应用生态学报 2017年7月 第28卷 第7期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jul. 2017, **28**(7): 2315-2320 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201707.038

食物资源的枯竭对丹顶鹤营养位的影响

罗金明[1*] 王永洁[1] 王文锋[2] 高忠燕[2]
([1]齐齐哈尔大学理学院, 黑龙江齐齐哈尔 161006; [2]黑龙江扎龙国家级自然保护区管理局, 黑龙江齐齐哈尔 161002)

摘 要 随着扎龙湿地生物资源的迅速减少,在该地栖息的丹顶鹤种群的营养关系可能发生显著的变化.本文使用稳定同位素($\delta^{15}N$ 和 $\delta^{13}C$)监测食物资源的枯竭对丹顶鹤营养位的影响.结果表明:丹顶鹤种群的 $\delta^{15}N$ 和 $\delta^{13}C$ 的丰度范围分别为 6.9‰~8.1‰和-17.8‰~-18.5‰.扎龙湿地系统以大型水禽为食物顶端的食物链长度为 3.8±0.2,其中丹顶鹤种群所处的平均营养位为 3.1(范围在 2.9~3.3).丹顶鹤的 $\delta^{15}N$ 的丰度近年波动范围为 7.4‰~8.8‰(波动幅度 1.4,小于营养位发生显著变化的阈值 3.4),这说明在该地区活动的丹顶鹤的营养位并没有随着大面积的栖息地和食物资源的消失而发生显著变化.然而,随着本地区生物资源的枯竭,丹顶鹤种群规模迅速减少,当前必须合理解决当地居民从湿地获取生活资源的需求与丹顶鹤觅食之间的矛盾,从而更好地保护这种濒危种群.

关键词 觅食行为; 丹顶鹤; 食物链; 稳定同位素

Characterization of trophic position of red-crowned crane (*Grus japonensis*) influenced by the food resource exhausting.

LUO Jin-ming[1*], WANG Yong-jie[1], WANG Wen-feng[2], GAO Zhong-yan[2] ([1]*Department of Science, Qiqihar University, Qiqihar* 161006, *Heilongjiang, China*; [2]*Zhalong National Natural Reserve Administration, Qiqihar* 161002, *Heilongjiang, China*).

Abstract: The trophic relations of the red-crowned crane species in Zhalong Wetland, northeastern China may change significantly with rapid decrease of biological resources. In this paper, the influence of food resource exhausting on the trophic levels of this vulnerable species was determined by using stable isotope ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$) methods. The results indicated that the mass of $\delta^{13}C$ and ^{15}N in the red-crowned cranes were in the range of -17.8‰ to -18.5‰ and 6.9‰ to 8.1‰, respectively. The dominant food chain length of large water fowls in the ecosystem of Zhalong Wetland was 3.8±0.2 in average, of which the examined species, *i.e.*, red-crowned cranes were 3.1 in average, with the range of 2.9 to 3.3. The annual fluctuation range of $\delta^{15}N$ values in the red-crowned cranes was from 7.4‰ to 8.8‰ (with the gap of approximately 1.4, which was below the threshold 3.4 that was considered as a trophic level significant change in an ecosystem), indicating the trophic level of this vulnerable species did not change significantly with the losses of large area of their habitats and foods. Nevertheless, the rapid decrease of the target species population with the food resource exhausting indicated that the conflict of food demand of the red-crowned cranes versus resource need of local residents should be resolved for better protecting this extinguishable species.

Key words: foraging behavior; red-crowned crane; food chain; stable isotope.

受人为干扰以及自然环境变化的双重胁迫,全球生物资源数量和种类正迅速减少[1].这对于一些濒危珍稀水禽的保护无疑带来巨大的影响.根据近期的研究表明,位于食物链顶端的动物的食性特征可能随着栖息地食物资源种类和数量的变化而发生明显的变化[2-4],例如肉食/草食之间的比例甚至食物的种类都可能发生变化,进而导致湿地系统中珍稀水禽所关联的食物链长度发生显著的变化.关于动物食性特征常见的研究方法有以下 5 种:稳定同

本文由黑龙江省自然科学基金项目(C2016058)和黑龙江省教育厅科研项目(135109231)资助 This work was supported by Natural Foundation of Heilongjiang Province, China (C2016058) and Scientific Research Project of Department of Education of Heilongjiang Province, China (135109231).
2017-02-27 Received, 2017-05-31 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luojm1000@163.com

位素监测(主要是碳和氮的同位素)[2-4]、胃部残留物观测[5]、觅食行为观察[6]、在其觅食地采样统计[7]、粪便组分分析[8],其中稳定同位素监测方法被认为是确定动物营养位非常有效的方法之一[2].

丹顶鹤是我国一级保护动物,且已经列入国际野生濒危动物保护组织红皮书名录.扎龙湿地是迁徙丹顶鹤种群重要的栖息地和繁殖地,该生态系统中生物多样性正在迅速衰减,这必然会影响在该地区栖息和繁殖的丹顶鹤种群的食性特征.近年来本地区活动的野生丹顶鹤种群规模和每年筑巢数都在持续减少[9].然而,迄今为止尚没有关于食物资源的减少对丹顶鹤营养关系的影响研究,这种现状不利于保护本已濒危的丹顶鹤种群.

本研究通过测定扎龙湿地常见的生物种类(包括底泥、水生植物、水生动物以及大型水禽丹顶鹤、白枕鹤和东方白鹳)的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 丰度,揭示近年来丹顶鹤种群与环境中其他种类之间的营养关系.在此基础上,探讨湿地生物多样性的减少是否导致丹顶鹤种群的营养位发生显著的变化.本研究首次以稳定同位素监测手段研究丹顶鹤种群的食性特征,研究结果可为本地区丹顶鹤种群食性生态研究及保护提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黑龙江扎龙国家级自然保护区(简称扎龙湿地)位于我国东北地区乌裕尔河流域下游(图 1),面积 2100 km^2(核心区 700 km^2,缓冲区 1400 km^2).大面积的原生芦苇沼泽成为迁徙丹顶鹤种群重要的栖息地和觅食地.每年 3 月末到 10 月末期间(8 个月左右),约 500 只丹顶鹤在该湿地栖息和繁殖.扎龙湿地周围被大面积农业区和城镇居民区包围,这决定了本地区人为活动会对湿地的演化造成显著影响.上游农业用水的急剧增加导致湿地因缺水而退化,例如每年进入湿地的水流量从 20 世纪 80 年代的 7.5×10^8 m^3减少至本世纪以来的不足 1×10^8 m^3,由此导致 13000 hm^2原生芦苇沼泽湿地退化和消失[9].随着湿地水域的消失和不合理的捕捞,本地区湿地产鱼量迅速减少,据统计在 20 世纪 70 年代本区域每年捕鱼量高达6000 t,而近年来整个湿地年可捕鱼总量不足 10 t.另一方面,各种污染废水直接排入湿地,且排入量从 1993 年的 0.17×10^8 m^3增加到近年的 0.45×10^8 m^3[9].随着湿地环境的退化,湿地中的生物资源减少和枯竭,丹顶鹤种群的觅食生态特征可能发生明显的变化.

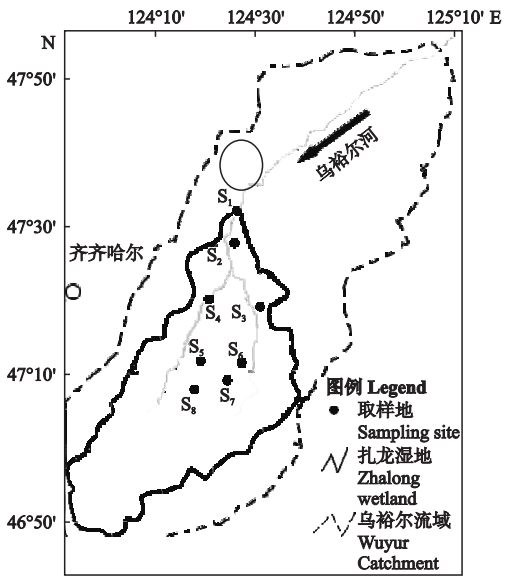


图 1 扎龙湿地的位置和丹顶鹤样本(S_1~S_8)及其粪便(S_5 和 S_8)的采集位置

Fig.1 Location of Zhalong Wetland, finding sites (S_1-S_8) of the red-crowned cranes and feces collection sites (S_5 and S_8).

1.2 供试材料与试验设计

2004—2014 年期间,收集到 8 只意外死亡的丹顶鹤样本(包括 5 只雄性和 3 只雌性),具体发现的位置以及生境特征见图 1 和表 1.同时还收集到 4 只野鸭(*Anas platyrhynchos*)、3 只白枕鹤(*Grus vipio*)和 3 只东方白鹳(*Ciconia boyciana*)的样本.通过尸检表明,这些样本的死亡原因可能是翅膀受伤难以南迁,且冬季缺乏食物而死,或者意外撞电线死亡.解剖丹顶鹤样本时,从口至小肠包括胃和沙囊部分都截取

表 1 丹顶鹤样本采集区的生境、采集日期和质量统计

Table 1 Habitat, finding date, and body mass of sampled red-crowned cranes

样地 Site	生境 Habitat	采集日期 Finding date	性别 Sex	是否成体 Adult or not	质量 Body mass (kg)
S_1	芦苇沼泽 Reed marsh	2014-04	雄体 Male	成体 Adult	9.82
S_2	芦苇沼泽 Reed marsh	2007-04	雄体 Male	亚成体 Juvenile	6.25
S_3	芦苇沼泽 Reed marsh	2010-04	雄体 Male	成体 Adult	9.44
S_4	草甸 Meadow	2010-10	雄体 Male	亚成体 Juvenile	6.80
S_5	草甸 Meadow	2012-11	母体 Female	亚成体 Juvenile	6.56
S_6	芦苇沼泽 Reed marsh	2011-05	母体 Female	成体 Adult	6.59
S_7	草甸 Meadow	2004-04	母体 Female	亚成体 Juvenile	5.85
S_8	草甸 Meadow	2012-10	雄体 Male	成体 Adult	8.31

下来，用手术刀片剖开后把其中的残留物用 70%浓度的酒精洗到烧杯中，根据文献[5]的方法进行胃容物成分分析.

在发现丹顶鹤样本的样点，分别采集以下 3 类样品：底泥、水生植物和水生动物，水生植物包括藻类和芦苇(*Phragmites australis*)的茎，藻类包括金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)和近直螺水绵(*Spirogyra rectispira*)，水生动物包括龙虱(*Cybister japonicus*)、水螺(*Cipangopaludina chinensis*)和 3 种体长小于 10 cm 的鱼类：鲤鱼(*Cyprinus carpio*)、泥鳅(*Misgurnus mohoity*)、老头鱼(*Perccottus glehnii*)，此外，在上述样点也收集体长大于 10 cm 的鲤鱼用来比较鱼类体长对营养位的影响.以上水生动物都是丹顶鹤喜爱的食物种类.在湿地区域的农田采集部分玉米，处理后和以上样本一起测定稳定同位素碳和氮的丰度，并确定本地区食物链结构.另外，还在样地 S5 和 S8 采集到部分丹顶鹤的粪便，在经过处理后按照参考文献[10]提供的方法对其组分进行分析.

1.3　试验方法

以上样本的稳定同位素丰度在中国科学院南京地理与湖泊研究所测定.使用稳定同位素质谱仪(Thermo Scientific MAT 253，德国 Finnigan 公司生产)测定底泥和常见生物种类的碳($\delta^{13}C$)和氮($\delta^{15}N$)同位素丰度，测定精度为 0.2‰.同位素丰度表示公式如下[2]：

$$\delta^{13}C_{sa}(\ \delta^{15}N_{sa}) = (R_{sa}/R_{st}-1)\times 1000‰$$

式中：R 代表 $^{15}N/^{14}N$ 或 $^{13}C/^{12}C$ 样本和标准物之间的比率.

根据下式计算不同动物的营养位(TL)[11]：

$$TL = 2+(\delta^{15}N_{co}-\delta^{15}N_{ba})/3.4$$

式中：$\delta^{15}N_{ba}$ 代表初级消费者的 $\delta^{15}N$ 丰度平均值；$\delta^{15}N_{co}$ 代表消费者的 $\delta^{15}N$ 丰度平均值.本文根据国内外相关研究的结论[12-14]，选择水螺的 $\delta^{15}N$ 作为基准值，测得营养位最大值即为研究区生态系统食物链长度.

1.4　数据处理

采用 Excel 2007、SPSS 18.0 以及 OriginPro 软件对数据进行统计分析和制图.采用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析($\alpha = 0.05$).图表中数据为平均值±标准差.

2　结果与分析

2.1　丹顶鹤的胃容物和粪便组分分析

从表 2 可知，丹顶鹤的胃部残留物质量在 10.62~26.32 g 之间，平均值(16.08±7.04) g.87%以上的胃部残留物是砂粒(13.95±6.82) g，而残留的食物质量不到 13%.丹顶鹤胃容物总体上包括水生植物和水生动物两种类型.植物所占的比例明显高于水生动物(63∶37).植物主要包括水草种子和芦苇的根与茎，水生动物则主要为鱼类和一些底栖动物(如龙虱和水螺壳).粪便组分见表 3，约 43%的粪便为植物(种子、植物根和茎等)，33%的粪便为水生动物残体.

2.2　食物链的同位素丰度和营养位分布

$\delta^{13}C$ 在生物体内相对稳定，因此常用来确定目标生物种群的食物来源[2-4].由表 4 可见，研究区各组分的碳同位素丰度为-30‰~-18‰，不同物种的碳同位素丰度变化较大，藻类、水螺和龙虱以及鱼类脂肪的碳同位素丰度变动较大.含脂量较高的龙虱、鱼和鸟类的脂肪的碳同位素丰度都明显低于其他物种以及同类其他组织(器官).水螺、藻类、鱼以及

表 2　扎龙湿地丹顶鹤胃容物的组分(干质量)

Table 2　Components of stomach contents (dry mass) of red-crowned cranes in Zhalong Wetland

项目 Item			S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	平均值 Mean
总质量 Total mass (g)			26.32	10.62	24.48	14.48	16.29	15.38	12.64	18.39	16.08±7.04
矿物质		5~10 mm	18.47	4.27	17.51	2.73	7.64	5.04	3.67	9.72	13.95±6.82
Mineral (g)		2~5 mm	3.71	3.14	3.11	7.63	2.70	3.58	3.60	4.62	
		0.2~2 mm	2.54	1.74	0.46	3.45	3.34	4.63	3.70	1.96	
残留食物	植物	种子 Seed	0.32	0.44	N	0.15	0.27	0.38	0.26	0.42	1.13±0.55
Food residue (g)	Plant	玉米 Maize	0.78	0.34	N	N	1.34	0.98	0.57	0.27	
		茎和根 Stem and root	0.09	0.31	0.68	0.03	0.45	0.13	0.37	0.48	
		总和 Sum	1.19	1.09	0.68	0.18	2.06	1.49	1.20	1.17	
	动物	鱼类 Fish	0.27	0.16	2.34	0.64	0.05	0.64	0.24	0.51	0.82±0.82
	Animal	贝类 Shell	0.14	0.22	0.38	0.31	N	N	0.23	0.41	
		总和 Sum	0.41	0.38	2.72	0.95	0.05	0.64	0.47	0.92	

N：没有检测到 Not detected.

表 3 丹顶鹤粪便组分及 $pH_{1:5}$ 特征
Table 3 Components and $pH_{1:5}$ of the feces excreted by red-crowned cranes

项目 Item			S_5	S_8
数量 Amount	成形 Well-formed		3	2
	不成形 Unformed		1	-
质量 Mass (g)	鲜质量 Fresh mass		1.8±0.3	1.5±0.3
	干质量 Dry mass		1.1±0.2	0.8±0.2
组分 Component (%)	植物 Plant	种子 Seed	23.2±6.4	21.6±5.1
		茎和根 Stem and root	20.1±4.3	21.8±3.6
	动物 Animal	鱼 Fish	9.8±6.2	8.0±4.4
		硬壳动物残片 Debris animal	24.1±4.7	25.3±12.6
	矿物质 Mineral	粉砂 Fine sand	22.9±13.1	23.4±10.3
$pH_{1:5}$			7.5±0.3	7.6±0.4

4 种水禽的碳同位素丰度较为相似(-20‰左右).常见物种的氮同位素丰度为 3.2‰~9.8‰,表现为植物(3.2‰~4.8‰) < 水生动物(4.1‰~6.3‰) < 鸟类 (7.8‰~9.8‰).藻类的氮同位素丰度最低,东方白鹳的氮同位素丰度最高(9.8‰),丹顶鹤(7.8‰)、野鸭(8.4‰)和白枕鹤(8.2‰)种群的氮同位素丰度较为相似.

图 2 为不同年限丹顶鹤体内组织的碳、氮稳定同位素丰度.从图 2 可见,不同年限的丹顶鹤种群体内组织中所测定的两种同位素的丰度存在一定的波动,其中碳稳定同位素波动幅度在 6‰左右,氮稳定同位素波动幅度在 1.2‰左右.

根据不同生物样本的氮同位素丰度可以得到其营养位.由表 4 可知,扎龙湿地整个生态系统为 4 级营养关系,属于复杂的生态系统.底栖动物(水螺、龙虱和泥鳅)的营养位处于整个生物种群的底层,营养位都在 2.5 以下.鱼类的平均营养位为 2.7,但是尺寸和种类对营养位的影响较大,个体大的鱼营养位较高(最高营养位在 3 以上),尺寸较小的个体以及以藻类为食的鱼的营养位较低,甚至与泥鳅的营养位相近.鸟类的营养位在 3.0 以上,其中丹顶鹤的营养位为 3.1±0.2,野鸭和白枕鹤的营养位在 3.0~3.6 之间,平均值为 3.3,东方白鹳的营养位最高(3.8±0.2).

通过上述分析可以断定,丹顶鹤、野鸭和白枕鹤是杂食动物,植物根、茎和种子是它们的主要食物来源,水生动物(例如鱼和软体动物)是丹顶鹤的主要食物来源.东方白鹳是肉食性动物,其营养位处于整个生态系统的食物链顶端.

表 4 扎龙湿地所采集样本碳、氮稳定同位素丰度及营养位
Table 4 Stable isotopes of nitrogen ($\delta^{15}N$), carbon ($\delta^{13}C$) and trophic level (TL) of samples in Zhalong Wetland

项目 Item	n	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)	营养位 TL	种类 Category
底泥 Sediment	8	-17.97±3.65	3.70±1.08	-	
藻类 Algae		-24.22±5.08	3.12±1.04	-	
底栖类 Benthonic	8	-17.02~-20.94	2.10±0.32	-	
浮游类 Phytoplankton	8	-20.31~-30.82	5.56±0.44	-	
芦苇 Reed	8	-27.01±0.50	4.71±0.82	-	
玉米 Maize	8	-18.02±0.46	8.08±0.58	-	
水螺 Pond snail (M)	8	-20.75±3.39	4.01±1.07	2.00±0.08	底栖动物
龙虱 Water beetle (M)	8	-28.11±3.76	4.02±0.56	2.01±0.11	Benthic animal
泥鳅 Pond loach (M)	8	-25.28±1.43	5.16±1.32	2.34±0.15	
鱼 Fish		-20.35±1.33	6.32±1.44	2.68±0.42	鱼类
老头鱼 Chinese sleeper (M)	8	-21.51±0.49	4.62±0.15	2.18±0.27	Fish
鲤鱼 Common fish (M,长度 Length<10 cm)	8	-18.62±0.48	7.21±0.26	2.94±0.39	
鲤鱼 Common fish (M,长度 Length>10 cm)	8	-20.22±0.23	7.62±0.17	3.16±0.43	
丹顶鹤 Red-crowned crane (M)	8	-18.35±1.21	7.54±0.37	3.03±0.26	杂食动物
野鸭 Mallard (M)	4	-19.28±1.08	8.35±0.42	3.28±0.32	Omnivores
白枕鹤 White-naped crane (M)	4	-19.25±0.89	8.31±0.35	3.26±0.35	
东方白鹳 Oriental stork (M)	2	-18.40±1.25	9.81±0.57	3.81±0.17	肉食动物 Carnivore
丹顶鹤 Red-crowned crane (L)	8	-30.85±2.47	-	-	
野鸭 Mallard (L)	4	-26.65±2.23	-	-	
白枕鹤 White-naped crane (L)	4	-27.65±3.74	-	-	
东方白鹳 Oriental stork (L)	2	-26.40±1.44	-	-	

M: 肌肉 Muscle; L: 脂类 Lip.

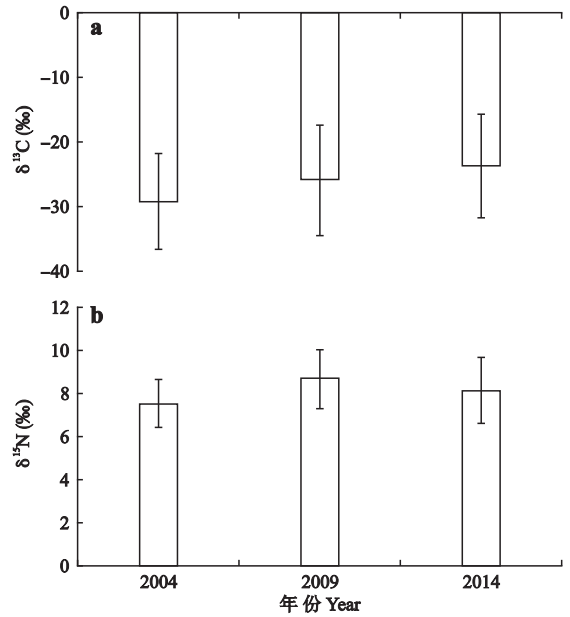


图 2　丹顶鹤组织中的碳、氮稳定同位素在 2004、2009 和 2014 年期间的波动特征

Fig.2　Fluctuations of stable isotope nitrogen and carbon in the tissues of red-crowned cranes in 2004, 2009 and 2014.

3　讨　　论

根据以往的研究，可获取的食物资源量、捕食者-食物之间相互关系以及环境扰动是影响复杂生态系统营养位的主要因素[12,14]．当环境中大量处于中间营养位的食物减少后，处于顶端的动物种群则可能改变食性而降低其营养位，最终改变整个食物网的结构，从而影响整个生态系统的稳定性和复杂度[15]．近年来扎龙湿地大面积的原生芦苇沼泽被开发成耕地，人为过度捕捞和污染物排放导致这个区域的生物多样性显著减少[1,6]．随之而来的是处于食物链顶端的鸟类的食物显著减少．近期文献也报道了本区域的丹顶鹤种群规模持续减少[9]．可见，湿地生物资源的减少可能是导致本地区丹顶鹤种群迅速减少的一个重要因素．

考虑到 $\delta^{13}C$ 丰度在生物体内相对稳定，因此常用来确定目标生物种群的食物来源[13]．一般来说，捕食者和食物之间的碳稳定同位素丰度相似．由于动物脂肪富集大量的食物碳，因此对其碳稳定同位素的丰度值存在明显影响．通常认为脂类含量较高的动物（例如本研究的龙虱）碳稳定同位素丰度值偏低[13,15]．本研究测定的动物肌肉组织和脂肪的碳稳定同位素丰度值的巨大差异也证实了该结论．本研究中各种动物的肌肉组织的碳同位素丰度测定表明，扎龙湿地栖息的老头鱼和鲫鱼等鱼类是丹顶鹤种群最常见的食物．而底栖藻类的 $\delta^{13}C$ 丰度（−25.37‰～−20.9‰）与丹顶鹤以及老头鱼的食物碳丰度相似，也就是说底栖藻类是老头鱼和丹顶鹤重要的食物来源．

营养位是生物种群重要的属性，食物链长度则反映整个生态系统的结构和功能．一般河流、湖滨湿地生态系统的食物链长度变化较大，通常在 2.6～4.4之间[14-15]．本文发现，扎龙湿地的东方白鹳占据着食物链顶端（营养位 3.9），这种系统的营养关系等级与上述研究结果相符．

研究表明，复杂生态系统中的营养位和食物网格局与食物资源的多少以及生态系统的尺度密切相关[13,15-16]，即使在一年当中也会发生波动，但是如果某一种动物种群的 $\Delta\delta^{15}N$ 超过 3.4，那么这种生物的营养位已经发生了显著变化[17]．由于动物组织的碳稳定同位素丰度（$\delta^{13}C$）能够反映其食物特性随时间的变化，因此往往用于反映动物的食物资源

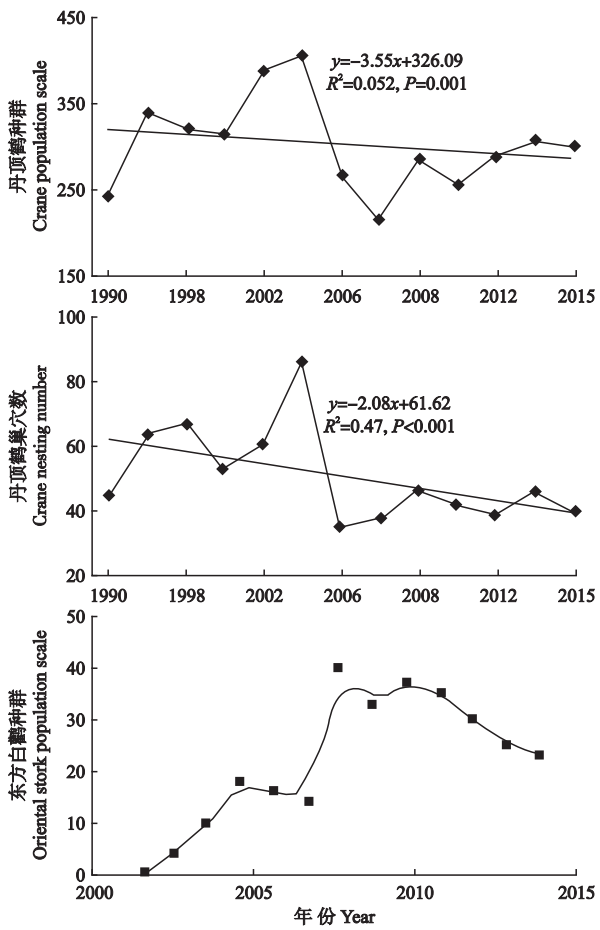


图 3　近 25 年（1990—2015 年）扎龙湿地丹顶鹤种群数量、筑巢数和东方白鹳种群数量的变化

Fig.3　Fluctuation of red-crowned crane population and nesting number and oriental stork population in Zhalong Wetland in recent 25 years (1990-2015).

和营养位.本文检测到丹顶鹤组织的 $\delta^{13}C$ 在近 10 年存在一定变化,其波动范围为-25.37‰~-29.2‰,这说明近年来丹顶鹤在本地区的食物是不断变化的,符合上述研究结论.丹顶鹤的 $\delta^{15}N$ 丰度在近 10 年波动范围为 7.4‰~8.8‰(波动幅度 1.4,明显小于营养位发生显著变化的阈值 3.4),可见这种濒危种群的营养位并没有随着其食物资源的显著减少而发生显著变化.值得注意的是,丹顶鹤种群规模在近年显著减少(图 3),东方白鹳种群规模则存在巨大的波动,有些年份东方白鹳甚至缺失,这表明在人类强烈的干扰背景下扎龙湿地以珍稀水禽为主的食物链是十分脆弱的.

通过分析得知,芦苇和水生动物(鱼类和泥鳅等)对于丹顶鹤的食物选择十分重要.但是近 20 年来,扎龙湿地的芦苇和鱼类资源持续减少[9],这应该引起高度关注.另一方面,当地农民的收入不高(每人每年平均 3000 元),芦苇和渔业资源是主要的经济收入来源[18].在没有任何其他经济补偿的条件下,他们会尽可能地开垦湿地、收割芦苇和捕捉鱼类等资源.因此,丹顶鹤觅食需求和当地人的生存之间产生了明显的矛盾.随着扎龙湿地鱼和芦苇资源的持续减少,这种矛盾进一步凸显,扎龙湿地生态系统的食物网结构可能发生更显著的变化,从而影响丹顶鹤种群的生态健康安全.如何有效缓解这种矛盾和改善丹顶鹤种群的觅食环境以保证其有充足的食物资源,对于管理者来说是亟需解决的问题.

参考文献

[1] Qiu J. China faces up to 'terrible' state of its ecosystems. *Nature*, 2011, **471**: 19-20

[2] Sabo JL, Finlay JC, Kennedy T, *et al*. The role of discharge variation in scaling of drainage area and food chain length in rivers. *Science*, 2010, **330**: 965-967

[3] Köhler HR, Triebskorn R. Wildlife ecotoxicology of pesticides: Can we track effects to the population level and beyond. *Science*, 2013, **341**: 759-765

[4] Braune BM, Gaston AJ, Hobson KA, *et al*. Changes in food web structure alter trends of Hg uptake at two seabird colonies in the Canadian Arctic. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**: 13246-13252

[5] Orlowski G, Kasprzykowski Z, Zawada Z, *et al*. Stomach content and grit ingestion by Rook *Corvus frugilegus* nestlings. *Ornis Fennica*, 2009, **86**: 117-122

[6] Li S-L (李淑玲), Wang Y (王 宇), Zhao Y (赵越), *et al*. Seasonal fluctuation of food quality and population for red-crowned crane in Zhalong conservation area. *Journal of Northeast Agricultural University* (东北农业大学学报), 2012, **43**(9): 113-117 (in Chinese)

[7] Kasprzykowski Z. Habitat preferences of foraging Rooks *Corvus frugilegus* during the breeding period in the agricultural landscape of eastern Poland. *Acta Ornithologica*, 2003, **38**: 27-31

[8] Luo J, Ye Y, Gao Z, *et al*. Stomach content and faecal analysis of red-crowned cranes (*Grus japonensis*) in Zhalong Wetland, Northeastern China. *Biologia*, 2015, **70**: 542-546

[9] Luo JM, Ye YJ, Gao ZY, *et al*. Heavy metal contaminations and influence on the red-crowned crane (*Grus japonensis*) in Wuyur catchments, Northeastern China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**: 5657-5667

[10] Zduniak P. Forced regurgitation with tartar emetic as an effective and safe method to study diet composition in hooded crow nestlings. *European Journal of Wildlife Research*, 2005, **51**: 122-125

[11] Foster KL, Stern GA, Pazerniuk MA, *et al*. Mercury biomagnifications in marine zooplankton food webs in Hudson bay. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**: 12952-12959

[12] Post DM. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, **83**: 703-712

[13] Sun M (孙 明), Wang B (王 彬), Li Y-L (李玉龙), *et al*. Feeding habitats and trophic levels of *Rhopilema esculentum* Kishinouye in Liaodong Bay based on analyzing carbon and nitrogen stable isotopes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(4): 1103-1108 (in Chinese)

[14] Saigo M, Zilli FL, Marchese MR. Trophic level, food chain length and omnivory in the Paraná River: A food web model approach in a floodplain river system. *Ecological Research*, 2015, **30**: 843-852

[15] Tunney TD, McCann KS, Lester NP, *et al*. Food web expansion and contraction in response to changing environmental conditions. *Nature Communications*, 2012, **3**: 1-9

[16] Lavoie RA, Kyser TK, Friesen VL, *et al*. Tracking overwintering area of fish-eating birds to identify mercury exposure. *Environmental Science & Technology*, 2015, **45**: 863-872

[17] Hebert CE, Hobson KA, Shutt JL. Changes in food web structure affect rate of PCB decline in herring gull (*Larus argentatus*) eggs. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**: 1604-1609

[18] Luo J, Wang Y, Ye Y, *et al*. Survey on stopover habitation resident of hooded crane in Changgou County Zhalong Wetland. The Third International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan, China, 2010: 4285-4287

作者简介 罗金明,男,1977 年生,博士,教授. 主要从事湿地生态健康和生物多样性研究. E-mail: luojm1000@163.com

责任编辑 张凤丽

罗金明, 王永洁, 王文锋, 等. 食物资源的枯竭对丹顶鹤营养位的影响. 应用生态学报, 2017, **28**(7): 2315-2320
Luo J-M, Wang Y-J, Wang W-F, *et al*. Characterization of trophic position of red-crowned crane (*Grus japonensis*) influenced by the food resource exhausting. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(7): 2315-2320 (in Chinese)