wb14-黄嘴白鹭。

开阔水域水鸟: O1-红嘴鸥、O2-黑嘴鸥、O3-黑尾鸥、O4-红嘴巨燕鸥、O5-白额燕鸥、O6-普通燕鸥、O7-灰翅浮鸥、O8-白翅浮鸥。

游禽: Wf1-栗树鸭、Wf2-小天鹅、Wf3-翘鼻麻鸭、Wf4-赤麻鸭、Wf5-赤膀鸭、Wf6-赤颈鸭、Wf7-绿头鸭、Wf8-斑嘴鸭、Wf9-针尾鸭、Wf10-绿翅鸭、Wf11-琵嘴鸭、Wf12-白眉鸭、Wf13-凤头潜鸭、Wf14-斑背潜鸭、Wf15-小䴙䴘、Wf16-凤头䴙䴘、Wf17-白胸苦恶鸟、Wf18-黑水鸡、Wf19-白骨顶、Wf20-针尾沙锥、Wf21-大沙锥、Wf22-扇尾沙锥、Wf23-赤翡翠、Wf24-白胸翡翠、Wf25-蓝翡翠、Wf26-普通翠鸟、Wf27-斑鱼狗。

Note: Explanatory variables: *M*-the area of mangroves (hm²); *F*-the area of tidal flats (hm²); *W*-the area of water bodies (hm²); *A*-the area of aquaculture ponds (hm²); *R*-road length (km); *B*-the area of built-up land (hm²).

Shorebirds: S1-Haematopus ostralegus, S2-Himantopus himantopus, S3-Recurvirostra avosetta, S4-Vanellus vanellus, S5-Vanellus cinereus, S6-Pluvialis fulva, S7-Pluvialis squatarola, S8-Charadrius placidus, S9-Charadrius dubius, S10-Charadrius alexandrinus, S11-Charadrius mongolus, S12-Charadrius leschenaultii, S13-Scolopax rusticola, S14-Limosa melanuroides, S15-Limosa lapponica, S16-Numenius phaeopus, S17-Numenius arquata, S18-Numenius madagascariensis, S19-Tringa erythropus, S20-Tringa totanus, S21-Tringa stagnatilis, S22-Tringa nebularia, S23-Tringa guttifer, S24-Tringa ochropus, S25-Tringa glareola, S26-Xenus cinereus, S27-Actitis hypoleucos, S28-Arenaria interpres, S29-Calidris tenuirostris, S30-Calidris canutus, S31-Calidris alba, S32-Calidris ruficollis, S33-Calidris pygmeus, S34-Calidris temminckii, S35-Calidris ferruginea, S36-Calidris alpina, S37-Phalaropus lobatus, S38-Phalacrocorax pelagicus, S39-Glareola maldivarum.

Wading birds: Wb1-Phalacrocorax carbo, Wb2-Ixobrychus sinensis, Wb3-Ixobrychus cinnamomeus, Wb4-Nycticorax nycticorax, Wb5-Butorides striatus, Wb6-Ardeola grayii, Wb7-Ardeola bacchus, Wb8-Bubulcus ibis, Wb9-Ardea cinerea, Wb10-Ardea purpurea, Wb11-Ardea alba, Wb12-Egretta garzetta, Wb13-Ardea intermedia, Wb14-Egretta eulophotes. Open-water birds: O1-Chroicocephalus ridibundus, O2-Saundersilarus saundersi, O3-Larus crassirostris, O4-Hydroprogne caspia, O5-Sternula albifrons, O6-Sterna hirundo, O7-Chlidonias hybrida, O8-Chlidonias leucopterus.

Waterfowl: Wf1-Dendrocygna javanic, Wf2-Cygnus columbianus, Wf3-Tadorna tadorna, Wf4-Tadorna ferruginea, Wf5-Mareca strepera, Wf6-Mareca penelope, Wf7-Anas platyrhynchos, Wf8-Anas zonorhyncha, Wf9-Anas acuta, Wf10-Anas crecca, Wf11-Spatula clypeata, Wf12-Spatula querquedula, Wf13-Aythya marila, Wf14-Aythya fuligula, Wf15-Tachybaptus ruficollispoggei, Wf16-Podiceps cristatus, Wf17-Gallinago stenura, Wf18-Gallinago megala, Wf19-Gallinago gallinago, Wf20-Fulica atra, Wf21-Gallinula chloropus, Wf22-Amaurornis phoenicurus, Wf23-Halcyon coromanda, Wf24-Halcyon smyrnensis, Wf25-Halcyon pileata, Wf26-Alcedo atthis, Wf27-Ceryle rudis.

图 4 水鸟多样性影响因子的 RDA 分析 Figure 4 The RDA analysis on the influence factors of waterbirds diversity

3 结论与讨论

红树林水鸟多样性是衡量红树林生态系统健康的重要指标之一^[8]。广东具有多种类型的红树林群落,植被异质性大,红树林湿地浮游生物和底栖动物资源丰富,为水鸟提供了良好的食物条件和栖息环境。

研究结果表明, 红树林面积是影响水鸟多样 性的主要正向因子(图4)。尽管历史上我国红树 林生态系统曾遭受严重威胁[3-7], 但进入 21 世纪 以来全国加大了红树林的保护与修复,这为维护 红树林生物多样性发挥了积极作用。作为全国红 树林面积最大的省份, 广东近年来全面加强红树 林保护修复工作。截至2023年8月,全省已完成 红树林营造 2 029.33 hm², 修复现有红树林 1929.47 hm²,累计投入中央、省级生态修复专项 资金14.9亿元,支持红树林营造修复项目31个。 这些措施极大地促进了红树林鸟类多样性的保护, 也是导致 2018—2023 年红树林鸟类从 56 种增至 88 种, 个体数量从83 296 只增至130 347 只的重 要原因之一(表2、图2、图3)。其他研究也进一 步支持了红树林面积的增加有利于水鸟多样性水 平的提升[8,32]。红树林面积的增加,为水鸟提供了 复杂的微生境,如广东沿海分布的红海榄、木榄、 秋茄树、无瓣海桑等红树植物的高矮、面积、根 系差异大, 能为不同的浮游生物和底栖动物提供 复杂多样的栖息环境,满足不同类型水鸟的栖息、 觅食[34-35]。

生境类型的多样化是影响鸟类多样性的重要因素^[9,33]。研究表明,红树林面积、滩涂面积、水域面积和水产养殖场面积是影响水鸟多样性的正向因子,道路长度和建设用地面积是影响水鸟多样性的负向因子(图 4),这些影响因子相互交织,错综复杂,形成了多样化的生境类型,使得不同生态系统物种的边缘效应得到充分发挥。如红树林植被区是鹭类的栖息地和繁殖地,以及一些秧鸡类的觅食地;滩涂区则是水鸟的"餐厅",涨潮时以游禽为主,退潮时以涉禽(如鸻鹬类和鹭类等)为主;基围鱼塘能为水鸟提供部分的食物^[9,36-39]。

推进科学开展红树林营造与修复工程^[40-41], 宜保持一定面积的滩涂及其他多种鸟类生境类型, 以维持区域最大化的水鸟多样性。此外,红树林 鸟类种群数量或种类丰富程度也是衡量红树林生态修复成功与否的重要参数,但以水鸟作为指标的红树林生态恢复评价,以及红树林修复对鸟类种群动态的影响等方面仍有待更深入的研究,以期为红树林修复区后续景观格局优化与鸟类多样性保护提供理论依据与技术支撑。

参考文献

- [1] 吴海轮,周琳,徐华林,等. 粤港澳大湾区红树林湿地鸟类承载力评估与提升对策:以深圳湾福田红树林为例 [J]. 北京大学学报(自然科学版),2020,56(6):1056-1064.
- [2] 张忠华,胡刚,梁士楚. 我国红树林的分布现状、保护及生态价值[J]. 生物学通报,2006(4):9-11,64.
- [3] 但新球,廖宝文,吴照柏,等. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J]. 生态环境学报,2016,25(7): 1237-1243.
- [4] DOYLE T W, KRAUSS K W, WELLS C J. Landscape analysis and pattern of hurricane impact and circulation on mangrove forests of the everglades [J]. Wetlands, 2009, 29(1):44-53.
- [5] PRANCHAI A, JENKE M, BERGER U. Well-intentioned, but poorly implemented: debris from coastal bamboo fences triggered mangrove decline in Thailand [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146:900-907.
- [6] 张磊. 红树林恢复背景下中国沿海潮间带退塘还林潜力评估[D]. 南宁:广西大学,2021.
- [7] 张颖,陈光程,钟才荣. 中国濒危红树植物研究与恢复现状[J]. 应用海洋学学报,2021,40(1):142-153.
- [8] XITAO Y, ZHIZHAO D, YUHUA H, et al. Mangrove planting strategies should consider the optimal ratio between thearea of tidal flats and the area of mangroves [J]. Ocean and Coastal Management, 2021(213):105875.
- [9] XITAO Y, ZHIZHAO D, SHUANGSHUANG L, et al. Factors driving the abundance of wintering waterbirds in coastal areas of Guangdong province, China[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022(9):808105.
- [10] 李相林,周放,孙仁杰,等. 北仑河口国家级自然保护 区冬季鸟类多样性水平梯度研究[J]. 广西科学,2006 (4):305-309,315.
- [11] 邹发生,宋晓军,陈康,等. 海南东寨港红树林湿地鸟 类多样性研究[J]. 生态学杂志,2001(3);21-23,20.
- [12] 梁振辉,冯尔辉,李隆飞,等. 2015 年海南东寨港红树 林湿地鸟类调查[J]. 热带林业,2018,46(2):43-46.
- [13] 陈志鹏,胡柳柳,王皓,等. 深圳福田红树林保护区水鸟调查及种群变化研究[J]. 资源节约与环保,2016 (12):163,167.
- [14] 公媛,沈小雪,丁欢,等. 深圳湾福田红树林湿地鸟类资源价值评估[J]. 北京大学学报(自然科学版),

- 2019,55(6):1078-1084.
- [15] 王勇军, 咎启杰, 林鹏. 深圳福田红树林陆鸟类变迁及保护[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1999(1):142-149.
- [16] 王勇军,诸葛仁,TERRY D. 深圳福田红树林鸟类自然保护区管理策略初探[J]. 生物多样性,1999(4):351-354
- [17] 吴诗宝,柯亚永,吴桂生,等. 雷州半岛湿地水鸟区系组成及生态分布的初步研究[J]. 动物学杂志,2002 (2):58-62.
- [18] 刘一鸣,许方宏,林广旋,等. 雷州半岛红树林湿地越 冬鸻鹬类时空分布格局[J]. 林业资源管理,2015(5): 117-125,156.
- [19] 吴晓东.广东湛江红树林国家级自然保护区鸟类调查监测及保护对策[J].湿地科学与管理,2009,5(4):27-29.
- [20] 张苇,余娜娜,刘军. 湛江红树林保护区水鸟监测及水鸟资源现状[J]. 湿地科学与管理,2013,9(1):69-71.
- [21] 张苇,邹发生,戴名扬.广东湛江红树林国家级自然保护区湿地鸟类资源现状及保护对策[J]. 野生动物,2007(2):40-42.
- [22] 张苇,邹发生,戴名扬. 湛江红树林湿地鸟类资源现状及其保护对策[J]. 林业调查规划,2008(5):54-57.
- [23] 叶锦玉,虞皓琦,廖宝文,等. 鸟类物种组合模式的稳定性:以珠海淇澳自然保护区红树林鸟类群落变化为例[J]. 生态环境学报,2022,31(2);265-276.
- [24] 广东省自然资源厅. 广东省 2021 年度国土变更调查 土地利用分类面积汇总表[EB/OL]. (2023-06-30). http://nr. gd. gov. cn/zwgknew/sjfb/tjsj/content/post_ 4209709. html.
- [25] 麦婉华. 广东探索红树林保护与经济建设共发展[J]. 小康,2023(26):52-53.
- [26] 约翰·马敬能,卡伦·菲利普斯.中国鸟类野外手册 [M].长沙:湖南教育出版社,2000.
- [27] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2017.
- [28] HAMZA F, HAMMOUDA A, SELMI S. Species richness patterns of waterbirds wintering in the gulf of Gabès in relation to habitat and anthropogenic features [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 165 (5): 254-260.
- [29] ALEXANDER B W, HEPP G R. Estimating effects of habitat characteristics on abundances of three species of

- secretive marsh birds in central Florida[J]. Waterbirds, 2014,37(3):274-285.
- [30] SHANNON C E, WEAVER W, WIENER N. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [31] PIELOU E C. Ecological diversity [M]. New York: John Wiley and Sons, 1975.
- [32] 林清贤. 闽南沿海红树林区鸟类及其与大型底栖动物相关关系研究[M]. 厦门: 厦门大学, 2003.
- [33] 陆袆玮, 唐思贤, 史慧玲, 等. 上海城市绿地冬季鸟类群落特征与生境的关系[J]. 动物学杂志, 2007(5): 125-130.
- [34] ZHANG M, HONG Y, ZOU F, et al. Response of shore-bird habitat selection to coastal reclamation and urbanization in an extensively developed delta; A case study in Macao, China [J]. Ocean and Coastal Management, 2019, 179 (1-8):1-9.
- [35] BURGER J. Use of intertidal habitat by four species of shorebirds in an experimental array of oyster racks, reefs and controls on Delaware Bay, New Jersey: Avoidance of oyster racks [J]. Science of The Total Environment, 2018,624(15):1234-1243.
- [36] ZHANG C, YUAN Y, ZENG G, et al. Influence of hydrological regime and climatic factor on waterbird abundance in Dongting Lake Wetland, China: Implications for biological conservation [J]. Ecological Engineering, 2016(90):473-481.
- [37] WEI P, ZAN Q, NORA F Y, et al. Impact of habitat management on waterbirds in a degraded coastal wetland [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 124(2):645-652.
- [38] 王成,刘红玉,李玉凤,等. 盐城滨海湿地水鸟类群生境适宜性及生态阈值研究:对栖息地景观结构恢复的启示[J]. 生态与农村环境学报,2021,37(11):1-20.
- [39] 杨锡涛,钟志强,修晨,等.利用物种扩散模型构建广东沿海地区黑脸琵鹭的功能性生态廊道[J]. 林业与环境科学,2022,38(2):12-22.
- [40] 杨加志,胡喻华,罗勇,等.广东省红树林分布现状与 动态变化研究[J]. 林业与环境科学,2018,34 (5): 102-106.
- [41] 刘彩红,胡喻华,张春霞,等.广东沿海红树林生态修 复模式研究[J]. 林业与环境科学,2020,36 (4):24-27