

鄱阳湖四种水鸟的栖息地利用与水深和食物的关系

张笑辰^① 金斌松^① 陈家宽^{①③} 吴建东^② 刘观华^② 马志军^{①③*}

① 南昌大学生命科学研究院流域生态研究所 南昌 330031; ② 江西鄱阳湖国家级自然保护区管理局 南昌 330038; ③ 复旦大学生物多样性科学研究所 生物多样性与生态工程教育部重点实验室 上海 200433

摘要: 为了了解水深和食物资源对水鸟栖息地利用的影响, 2012 ~ 2013 年越冬期, 采用样方法, 对鄱阳湖沙湖的白鹤 (*Grus leucogeranus*)、小天鹅 (*Cygnus columbianus*)、东方白鹳 (*Ciconia boyciana*) 和白琵鹭 (*Platalea leucorodia*) 4 种水鸟的数量、觅食地和休息地水深以及主要食物——沉水植物冬芽的密度和生物量进行了调查。每个样方为 150 m × 150 m 的栅格, 全湖共设置 152 个样方。结果显示, 10 月份沉水植物冬芽分布的平均水深为 (124.2 ± 12.0) cm。4 种水鸟觅食地水深均显著高于其休息地水深 (白鹤: $Z = 11.96$, 小天鹅: $Z = 4.69$, 东方白鹳: $Z = 14.44$, 白琵鹭: $Z = 29.33$, 所有 $P < 0.01$); 对于 2 种食冬芽的水鸟, 白鹤觅食地水深、冬芽生物量、取食深度以及休息地水深均显著低于小天鹅 (觅食地水深: $Z = 8.56$, 冬芽生物量: $Z = 2.93$, 取食深度: $Z = 14.69$, 休息地水深: $Z = 4.34$, 所有 $P < 0.05$), 但两者觅食地的冬芽密度差异不显著 ($Z = 0.6$, $P = 0.55$); 对于 2 种食鱼性水鸟, 东方白鹳觅食地水深、取食深度和休息地水深均显著大于白琵鹭 (觅食地水深: $Z = 10.60$; 取食深度: $Z = 9.35$; 休息地水深: $Z = 8.47$, 所有 $P < 0.01$)。回归分析表明, 白鹤、东方白鹳、白琵鹭的觅食个体数量均与水深呈二次项关系, 个体数量最大的觅食地水深分别为 23.9 cm, 33.0 cm 和 22.6 cm; 白鹤、小天鹅的觅食个体数量均与冬芽生物量呈线性关系。3 种涉禽均只分布在一定的水深范围内, 且同种食性的水鸟利用不同的水深从而减少在空间生态位的重叠。

关键词: 水深; 冬芽; 白鹤; 小天鹅; 东方白鹳; 白琵鹭; 鄱阳湖; 沙湖; 生态位

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263(2014)05-657-09

Relationship between Habitat Use of Four Waterbird Species and Water Depth and Food Resource in Poyang Lake

ZHANG Xiao-Chen^① JIN Bin-Song^① CHEN Jia-Kuan^{①③} WU Jian-Dong^②
LIU Guan-Hua^② MA Zhi-Jun^{①③*}

① Center of Watershed Ecology, Institute of Life Science, Nanchang University, Nanchang 330031; ② Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve, Nanchang 330038; ③ Institute of Biodiversity Science, Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: In order to understand the effects of water depth and food resources on the habitat use of waterbirds, we surveyed individual numbers, water depth of foraging and resting sites, food availability (density and

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31260107);

* 通讯作者, E-mail: zhijunm@fudan.edu.cn;

第一作者介绍 张笑辰, 男, 硕士研究生; 研究方向: 鸟类生态学; E-mail: greatsolo@163.com。

收稿日期: 2014-01-13, 修回日期: 2014-05-19

biomass of winter buds of submerged macrophytes for bud-feeders) of four waterbird species (*Grus leucogeranus*, *Cygnus columbianus*, *Ciconia boyciana* and *Platalea leucorodia*) using plot methods in winter 2012–2013 in Shahu Lake, a sub-lake of Poyang Lake. A total of 152 plots were set in the lake with each plot being 150 m × 150 m. The buds were collected in October before arrival of waterbirds and individuals of birds were counted in January when large amounts of them concentrated in the lake. Distribution patterns of winter buds in different water depth in October were analyzed using Kolmogorov-Smirnov Z test. We compared water depth between foraging and resting sites of the 4 species using Mann-Whitney U test, respectively. We further compared water depth, density and biomass of winter buds in foraging sites and water depth in resting sites between *G. leucogeranus* and *Cygnus columbianus* (both mainly forage on buds) using Mann-Whitney U test, respectively. We also compared water depth between two piscivorous bird species in foraging sites and resting sites, respectively. Regression analysis were used to assess the relationship between foraging bird numbers and water depth for the 4 species, as well as between foraging bird numbers and biomass of winter buds for 2 bud-feeding species. We found out that winter buds occurred in the region with an average water depth (124.2 ± 12.0) cm in October (Fig. 2). Water depth at foraging sites of all the four species were deeper than that at resting sites (*G. leucogeranus*: $Z = 11.96$, *Cygnus columbianus*: $Z = 4.69$, *Ciconia boyciana*: $Z = 14.44$, *P. leucorodia*: $Z = 29.33$, $P < 0.01$ for all) (Table 1). Density of winter buds at foraging sites was not significantly different ($Z = 0.6$, $P = 0.55$) between the two bud-feeding waterbird species, *G. leucogeranus* and *Cygnus columbianus*. *G. leucogeranus* roosted in shallower water and foraged in shallower water with lower biomass of winter buds than that of *Cygnus columbianus*, and the former had shallower foraging depth than the latter (water depth at foraging sites: $Z = 8.56$; biomass of winter buds: $Z = 2.93$, foraging depth: $Z = 14.69$, water depth at resting sites: $Z = 4.34$, $P < 0.05$ for all). For the two piscivorous waterbird species, foraging depth, water depth at foraging sites and water depth at resting sites of *Ciconia boyciana* were deeper than that of *P. leucorodia* (water depth at foraging sites: $Z = 10.60$, foraging depth: $Z = 9.35$, water depth at resting sites: $Z = 8.47$, $P < 0.01$ for all). Regression analysis indicated significant quadratic relationships between the individual numbers of foraging *G. leucogeranus* ($R^2 = 0.39$, $P < 0.05$), *Ciconia boyciana* ($R^2 = 0.31$, $P < 0.05$), *P. leucorodia* ($R^2 = 0.29$, $P < 0.05$) and water depth at study site (Fig. 3). The water depth at the area held the highest densities for the three species was 23.9, 33.0, and 22.6 cm, respectively. The individuals of *G. leucogeranus* and *Cygnus columbianus* foraging at an area were linear related to the biomass of winter buds ($R^2 = 0.43$, $P < 0.01$) and ($R^2 = 0.54$, $P < 0.05$), respectively. The three wader species distributed only in the region with a certain range of water depth, moreover, the species fed on same diets seems use their habitat with water depth differed from that used by another species to reduce overlap of spatial niche.

Key words: Water depth; Winter bud; *Grus leucogeranus*; *Cygnus columbianus*; *Ciconia boyciana*; *Platalea leucorodia*; Poyang Lake; Shahu Lake; Niche

越冬水鸟常形成多物种的集群,不同水鸟在形态学特征、食性等方面的差异导致其具有不同的生态位(Baker 1979, Pöysä 1983)。很多水鸟对一些栖息地特征,如水深和食物,具有很强的专一性(Safran et al. 1997, Isola et al. 2000)。例如,Elphick (1998)等在美国加利福尼亚稻田的研究表明,涉禽和涉水雁鸭类集中栖息于 15 ~ 20 cm 水深区域。Hartke (2009)等

在美国德克萨斯的沿海洲滩研究表明,植食性水鸟数量的变化趋势与沉水植物川蔓藻(*Ruppia maritima*)的丰富度密切相关。所以,栖息地特征可以代表一种水鸟生态位的综合指标(楚国忠等 1993)。

在越冬期,水鸟对栖息地的需求相对简单,一般只需要觅食地和休息地两种类型的栖息地。食物的多少直接影响着水鸟对觅食地的

利用程度,而水深则决定着觅食地和休息地是否能被水鸟利用,如涉禽无法在水位过深的区域栖息。另外,水深还会影响食物资源的分布,从而影响着水鸟对觅食地的利用(Bolduc et al. 2004, Klaassen et al. 2006)。因此,了解栖息地的水深和食物特征是认识越冬水鸟栖息地利用的关键。

鄱阳湖是中国最大的淡水湖,冬季丰富的水生植物和独特的湿地空间异质性为数十万越冬水鸟提供了重要的食物资源和栖息场所,其中包括全世界 99% 的白鹤(*Grus leucogeranus*)和 90% 的东方白鹳(*Ciconia boyciana*) (马克·巴特等 2004, 2005)。沉水植物的冬芽是一些植食性水鸟在鄱阳湖越冬的重要食物。沙湖是鄱阳湖国家级自然保护区(以下简称保护区)拥有权属的子湖泊,是越冬水鸟在鄱阳湖的重要栖息地之一。其中白鹤、小天鹅(*Cygnus columbianus*)、东方白鹳、白琵鹭(*Platalea leucorodia*)是沙湖 4 种常见的国家重点保护水鸟,了解其栖息地和食物特征对保护和改善其栖息生境是至关重要的。本研究对沙湖水鸟栖息地和食物特征开展调查,了解这 4 种水鸟栖息地的水深和取食深度,分析水深和沉水植物冬芽对水鸟栖息地利用的影响,为湿地管理和越冬水鸟保护提供科学依据。

1 研究地点

鄱阳湖是与长江连通的一个过水性吞吐型湖泊(张本 1988)。洪枯季节水位变化剧烈,冬季枯水期湖面面积仅为丰水期的一半(Shankman et al. 2003)。冬季逐渐裸露出大面积的泥滩和浅水沼泽为数十万只水鸟提供了重要越冬地(马克·巴特等 2004, 2005)。

保护区(29° 05' ~ 29° 15' N, 115° 55' ~ 116° 03' E)位于鄱阳湖的西北部,为赣江和修河交汇口,总面积约 224 km² (纪伟涛等 2002)。越冬水鸟一般在 10 月底陆续迁到,翌年 3 月底开始迁离。根据栖息地和食物特征,越冬水鸟可分为三种主要类型: 1. 以水生植物的块茎为主要食物的白鹤、鸿雁(*Anser*

cygnoides)、小天鹅; 2. 以莎草科和禾本科植物茎叶为主要食物的雁类和鹤类; 3. 以鱼类或无脊椎动物为主要食物的鸕鹚类、鸬鹚类和游禽(吉姆·哈里斯 2011)。

沙湖为保护区的核心湖泊,总面积约为 1 400 hm², 没有水产养殖活动,人为干扰较少(刘观华等 2011)。丰水期沙湖与鄱阳湖主湖相连,枯水期与主湖分开,仅通过南部水闸与修河相连。每年 10 月中旬左右闸口开始放水捕捞湖中自然生长的鱼类。放水速率根据沙湖的水位和水鸟越冬情况进行控制。由于湖滩高程上的差异,随着水位的逐渐下降,水鸟可利用的区域逐步向湖心蔓延,这样不仅可以为各种类型的水鸟提供与其适合的栖息场所,而且使栖息地能被水鸟充分利用。水闸于 1 月中下旬关闭,水位保持稳定,水鸟群落趋于平稳。自 2003 年冬季以来,每年平均单次调查有 9 600 只水鸟,主要物种包括白鹤、小天鹅、鸿雁、东方白鹳、白琵鹭等(曾南京等 2011b)。

2 研究方法

2.1 刻度杆布置及冬芽调查 2012 年 7 月上旬,乘船对沙湖沉水植物的分布进行初步踏查,使用 GPS(任我游集思宝 G390)记录沉水植物的分布范围。我们根据踏查结果在 Google Earth 上设置栅格。栅格面积为 300 m × 300 m,确定并记录每个栅格顶点的地理坐标作为野外设置刻度杆的位置(标有刻度的 PVC 管,共 54 个,可用于测量水深)。为了尽量减少环境的异质性对研究结果的影响,我们将每个栅格平均分为 4 个区域,每个区域面积为 150 m × 150 m,在每个区域的顶点设置冬芽采样点,共 187 个样点。我们将每个 150 m × 150 m 的区域作为一个水鸟监测的基本单位,共 152 个区域(图 1)。

刺苦草(*Vallisneria spinulosa*)和罗氏轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata* var. *rosburghii*)是沙湖的优势沉水植物,且均能形成冬芽越冬(万文豪等 2002)。以冬芽为食的越冬水鸟在每年 10 月中下旬陆续抵达鄱阳湖(严丽等 1988, 曾

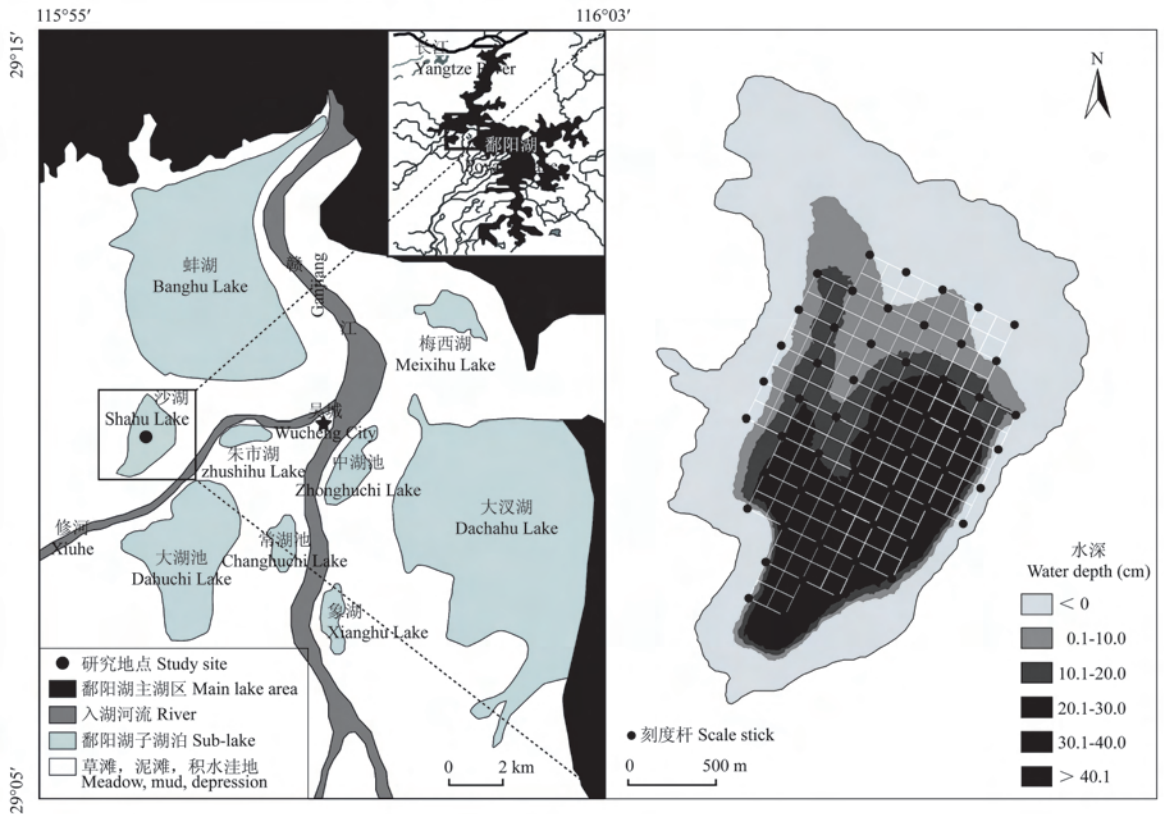


图1 研究区域及插杆标记位置示意图(水深图根据2013年1月16日水位绘制)

Fig. 1 Sketch map of study area and location of stick mark (Water depth map was drawn according to the water level measured on January 10, 2013)

南京等 2011a)。2012 年 10 月底,乘船至各采样点采集冬芽。以采样夹(取样面积 $13\text{ cm} \times 15\text{ cm}$)采集冬芽,在底泥中的采样深度为 30 cm 。白鹤、小天鹅喙长分别约为 18 cm 和 9 cm (赵正阶 2001),因此我们的采样深度能获得它们可利用的全部冬芽。采用不锈钢筛网(网孔尺寸: $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$)从底泥中筛选存活冬芽,剔除死亡腐烂的冬芽,记录冬芽的种类和数量,装入封口袋保存,记录采样点编号。采集冬芽的同时测量采样点的水深,并在预设的位置安插刻度杆。采集的冬芽带回实验室清洗,用吸水纸吸干表面水分,在干燥箱中 80°C 烘至恒重,称量干重。

2.2 水鸟调查 2013 年 1 月沙湖水位稳定,水鸟数量趋于平稳。我们对白鹤、小天鹅、东方白鹤、白琵鹭 4 种水鸟进行调查,每 5 d 调查一

次,共 5 次。沙湖枯水期湖面积较小,选择固定高度的观测点(观鸟亭)使用单筒望远镜(Carl Zeiss 20-75 \times 85)观测各个位点的水深,并以直接计数法和集团估计法对 4 种水鸟数量分别进行统计。统计各个监测区域水鸟的取食个体数量和休息个体数量,并记录水鸟取食时喙、头、颈部没入水中的比例以估计其水下取食深度。由于上午湖面的雾较大影响调查效果,调查在 $14:00 \sim 16:00$ 时进行。

2.3 数据分析 我们以 10 月份采样点栅格的 4 个顶点的实测水深和采集冬芽密度、生物量(干重)的平均值估计各区域的冬芽分布水深和冬芽密度、生物量。采用单样本 Kolmogorov-Smirnov Z 检验分析 10 月份冬芽分布趋势。

由于越冬前期(11 ~ 12 月)沙湖水位较高,调查区域内仅发现少量的小天鹅休息,所以冬

芽生物量不会有明显变化。根据 1 月份观测的刻度杆水深,每个栅格 4 个顶点的平均值估计各监测区域的水鸟分布水深以及 10 月份各区域冬芽密度和生物量,根据水鸟觅食时其喙、头、颈部没入水中的比率与中国鸟类志记载的和南昌大学标本馆所记录的水鸟各部位的平均长度估算觅食水鸟的水下取食深度。采用 Mann-Whitney *U* 检验分别比较 4 种水鸟觅食地与休息地之间的水深差异;比较 2 种食冬芽水鸟之间觅食地水深、冬芽密度、生物量以及休息地水深差异;比较 2 种食鱼性水鸟之间觅食地水深以及休息地水深差异。

为了了解不同水鸟的空间分布与水深和食物分布的关系,我们采用回归分析分别探讨 4 种水鸟在不同监测区域的觅食数量与水深的关系以及 2 种食冬芽水鸟觅食数量与冬芽生物量(干重)关系。水鸟的数量为 5 次调查的平均值。所有的统计分析在 SPSS Statistics 17.0 上进行。文中数值以平均值 \pm 标准差表示。

3 结果

3.1 沙湖水深、冬芽密度及生物量 沙湖 10 月份沉水植物冬芽的平均密度为 (38.4 ± 33.6) ind/m² (0 ~ 166.7 ind/m², $n = 152$),冬芽平均生物量为 (9.1 ± 7.3) g/m² (0 ~

39.9 g/m², $n = 152$),冬芽的分布平均水深为 (124.2 ± 12.0) cm (图 2)。1 月份调查区域平均水深下降为 (32.0 ± 14.5) cm (1 ~ 59 cm, $n = 152$)。

3.2 水鸟觅食地和休息地水深 同种水鸟觅食地与休息地水深之间存在差异。白鹤、小天鹅、东方白鹳、白琵鹭 4 种水鸟的觅食地水深均显著大于其休息地水深(白鹤: $Z = 11.96$,小天鹅: $Z = 4.69$,东方白鹳: $Z = 14.44$,白琵鹭: $Z = 29.33$,所有 $P < 0.01$) (表 1)。

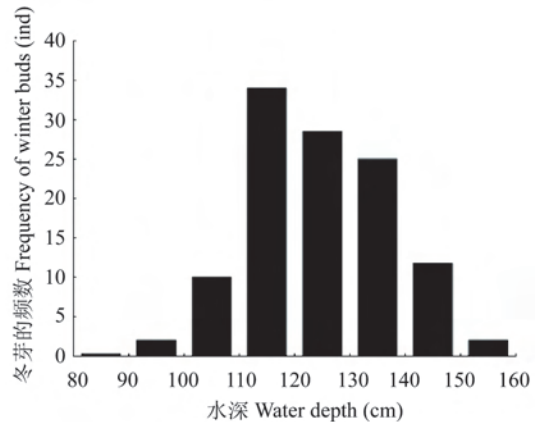


图 2 2012 年 10 月份沙湖沉水植物冬芽的分布
Fig. 2 Distribution of submerged plant winter buds in Shahu Lake in October 2012

表 1 4 种水鸟觅食地和休息地水深和取食深度

Table 1 Water depth and feeding depth at foraging and resting sites of four waterbird species

物种 Species	觅食地 Foraging site			休息地 Resting site	
	个体数量 Number (ind)	水深(cm) Water depth	取食深度(cm) Feeding depth	数量(ind) Number	水深(cm) Water depth
白鹤 <i>Grus leucogeranus</i>	204	20.4 ± 7.0^{aX}	26 ± 3^a	90	7.0 ± 4.1^{aY}
小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>	101	29.6 ± 13.0^{bX}	51 ± 7^b	150	20.5 ± 13.5^{bY}
东方白鹳 <i>Ciconia boyciana</i>	149	30.7 ± 4.8^{aX}	28 ± 11^a	269	15.6 ± 8.0^{aY}
白琵鹭 <i>Platalea leucorodia</i>	557	23.0 ± 5.6^{bX}	20 ± 3^b	1358	12.0 ± 6.3^{bY}

a, b 表示同种食性的不同水鸟觅食地水深、取食深度存在显著差异; X, Y 表示同种水鸟的觅食地与休息地水深存在显著差异。

a, b indicate significant differences in water depth, feeding depth between waterbirds with the same diets; X, Y indicate significant differences in water depth between foraging and resting sites of the same waterbird species.

4种水鸟活动区域的水深也存在差异。对于2种食冬芽的水鸟,白鹤无论是觅食地($Z = 8.56, P < 0.01$)还是休息地($Z = 4.34, P < 0.01$)的水深均显著小于小天鹅;对于2种食鱼的水鸟,东方白鹤无论是觅食地($Z = 10.60, P < 0.01$)还是休息地($Z = 8.47, P < 0.01$)的水深均显著大于白琵鹭。

3.3 水鸟觅食地冬芽密度和生物量 白鹤觅食地的冬芽密度和生物量分别为(57.4 ± 30.2) ind/m² ($n = 204$)和(11.4 ± 6.7) g/m² ($n = 204$),小天鹅觅食地的冬芽密度和生物量分别为(56.0 ± 37.9) ind/m² ($n = 101$)和(17.4 ± 9.9) g/m² ($n = 101$)。两者间冬芽密度差异不显著($Z = 0.6, P = 0.55$),但白鹤觅食地的冬芽生物量显著小于小天鹅的觅食地($Z = 4.96, P < 0.01$)。

3.4 水鸟取食行为及取食深度 相同食性水鸟的水下取食深度比较,白鹤的取食深度显著小于小天鹅($Z = 14.69, P < 0.01$),东方白鹤的取食深度显著大于白琵鹭($Z = 9.35, P < 0.01$)。

3.5 水鸟觅食数量与水深、冬芽生物量的关系

回归分析显示,2种食冬芽水鸟中白鹤觅食数量与水深呈显著的二次项关系($F = 4.79, P < 0.01, R^2 = 0.37, n = 19$),个体数量最大区域的水深为23.9 cm,与冬芽生物量呈显著的线性关系($F = 12.83, P < 0.01, R^2 = 0.43, n = 19$);小天鹅觅食数量与水深无显著的相关性($F = 2.02, P = 0.23, R^2 = 0.45, n = 8$),但随着冬芽生物量的增加而显著增长($F = 7.02, P < 0.01, R^2 = 0.54, n = 8$)。对于2种食鱼的水鸟来说,东方白鹤($F = 3.79, P < 0.05, R^2 = 0.31, n = 20$)和白琵鹭($F = 3.62, P < 0.05, R^2 = 0.29, n = 21$)觅食数量均与水深呈显著的二次项关系,个体数量最大区域的水深分别为33.0 cm和22.6 cm(图3)。

4 讨论

水深是限制水鸟栖息地利用的最重要的因子(Isola et al. 2000, Ma et al. 2010)。水深不

但决定栖息地是否可以被水鸟利用(Taft et al. 2002),还能影响水鸟的取食行为和取食能耗(Nolet et al. 2002),这对越冬水鸟在觅食地的取食对策起着至关重要的作用。不同水鸟由于形态特征的限制导致它们在栖息地利用方面存在差异。本研究表明,2种食冬芽水鸟中小天鹅的觅食和休息水深均显著大于白鹤。前人研究表明,白鹤主要在水没及跼跼以下水深的浅水区域(10~30 cm)活动(何春光等2002),而觅食地的水深为20 cm左右(胡振鹏2012)。荷兰Lauwersmeer湖小天鹅能在30~70 cm的水域中取食篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)的块茎(Nolet et al. 2001)。由于鄱阳湖洪枯季节水位波动剧烈,丰水期过高的水位影响沉水植物冬芽的形成(Wu et al. 2009)。因此,本研究中小天鹅觅食地水深要低于前人的报道。

对于2种食鱼性水鸟,东方白鹤的觅食和休息水深均显著大于白琵鹭。前人研究表明,升金湖白琵鹭觅食地和休息地的水深分别为5~20 cm和5~10 cm(胡维华等1999)。东方白鹤在鄱阳湖保护区主要分布于水深5~40 cm的沼泽地或浅水域中(王禹石等2010)。这与本研究结果相一致,说明了东方白鹤能比白琵鹭利用更深的水域。

为了有效地利用食物资源,水鸟趋向于选择食物资源丰富的栖息地(Hutto 1985)。除了食物的丰富度,食物的可利用度也在很大程度上影响到水鸟觅食地的选择(Taft et al. 2003, Bolduc et al. 2004)。鄱阳湖越冬的白鹤和小天鹅所利用的食物相似(吉姆·哈里斯2011),但小天鹅的觅食地冬芽生物量显著大于白鹤觅食地的冬芽生物量。这可能是由于形态学上的限制,白鹤无法在在水位较深的区域取食,而小天鹅可以在更深的区域选择食物资源更丰富的觅食地。

觅食时的运动方式和取食方式是水鸟发现以及利用食物的觅食对策(Zhu et al. 2007)。取食深度的结果显示,小天鹅的取食深度显著大于白鹤。Nolet等(2006)研究发现小天鹅在

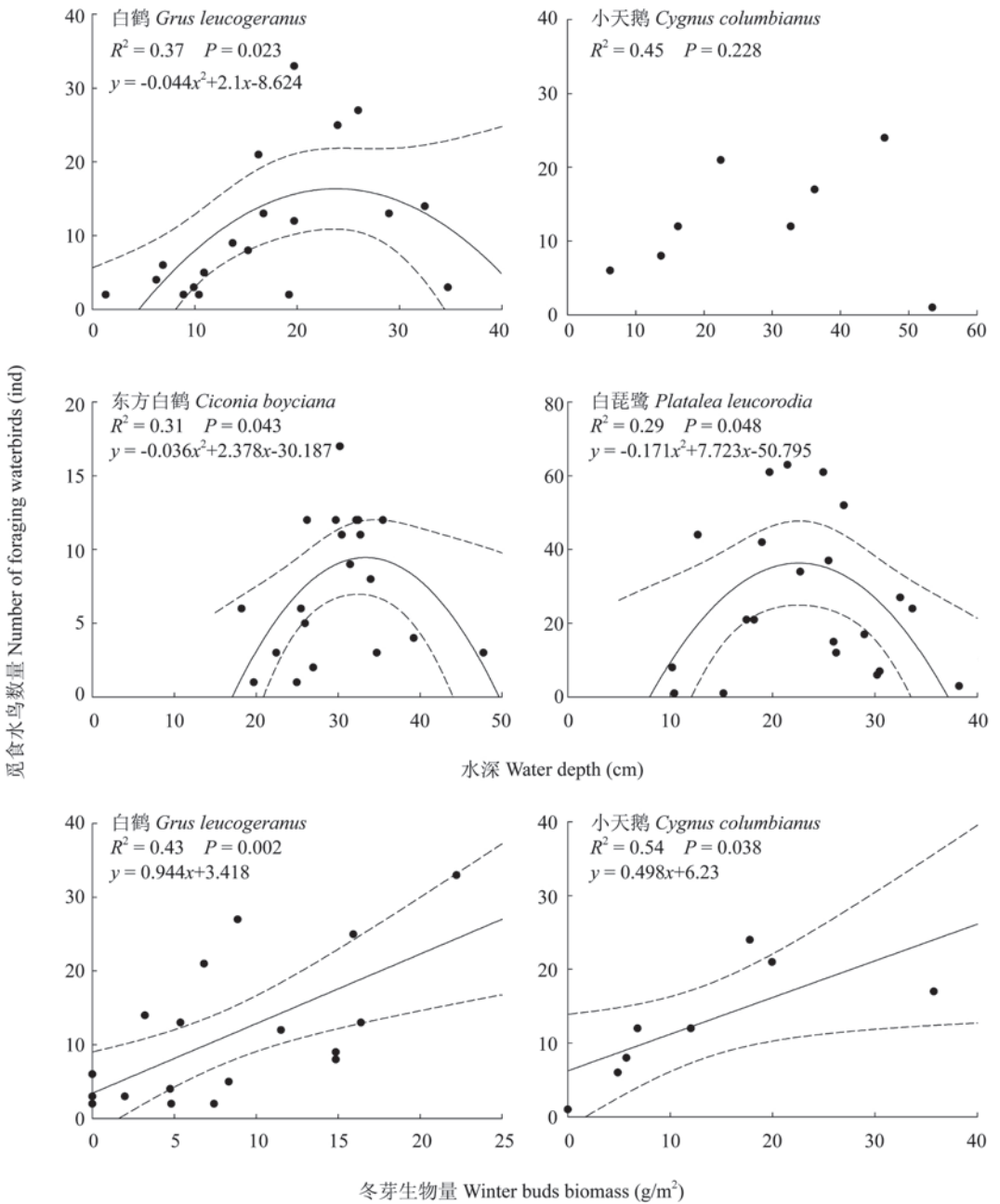


图 3 水鸟觅食数量与水深和冬芽生物量的关系

Fig. 3 Individual numbers of foraging waterbirds in relation to the water depth and biomass of winter buds

虚线代表 95% 的置信区间。The dashed line represents the 95% confidence interval.

不同的水深条件下有 2 种不同的取食方式: 在浅水域取食, 以其脖子伸入水中 (head-dipping) 寻觅食物; 在较深的区域则将尾部翘起成倒立姿势 (up-ending) 以便获取更深的

食物, 最深的取食深度可达 86 cm。白鹤则大多在泥滩附近的浅水域 (15 cm 左右) 中取食, 通过喙部高频率挖掘底泥寻觅冬芽, 且觅食时间较长, 挖掘深度为 10 ~ 20 cm (胡振鹏

2012)。这与本研究观察到白鹤挖掘深度基本一致。

对于 2 种食鱼性水鸟, 东方白鹤的取食深度显著大于白琵鹭。研究表明, 白琵鹭觅食时可将喙的一半以上没入水中(胡维华等 1999), 这与本研究记录的白琵鹭取食深度相似。本研究也表明, 在水位较浅的区域东方白鹤将喙部或头部伸入水中取食, 而水位较深的区域能够将近乎一半的颈部伸入水中捕获食物。

回归分析结果显示, 3 种涉禽觅食数量均与水深呈二次项关系, 这与食物的分布、丰富度以及可利用度密切相关。在水分太少或基质过于干燥的区域, 白鹤需要花费更多能量挖掘食物, 甚至挖掘不出食物(吴建东等 2013); 水位过浅区域只能为一些小型鱼类提供一个栖息生境, 低于水位较深区域鱼类资源的丰富度; 而水位过深的区域对 3 种涉禽同时也是取食限制, 而且当达到水鸟栖息水深阈值时, 取食效率与水深呈反比(Gawlik 2002)。小天鹅觅食数量与水深无显著相关性, 这可能由于数据量过少导致的。白鹤与小天鹅的觅食数量都与冬芽生物量呈正相关, 验证了食物对其栖息地利用具有重要影响。

水鸟在湿地中的空间分布受空间资源、食物资源以及取食行为等多种因素共同影响(陈锦云等 2011)。浅水湖泊的泥滩生境和浅水区能够承载种类众多和密度庞大的越冬水鸟。这是因为这种生境的异质性较大, 并且有多种丰富的食物。不同水鸟所利用的取食空间和食物资源存在差异, 导致栖息地和食物资源能够被最大化地利用, 降低了种间的竞争, 为形态相似物种的共存提供了条件。

致谢 感谢鄱阳湖国家级自然保护区管理局和国家林业局江西鄱阳湖湿地生态系统定位观测研究站对本研究工作的支持, 感谢南昌大学秦海明、曾泰、徐冬江等人在野外采样工作中给予的帮助。

参 考 文 献

Baker M C. 1979. Morphological correlates of habitat selection in

- a community of shorebirds (Charadriiformes). *Oikos*, 33(1): 121-126.
- Bolduc F, Afton A D. 2004. Relationships between wintering waterbirds and invertebrates, sediments and hydrology of coastal marsh ponds. *Waterbirds*, 27(3): 333-341.
- Elphick C S, Oring L W. 1998. Winter management of Californian rice fields for waterbirds. *Journal of Applied Ecology*, 35(1): 95-108.
- Gawlik D E. 2002. The effects of prey availability on the numerical response of wading birds. *Ecological Monographs*, 72(3): 329-346.
- Hartke K M, Kriegel K H, Nelson G M, et al. 2009. Abundance of wigeongrass during winter and use by herbivorous waterbirds in a Texas coastal marsh. *Wetlands*, 29(1): 288-293.
- Hutto R L. 1985. Habitat selection by nonbreeding, migratory land birds//Cody M L. *Habitat Selection in Birds*. London: Academic Press, 455-476.
- Isola C R, Colwell M A, Taft O W, et al. 2000. Interspecific differences in habitat use of shorebirds and waterfowl foraging in managed wetlands of California's San Joaquin Valley. *Waterbirds*, 23(2): 196-203.
- Klaassen R H G, Nolet B A, Bankert D. 2006. Movement of foraging tundra swans explained by spatial pattern in cryptic food densities. *Ecology*, 87(9): 2244-2254.
- Ma Z J, Cai Y T, Li B, et al. 2010. Managing wetland habitats for waterbirds: An international perspective. *Wetlands*, 30(1): 15-27.
- Nolet B A, Bevan R V, Klaassen M, et al. 2002. Habitat switching by Bewick's swans: maximization of average long-term energy gain? *Journal of Animal Ecology*, 71(6): 979-993.
- Nolet B A, Fuld V N, van Rijswijk M E C. 2006. Foraging costs and accessibility as determinants of giving-up densities in a swan-pondweed system. *Oikos*, 112(2): 353-362.
- Nolet B A, Langevoord O, Bevan R M, et al. 2001. Spatial variation in tuber depletion by swans explained by differences in net intake rates. *Ecology*, 82(6): 1655-1667.
- Pöysä H. 1983. Resource utilization pattern and guild structure in a waterfowl community. *Oikos*, 40(2): 295-307.
- Safran R J, Isola C R, Colwell M A, et al. 1997. Benthic invertebrates at foraging locations of nine waterbird species in managed wetlands of the northern San Joaquin Valley, California. *Wetlands*, 17(3): 407-415.
- Shankman D, Liang Q L. 2003. Landscape changes and increasing flood frequency in China's Poyang Lake Region. *The Professional Geographer*, 55(4): 434-445.

- Taft O W, Colwell M A, Isola C R, et al. 2002. Waterbird responses to experimental drawdown: implications for the multispecies management of wetland mosaics. *Journal of Applied Ecology*, 39(6): 987-1001.
- Taft O W, Haig S M. 2003. Historical wetlands in Oregon's Willamette Valley: implications for restoration of winter waterbird habitat. *Wetlands*, 23(1): 51-64.
- Wu G F, de Leeuw J, Skidmore A K, et al. 2009. Will the Three Gorges Dam affect the underwater light climate of *Vallisneria spiralis* L. and food habitat of Siberian crane in Poyang Lake? *Hydrobiologia*, 623(1): 213-222.
- Zhu J, Jing K, Gan X J, et al. 2007. Food supply in intertidal area for shorebirds during stopover at Chongming Dongtan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 27(6): 2149-2159.
- 陈锦云, 周立志. 2011. 安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构. *生态学报*, 31(18): 5323-5331.
- 楚国忠, 郑光美. 1993. 鸟类栖息地研究的取样调查方法. *动物学杂志*, 28(6): 47-52.
- 何春光, 宋榆钧, 郎惠卿, 等. 2002. 白鹤迁徙动态及其停歇地环境条件研究. *生物多样性*, 10(3): 286-290.
- 胡维华, 俞贵庆, 何山春, 等. 1999. 白琵鹭的越冬生态研究. *国土与自然资源研究*, (1): 69-71.
- 胡振鹏. 2012. 白鹤在鄱阳湖越冬生境特性及其对湖水水位变化的响应. *江西科学*, 30(1): 30-35.
- 吉姆·哈里斯. 2011. 鄱阳湖生态监测项目回顾//李凤山, 刘观华, 吴建东. 鄱阳湖湿地和水鸟的生态研究. 北京: 科学普及出版社, 10-17.
- 纪伟涛, 曾南京, 刘志刚, 等. 2002. 自然地理//吴英豪, 纪伟涛. 江西鄱阳湖国家级自然保护区研究. 北京: 中国林业出版社, 1-6.
- 刘观华, 曾南京, 文思标. 2011. 鄱阳湖与鄱阳湖国家级自然保护区基本情况//李凤山, 刘观华, 吴建东. 鄱阳湖湿地和水鸟的生态研究. 北京: 科学普及出版社, 3-9.
- 马克·巴特, 陈立伟, 曹垒, 等. 2004. 长江中下游水鸟调查报告(2004年1~2月). 北京: 中国林业出版社.
- 马克·巴特, 雷刚, 曹垒. 2005. 长江中下游水鸟调查报告(2005年2月). 北京: 中国林业出版社.
- 万文豪, 纪伟涛, 刘彬生, 等. 2002. 苦草的生长研究//吴英豪, 纪伟涛. 江西鄱阳湖国家级自然保护区研究. 北京: 中国林业出版社, 62-84.
- 王禹石, 阮禄章, 黄鹏, 等. 2010. 鄱阳湖越冬季节东方白鹤栖息地选择及保护现状研究. *安徽农业科学*, 38(14): 7376-7378.
- 吴建东, 李凤山, Brunham J. 2013. 鄱阳湖沙湖越冬白鹤的数量分布及其与食物和水深的关系. *湿地科学*, 11(3): 305-312.
- 严丽, 丁铁明. 1988. 江西鄱阳湖区白鹤越冬调查. *动物学杂志*, 23(4): 34-38.
- 曾南京, 金杰锋, 刘凯, 等. 2011a. 小天鹅、鸿雁、白额雁的监测//李凤山, 刘观华, 吴建东. 鄱阳湖湿地和水鸟的生态研究. 北京: 科学普及出版社, 89-105.
- 曾南京, 刘观华, 吴建东, 等. 2011b. 越冬水鸟监测//李凤山, 刘观华, 吴建东. 鄱阳湖湿地和水鸟的生态研究. 北京: 科学普及出版社, 43-54.
- 张本. 1988. 鄱阳湖研究. 上海: 上海科学技术出版社, 13-15.
- 赵正阶. 2001. 中国鸟类志. 长春: 吉林科学技术出版社, 151-232, 410-421.