

鄱阳湖越冬雁类时空分布特征及热点区域识别*

王晨溪^{1,3}, 夏少霞^{1,3**}, 余定坤², 于秀波^{1,3}, 龚磊强²

(1: 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

(2: 江西省鄱阳湖国家级自然保护区管理局, 南昌 330038)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 鄱阳湖是东亚-澳大利西亚迁徙路线上重要的水鸟越冬栖息地, 雁类是迁徙路线上的优势种群。然而, 近年来迁徙路线上的雁类种群数量有所下降, 识别越冬地雁类时空分布特征, 确定分布热点区域是科学、精准保护的前提。本研究利用 2018—2021 年越冬期在鄱阳湖区域开展的共 58 次水鸟调查数据, 提取了基于时间序列的白额雁 (*Anser albifrons*)、豆雁 (*Anser fabalis*)、鸿雁 (*Anser cygnoid*) 的分布数据, 分析了 3 种雁类在越冬地的种群动态、时间和空间分布动态, 评估了鄱阳湖各子湖的重要性, 确定了雁类分布热点区域。研究结果表明, 3 种雁类在越冬地的种群数量表现出一定的年际波动, 雁类种群总数量维持在 27.9 万~44.8 万只; 不同雁类迁徙的时间节律存在差异, 本次地面调查数据显示白额雁、豆雁、鸿雁分别是在 10 月初至 11 月初、11 月中旬、12 月中旬到达鄱阳湖, 其中鸿雁到达最晚; 高峰期集中在 11 月底至次年 2 月初, 持续时间约为 100 天; 3 种雁类分别在 2 月中旬、2 月底和 3 月中旬开始迁离鄱阳湖。3 种雁类空间分布范围有所差异, 豆雁分布范围最广, 白额雁分布相对集中, 高峰期雁类的分布范围最大, 对子湖的利用强度也最大。从空间分布特征来看, 大湖池和大汉湖重要性最高, 鄱阳湖保护区是雁类利用强度最高的区域, 其次是都昌保护区。此外, 雁类, 特别是鸿雁, 对保护区以外的子湖利用强度也较高。本研究对精准刻画鄱阳湖越冬雁类时空分布范围、针对性地开展栖息地保护和修复、加强子湖保护和管理具有重要意义。

关键词: 鄱阳湖; 越冬雁类; 时空分布; 重要性评估; 热点区域

Temporal and spatial distribution characteristics and hotspot area identification of wintering geese in Lake Poyang*

Wang Chenxi^{1,3}, Xia Shaoxia^{1,3**}, Yu Dingkun², Yu Xiubo^{1,3} & Gong Leiqiang²

(1: Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China)

(2: Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve Authority, Nanchang 330038, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Lake Poyang is an important wintering habitat for waterbirds on the East Asian-Australasian Flyway, and geese are the dominance species along the flyway. While their populations along the flyway have declined and it is urgent to clarify their spatial and temporal distribution pattern and hotspots, which is the precondition and foundation for scientific and effective conservation. A total of 58 surveys were conducted in the sub-lakes of Lake Poyang from 2018 to 2021. Based on the ground survey data of geese, this study analyzed the temporal and spatial distribution dynamics of wintering geese, evaluated the importance of sub-lakes in Lake Poyang, and proposed the hotspot areas of geese. The results showed that the population of the three species of geese in the wintering ground fluctuated annually, and the total counts of geese remains at 279000–448000. There were differences in the migration time rhythms of different species of geese. The results showed that greater white-fronted geese (*Anser albifrons*), bean geese (*Anser fabalis*) and swan geese (*Anser cygnoid*) arrived at Lake Poyang from early October to November 8th, November 18th, and De-

* 2023-07-11 收稿; 2023-10-25 收修改稿。

中国科学院网信专项 (CAS-WX2021SF-0501)、国家自然科学基金项目 (42171105) 和中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (XDA23040203) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: xiasx@igsrr.ac.cn。

cember 8th, respectively, with swan geese arriving the latest. The peak period was from the end of November to the beginning of February, and lasts for 100 days. The three species of geese began to leave Poyang Lake on February 18th, February 28th and March 18th, respectively. The spatial distribution of geese differed, with Bean geese having the widest distribution and greater white-fronted geese having the narrowest. During the wintering period, all three geese had the widest distribution in the peak period, and the highest utilization intensity of sub-lakes. In terms of spatial distribution pattern, Lake Dahuchi and Lake Dacha were most important for geese. Lake Poyang Nature Reserve was the most important hotspot area for geese, followed by Duchang Nature Reserve, while sub-lakes outside nature reserves were also important, especially for Swan geese. This study is important to accurately delineate the spatial and temporal distribution of wintering geese, carry out habitat protection and restoration, and strengthen the protection and management of the sub-lakes.

Keywords: Lake Poyang; wintering geese; spatial and temporal distribution; importance analysis; hotspot area

水鸟是湿地的重要组成部分,其物种多样性及动态变化对湿地生态系统的环境质量与健康状况有重要的指示作用^[1-3]。近年来,世界范围内水鸟种群受到严重威胁,特定物种种群数量呈明显的下降趋势^[4-5]。其中,东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线(East Asian-Australasian Flyway, EAAF)是世界上迁徙水鸟受威胁最严重的路线^[6],也是开展水鸟及其栖息地研究和保护的焦点。长江中下游湿地是东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线上不可替代的关键区域^[7],也是水鸟重要的越冬地。雁类是长距离迁徙的鸟类,包括鸿雁(*Anser cygnoid*)、白额雁(*Anser albifrons*)、豆雁(*Anser fabalis*)等优势物种,其数量约占长江中下游越冬水鸟数量的60%^[8]。

研究显示,近年来迁徙路线上的湿地受到不同程度的干扰和破坏,对水鸟种群数量产生影响,特别是迁徙路线上的雁类,如鸿雁、白额雁等种群数量均有所下降^[9-10]。此外,雁类的分布范围也发生了变化,如在越冬地,雁类曾广泛分布于长江中下游的周边湖泊湿地,然而,目前大型种群多聚集于通江湖泊^[11]。此外,在越冬期,选择在水稻田觅食栖息的比例也在增加^[9,12]。作为长距离迁徙鸟类,雁类到达越冬地时能量匮乏,又要为春季迁徙储存能量^[13],因此越冬地的栖息环境和能量补给对完成整个迁徙过程至关重要。然而,目前对于雁类在越冬地的时空分布动态研究仍不充分,难以开展科学、精准的保护和管理。

本研究基于雁类地面调查数据,分析了鄱阳湖湿地越冬雁类的时空分布动态特征,探讨了鄱阳湖保护区对雁类栖息地的保护现状,明确了鄱阳湖各子湖的重要性和雁类分布热点区域。本研究将为越冬雁类种群数量维持、湿地保护修复、水鸟栖息地质量和湿地生态系统服务功能提升以及国际重要湿地生态安全保障提供技术支撑。

1 研究区概况

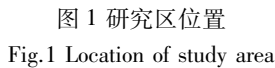
鄱阳湖地处长江中下游南岸,是我国最大的淡水湖,是仅存的与长江连通的两个通江湖泊之一。其属于亚热带温暖湿润季风气候,年平均降水量为1350~2150 mm,年平均气温16.5~17.8℃。鄱阳湖分布着数量众多的子湖,其季节性的水位变化为湿地生态系统的发育提供了优良的环境条件^[14],维持了丰富的生物多样性。作为东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线上最重要的越冬地和停歇地,鄱阳湖为鹤类、雁类等珍稀水鸟提供了不可替代的栖息环境^[15],其中雁类是优势种群,包括豆雁、白额雁、鸿雁、小白额雁(*Anser erythropus*)、灰雁(*Anser anser*)等。

2 研究方法

2.1 雁类地面调查数据

雁类地面调查数据来源于江西鄱阳湖国家级自然保护区管理局,包括2018—2021年越冬期的全湖同步调查数据以及以旬为周期的水鸟常规监测数据,由若干调查小组,每组2~3人,采用定点同步调查的方法,对观测的水鸟采用直接计数法监测并记录。其中,全湖同步调查数据,一般在越冬季的12月下旬至次年1月上旬,共调查4次,调查点88个。水鸟常规监测数据,从每年的10月上旬开始至次年3月下旬,每月开展3次调查,共调查54次,调查点110个。本研究对上述数据进行整合,获取了累计58次调查、110个调查点的雁类数据(图1)。在鄱阳湖越冬的雁类中,白额雁、豆雁和鸿雁种群数量较大,是优势种群,也是近年来的

2.2.1 时间动态分析 基于雁类常规监测数据分析雁类时间分布动态。将每年的 10 月 8 日作为初始值,按照距离初始值的时间,形成以 10 天为间隔的共 18 个时间序列,分别计算每个时间序列水鸟数量的平均值,将该值除以历次该种群调查数量的最大值,进行标准化处理。即将种群数量大于鄱阳湖该物种越冬种群数量最大值的 50% 作为高峰期,在此之前划定为到达期,之后划定为迁飞期^[16],并分析其时间分布动态。



本研究采用 Excel 2019 和 SPSS 25 进行数据统计和初步分析,使用 R4.1.2 和 ArcGIS 10.7 软件进行数据分析和制图。

2.2.1 时间动态分析 基于雁类常规监测数据分析雁类时间分布动态。将每年的 10 月 8 日作为初始值,按照距离初始值的时间,形成以 10 天为间隔的共 18 个时间序列,分别计算每个时间序列水鸟数量的平均值,将该值除以历次该种群调查数量的最大值,进行标准化处理。即将种群数量大于鄱阳湖该物种越冬种群数量最大值的 50% 作为高峰期,在此之前划定为到达期,之后划定为迁飞期^[16],并分析其时间分布动态。

$$N_i = \sum_{j=2018}^{j=2021} n_{ij}/4 \quad (1)$$

$$P_i = N_i / N_{\max} \quad (2)$$

式中, N_i 为时间序列 i 某种雁类多年平均的调查数量, n_{ij} 为时间序列 i 第 j 年某种雁类调查的数量, $N_{\max}$ 为某种雁类历次调查的最大值, P_i 为时间序列 i 某种雁类数量占该雁类种群调查数量的比例, n 为时间序列的个数。

2.2.2 空间动态分析 整合鄱阳湖全湖同步调查数据和雁类常规监测数据分析雁类空间分布动态。按照上述的到达期、高峰期、迁飞期 3 个阶段分别统计 3 种雁类在不同子湖的数量, 并除以单个子湖中调查的最大数量, 对数据进行标准化处理, 按照自然断点法分为高、中、低 3 个等级, 并在 ArcGIS 中制图。

$$M_i = \sum_{j=2018}^{j=2021} m_{ij}/4 \quad (3)$$

$$Q_i = M_i / M_{\max} \quad (4)$$

式中, M_i 为子湖 i 中某种雁类在越冬期不同阶段(到达期、高峰期、迁飞期,下同)的平均调查数量, m_{ij} 为子湖 i 的某种雁类第 j 年的数量, $M_{\max}$ 为单个子湖中某种雁类调查的最大数量, Q_i 为子湖 i 中某种雁类数量占单个子湖中最大数量的比例。

2.2.3 热点区域识别及重要性分析 将 2.2.2 节中每个子湖的高、中、低等级分别赋值为 3、2、1, 缺省数据为 0, 同时, 将子湖按照空间范围划分为鄱阳湖保护区、南矶湿地保护区、都昌保护区和其他区域(附表I), 对雁类在上述区域的分布重要值进行累加, 并计算各个区域内单位面积下的重要值(公式 5), 分析其热点区域。

$$I = \sum_{i=1}^n b_i + d_i + h_i \quad (5)$$

$$I_a = I/A \quad (6)$$

式中, I 为不同区域子湖中 3 种雁类重要值的累加, b_i 、 d_i 、 h_i 分别代表子湖 i 中白额雁、豆雁、鸿雁的重要值, n 为不同区域中子湖的个数。 I_a 为各个区域单位面积的重要值, A 为不同区域子湖或湖面的面积之和。

3 研究结果

3.1 数量变化动态

越冬地雁类数量分析结果表明, 豆雁种群数量最大, 白额雁的种群数量最小, 越冬期雁类总数量维持在 27.9 万~44.8 万只。雁类在到达期和迁飞期的平均数量分别占高峰期平均数量的 39.6% 和 45.7% (图 2)。不同物种的数量在年际间波动变化, 豆雁的数量有所上升, 而白额雁和鸿雁的数量波动幅度较大, 且与 2017 年相比, 2021 年白额雁的数量有所减少, 需要重点关注二者的种群动态和分布情况。

3.2 越冬雁类时间动态特征

3 种雁类在鄱阳湖的越冬天数约为 170 天。本次地面调查数据显示, 白额雁、豆雁、鸿雁分别是在 10 月初至 11 月初(第 30 天, 距离当年越冬期第一次观测的日期, 即 10 月 8 日, 下同)、11 月中旬(第 40 天)、12 月中旬(第 60 天)到达鄱阳湖, 其中鸿雁数量达到峰值期所需的时间最长; 3 种雁类的高峰期约持续 100 天, 但不同雁类高峰期开始的时间有所不同, 分别在 2 月中旬(第 130 天)、2 月下旬(第 140 天)和 3 月中旬(第 160 天)开始迁飞鄱阳湖。白额雁、豆雁、鸿雁从首次观测至达到峰值平均所需时间分别为 80、77 和 83 天; 越冬期豆雁平均数量最大, 为 15.91 万只, 白额雁平均数量最少, 为 7.05 万只。从时间动态来看, 3 种雁类时间节律存在差异, 但数量峰值期均集中在 11 月底至次年 2 月初, 该时间段 3 种雁类在时间上存在重叠, 栖息地承载压力增大(图 3)。

3.3 越冬雁类空间分布特征

越冬期白额雁、豆雁和鸿雁主要分布在鄱阳湖保护区、都昌保护区、南矶湿地保护区, 但分布格局也存在一定差异(图 4)。白额雁主要分布在大湖池、大汉湖、金溪湖, 豆雁主要集中在大湖池和龙潭湖, 鸿雁集中分布在大汉湖, 其中白额雁分布的热点区域最多。3 种雁类的分布范围相比, 豆雁分布范围最广, 其次是鸿雁和白额雁。在不同阶段下, 3 种雁类均是在高峰期分布范围最广, 其次是到达期, 迁飞期分布范围最小(图 4)。

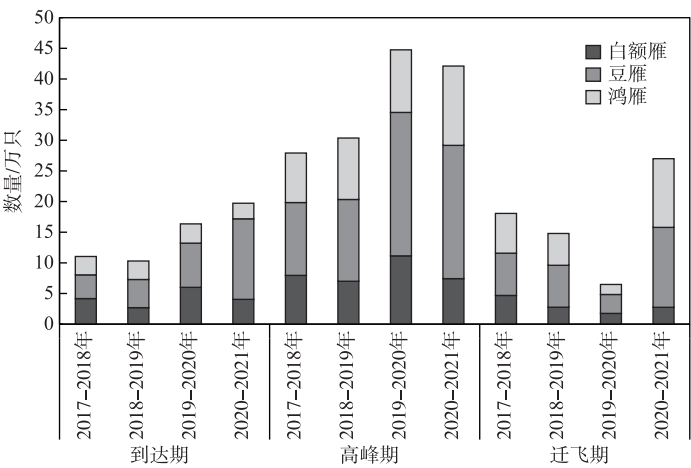


图 2 不同越冬期阶段雁类的数量变化

Fig.2 Changes in the number of geese in different wintering periods

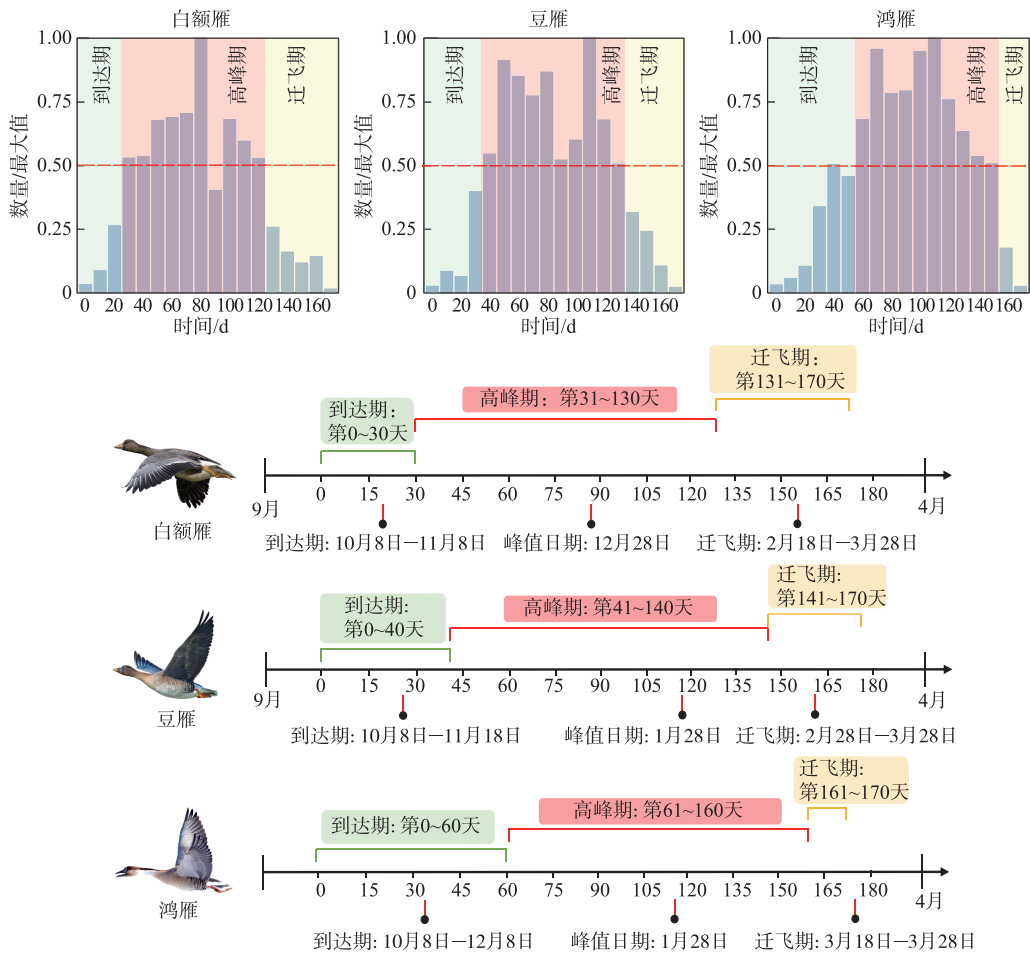


图 3 白额雁、豆雁、鸿雁在越冬期的时间动态(将越冬期的 10 月 8 日作为迁徙周期的初始日期)

Fig.3 Time dynamics of *Anser albifrons*, *Anser fabalis* and *Anser cygnoid* in the wintering period

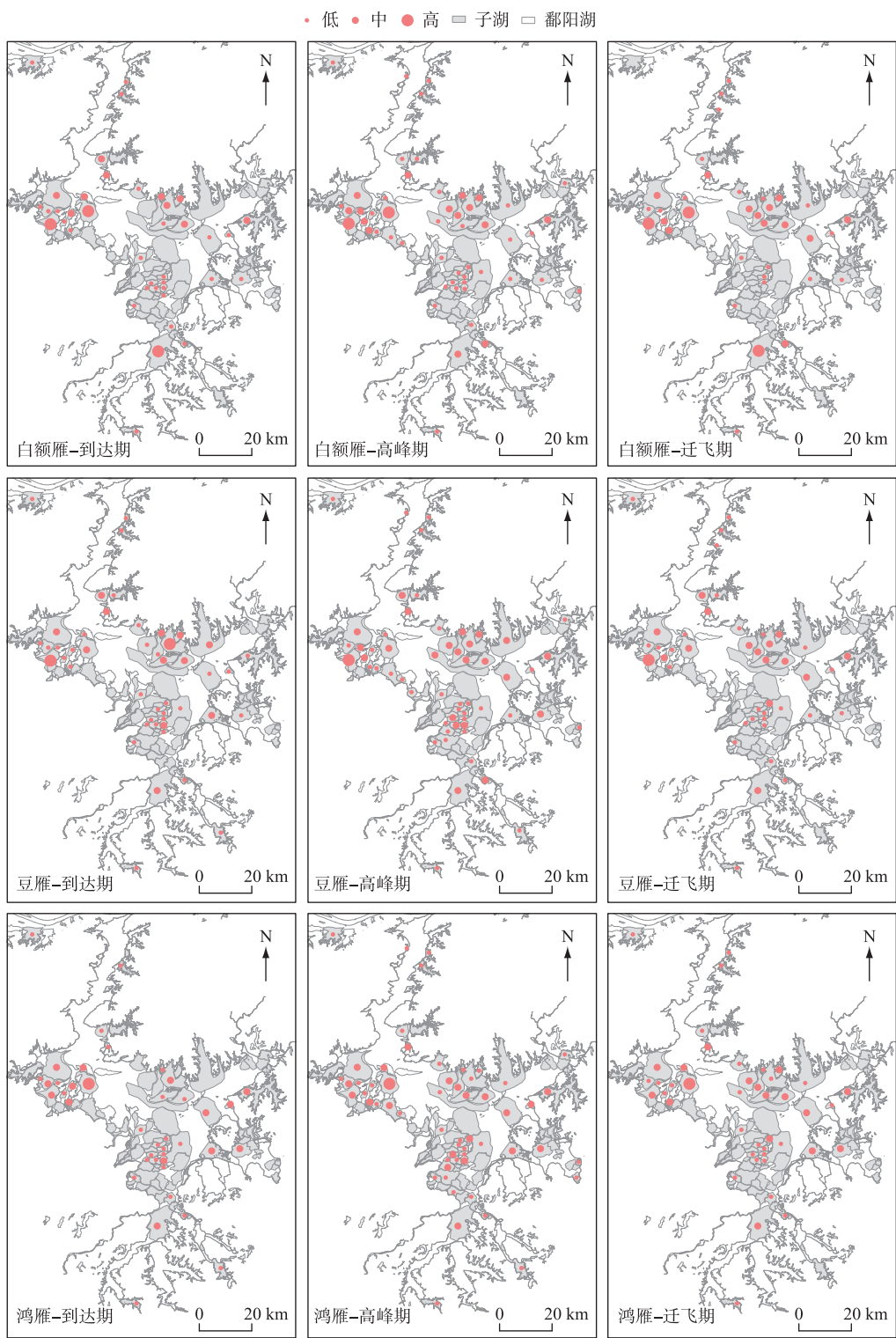


图 4 越冬期不同阶段雁类空间分布的差异

Fig.4 Differences in spatial pattern of three geese in different wintering periods

3.4 子湖重要性分析及热点区域识别

在整个越冬期,大湖池和大汉湖重要性最高,雁类利用强度最高,栖息地承载压力最大。其次是金溪湖、龙潭湖、蚌湖、珠湖、矾山湖和泉阳圩堤。对于3个越冬阶段,高峰期各子湖重要性总和最高,栖息地承载力最大(图5)。

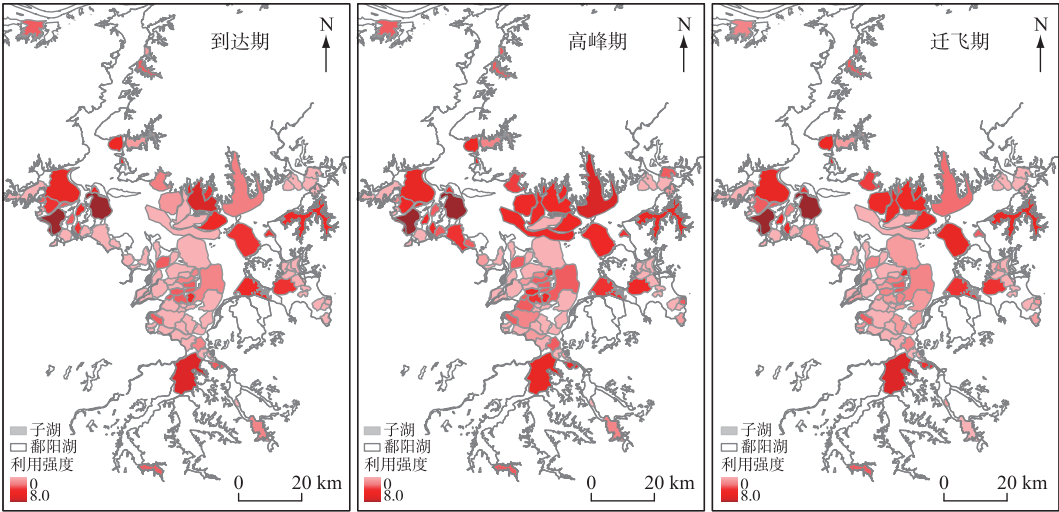


图5 雁类在越冬期不同阶段对鄱阳湖子湖的利用强度分析
Fig.5 Utilization intensity of geese on sub-lakes of Lake Poyang in different wintering periods

在整个越冬季,鄱阳湖保护区是所有区域中雁类利用强度最高的区域,其面积为 224 km²,重要值范围为 0.058~0.094。对于白额雁和豆雁,都昌保护区是第2热点区域,其面积是 411 km²,重要值范围为 0.017~0.056,其次是南矶湿地保护区,其面积为 333 km²;对于鸿雁来说,保护区以外的子湖也具有较高的利用强度(图6)。因此,除鄱阳湖保护区、都昌保护区、南矶湿地保护区外,其他子湖也应该加强调查与监测。

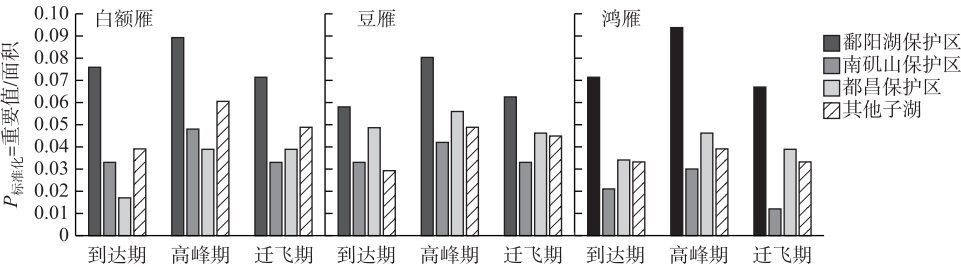


图6 鄱阳湖不同区域对越冬雁类的重要性(都昌保护区面积 411 km²,鄱阳湖保护区面积 224 km²,南矶湿地保护区面积 333 km²,其他子湖面积 512 km²)

Fig.6 Importance of different regions of Lake Poyang to wintering geese

研究表明,湿地中的浅水区域和低草草洲是越冬雁类适宜的栖息地类型^[17]。根据2022年越冬期鄱阳湖3个自然保护区的遥感影像数据解译结果(图7),鄱阳湖保护区、南矶湿地保护区和都昌保护区的浅水和低草草洲总面积分别为133.33(38.91%)、59.20(15.91%)和110.02 km²(27.51%),而鄱阳湖其他区域的浅水和低草草洲的总面积分别为129.1(4.84%)和296.6 km²(11.13%),3个保护区中,浅水和低草草洲的总面积占比更大,即适宜雁类栖息的面积和比例更大,这可能是3个保护区中越冬雁类分布更集中、利用强度更高的原因。

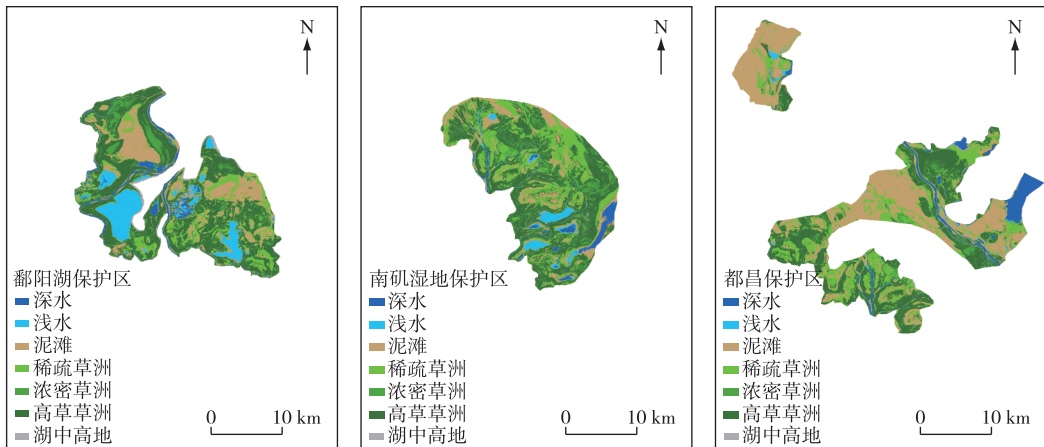


图7 2022年12月鄱阳湖3个自然保护区湿地类别分布

Fig.7 Wetland category distribution of three nature reserves in Lake Poyang in December 2022

4 讨论和结论

雁类是迁徙水鸟,长期以来形成的迁徙节律使其空间分布与季节性食物资源同步,而全球或局地气候的变化和生境破碎化会影响其迁徙节律与食物资源的耦合关系^[18-20],因此明确雁类的迁徙时间和空间动态特征对于其栖息地的保护至关重要。本研究结果表明,3种雁类在鄱阳湖越冬的时间为170天,尽管不同物种迁徙时间动态存在差异,但数量峰值期均集中在11月底至次年2月初,此时栖息地承载压力大,存在物种间的竞争,与曹开强^[21]、Si等^[18]的研究结果一致。

雁类在空间分布上的差异是其对湿地环境变化的适应方式,反映了其栖息地选择的策略^[17]。作为洪泛平原湿地,鄱阳湖湿地时空维度上高度异质的湿地景观为水鸟塑造了觅食和栖息的基本条件^[22]。越冬雁类分布与湿地的景观异质性有关,景观异质性高的区域,栖息地类型更为丰富,可以满足越冬雁类的生态位需求^[16,23]。景观异质性使得湿地形成了不同密度和高度的植物斑块,为提供更高质量的食物资源创造了条件^[24]。食物资源丰度也是影响雁类分布的重要因素,导致越冬雁类对不同区域利用强度上的差异^[25]。鄱阳湖保护区、南矶湿地保护区和都昌保护区的子湖,由于地理位置和微地形的差异,形成了水位梯度及景观连接上的差异,栖息地类型丰富^[26]。本研究通过分析鄱阳湖遥感影像数据发现,3个保护区与鄱阳湖其他区域相比,雁类偏好的浅水区域和低草草滩的总面积占比更大(图7),可以满足其栖息需求。保护区的子湖大多与主湖季节性连通,越冬季通过水闸控制水位,在越冬期可以保持一定水面面积和洲滩面积,雁类适宜栖息地面积和有效食物资源更多^[25],这可能是白额雁、豆雁和鸿雁均集中分布在3个保护区的重要原因。其中豆雁分布范围最广,白额雁分布热点区域最多,这与朱奇等^[27]、张娜等^[28]、邵明勤等^[29]的研究结果相似。

越冬雁类对栖息地的利用与水文因素息息相关,水位波动会影响植物的生长,进而影响越冬雁类的分布^[16]。越冬雁类以洲滩的莎草科植物为食,特别是鲜嫩的苔草^[10],Jan等通过鄱阳湖遥感影像信息提取,发现雁类丰度的变化与苔草出露时间和雁类到达的间隔时间有关^[26]。保护区内的子湖会根据越冬水鸟的需求进行人工调控水位,使得洲滩在适宜时间下逐渐出露,苔草在不同的时间开始生长,保障在越冬期不同阶段为雁类提供更大范围的新鲜苔草^[30]。鄱阳湖保护区范围内的子湖是雁类分布的重要区域和热点区域,保护区的管理措施对水鸟及其栖息地的保护起到了积极的作用,与夏少霞等^[31]、崔鹏等^[32]的研究结果一致。此外,较大面积子湖也更有利于维持水鸟的高丰度^[33-34]。本研究结果显示,大湖池和大汉湖的利用强度最高。这是因为大湖池和大汉湖是鄱阳湖保护区内面积较大的子湖,景观生境异质性较高,植物斑块更为丰富,为雁鸭类提供了更适宜更丰富的生境条件,保障充足的食物资源^[26]。

现有保护区对越冬雁类种群起到了重要的保护作用^[35],因此,加强对保护区内重要子湖的保护管理,维持湿地景观异质性,提升雁类有效的食物资源,是维持雁类种群稳定性的关键。本研究认为,在越冬高峰期雁类利用强度和分布范围最大,食物资源和栖息地承载压力也较大,部分个体可能为避免竞争而寻找其他栖息地^[27]。建议在越冬数量高峰期,通过一些人工措施,如水位调度^[16]及刈割促进新生苔草萌发^[28]等措施,恢复和提升高峰期时越冬雁类食物资源有效性,减少因空间聚集带来的禽流感等风险。此外,值得注意的是,保护区以外的子湖也是雁类(特别是鸿雁)重要栖息地,这意味鄱阳湖水鸟栖息地保护还存在一定的空缺。因此,应优化整合现有的鄱阳湖保护区体系和范围,对水鸟具有重要意义的区域提升其保护级别,加强保护区以外区域的联合调查与监测。

致谢:感谢江西省南矶湿地国家级自然保护区和都昌省级自然保护区对本研究的实地工作和数据提供的支持。

5 附录

附表 I 见电子版(DOI: 10.18307/2024.0331)。

6 参考文献

- [1] Wang Q, Lu XG. Application of water bird to monitor and evaluate wetland ecosystem. *Wetland Science*, 2007, **5**(3): 274-281. [王强, 吕宪国. 鸟类在湿地生态系统监测与评价中的应用. *湿地科学*, 2007, **5**(3): 274-281.]
- [2] Zhang SX, Dong YX, Xia F. Significance of waterbird monitoring in lake ecosystems. *J Lake Sci*, 2011, **23**(2): 155-162. DOI: 10.18307/2011.0201. [张淑霞, 董云仙, 夏峰. 湖泊生态系统的水鸟监测意义, *湖泊科学*, 2011, **23**(2): 155-162.]
- [3] Guareschi S, Abellan P, Laini A *et al.* Cross-taxon congruence in wetlands: Assessing the value of waterbirds as surrogates of macroinvertebrate biodiversity in Mediterranean Ramsar sites. *Ecological Indicators*, 2015, **49**: 204-215. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.10.012.
- [4] Klaassen RHG, Hake M, Strandberg R *et al.* When and where does mortality occur in migratory birds? Direct evidence from long-term satellite tracking of raptors. *Journal of Animal Ecology*, 2014, **83**(1): 176-184. DOI: 10.1111/1365-2656.12135.
- [5] Cao L, Meng FJ, Zhang JJ *et al.* Moving forward: How best to use the results of waterbird monitoring and telemetry studies to safeguard the future of Far East Asian Anatidae species. *Wildfowl*, 2020, (6): 293-319.
- [6] 陈艳. 以雁形目为主, 探讨东亚—澳大利亚路线迁徙水鸟的潜在胁迫因素[学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [7] Cao L, Zhang Y, Barter M *et al.* Anatidae in Eastern China during the non-breeding season: Geographical distributions and protection status. *Biological Conservation*, 2010, **143**(3): 650-659. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.12.001.
- [8] Jia QA, Koyama K, Choi CY *et al.* Population estimates and geographical distributions of swans and geese in East Asia based on counts during the non-breeding season. *Bird Conservation International*, 2016, **26**(4): 397-417. DOI: 10.1017/s0959270915000386.
- [9] Yu H, Wang X, Cao L *et al.* Are declining populations of wild geese in China 'prisoners' of their natural habitats? *Current Biology*, 2017, **27**(10): R376-R377. DOI: 10.1016/j.cub.2017.04.037.
- [10] 赵美娟. 长江中下游流域白额雁和豆雁越冬种群生态学的研究[学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [11] Damba I, Fang L, Yi K *et al.* Flyway structure, breeding, migration and wintering distributions of the globally threatened swan goose *Anser cygnoides* in East Asia. *Wildfowl*, 2020: 97-123.
- [12] Wang X, Cao L, Fox AD *et al.* Stochastic simulations reveal few green wave surfing populations among spring migrating herbivorous waterfowl. *Nature Communications*, 2019, **10**: 2187. DOI: 10.1038/s41467-019-09971-8.
- [13] Stafford JD, Janke AK, Anteau MJ *et al.* Spring migration of waterfowl in the northern hemisphere: A conservation perspective. *Wildfowl*, 2014, (4): 70-85.
- [14] Wang SY, Gao Y, Jia JJ *et al.* Water level as the key controlling regulator associated with nutrient and gross primary productivity changes in a large floodplain-lake system (Lake Poyang), China. *Journal of Hydrology*, 2021, **599**: 126414. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126414.
- [15] 李凤山, 刘观华, 吴建东等. 鄱阳湖湿地和水鸟的生态研究. 北京: 科学普及出版社, 2011.
- [16] Xia SX, Liu Y, Chen B *et al.* Effect of water level fluctuations on wintering goose abundance in Poyang Lake wetlands of China. *Chinese Geographical Science*, 2017, **27**(2): 248-258. DOI: 10.1007/s11769-016-0840-z.
- [17] 冯多多. 东洞庭湖小白额雁(*Anser erythropus*)越冬种群空间分布及其影响因子研究[学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [18] Si YL, Xin QC, Prins HHT *et al.* Improving the quantification of waterfowl migration with remote sensing and bird tracking. *Science Bulletin*, 2015, **60**(23): 1984-1993. DOI: 10.1007/s11434-015-0930-9.
- [19] Van Eerden MR, Drent RH, Stahl J *et al.* Connecting seas: Western Palaearctic continental flyway for water birds in the perspective of changing land use and climate. *Global Change Biology*, 2005, **11**(6): 894-908.

- [20] Drent RH, Eichhorn G, Flagstad A *et al.* Migratory connectivity in Arctic geese: Spring stopovers are the weak links in meeting targets for breeding. *Journal of Ornithology*, 2007, **148**(2): 501-514. DOI: 10.1007/s10336-007-0223-4.
- [21] 曹开强. 鄱阳湖越冬雁和白额雁越冬种群迁徙路线与活动特征[学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2020.
- [22] Xia SX, Yu XB, Fan N. Relationship between winter migratory bird habitat area and water level change in Poyang Lake. *Resources Science*, 2010, **32** (11): 2072-2078. [夏少霞, 于秀波, 范娜. 鄱阳湖越冬候鸟栖息地面积与水位变化的关系. 资源科学, 2010, **32** (11): 2072-2078.]
- [23] Wei J, Xin QC, Ji LY *et al.* A new satellite-based indicator to identify spatiotemporal foraging areas for herbivorous waterfowl. *Ecological Indicators*, 2019, **99**: 83-90. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.12.016.
- [24] Teng JK, Xia SX, Liu Y *et al.* Differences of regulative flexibility between hydrological isolated and connected lakes in a large floodplain: Insight from inundation dynamics and landscape heterogeneity. *Water*, 2020, **12**(4): 991. DOI: 10.3390/w12040991.
- [25] Xia SX, Liu Y, Wang YY *et al.* Wintering waterbirds in a large river floodplain: Hydrological connectivity is the key for reconciling development and conservation. *Science of the Total Environment*, 2016, **573**: 645-660. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.147.
- [26] Jan DL, Si YL, Zeng YD *et al.* Mapping flood recessional grasslands used by overwintering geese: A multi-temporal remote sensing application. *Enschede: ISPRS Mid-Term Symposium Remote Sensing*, 2006.
- [27] Zhu Q, Zhan YH, Liu GH *et al.* Investigation of number and distribution of the waterfowl of Poyang Lake in the winter of 2011. *Jiangxi Forestry Science and Technology*, 2012, **40**(3): 1-9. [朱奇, 詹耀煌, 刘观华等. 2011年冬鄱阳湖水鸟数量与分布调查. 江西林业科技, 2012, **40**(3): 1-9.]
- [28] Zhang N, Li YK, Shan JH *et al.* Community structure, abundance and spatial distribution of water birds wintering in Poyang Lake wetland. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 183-194. DOI: 10.18307/2019.0117. [张娜, 李言阔, 单继红等. 鄱阳湖枯水期延长背景下越冬水鸟群落结构、丰富度及其空间分布格局. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 183-194.]
- [29] Shao MQ, Chen B, Jiang JH. Population dynamics and spatial-temporal distribution of wintering geese and ducks in Poyang Lake. *Sichuan Journal of Zoology*, 2016, **35** (3): 460-465. [邵明勤, 陈斌, 蒋剑虹. 鄱阳湖越冬雁鸭类的种群动态与时空分布. 四川动物, 2016, **35** (3): 460-465.]
- [30] Yu DK, Xu ZW, Liu W *et al.* A preliminary study on wintering waterbirds diversity and trend of sub lakes in Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, **36**(11): 1403-1409. [余定坤, 徐志文, 刘威等. 江西鄱阳湖国家级自然保护区子湖泊越冬水鸟多样性及变化趋势. 生态与农村环境学报, 2020, **36**(11): 1403-1409.]
- [31] Xia SX, Liu GH, Yu XB *et al.* Evaluation of wintering waterfowl habitat in Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2015, **27** (4): 719-726. DOI: 10.18307/2015.0421. [夏少霞, 刘观华, 于秀波等. 鄱阳湖越冬水鸟栖息地评价. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 719-726.]
- [32] Cui P, Xia SX, Liu GH *et al.* Population dynamics of wintering waterbirds in Poyang Lake. *Sichuan Journal of Zoology*, 2013, **32**(2): 292-296. [崔鹏, 夏少霞, 刘观华等. 鄱阳湖越冬水鸟种群变化动态. 四川动物, 2013, **32**(2): 292-296.]
- [33] González-Gajardo A, Sepúlveda PV, Schlatter R. Waterbird assemblages and habitat characteristics in wetlands: Influence of temporal variability on species-habitat relationships. *Waterbirds*, 2009, **32**(2): 225-233. DOI: 10.1675/063.032.0203.
- [34] Sebastián-González E, Green AJ. Habitat use by waterbirds in relation to pond size, water depth, and isolation: Lessons from a restoration in southern Spain. *Restoration Ecology*, 2014, **22**(3): 311-318. DOI: 10.1111/rec.12078.
- [35] Zhang C, Li YK, Ren Q *et al.* Species diversity, spatial distribution and protection strategies of wintering waterbirds after extreme summer flood in Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1584-1599. DOI: 10.18307/2022.0528. [张超, 李言阔, 任琼等. 鄱阳湖夏季极端水位条件下越冬水鸟多样性、空间分布及其保护对策. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1584-1599.]

附表I 白额雁、豆雁、鸿雁在不同子湖的分布*

Attached Tab.I Utilization intensity of geese on different sub-lakes

区域	子湖	白额雁			豆雁			鸿雁		
		到达期	高峰期	迁飞期	到达期	高峰期	迁飞期	到达期	高峰期	迁飞期
鄱阳	蚌湖	2	2	2	2	2	2	2	2	2
湖保	沙湖	1	2	1	1	1	1	2	2	1
保护区	朱市湖	1	2	1	1	2	1	1	1	1
	大湖池	3	3	3	3	3	3	2	2	2
	中湖池	2	1	0	1	1	1	2	1	1
	常湖池	1	2	2	1	2	2	1	1	1
	梅西湖	2	1	1	1	1	1	2	2	2
	大汉湖	3	3	3	2	2	2	3	3	3
	象湖	1	2	2	1	1	1	2	2	2
	董家湖	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	蚕豆湖	0	1	0	0	1	0	0	2	1
	小滩湖	0	1	0	0	1	0	0	1	0
南矶	上段湖	1	1	1	1	1	1	1	1	0
湿地	边湖	0	0	0	0	0	0	0	1	0
保护区	大车荒	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	常湖	1	1	0	1	2	1	1	2	1
	战备湖	1	1	0	1	1	1	1	1	0
	三泥湾	1	1	0	1	2	0	1	1	1
	石湖	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	白沙湖	1	1	0	2	2	1	2	2	1
	上深湖	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	下深湖	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	上北甲	0	1	1	1	1	1		1	1
	下北甲	0	1	1	1	1	2	1	2	2
	朱湖	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	红兴湖	0	0	0	0	1	0	0	1	0
其他子湖	神塘湖	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	东湖	0	1	0	1	1	1	1	1	1
	盘湖	0	1	0	0	1	1	0	1	0
	三湖	0	0	0	0	1	0	0	2	0
	大伍湖	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	林充湖	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	草湾湖	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	独洲湖	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	汉池湖	1	1	2	1	2	2	2	2	2

都昌 保护 区	企湖	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	大莲子湖	1	1	1	1	2	1	2	2	2
	西湖	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	三水湖	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	二水湖	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	程家池	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	北口湾	1	1	0	0	1	1	1	1	1
	明溪湖	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	金溪湖	3	2	3	2	2	2	2	2	2
	坎下湖	1	2	2	1	2	1	1	1	1
	瑶岗湖	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	杨坊湖	0	0	0	1	1	0	1	1	0
	晚湖	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	交汊湖	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	上港湖	1	1	1	1	1	1	2	2	1
	北口湖	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	长湖	1	1	0	1	0	0	1	1	0
	鳊鱼湖	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	下水湾	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	双岭湖	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	青岚湖	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	珠湖	2	1	2	2	2	2	2	2	2
	赛城湖	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	皂湖	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	鞋山湖	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	南疆湖	1	2	2	1	1	2	1	1	2
	泊洋湖	1	0	0	1	1	1	1	1	1
	高桥湖	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	马影湖	2	2	1	1	2	1	1	2	1
	朱袍山	0	0	0	2	2	1	2	2	2
	三山	0	1	0	1	1	2	0	1	2
	泥湖	1	2	1	1	2	2	2	2	2
	泥湖大道	0	0	0	1	2	1	0	0	0
	大沔池	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	龙潭湖	2	3	2	2	2	1	2	2	1
	后湖	0	2	0	1	2	1	1	1	0
	泉阳圩堤	2	2	1	2	2	2	2	2	2
	黄金嘴	2	2	1	2	2	1	1	1	1

输湖	2	2	0	2	2	1	2	2	2
新妙湖	0	1	0	1	1	0	0	1	0
矾山湖	2	2	1	2	2	2	2	2	2

* 表中 0、1、2、3 分别代表雁类在各子湖的分布等级为缺省、低、中、高，划定方法如下：将 3 种雁类在不同子湖的数量除以单个子湖中调查的最大数量，对数据进行标准化处理，将其按照自然断点法分为高、中、低 3 个等级，并分别赋值为 3、2、1，缺省数据为 0。