

DOI: 10.5846/stxb201804260951

黄田, 徐正刚, 周立波, 赵运林. 水位波动对洞庭湖越冬小天鹅家域的影响. 生态学报, 2019, 39(22): 8657–8666.

Huang T, Xu Z G, Zhou L B, Zhao Y L. Home range associated with water surface variations for wintering *Cygnus columbianus* in Dongting Lake. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): 8657–8666.

# 水位波动对洞庭湖越冬小天鹅家域的影响

黄田<sup>1,2</sup>, 徐正刚<sup>1,3</sup>, 周立波<sup>4</sup>, 赵运林<sup>3,\*</sup>

1 湖南城市学院 信息与电子工程学院, 益阳 413002

2 湖南农业大学 生物科学技术学院, 长沙 410128

3 中南林业科技大学 林业遥感大数据与生态安全湖南省重点实验室, 长沙 410004

4 湖南省动物物联网工程技术研究中心, 长沙 410205

**摘要:**洞庭湖是小天鹅在我国的重要越冬地之一,为探讨洞庭湖水位变动对越冬小天鹅活动的影响,本研究于 2014—2015 年利用卫星跟踪技术对洞庭湖自然保护区 18 只越冬小天鹅活动轨迹进行跟踪,采用最小凸多边形(MCP)和核心密度估计(KDE)方法估算了越冬中、后期不同水位条件下小天鹅的家域。同时,基于 MODIS 遥感数据提取洞庭湖水体面积、计算水体淹没时间指数(STI),进而开展了水位与家域关系、栖息地选择模式等方面的分析和探讨。结果表明:水位对小天鹅家域起制约作用,随着水位上升小天鹅家域范围会明显减小;越冬期间小天鹅喜欢在空间相邻的浅水和草地综合性区域活动,食物资源分布和可获得性是小天鹅活动区发生改变的主要原因。

**关键词:**水位; 家域; 卫星跟踪; 小天鹅

## Home range associated with water surface variations for wintering *Cygnus columbianus* in Dongting Lake

HUANG Tian<sup>1,2</sup>, XU Zhenggang<sup>1,3</sup>, ZHOU Libo<sup>4</sup>, ZHAO Yunlin<sup>3,\*</sup>

1 College of Information and Electronic Engineering, Hunan City University, Yiyang 413002, China

2 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

3 Key Laboratory of Forestry Remote Sensing Based Big Data &amp; Ecological Security for Hunan Province, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

4 Hunan Engineering Research Center for Internet of Animals, Changsha 410205, China

**Abstract:** Dongting Lake is an important wintering habitat of *Cygnus columbianus* in China. To explore the effect of water level changes in Dongting Lake on the activities of wintering *Cygnus columbianus*, satellite tracking was carried out for 18 *C. columbianus* individuals in the Dongting Lake between 2014 and 2015. The home range of *C. columbianus* at different water levels during the wintering period were estimated via the Minimum Convex Polygons (MCP) and Kernel Density Estimation (KDE) methods. The MODIS remote sensing data were used to extract the surface water of Dongting Lake during the wintering period and calculate the Submergence Time Index (STI), followed by correlation analysis and spatial superposition analysis of the home range, water level, and STI. The water level restricts the home range size of *C. columbianus*, which is then significantly reduced with an increase in the water level. During the wintering period, the favorite habitat of *C. columbianus* is the integrative area of shallow water and grasslands, and the distribution and availability of food resources are the primary reasons for the changes in the home range.

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2019JJ40012);湖南省科技创新平台与人才计划项目(2017TP2014, 2018TP1042, 2016TP1014)

收稿日期:2018-04-26; 网络出版日期:2019-09-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyl8291290@163.com

**Key Words:** water level; home range; satellite-tracking; *Cygnus columbianus*

洞庭湖是中国的第二大淡水湖泊,国际重要湿地,有丰富的野生动植物资源,是我国南方重要的水鸟越冬地和东亚-澳大利西亚候鸟迁飞路线上重要停歇地,对全球候鸟保护具有重要作用。近年,受三峡大坝调节和气候变化影响,长江流域湖泊湿地的季节性淹没规律和水文波动幅度发生了改变,洞庭湖枯水期明显提前<sup>[1]</sup>。水文情势变化改变了洞庭湖湿地的泥沙淤积过程和湿地景观格局,进而影响到水鸟栖息地质量和完整性。有研究表明,洞庭湖枯水期提前使大面积的浅水沼泽、泥滩提前出露,苔草和杂草草甸上的植物提前萌发和生长,导致草洲植物的生物量积累提前完成<sup>[2]</sup>,由于错过食物资源高峰,越冬水鸟可能面临食物短缺的风险。水鸟通过摄入食物满足其越冬的能量需求,食物资源的可获得性会影响水鸟个体身体机能、迁徙规律,以及后续个体繁殖成功率,从而对整个种群的生存和发展产生影响<sup>[3]</sup>,已有研究证明长江中下游水文情势变化对越冬水鸟的数量、行为和食性产生了重大影响<sup>[4,5]</sup>。因此,了解栖息地的水位变化和食物特征是认识越冬水鸟栖息地利用的关键。

小天鹅 *Cygnus columbianus* 隶属雁形目 Anseriformes 鸭科 Anatidae 天鹅属 *Cygnus*,为国家 II 级保护动物。在洞庭湖越冬的小天鹅属于小天鹅古北亚种 *C. c. bewickii*,每年 6—7 月在北极苔原带繁殖,8 月末 9 月初离开繁殖地前往越冬地,翌年 3 月中下旬再从越冬地返回繁殖地<sup>[6]</sup>。近年,受自然环境因素和人类活动影响,洞庭湖越冬小天鹅种群数量波动较大,尤其近两年洞庭湖湿地周边地区发生了多起毒杀小天鹅的恶性事件,使小天鹅种群保护面临严峻威胁。

家域是一定时间范围内,动物个体或群体寻找食物、进行交配和哺育幼崽所利用和经过的区域<sup>[7]</sup>,对动物取食策略<sup>[8]</sup>、生境选择<sup>[9]</sup>和行为规范<sup>[10]</sup>等有较大影响。家域估算最重要的内容是获取动物个体或种群的活动位点数据。当前,获取动物活动位点的方式主要有野外观测、无线电遥测和 GPS 卫星跟踪,卫星跟踪技术具有时间持续长、空间覆盖广和数据量丰富等优势,正越来越多的应用于动物家域估算、活动路径、活动模式等行为生态学研究<sup>[11,12]</sup>。家域变化是动物响应外部环境变化的自我调节行为,反映出栖息地环境质量和稳定性。研究不同水位条件下小天鹅家域变化,将有助于探究外部环境变化对小天鹅栖息地影响以及小天鹅对栖息地的利用策略,从而为洞庭湖越冬小天鹅栖息地保护及恢复提供理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 数据来源

#### 1.1.1 小天鹅卫星跟踪数据

2014—2015 年,经林业主管部门审批,在东洞庭湖自然保护区捕捉和救助了 18 只小天鹅,研究人员为 18 只小天鹅佩带了卫星跟踪器(表 1)。跟踪器装置总重量为 28—30 g,仅占小天鹅体重 0.5%,符合动物遥测技术中跟踪器重量不超过体重 3%—5%的经验值<sup>[13]</sup>。跟踪器的数据采集和传输频率均为每小时 1 次,字段数据包括设备编号、时间、经度、纬度、速度、高度、航向、温度、定位精度和电压。定位精度分为 A、B、C、D、E、N 六个等级,其中 A 为 5 m, B 为 10 m, C 为 20 m, D 为 100 m, E 为通信基站定位, N 为无效数据。为有效表达小天鹅在洞庭湖的活动范围,剔除了速度>0 和洞庭湖大堤外部的位点。

#### 1.1.2 洞庭湖水位数据

水位数据引自湖南省水情信息查询系统([http://61.187.56.156/wap/index\\_sq.asp](http://61.187.56.156/wap/index_sq.asp)),下载 2013—2016 越冬期(当年 10 月至翌年 3 月)每日 08:00 城陵矶水文站实测水位,缺少数据用 09:00 的水位数据补充。

#### 1.1.3 遥感数据获取与处理

从美国地质勘探局(USGS)的 EarthExplorer 网站下载 Terra/MODIS 卫星 8 天合成的地表反射率数据 MOD09Q1,分辨率为 250 m,包括红外和近红外 2 个波段。2013—2015 年越冬期共下载了 150 景数据,利用 MRT 4.1 对 MODIS 遥感数据重投影、重采样、拼接及格式转换处理,重新投影坐标系为横向墨卡托(WGS,

1984 UTM Zone 49N) 输出数据格式为\* .tif。

## 1.2 家域计算

利用 ArcMET 10.1.12 工具包估算小天鹅家域(Movement Ecology Tools for ArcGIS, 下载地址 <http://www.movementecology.net>) ,该工具支持 MCP、KDE 等多种家域估算方法。KDE 采用最优平滑指数(href) 法来判定 h 值,即根据输入点的空间方差计算平滑参数的最优值<sup>[14]</sup>。MCP 家域计算结果为矢量数据,KDE 家域计算结果为栅格数据,为方便空间叠加与数据统计,通过提取等值线的方式转换为矢量数据。

## 1.3 水面变动分析

选用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 提取水面是湖泊遥感监测中常用的手段<sup>[15-18]</sup>,MODIS 遥感数据提取水面步骤如下:

### (1) 计算 NDVI

$$NDVI = (CH_2 - CH_1) / (CH_2 + CH_1) \quad (1)$$

式中,  $CH_1$  为 MODIS 数据第 1 波段的地表反射率,  $CH_2$  为第 2 波段的地表反射率,利用 ENVI 5.3 软件的波段运算(Band Math) 指令计算 NDVI。

### (2) 确定水体阈值

NDVI 的值域为  $[-1, 1]$ 。一般情况下,水体的 NDVI 值为负数,如果有水生植物覆盖在水面,则 NDVI 值会稍偏高。另外云、雪的 NDVI 值也为负值,植被、建筑、裸露土壤的 NDVI 值则很高。为消除水生植物的影响,采用两个规则来识别水体<sup>[15]</sup>,  $NDVI \leq 0.15$  用来区分水体和植被;DN 值(Digital Number) 指遥感影像元亮度值,本研究中将遥感反射率 $\times 10000$ ,得到 DN 值。Band2 的  $DN < 1200$  用来区分水体与建筑、裸露的土壤。即一个像素的值满足规则 1 或规则 2,则识别为水体。

### (3) 消除云层的影响

洞庭湖地区 12 月—3 月阴雨天气较多,阈值提取法可能将云层识别为水体。根据云的光谱特征,云在可见光和近红外波段均具有较高的反射率<sup>[19]</sup>,因此,当 band1 和 band2 的 DN 值均  $> 2,000$  时,可认为该像素不是水体,需将其剔除。本研究中共有 19 幅数据由于云量太大,剔除云层影响后的水体严重失真,没有纳入水体提取。最终,提取了 2013—2015 年 3 个越冬期共 56 幅水体范围图。

### (4) 复合生成月水体范围

为进一步降低卫星过境时天气和云量影响,采用最大值复合方法(MVC) 合成每月水体范围图,合成值为 1 或 0,1 表示水体淹没区,0 表示非水区域。

### (5) 淹没时间指数计算

淹没时间指数(STI) 可以对湖泊水体的时间和空间变化进行定量描述,可用来表达小天鹅越冬期间洞庭湖水体的动态特征,STI 计算公式如下:

$$STI = \frac{\sum_{i=1}^{12} (W_i \times N_i)}{N} \times 100 \quad (2)$$

其中:  $i$ : 当年 10、11、12 月,翌年 1、2、3 月;  $W_i$ :  $i$  月水淹范围;  $N_i$ :  $i$  月天数;  $N$ : 越冬期总天数。

STI 计算结果为栅格数据,计算过程在 ArcGIS 10.1 软件中完成。

## 1.4 家域与水面叠加分析

利用 ArcGIS 10.1 的 Tabulate Area 工具实现家域与水面叠加分析,参数 Input raster or feature zone data 的值设定为 STI 栅格数据,参数 Zone field 的值设定为 STI 的 Value 字段,参数 Input raster or feature class data 的值设定为家域矢量数据,参数 Class field 的值设定为 Object ID 字段,参数 Processing cell size 的值与 STI 栅格大小一致,设定为 250 m,最后对输出结果进行汇总和统计。为研究水位波动对家域范围大小的影响,将越冬期划分为不同的水位平稳窗口期,采用 KDE 方法估算每个窗口期的小天鹅的家域,使用 Pearson 相关分析检

验家域面积与水位的相关性。统计分析 with 图表制作在 R 软件中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 小天鹅卫星跟踪情况

2014 年—2015 年间卫星跟踪器共采集有效位点 26997 个,研究区内 0 速度点 18747 个(表 1)。跟踪的 18 只小天鹅中除 10#小天鹅未获取到点数据,其他小天鹅均获得至少 250 个点,监测时间主要集中于小天鹅越冬中、后期(1 月—4 月)。

表 1 小天鹅卫星跟踪数据

Table 1 List of satellite tracking information of *Cygnus columbianus*

年份 Year	编号 ID	来源 Source	位点数 Amount	0 速度点 Speed = 0	非 0 速度点 Speed > 0	定位期间 Tracking period	迁走时间 Migration time
2014	1#	捕捉	843	771	72	2014.03.07—2014.04.10	2014.04.10
	2#	捕捉	353	334	19	2014.03.07—2014.03.22	2014.03.22
	3#	捕捉	179	172	7	2014.03.07—2014.03.14	2014.03.14
	4#	捕捉	1226	1102	124	2014.03.07—2014.04.27	2014.04.27
	5#	捕捉	575	556	19	2014.03.07—2014.04.03	2014.04.03
	6#	捕捉	347	332	15	2014.03.07—2014.03.22	2014.03.22
2015	7#	捕捉	366	337	29	2015.01.28—2015.02.13 2015.02.15—2015.02.16 2015.03.02—2015.03.10	2015.03.12
	8#	捕捉	1097	1010	87	2015.01.28—2015.03.25	2015.03.25
	9#	捕捉	351	324	27	2015.01.28—2015.02.14 2015.03.01—2015.03.06	2015.03.06
	10#	捕捉	0	0	0	—	—
	11#	救助	250	225	25	2015.02.08—2015.02.18 2015.02.21—2015.02.22	—
	12#	救助	162	145	17	2015.02.08—2015.02.14	—
	13#	救助	108	105	3	2015.02.08—2015.02.12	—
	14#	救助	1033	835	198	2015.02.08—2015.03.27	2015.03.27
	15#	救助	1053	957	96	2015.02.08—2015.03.25	2015.03.25
	16#	救助	166	153	13	2015.02.08—2015.02.14 2015.02.15—2015.02.17 2015.02.25—2015.02.27	2015.02.27
	17#	救助	915	872	43	2015.02.08—2015.03.03 2015.03.05—2015.03.20 2015.03.22—2015.03.27	2015.03.27
	18#	救助	783	710	73	2015.02.08—2015.03.13	2015.03.13

研究期间,0 速度位点所占的比例为 91.2%,静止位点比例较非静止位点比例高。位点数据质量较好,定位精度主要集中在 A、B 等级(表 2)。

### 2.2 越冬期间洞庭湖水位变动

小天鹅越冬期间洞庭湖水位波动特征较为明显,根据卫星跟踪起止时间和水位变化特征,将跟踪期划分 WL1、WL2 和 WL3 三个水位变化期(图 1)。2014 年 WL1 期从 3 月 8 日至 3 月 25 日,水位呈小幅下降趋势,WL2 期从 3 月 26 日至 4 月 7 日,水位呈台阶式上升,WL3 期从 4 月 8 日至小天鹅迁走前夕,期间水位逐步上涨,涨幅达 3.28 m。2015 年 WL1 期从 2 月初至 2 月 21 日,水位处于平稳状态,WL2 期从 2 月 22 日至 3 月 4 日,水位逐步上升,涨幅达 2.12 m,WL3 期从 3 月 4 日至小天鹅迁走前,水位呈小幅度波动。

表 2 跟踪位点精度分析

Table 2 The positioning precision of GPS points

精度等级 Positioning precision	2014		2015	
	数量 Number of GPS points	百分比 Percent	数量 Number of GPS points	百分比 Percent
A	1788	54.73%	2232	39.34%
B	1204	36.85%	2762	48.69%
C	78	2.39%	575	10.14%
D	197	6.03%	104	1.83%
E	0	0	0	0
合计(Total)	3267	100%	5673	100%

2014 年和 2015 年 2—4 月, 洞庭湖水位变化趋势基本一致, 整体呈逐步上升趋势。从 3 月初开始, 2015 年水位较 2014 年上涨更加迅速和明显(图 1)。

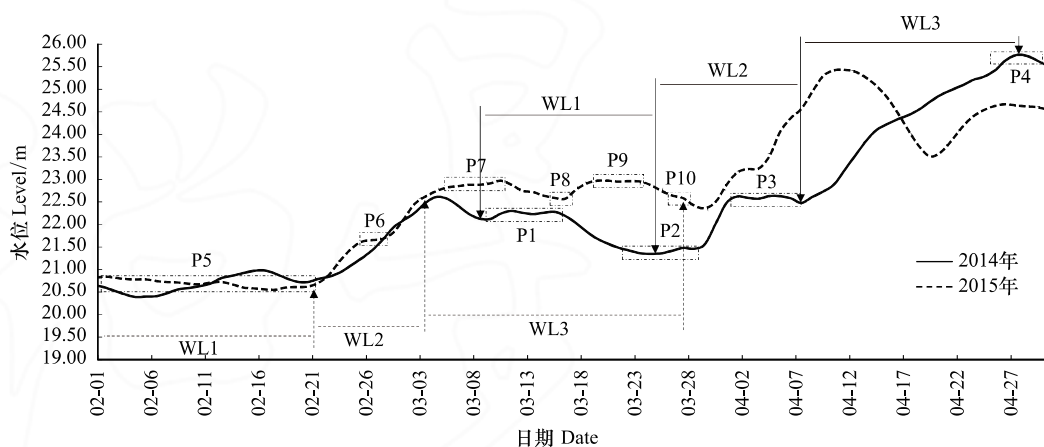


图 1 2014—2015 年越冬期洞庭湖水位变化趋势

Fig.1 The trend of water level change of Dongting Lake in wintering during 2014—2015

### 2.3 家域与水位相关性分析

研究共选取 10 个水位平稳窗口期 P1—P10(图 1, 表 3)。结果表明: 随着水位上升, 小天鹅家域范围会逐渐减小(图 2)。KDE95% 与水位呈显著负相关( $r = -0.636, P = 0.024$ ), KDE75% 与水位呈显著负相关( $r = -0.648, P = 0.021$ ), KDE50% 和 水位呈显著负相关( $r = -0.576, P = 0.041$ )。

表 3 水位平稳周期

Table 3 The stable period of water level during the wintering

年 Year	编号 ID	日期范围 Date range	天数/d Days	水位/m Water level
2014	P1	03.07—03.16	8	22.23±0.00
	P2	03.23—03.29	7	21.43±0.01
	P3	04.01—04.07	7	22.59±0.00
	P4	04.23—04.27	5	25.46±0.05
2015	P5	02.01—02.21	25	20.69±0.01
	P6	02.25—02.27	3	21.65±0.00
	P7	03.05—03.11	7	22.88±0.02
	P8	03.15—03.17	3	22.64±0.01
	P9	03.18—03.23	6	22.95±0.00
	P10	03.26—03.27	2	22.61±0.00

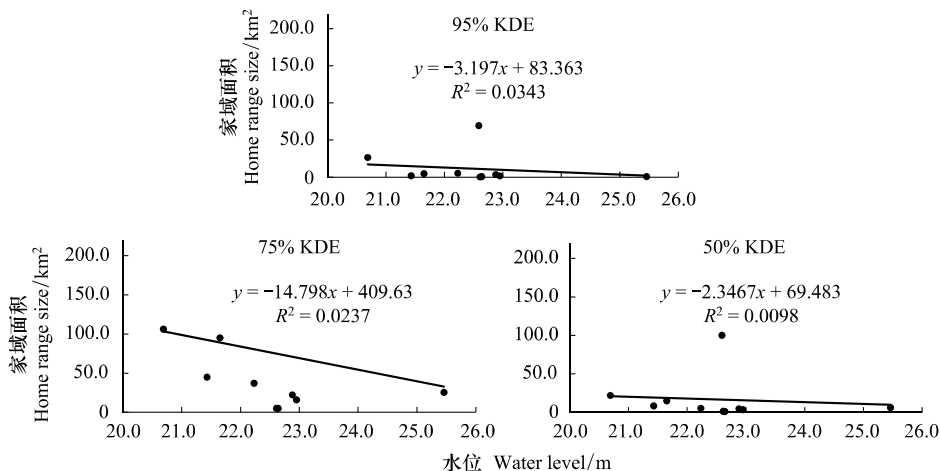


图2 家域与水位相关性分析

Fig.2 Analysis of the correlation between home range and water level

水位变化对小天鹅家域的空间位置、结构和大小也有较大影响,以2015年3个不同水位期的75%KDE家域为例(图3)。WL1期水位处于基本平稳状态,小天鹅活动范围主要分布在丁字堤和大、小西湖,白湖有少量分布,家域面积为50.96 km<sup>2</sup>。WL2期水位逐步上升,小天鹅活动范围向丁字堤集中,大、小西湖有少量分布,家域面积为19.1 km<sup>2</sup>。WL3期水位较高,小天鹅活动范围更加集中于丁字堤,大、小西湖仅有零星活动点分布,家域面积约为8.89 km<sup>2</sup>。

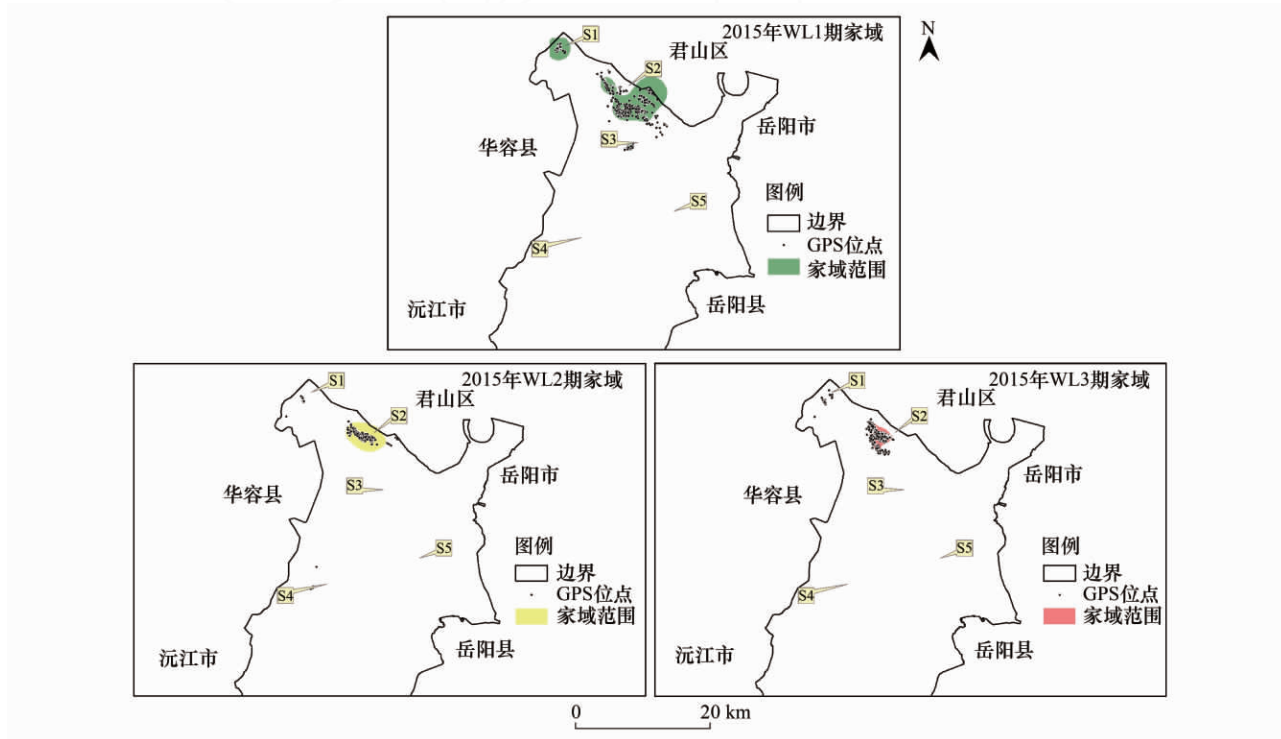


图3 2015年不同水位期KDE75%家域的空间形态

Fig.3 The spatial pattern of KDE75% home range in different water levels in 2015

#### 2.4 水面变动分析

整体而言,洞庭湖STI由内湖中心向外逐渐减少(图4)结合越冬地栖息生境调查,将STI由低到高分7个等级(表4)。

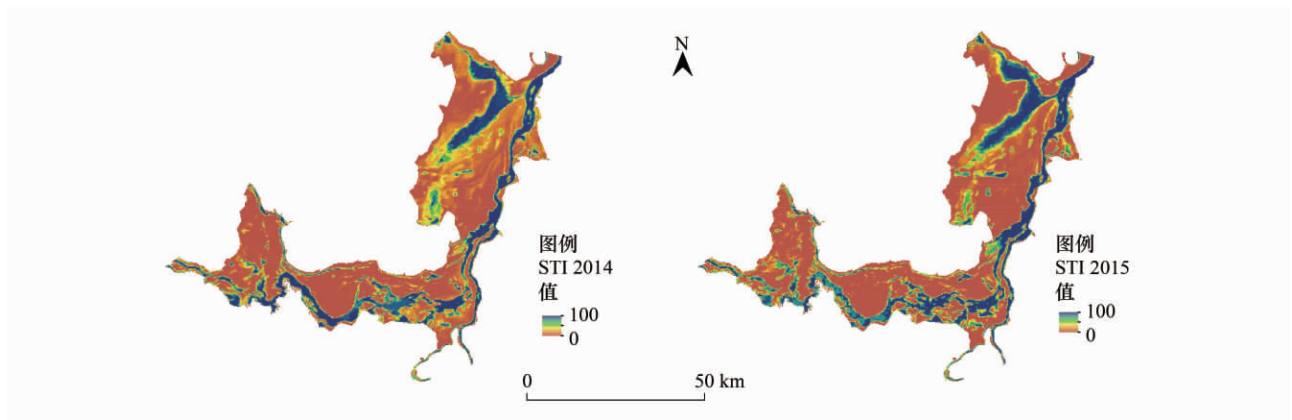


图4 2014—2015年洞庭湖水体淹没时间指数图

Fig.4 The SIT of Dongting Lake in 2014—2015

2015年春季洞庭湖水位上涨速度较快,导致STI低值区面积较2014年减少,高值区面积增加,其中A类用地面积减小了7.21%,B类用地面积减少了3.5%,C、D、E、F、G类用地面积都有一定增加(表4)。

表4 2014—2015年STI统计表  
Table 4 The SIT trend in 2014—2015

等级 Levels	淹没时间指数 STI	面积与比例 (Area and percent)		生境 Habitat types
		2014	2015	
A	0	1104.56(41.10%)	910.88(33.89%)	始终都没有被水淹没的区域,多为地势较高的湖洲、滩地等
B	(0%—20%)	794.31(29.56%)	700.31(26.06%)	邻近湖洲且少被水淹没的苔草地
C	[20%—40%)	165.25(6.15%)	302.69(11.26%)	含水成份不同的沼泽地
D	[40%—60%)	105.31(3.92%)	148.44(5.52%)	
E	[60%—80%)	105.38(3.92%)	133.81(4.98%)	
F	[80%—100%)	149.81(5.57%)	210.31(7.83%)	大部分时间淹没、仅水位很低时才偶尔裸露的浅水区,有着丰富的水草,是越冬水鸟重要的活动区域
G	100%	262.94(9.78%)	281.13(10.46%)	一直都被淹没的开阔水体,如湖泊核心、主河道等

## 2.5 家域与水面叠加分析

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<sup>[20]</sup>。为进一步研究小天鹅对栖息地的利用情况,将越冬期小天鹅家域与水体淹没时间指数进行空间叠加分析,结果表明:越冬期小天鹅对栖息地类型偏好由高到低依次为B、G、F、C、E、D、A(图5)。其中,B类用地占家域面积的平均比例为29.78%,并且在水位快速上涨期间更加明显,如2014年WL3期达53.78%,2015年WL2期达36.68%;G类用地占家域面积的平均比例为25.55%,并且在水位较低期间更加明显,如2014年WL1期为36.55%,2015年WL1期为38.88%;F类用地占家域面积的平均比例为16.77%,并且在每年3月份表现更加明显,如2014年WL1期达23.45%,2015年WL3期达21.34%;C、E、D、A四类用地占家域面积的平均比例相对较小,分别为8.98%、8.79%、7.67%、2.46%。

## 3 讨论与结论

### 3.1 水位影响食物资源分布和可获得性

本研究结果表明,越冬期间小天鹅家域大小与水位呈负相关,水位上升将压缩小天鹅家域,与刘成林等人的研究结果一致,即水位越高水陆过渡带(候鸟栖息地)面积越小<sup>[21]</sup>。张冬梅认为这种现象的主要原因是水

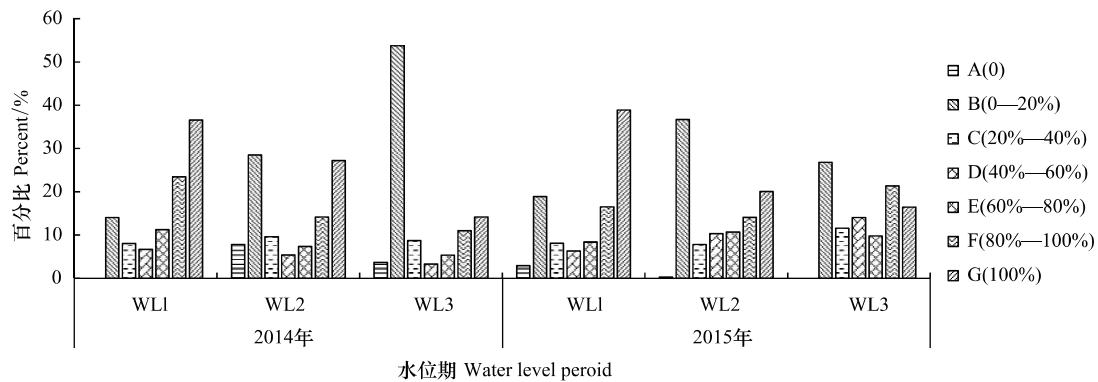


图5 不同水位期的栖息地利用情况

Fig.5 Habitat utilization in different water level period

位影响食物资源的分布和可获得性,从而影响越冬水鸟的数量和分布<sup>[22]</sup>。越冬期间小天鹅的取食行为占主导地位<sup>[23]</sup>,生长在浅水中的菹草是小天鹅在越冬地偏爱的食物之一<sup>[24]</sup>。1—2月份低水位时期,小天鹅多分布在浅水区域中取食菹草,其主要原因可能是菹草的生长节律与小天鹅的越冬期匹配。菹草是一种秋季发芽,冬季生长的沉水草本植物,其生长过程受水位和温度影响较大。有研究表明适宜菹草生长的水深范围为50—250 cm,90—150 cm最适合<sup>[25-27]</sup>。根据调查,小天鹅栖息地水深一般在30 cm左右,这些区域在越冬前期水位较高且温度适宜,菹草生长较好并完成生物量积累,为越冬小天鹅提供丰富的食物资源。越冬中期的低水位不适宜菹草生长,且冬季长时间低温无法满足植物生长所需有效积温,菹草会停滞生长,导致菹草资源不足。越冬后期水位开始上涨,使剩余的菹草获取难度加大,迫使小天鹅转移到临水的泥滩和草地取食苔草和藓草。孟竹剑等人研究表明,湿地植被的生长发育与洲滩淹没和出露时间密切相关,水位周期会影响越冬候鸟的适宜取食窗口期<sup>[28]</sup>。11月份洞庭湖水位开始大幅下降,部分洲滩出露为苔草生长发育提供了良好条件,为越冬中后期小天鹅提供丰富的苔草食物资源。总的来看,水位是影响小天鹅越冬食物生长发育的关键因素之一,冬季退水时间推迟,会导致食物资源生长期缩短和低温限制下的有效生长时间减少,从而影响越冬期间食物资源数量与分布。

另外,根据本文的研究结果,水位越低,洞庭湖湿地的小天鹅活动范围越大,但不能认为秋季和冬季水文干旱有利于越冬小天鹅保护。事实上,如果洞庭湖秋、冬季干旱呈现常态化,必然导致洞庭湖湿生植物向陆生植物演替,从而引起洞庭湖湿地整体萎缩,这将会给小天鹅等越冬水鸟的越冬栖息地带来更加严重的威胁。

### 3.2 家域模型对活动区估算的差异

研究在估算小天鹅家域时,采用了MCP和KDE两种估算方法。采用MCP方法估算2015年越冬期小天鹅家域时,由于小天鹅在六门闸附近有过短暂停留,估算结果将东洞庭湖西部大片没有小天鹅活动的区域包括进来,使估算结果值偏大。这与其他学者的结论相同,MCP法受异常值影响,容易高估家域范围<sup>[29-31]</sup>。张晋东等认为,KDE方法既能反映出动物对空间的利用强度又能确定家域大小和形状,是最适合的估算模型<sup>[29]</sup>。本研究采用KDE方法估算2015年越冬期小天鹅家域时( $h=300$ ),估算结果将活动区分为3个核域,并忽略掉了最外侧的异常点,使家域面积更加符合真实情况。基于以上结论,本研究在分析水位与家域相关性、水位对家域影响时均采用KDE方法估算的结果。

Horne等学者认为家域与估算模型的假设前提密切相关,不同物种的空间利用格局不同,使用相同家域模型计算的表现也不尽相同<sup>[32]</sup>。因此在研究野生动物领域行为时,可以同时使用KDE和MCP两种方法,再根据研究问题和物种来选择合适的估算结果。

### 3.3 小天鹅对栖息地的选择模式

本研究表明,浅水和草滩是小天鹅食物的主要来源地,小天鹅喜好在空间相邻的草地与浅水综合性区域中活动(图6),但水陆交界地带往往是人类活动最为频繁的区域,渔业、牧业和农业活动时时有发生,这增加了



小天鹅在越冬期间的危险性。近年,洞庭湖区偷猎、毒杀野生候鸟事件经常发生,当地政府部门应当加强对这类综合性区域的管理和保护,为小天鹅等水鸟越冬营造良好的栖息环境。

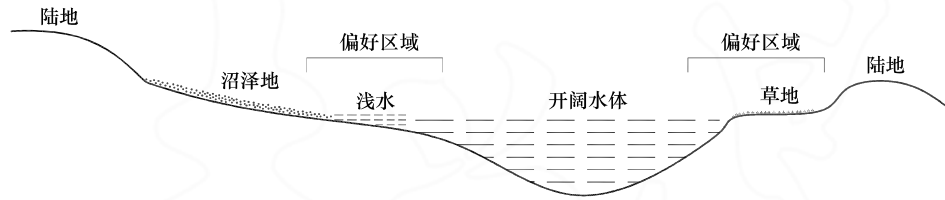


图6 小天鹅对栖息地土地类型选择模式图

Fig.6 *Cygnus columbianus* select patterns for habitat land types

### 3.4 卫星追踪技术的应用

受卫星跟踪器价格限制,利用卫星遥测技术研究动物的样本很难达到理想数量<sup>[33,34]</sup>。2014年以来,国内野生动物卫星跟踪技术取得了较大发展,我国生产的BD/GPS-GSM太阳能跟踪器性能稳定且能密集定位<sup>[35]</sup>,使得利用卫星遥测动物行为与栖息地选择结合的研究变得更加便利和可行<sup>[36-42]</sup>。

通过本研究,作者认为除卫星跟踪设备的稳定性之外,适合的动物样本来源和设备佩带方式也是卫星跟踪技术应用的难点。本研究跟踪的18只小天鹅,由于个体体质和设备脱落等多方面原因,有部分小天鹅在跟踪过程中失联,没有完整记录小天鹅越冬期的全部活动情况,所以没有对越冬前期小天鹅家域和水位关系展开研究。但作者认为越冬中、后期,水位、食物等外部环境因子变化更为明显和典型,足以说明本文观点。

致谢:湖南环球信士科技有限公司协助卫星跟踪器安装工作,特此致谢。

### 参考文献(References):

- [1] Lai X J, Jiang J H, Huang Q. Effects of the normal operation of the Three Gorges Reservoir on wetland inundation in Dongting Lake, China: a modelling study. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(7): 1467-1477.
- [2] 谢永宏,陈心胜. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. *农业现代化研究*, 2008, 29(6): 684-687.
- [3] Newton I. Population limitation in migrants. *IBIS*, 2010, 146(2): 197-226.
- [4] Wang Y Y, Jia Y F, Guan L, Lu C, Lei G C, Wen L, Liu G H. Optimising hydrological conditions to sustain wintering waterbird populations in Poyang Lake National Natural Reserve: implications for dam operations. *Freshwater Biology*, 2013, 58(11): 2366-2379.
- [5] Jia Y F, Jiao S W, Zhang Y M, Zhou Y, Lei G C, Liu G H. Diet shift and its impact on foraging behavior of siberian crane (*Grus leucogeranus*) in Poyang Lake. *PLoS One*, 2013, 8(6): e65843.
- [6] 黄慧敏,赵运林,王定兴,秦会,晏纯,王训博,钟勇. 基于RS和GIS的洞庭湖小天鹅越冬生境选择研究. *湖南城市学院学报: 自然科学版*, 2013, 22(1): 62-66.
- [7] 张晋东, Hull V, 欧阳志云. 家域研究进展. *生态学报*, 2013, 33(11): 3269-3279.
- [8] Klaassen R H G, Nolet B A, Bankert D. Movement of foraging Tundra Swans explained by spatial pattern in cryptic food densities. *Ecology*, 2006, 87(9): 2244-2254.
- [9] Bengtsson D, Avril A, Gunnarsson G, Elmberg J, Söderquist P, Norevik G, Tolf C, Safi K, Fiedler W, Wikelski M, Olsen B, Waldenström J. Movements, home-range size and habitat selection of mallards during autumn migration. *PLoS One*, 2014, 9(6): e100764.
- [10] Barratt D G. Home range size, habitat utilisation and movement patterns of suburban and farm cats *felis catus*. *Ecography*, 2010, 20(3): 271-280.
- [11] Horne J S, Garton E O, Krone S M, Lewis J S. Analyzing animal movements using brownian bridges. *Ecology*, 2007, 88(9): 2354-2363.
- [12] 张晋东, Hull V, 黄金燕, 周世强, 李仁贵, 刘巖, 黄炎, 李德生, 徐卫华, 张和民, 刘建国, 欧阳志云. 大熊猫取食竹笋期间的昼夜活动节律和强度. *生态学报*, 2011, 31(10): 2655-2661.
- [13] Barron D G, Brawn J D, Weatherhead P J. Meta-analysis of transmitter effects on avian behaviour and ecology. *Methods in Ecology and Evolution*, 2010, 1(2): 180-187.
- [14] Worton B J. *Statistical Modelling of Spatial Animal Movements*[D]. Canterbury: University of Kent, 1989.
- [15] Huang S F, Li J G, Xu M. Water surface variations monitoring and flood hazard analysis in Dongting Lake area using long-term Terra/MODIS data

- time series. *Natural Hazards*, 2012, 62(1): 93–100.
- [16] Feng L, Hu C M, Chen X L, Cai X B, Tian L Q, Gan W X. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 80–92.
- [17] 丁莉东, 吴昊, 王长健, 覃志豪, 章其祥. MODIS 图像湖泊水体信息的快速识别与制图. *海洋测绘*, 2006, 26(06): 31–34.
- [18] Khandelwal A, Karpatne A, Marlier M E, Kim J, Lettenmaier D P. An approach for global monitoring of surface water extent variations in reservoirs using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 113–128.
- [19] 李微, 方圣辉, 佃袁勇, 郭建星. 基于光谱分析的 MODIS 云检测算法研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2005, 30(5): 435–438, 443–443.
- [20] 张笑辰, 金斌松, 陈家宽, 吴建东, 刘观华, 马志军. 鄱阳湖四种水鸟的栖息地利用与水深和食物的关系. *动物学杂志*, 2014, 49(5): 657–665.
- [21] 刘成林, 谭胤静, 林联盛, 陶海南, 谭晦如. 鄱阳湖水位变化对候鸟栖息地的影响. *湖泊科学*, 2011, 23(1): 129–135.
- [22] 张冬梅. 水位和食物资源变化对越冬白头鹤(*Grus monacha*)觅食行为的影响[D]. 合肥: 安徽大学, 2015.
- [23] 段酬苍, 赵运林, 李立, 徐正刚, 吴良, 王双业. 救助小天鹅越冬期行为节律研究. *野生动物学报*, 2016, 37(3): 216–220.
- [24] 张梅清, 赵运林, 徐正刚, 廖嘉欣, 李立, 黄田, 段酬苍. 洞庭湖越冬小天鹅食性研究. *西南林业大学学报*, 2016, 36(4): 121–125.
- [25] 陈正勇, 王国祥, 吴晓东, 王立志, 徐伟伟, 俞振飞. 不同水深条件下菹草(*Potamogeton crispus*)的适应对策. *湖泊科学*, 2011, 23(6): 942–948.
- [26] 何伟, 王国祥, 杨文斌, 陈秋敏, 陆貽超. 水深梯度对菹草生长的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(7): 1224–1228.
- [27] 曹昀, 王国祥, 黄齐. 水深对菹草生长的影响研究. *人民黄河*, 2009, 31(11): 72–73.
- [28] 孟竹剑, 夏少霞, 于秀波, 饶滴滴, 金斌松. 鄱阳湖越冬雁类食源植被适宜取食时间窗口. *生态学报*, 2018, 38(21): 7539–7548.
- [29] Kernohan B J, Gitzen R A, Millsbaugh J J. Chapter 5—Analysis of animal space use and movements. *Radio Tracking and Animal Populations*. San Diego: Academic Press, 2001: 125–166.
- [30] Hemson G, Johnson P, South A, Kenward R, Ripley R, Macdonald D. Are kernels the mustard? Data from global positioning system (GPS) collars suggests problems for kernel home-range analyses with least-squares cross-validation. *Journal of Animal Ecology*, 2005, 74(3): 455–463.
- [31] Powell R A. Black bear home range overlap in North Carolina and the concept of home range applied to black bears. *Bears Their Biology and Management*, 1987, 7: 235–242.
- [32] Horne J S, Garton E O. Selecting the best home range model: an information-theoretic approach. *Ecology*, 2006, 87(5): 1146–1152.
- [33] Aebischer N J, Robertson P A, Kenward R E. Compositional analysis of habitat use from animal radio-tracking data. *Ecology*, 1993, 74(5): 1313–1325.
- [34] Hebblewhite M, Haydon D T. Distinguishing technology from biology: a critical review of the use of GPS telemetry data in ecology. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 2010, 365(1550): 2303–2312.
- [35] Liu D P, Chen L X, Wang Y H, Lu J, Huang S L. How much can we trust GPS wildlife tracking? An assessment in semi-free-ranging Crested Ibis *Nipponia nippon*. *PeerJ*, 2018, 6: e5320.
- [36] 李秀明, 李晓民, 宋玉波, 钱法文. 基于卫星跟踪技术的三江平原大白鹭幼鸟活动区分析. *野生动物学报*, 2015, 36(4): 395–401.
- [37] 李秀明, 徐家慧, 钱法文. 卫星跟踪的白鹤春季和秋季迁徙路线. *湿地科学*, 2016, 14(3): 347–353.
- [38] 李淑红, 孟维悦, 陈丽霞, 李云锋, 高如意, 茹文东, 孙孟和, 戴强, 张国钢, 陆军. 黄河中上游春季迁徙期水鸟群落及大天鹅活动特征. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 1910–1916.
- [39] 徐正刚, 王双业, 赵运林, 彭姣, 罗亮宇, 段酬苍. 基于卫星定位技术的洞庭湖麋鹿活动范围研究. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(2): 110–114.
- [40] 温立嘉, 任永奇, 邢小军, 包小峰, 白兆勇, 吴俊卿, 郭培荣, 郭玉民. 鄂尔多斯荒漠鸨小群体的 GPS-GSM 跟踪初步分析. *动物学杂志*, 2017, 52(2): 210–216.
- [41] 黄田, 徐正刚, 彭姣, 赵运林. 基于卫星跟踪的洞庭湖越冬小天鹅迁徙路线研究. *四川动物*, 2018, 37(4): 361–372.
- [42] Yu H, Wang X, Cao L, Zhang L, Jia Q, Lee H, Xu Z G, Liu G H, Xu W B, Hu B H, Fox A D. Are declining populations of wild geese in China ‘prisoners’ of their natural habitats? *Current Biology*, 2017, 27(10): R376–R377.