

湖泊生态系统的水鸟监测意义*

张淑霞, 董云仙, 夏 峰

(云南省环境科学研究院, 昆明 650034)

摘要: 水鸟的多样性及其变化趋势是保护水鸟必需的信息,也是其栖息湿地环境质量的指示因子之一. 本文综述了水鸟与湖泊生态系统关系的研究成果,认为水鸟的物种多样性与丰富度可以快速反映湖泊的水生植物、鱼类的生物量和湖泊水位、营养状况的变化,集群繁殖的食鱼水鸟可用于湖泊生态系统中持久性有毒化学污染物的生态监测;同时阐述了水鸟通过取食水生植物、排出粪便对湖泊生态系统产生的主要影响,并在湖泊生态系统管理中给出相应建议. 为了深入了解湖泊生态系统的多稳态转变机制和全面反映受污染湖泊的恢复进程,建议在我国富营养湖泊的恢复过程中,应将水鸟与湖泊生态系统其它成分作为一个整体进行监测,量化研究水鸟与湖泊水生植物、鱼类和水环境之间的关系.

关键词: 水鸟; 浅水湖泊; 指示生物; 大型水生植物; 生态系统监测

Significance of waterbird monitoring in lake ecosystems

ZHANG Shuxia, DONG Yunxian & XIA Feng

(*Yunnan Institute of Environment Sciences, Kunming 650034, P. R. China*)

Abstract: Statistics on the status and trends in numbers of waterbirds are necessary for the conservation of their wetland habitats. Waterbirds are also considered as one of the indicators of habitat quality of wetlands. We reviewed the studies on the ecological relationships between waterbirds and lake ecosystems, and found that abundance and species richness of waterbirds could respond quickly to the biomass change of macrophytes and fishes, as well as variation of water level, trophic status of lakes, and colonial fish-eating birds could be used to monitor the level of persistent toxic substances in lakes. In turn, waterbirds could impose a significant impact to lakes through grazing on aquatic vegetation, and nutrient load by faecal deposition. In addition, management of lake ecosystems related to waterbirds was suggested accordingly. In order to have a better understanding of the factors that lead to switches between multiple stable states in eutrophic lakes, and on the restoration progress of eutrophic lakes, waterbirds should be incorporated into monitoring of eutrophic lakes in the process of lake restoration in China, and additional studies to quantify the relationships between waterbirds and macrophytes, fish and environmental variables of lakes are necessary.

Keywords: Waterbirds; shallow lakes; indicator species; macrophytes; ecosystem monitoring

1 我国开展湖泊水鸟监测研究的重要意义

根据《湿地公约》的定义,水鸟是指“生态学上主要依赖水域(湿地)生存的鸟类”.它们对水域(湿地)有较强依赖性和适应性,其生活史全过程或部分过程必须在水域或湿地生境中完成,常见的有鸕鹚、鸬鹚、雁鸭及鸥鸟等游禽(Natatores)和鹭、鹤、鹤、秧鸡、鴛、鹮等涉禽(Grallatores).

水鸟是湖泊生态系统中比较容易观察到的生物类群,处于顶级消费者的地位,是湖泊生态系统中的重要成员之一.尽管水鸟与鱼类、无脊椎动物等生物一样受到湖泊环境因素的影响,如湖泊的大小、深度和营养状态,并且作为捕食者、竞争者或被捕食者,水鸟与这些生物发生着相互依存和制约的作用,但是水鸟与湖泊生态系统中其它生物成员之间的相互作用却受到忽视,并没有得到广泛的研究^[1].近年来,伴随受污染湖泊的治理得到普遍重视,湖泊科学的很多学术焦点转移到是什么因素决定浅水湖泊在草型与藻型生态系

* 云南省科技厅社会发展科技计划项目(2009CA002)资助. 2010-09-16 收稿;2010-12-06 收修修改稿. 张淑霞,女,1977年生,博士,高级工程师;E-mail:zhangsx03@mail.kiz.ac.cn.

统之间转变^[2],而鉴于水鸟对湖泊生态系统的变化较为敏感,并且有时在湖泊生态系统发生转变时起到了显著的作用,因此现在越来越多的研究关注水鸟在湖泊生态系统中的作用,并且将对水鸟的研究整合到湖沼学的研究中^[3].

根据食性,水鸟可被划分为主食草、鱼、无脊椎动物或杂食性等不同的同资源种团(guild),每个同资源种团对其相应的食物资源变化较为敏感,往往可以反映湖泊生态系统中低等级生物的丰富度状况.例如主食各种草本植物的雁鸭类种群数量的消长,可能与湖泊的水生植物覆盖度有着密切的关系;鸬鹚类、鸥类等主食鱼类水鸟的种群数量消长,往往与湖泊中鱼类资源的丰富度有关;主食湖泊底栖动物,如螺、蚌等软体动物的潜鸭类种群数量的消长,也可间接推测湖泊底栖软体动物类群的资源丰富度.水鸟的种群数量可以通过计数进行准确评估,而且它们的强运动能力可以使其对环境食物资源的变化反应迅速,因此它们的多样性状况通常可以强有力的反映湖泊生态系统中其它生物的变化^[4].就湖泊生态系统而言,对湖泊水鸟的种类和个体数量进行准确计数,比对低等级生物(浮游动植物)进行全面计数较容易进行.也正是因为水鸟作为湖泊生态系统监测生物的可行性,通过对湖泊水鸟的长期监测可以在大的时间尺度上反映湖泊生态系统的整体变化.水鸟的物种多样性、种群丰富度以及衍生指数也通常是其栖息湿地恢复程度的评价指标^[5-6].

从1950s开始,瑞典、荷兰、西班牙、英国、美国、澳大利亚等多个国家就开展了湿地水鸟监测工作,而且作为一项传统,这些监测工作一直延续至今.对长期水鸟监测数据的分析,有助于了解湖泊生态系统的演化,对受污染湖泊的恢复具有一定的指导意义.例如,在荷兰的浅水湖泊 Lake Veluwemeer,草食性水鸟的种群数量与沉水植物的数量具有非常密切的关系^[4,7].1970s和1980s,由于该湖泊受到污染,沉水植物数量有限,水鸟种群数量也是历史上的最低值.但是进入1990s,当入湖污染物得到有效控制后,随着水质的改善,水生植物开始繁茂,水鸟的种群数量也开始增长.在1970s以前,只有水鸟监测数据可以获得的情况下,利用这种关系,可重建1970s以前沉水植物多样性的演变过程,对该湖泊1970s以前的生态系统健康状况进行定性描述.由此可见,通过长期水鸟种群数量监测数据的分析,一方面可以快速了解湖泊生态系统的现状,另一方面则可以在大的时间尺度上掌握湖泊生态系统的演化,反映受污染湖泊的恢复进程.

我国拥有数千个浅水湖泊,它们在湖区经济发展中起了至关重要的作用,但是浅水湖泊的湖水与底泥间物质交换强烈,沉积较为缓慢,污染负荷能力也较低^[8].自1970s以来,滇池、太湖、巢湖等浅水湖泊的富营养化问题日趋严重,限制了湖区经济的发展.我国自“六五”起就全面开展了富营养湖泊的研究和治理工作,伴随近年来国家和地方政府对大量污染湖泊治理力度的加大,这些恢复中的湖泊可为迁徙水鸟提供潜在的栖息地或停歇地.在全球湿地面积正在减少或质量正在退化^[9]、全球水鸟种群数量正在下降的大趋势下^[10],新的栖息地或停歇地的出现对迁徙水鸟的保护尤显重要.因此,本文综述了有关水鸟与湖泊生态系统关系的研究结果,一方面揭示水鸟在湖泊生态系统中的作用,阐述对受污染湖泊开展水鸟监测的必要性;另一方面,强调应及时开展对污染湖泊恢复过程中的水鸟栖息地利用的研究,以便更好的保护迁徙水鸟及其栖息地.

2 水鸟与湖泊中其它生物类群的关系

2.1 水鸟与湖泊水生植物的关系

水生植物的种子、叶、茎和根可直接为水鸟提供食物,依附于水草群落生活的无脊椎动物也是水鸟的重要食物资源,除此之外,在水鸟的繁殖季节,茂密的挺水和浮叶植物可以为其提供营巢材料及庇护场所,使其繁殖成功率得以提高^[11].因此,水鸟与水生植物是密切相关的,维持湖泊中足够多的水生植物是为迁徙水鸟提供充足食物、保护其栖息水鸟的重要前提.

很多浅水湖泊生态系统会在草型和藻型状态之间转换,当湖泊为草型生态系统时,水生植物繁盛,水体清澈;当湖泊为藻型生态系统时,藻类爆发,水体浑浊^[12].在瑞典南部的浅水湖泊 Lake Krankesjön,22年的水鸟监测研究发现^[13],藻型生态系统时期的水鸟个体数量低于草型生态系统时期.由于得益于水体的较高透明度,不仅草食性水鸟的种群数量,依赖视觉发现食物的主食无脊椎动物和鱼类的水鸟种群数量,也对水生植物覆盖度和水体透明度显示出正相关的关系.这项研究也说明,迁徙水鸟可以对湖泊中食物资源的变化

做出响应,根据湖泊水质变化大尺度的调整其迁徙路线.同样,在西班牙南部的 Lake Honda 和 Lake Nueva,与藻型湖泊时期相比,雁鸭类水鸟在草型湖泊时期可获得更多的食物,因此种群数量和繁殖成功率都得以增加^[14];在瑞典南部的 Lake Takern,沉水植物的数量变动也显著影响了草食性水鸟的种群数量^[15].21 世纪以来,我国安徽的升金湖富营养化严重,导致湖泊内部分沉水植物种类的消失,从而使鸿雁 (*Anser cygnoides*)、小天鹅 (*Cygnus bewickii*)、白头鹤 (*Grus monacha*) 等主食植物块茎的水鸟数量在 2005 - 2010 年间逐年减少^[16].

人们往往将水鸟多样性的下降归因于栖息地质量的退化,但是另一方面,水鸟却可能是湖泊生态系统演变的驱动力,对生态系统中的水生植物产生一定的影响.自 1980s 起,骨顶鸡 (*Fulica atra*)、天鹅类 (*Cygnus* spp.) 以及部分草食性雁鸭类水鸟对湿地水生植物生长的影响得到了较多的研究和关注^[17],近年来研究人员又将草食性水鸟与鱼类联合在一起,研究它们的取食压力对沉水植物生长的影响^[18-19].由于研究中具体研究地点和采用的方法不同,因此就草食性水鸟对湖泊中水生植物生长的影响并没有得到统一的结论,主要有以下观点:1) 多数研究认为草食性水鸟对春夏季湖泊水生植物的生长没有显著影响^[18,20-21],但是草食性水鸟与草食性鱼类一起将可能对春夏季湖泊水生植物的生长产生负面影响^[22];2) 在秋冬季水生植物生物量较低时,大量过境水鸟通过取食水生植物的种子、休眠芽或宿根,可能影响温带浅水湖泊水生植物来年的生长^[17,20];3) 当湖泊总体水生植物生物量处于历史上较低的状态时,草食性水鸟可以加速湖泊由草型生态系统向藻型生态系统的转变,或者在湖泊由藻型向草型生态系统转变初期,抑制水草的萌发^[13,23];4) 草食性水鸟通过选择性的取食水生植物,例如篦齿眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*),可以对湖泊中不同的沉水植物种类产生不同程度的影响,甚至改变沉水植物群落的物种组成^[24].

综合以上观点,我们认为在特定的情况下(秋冬季或湖泊总体水生植物生物量处于历史上较低的状态时),大量草食性水鸟的取食活动对湖泊中水生植物的生长可能产生负面影响,其选择性的取食策略又将使水生植物群落中的每个物种受到不同程度的负面影响.因此,建议在我国秋冬季有大量迁徙候鸟停歇的湖泊中,应密切监测草食性水鸟的物种多样性与丰富度的变化,研究草食性水鸟对水生植物生物量的影响.如果草食性水鸟对恢复湖泊中水生植物的生长产生负面影响,可以采取以下措施来进行防范:通过人工提供食物来降低草食性水鸟对水草的取食压力,或者在恢复区内安装物理保护装置来防止迁徙水鸟的降落.另外,在氮、磷等营养物质已被大幅稳定削减的恢复湖泊中,应避免仅恢复眼子菜类 (*Potamogeton* spp.) 单一化物种,建议恢复多元化的水生植物群落,以缓冲来自草食性水鸟的取食压力.

2.2 水鸟与湖泊鱼类的关系

水鸟的多样性可以对湖泊中鱼类的存在与否、密度大小和鱼群的结构做出响应^[25-27].Eriksson 和 Andersson 根据温带湖泊中鲈鱼类和鲤鱼类与一些雁鸭类物种食性上的重叠^[28-29],首先提出鱼类与水鸟之间具有显著的食物竞争关系,后来的研究又进一步证实了这一关系^[30-31].此后又约有 40 项研究详细阐述了鱼鸟关系,这些研究揭示了比较一致的鱼鸟关系格局,即鱼类的存在对于非捕食鱼类水鸟的丰富度、栖息地利用和幼鸟的存活具有负面影响^[26,32].目前解释形成这种鱼鸟关系格局的原因有两个,一为鱼类在捕食底栖和浮游动物上比水鸟效率更高^[33],二为鱼类对水鸟幼体的捕食时有发生,使其繁殖成功率下降^[34].主食鱼类的水鸟数量则与湖泊中鱼类的生物量呈正相关的关系^[35].

虽然共同栖息于同一湖泊中的鱼类与水鸟存在着显著的竞争关系,但是由于研究人员对近缘物种之间的竞争关系较为关注,再加上鱼类学家与鸟类学家共同开展研究的机会较少,因此远缘生物类群——水鸟和鱼类之间的竞争关系没有得到广泛的研究,这也导致当今的湖沼学、水生生态学教科书中低估甚至忽略了鱼鸟关系的重要性^[36-39],而鱼类和水鸟往往是湖泊中具有较大的经济与保护价值的生物类群,与湖泊生态系统服务功能密切相关.

3 水鸟与湖泊水环境的关系

3.1 水鸟对湖泊水位变化的响应

由于很多水鸟的取食活动受限于自身的身体特征,如涉禽的腿长、颈长,因此水鸟对其取食地的水深有较高的要求.例如,一般情况下,小型鸕鹚类在水深小于 5cm 的湿地中取食,大型鸕鹚类在水深不超

15cm 的湿地中取食,绿翅鸭(*Anas crecca*)、绿头鸭(*Anas platyrhynchos*)等钻水雁鸭类和鹭类涉禽在水深不超过的 30cm 的湿地中取食,鸕鶿和鸬鹚等潜水类水鸟则在最小水深超过 25cm 的水域中取食^[11]. 因此,湖泊水位的变化,尤其是浅水湖泊,可以使湖泊中水鸟物种多样性最为丰富的浅水区域面积发生显著的改变,从而迅速改变水鸟群落结构的组成. Holm & Clausen 通过对比丹麦沿海三个泻湖水位改变后的秋季迁徙水鸟的多样性变化,发现虽然提高运行水位改善了湖泊水质,但是被提高水位湖泊水鸟的物种多样性降低,而没有提高运行水位湖泊的水鸟物种、个体数量及停留时间却增加了^[40].

3.2 水鸟多样性与湖泊营养状态的关系

由于湖泊营养状态的变化可以显著影响水鸟可获得的食物量,因此湖泊水鸟的物种多样性与丰富度也与湖泊的营养状态有关^[41-44]. Hoyer & Canfield 对美国佛罗里达州 46 个湖泊的营养状态(指标为总磷、总氮和叶绿素 a)和水鸟的年平均种群密度进行了相关检验,发现水鸟的丰富度与湖泊营养水平正相关,物种多样性与湖泊表面积和营养水平正相关^[45]. Nilsson 及 Murphy 等在瑞典南部和阿拉斯加的湖泊中也发现了类似的关系,其湖泊营养状态指标为叶绿素 a 和总磷^[41-42]. Suter 连续 12 年在 20 个高原湖泊(3-580km²)中调查了越冬水鸟的多样性与湖泊的营养水平(指标为总磷)的关系,发现草食性的绿头鸭和捕食鱼类的普通鸬鹚(*Phalacrocorax carbo*)的种群密度与湖泊的营养状况显著正相关^[46]. 在湖泊营养状态相似的情况下,与湖泊表面积相比,水鸟种群密度与湖岸线长度关系更加紧密^[46-47]. 湖泊的营养水平(指标为总磷)与水鸟多样性的正相关关系仅限于自然状态下的多个湖泊比较,就单个湖泊而言,如果是人为活动造成湖泊由贫营养化变为富营养化,那么该湖泊水鸟的物种多样性是不会增加的^[41].

水鸟粪便中氮、磷等营养元素含量较高,因此当大量水鸟粪便进入湖泊水体中时,可能会使湖泊水质发生变化. 例如,在美国密歇根州西南部的 Lake Wintergreen,大量水鸟的粪便分别占外源性总碳、总氮和总磷入湖量的 69%、27% 和 70%^[48]. 于秀芳和张乃明也认为,大量红嘴鸥的粪便和喂养红嘴鸥的食物残渣可能是引起昆明翠湖冬季氨氮和总氮大量增加的主要原因^[49];但是更多的研究表明水鸟的粪便并不对其栖息水体造成严重污染^[45,50],因为与湖泊中固有的生物相比,例如浮游植物、浮游动物、大型水生植物、鱼类、底栖生物相比,水鸟的生物量一般较小,其粪便并不足以成为主要的污染源,进入湖泊的污染物应该主要来自于人类的活动^[3].

3.3 水鸟对湖泊中持久性有毒化学污染物的指示作用

利用水鸟监测环境中有害污染物的研究始于 1970s,随着人们对环境污染问题的重视,1990s 后,许多学者相继报道了关于海岸、河流、湖泊、水稻田等湿地环境中的重金属、有机氯杀虫剂(OCPs)、多氯联苯(PCBs)、多溴二苯醚(PBDEs)等持久性有毒化学污染物(Persistent Toxic Substances, PTS)在鹭类^[51]、鸥类^[52]、鸬鹚类^[53]、鹤类^[54]、鸬鹚类^[55-56]等水鸟体内的富集情况. 由于集群繁殖的水鸟在繁殖期间卵、幼鸟、成鸟通常局限分布在特定的繁殖地,可以同时使用多个监测指标进行环境污染状况的分析,例如卵内容物、卵壳、羽毛以及血液等组织中的污染物含量,幼鸟畸变情况,病理学分析,基因毒性测试等,因此,有集群繁殖习性的水鸟类群被推荐用于湿地环境监测^[57]. 目前已有鹭类、鸥类和鸬鹚类水鸟被用于湖泊生态系统的污染物监测,现分述如下:

3.3.1 鹭类水鸟 由于鹭类水鸟能够活动于湿地中的多种生境中,以脊椎动物或无脊椎动物为食;其集群营巢地和繁殖地较易接近,为生态观测与样品采集提供了方便,因此鹭类水鸟为水环境污染监测中常用的物种^[58-59]. 到目前为止,涉及湖泊生态系统污染物的鹭类生物指示研究报道并不多见,仅见于中国的太湖、鄱阳湖地区^[60-64]和巴基斯坦的 Lake Haleji^[65-66]、Lake Rawal^[67]地区.

上述研究使用的指示水鸟为夜鹭(*Nycticorax nycticorax*)、白鹭(*Egretta garzetta*)或牛背鹭(*Bubulcus ibis*),使用的组织材料为羽毛、卵或幼鸟反吐物. 在对指示水鸟进行繁殖生态研究、觅食生境与食性分析的基础上,这些研究从底泥—食物—鹭类水鸟食物链的角度分析了鹭类水鸟对有机氯杀虫剂、多氯联苯、重金属等污染物的富集规律. 根据这些湖泊地区已开展研究的结果,目前较为一致的结论为:1) 多数污染物浓度未达到影响鹭类水鸟生存或繁殖成功率的阈值;2) 每种污染物的生物富集特征都具有种的特异性,即不同的物种对特定的污染物种类富集能力不同,例如,白鹭对环境中 Hg 元素富集明显^[64-65],夜鹭对滴滴涕和六六六等有机氯杀虫剂富集明显^[61];3) 鹭类水鸟对污染物的富集能力一般与年龄呈正相关,即年龄越长的个体

体内污染物浓度越高^[60]。

虽然大量的研究表明鹭类水鸟可被用于湿地生态系统有害污染物的监测,但值得注意的是,由于鹭类水鸟的觅食范围较大,并不严格依赖于湖滨区域取食,往往是湖泊周围的水稻田或者鱼塘,因此鹭类水鸟是对湖泊流域系统中的污染物进行指示,而非仅限于严格的湖泊生态系统。所以,在开展相关研究之前,确定指示水鸟的食物主要来源于湖泊生态系统是重要的前提条件。

3.3.2 鸥类水鸟 鸥类水鸟喜栖息于沿海、近海岛屿、内陆湖泊、河流等大面积水域环境中,主要以鱼、虾及各种水生昆虫为食,有集群繁殖的习性,因此鸥类水鸟也适宜用于湖泊生态系统污染物的监测^[68]。在北美地区有鸥类集群繁殖的五大湖区,Hebert 等^[69]开展了使用银鸥(*Larus argentatus*)卵比较不同湖泊横向之间和单个湖泊时间纵向上多氯联苯污染情况的对比研究。Burger^[70]使用弗氏鸥(*Larus pipixcan*)幼鸟和成鸟的胸部羽毛对其美国北部内陆四个繁殖地的重金属污染情况进行了对比研究,认为1)南达科他州的 Lake Sand 和北达科他州的 Lake Alice 国家级野生动物避难所的弗氏鸥体内 Hg 含量最高;2)除 Se 外,成年个体体内 Hg、Cd、Pb、Cr、Mn 的重金属含量高于幼年个体。

国内尚未有使用繁殖鸥类监测湖泊污染物的研究报道,仅黄海魁等^[71]探讨了昆明地区越冬红嘴鸥(*Larus ridibundus*)与滇池水环境的关系,认为由于滇池富营养化的发展,鱼类小型化明显,且数量相对增加,可能导致喜食小型鱼类红嘴鸥的大量到来,Mitchell 和 Perrow^[3]也认为伴随湖泊营养水平的升高,鱼类生物量的增加,食鱼水鸟的种群数量可能会有所增加。王强和吕宪国^[72]提出,应当重视鸥类等数量较多的广布种在湿地环境评价中作用,鉴于红嘴鸥在我国南方多数富营养淡水湖泊具有较大的越冬种群数量,且与浮游生物相比,更易于数量统计,因此,建议在在我国有自然红嘴鸥分布的富营养湖泊,加强对红嘴鸥越冬种群的数量监测,量化研究红嘴鸥的种群数量变动与湖泊营养水平的关系,探究使用红嘴鸥等水鸟进行富营养湖泊水环境质量综合评价的可行性。

3.3.3 鸬鹚类水鸟 鸬鹚类水鸟多集群活动于沿海、江河及湖泊等水域中,善于潜游捕食鱼类,繁殖期多在海滨悬岩或湖泊沿岸的岩石上结群营巢,适宜用于湖泊生态系统污染物的监测^[68]。Fox 等^[56]以双冠鸬鹚(*Phalacrocorax auritus*)幼鸟喙的畸变情况反映了北美五大湖区多氯联苯的污染状况。我国尚未有相关研究报道。同鸥类水鸟一样,鸬鹚类水鸟在我国的繁殖区域主要分布于东北和西北等人口稀少的地区,而我国的富营养湖泊多分布于人口密集的长江流域等南方地区(主要在东部平原湖区及云贵高原湖区)^[73],因此,在我国南方富营养湖泊地区利用繁殖鸥类、鸬鹚类水鸟监测有害污染物,客观上存在一定的困难,但是在我国东北平原与山地湖区可以考虑开展相关研究。

4 结语

综上所述,水鸟作为构成湖泊生态系统中的成分之一,与湖泊中其它水生生物类群和水环境具有十分紧密的联系。但是,迄今为止,我国以水鸟与湖泊生态系统关系为主的研究报道较少,仅有 Fang 等综述了长江中游地区湖泊过去 50 年来水生植物、鱼类和水鸟的生物多样性变化^[74],国内外研究人员共同在安徽升金湖国家级自然保护区开展了湖泊水生植物与草食性水鸟种群数量变化关系的研究^[16];另外,对太湖和鄱阳湖地区的持久性有毒化学污染物在鹭类水鸟体内的富集状况进行了研究报道^[60-64]。总体来说,我国湖泊生态学研究中仅仅关注于严格的水生生物类群,并没有对湖泊水鸟开展广泛的长期监测,而在当今国际湖泊生态学的研究中,已经有大量的湖泊水鸟与水生植物、鱼类等相互作用的研究报道,并使用多种集群繁殖的食鱼水鸟对湖泊生态系统中的持久性有毒化学污染物的污染状况开展了对比研究。为深入理解湖泊生态系统的多稳态转变机制和反映受污染湖泊的恢复进程,我们建议在我国富营养湖泊的恢复过程中,应重视水鸟在湖泊生态系统中的作用,将其与湖泊生态系统的其它成分作为一个整体进行监测,量化研究水鸟与湖泊水生植物、鱼类和水环境之间的关系。

致谢:感谢我的导师中国科学院昆明动物研究所杨岚研究员,对本文初稿进行审阅并提出宝贵的修改意见,在此谨致谢忱!

5 参考文献

[1] Paszkowski CA, Tonn WM. Community concordance between the fish and aquatic birds of lakes in northern Alberta,

- Canada; the relative importance of environmental and biotic factors. *Freshwater Biology*, 2000, **43**(3):421-437.
- [2] Scheffer M, Hosper SH, Meijer ML *et al.* Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology and Evolution*, 1993, **8**:275-279.
- [3] Mitchell SF, Perrow MR. Interactions between grazing birds and macrophytes. In: Jeppesen E, Søndergaard M, Søndergaard M *et al.* eds. The structuring role of submerged macrophytes in lakes. Ecological Studies 131. New York: Springer Press, 1997:175-196.
- [4] Roomen M, Koffijberg K, Noordhuis R *et al.* Longterm waterbird monitoring in the Netherlands: a tool for policy and management. In: Boere G, Galbraith C, Stroud D eds. Waterbirds around the world. Edinburgh: The Stationery Office, 2006:463-470.
- [5] Neckles HA, Dionne M, Burdick DM *et al.* A monitoring protocol to assess tidal restoration of salt marshes on local and regional scales. *Restoration Ecology*, 2002, **10**:556-563.
- [6] Konisky RA, Burdick DM, Dionne MD *et al.* A regional assessment of salt marsh restoration and monitoring in the Gulf of Maine. *Restoration Ecology*, 2006, **14**:516-525.
- [7] Noordhuis R, van der Molen DT, van den Berg MS. Response of herbivorous water-birds to the return of *Chara* in Lake Veulwemeer, The Netherlands. *Aquatic Botany*, 2002, **72**:349-367.
- [8] 李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用. 湖泊科学, 1997, **9**(2):97-104.
- [9] Fraser LH, Keddy PA. The world's largest wetlands: Ecology and conservation. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [10] Wetlands International. Waterbirds population estimates, 4th ed. Wageningen: Wetlands International, 2006.
- [11] Ma ZJ, Cai YT, Li B *et al.* Managing wetland habitats for waterbirds; an international perspective. *Wetlands*, 2010, **30**:15-27.
- [12] Scheffer M. Multiplicity of stable states in freshwater systems. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**:475-486.
- [13] Hansson LA, Nicolle A, Brönmark C *et al.* Waterfowl, macrophytes, and the clear water state of shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2010, **646**:101-109.
- [14] Moreno-Ostos E, Paracuellos M, de Vicente I *et al.* Response of waterbirds to alternating clear and turbid water phases in two shallow Mediterranean lakes. *Aquatic Ecology*, 2008, **42**(4):701-706.
- [15] Milberg P, Gezelius L, Blindow I *et al.* Submerged vegetation and the variation in the autumn waterfowl community at Lake Takern, southern Sweden. *Ornis Fennica*, 2002, **79**:72-81.
- [16] Fox AD, Cao L, Zhang Y *et al.* Declines in the tuber-feeding waterbird guild at Shengjin Lake National Nature Reserve, China—a barometer of submerged macrophyte collapse. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem*, 2010 (doi: 10.1002/aqc.1154).
- [17] Kiørboe T. Distribution and production of submerged macrophytes in Tipper Grund (Ringkøbing-fjord, Denmark), and the impact of waterfowl grazing. *Journal of Applied Ecology*, 1980, **17**:675-687.
- [18] Marklund O, Sandsten H, Hansson LA *et al.* Effects of waterfowl and fish on submerged vegetation and macroinvertebrates. *Freshwater Biology*, 2002, **47**:2049-2059.
- [19] Hidding B, Bakker ES, Keuper F *et al.* Differences in tolerance of pondweeds and charophytes to vertebrate herbivores in a shallow Baltic estuary. *Aquatic Botany*, 2010, **93**:123-128.
- [20] Perrow MR, Schutten JH, Howes JR *et al.* Interactions between coot (*Fulica atra*) and submerged macrophytes: the role of birds in the restoration process. *Hydrobiologia*, 1997, **342/343**:241-255.
- [21] Sandsten H, Beklioglu M, Ince Ö. Effects of waterfowl, large fish and periphyton on the spring growth of *Potamogeton pectinatus* L. in Lake Mogan, Turkey. *Hydrobiologia*, 2005, **537**:239-248.
- [22] Hilt S. Recovery of *Potamogeton pectinatus* L. stands in a shallow eutrophic lake under a shallow eutrophic lake under extreme grazing pressure. *Hydrobiologia*, 2006, **570**:95-99.
- [23] Weisner SEB, Strand JA, Sandsten H. Mechanisms regulating abundance of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes. *Oecologia*, 1997, **109**:592-599.
- [24] Rodríguez-Villafañe C, Bécares E, Fernández-Aláez M. Waterfowl grazing effects on submerged macrophytes in a shallow Mediterranean lake. *Aquatic Botany*, 2007, **86**(1):25-29.
- [25] Allen J, Nuechterlein G, Buitron D. Resident nongame waterbird use following biomanipulation of a shallow lake. *Journal*

- of Wildlife Management*, 2007, **71**:1158-1162.
- [26] Haas K, Kohler U, Diehl S *et al.* Influence of fish on habitat choice of water birds: a whole system experiment. *Ecology*, 2007, **88**:2915-2925.
- [27] Kloskowski J, Nieoczym M, Polak M *et al.* Habitat selection by breeding waterbirds at ponds with size-structured fish populations. *Naturwissenschaften*, 2010, **97**:673-682.
- [28] Eriksson MOG. Competition between freshwater fish and Goldeneye *Bucephala clangula* for common prey. *Oecologia*, 1979, **41**:99-107.
- [29] Andersson G. Influence of fish on waterfowl and lakes (in Swedish with a summary in English). *Anser*, 1981, **20**:21-34.
- [30] Eadie JM, Keast A. Do goldeneye and perch compete for food? *Oecologia*, 1982, **55**:225-230.
- [31] Pehrsson O. Relationships of food to spatial and temporal breeding strategies of mallards in Sweden. *Journal of Wildlife Management*, 1984, **48**:322-339.
- [32] Bouffard SH, Hanson MA. Fish in waterfowl marshes: waterfowl managers' perspective. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, **25**:146-157.
- [33] Wagner BMA, Hansson LA. Food competition and niche separation between fish and the Red-necked Grebe *Podiceps grise-gena*. *Hydrobiologia*, 1998, **368**:75-81.
- [34] Elmberg J, Dessborn L, Englund G. Presence of fish affects lake use and breeding success in ducks. *Hydrobiologia*, 2010, **641**(1):215-223.
- [35] Lammens EHRR. The central role of fish in lake restoration and management. *Hydrobiologia*, 1999, **396**:191-198.
- [36] Englund G, Johansson F, Olsson TI. Asymmetric competition between distant taxa: poecilid fishes and water striders. *Oecologia*, 1992, **92**:498-502.
- [37] Wetzel RG. Limnology, lake and river ecosystems, 3rd edition. San Diego: Academic Press, 2001.
- [38] Lampert W, Sommer U. Limnology, 2nd edition. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- [39] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [40] Holm TE, Clausen P. Effects of water level management on autumn staging waterbird and macrophyte diversity in three Danish coastal lagoons. *Biodiversity and Conservation*, 2006, **15**:4399-4423.
- [41] Nilsson SG, Nilsson IN. Breeding bird community densities and species richness in lakes. *Oikos*, 1978, **31**:214-221.
- [42] Murphy SM, Kessel B, Vining LJ. Waterfowl populations and limnologic characteristics of taiga ponds. *Journal of Wildlife Management*, 1984, **48**:1156-1163.
- [43] Hoyer MV, Canfield DE Jr. Limnological factors influencing bird abundance and species richness on Florida lakes. *Lake Reservoir Management*, 1990, **6**:132-141.
- [44] Acuna R, Contreras F, Kerekes J. Aquatic bird densities in two coastal lagoon systems in Chiapas State, Mexico, a preliminary assessment. *Hydrobiologia*, 1994, **279/280**:101-106.
- [45] Hoyer MV, Canfield DE Jr. Bird abundance and species richness on Florida lakes: influence of trophic status, lake morphology, and aquatic macrophytes. *Hydrobiologia*, 1994, **279/280**:107-119.
- [46] Suter W. Overwintering waterfowl on Swiss lakes: how are abundance and species richness influenced by trophic status and lake morphology? *Hydrobiologia*, 1994, **279/280**:1-14.
- [47] Nilsson L. Breeding waterfowl in eutrophicated lakes in south Sweden. *Wildfowl*, 1978, **29**:101-110.
- [48] Manny BA, Johnson WC, Wetzel RG. Nutrient additions by waterfowl to lakes and reservoirs: predicting their effects on productivity and water quality. *Hydrobiologia*, 1994, **279/280**:121-132.
- [49] 于秀芳, 张乃明. 昆明翠湖水水质变化特征及影响因素研究. 云南地理环境研究, 2008, **20**(3):38-41.
- [50] Mitchell SF, Wass RT. Food-consumption and fecal deposition of black swans *Cygnus aratus* in a shallow New-Zealand lake. *Hydrobiologia*, 1995, **306**:189-197.
- [51] Luo XJ, Zhang XL, Liu J *et al.* Persistent halogenated compounds in waterbirds from an e-waste recycling region in south China. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(2):306-311.
- [52] Conover MR, Vest JL. Selenium and mercury concentrations in California gulls breeding on the Great Salt Lake, Utah, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2009, **28**(2):324-329.
- [53] Kim J, Koo TH. Heavy metal concentrations in feathers of Korean shorebirds. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, **55**:122-128.

- [54] Teraoka H, Kumagai Y, Iwai H *et al.* Heavy metal contamination status of Japanese cranes (*Grus japonensis*) in East Hokkaido, Japan-Extensive mercury pollution. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, **26**(2):307-312.
- [55] Fox GA, Weseloh DV, Kubiak TJ *et al.* Reproductive outcomes in colonial fish-eating birds: a biomarker for developmental toxicants in Great Lakes food chains: I. historical and ecotoxicological perspectives. *Journal of Great Lakes Research*, 1991, **17**(2):153-157.
- [56] Fox GA, Collins B, Hayakawa E *et al.* Reproductive outcomes in colonial fish-eating birds: a biomarker for developmental toxicants in Great Lakes food chains: II. Spatial variation in the occurrence and prevalence of bill defects in young Double-Crested Cormorants in the Great Lakes, 1979-1987. *Journal of Great Lakes Research*, 1991, **17**(2):158-167.
- [57] Kushlan JA. Colonial waterbirds as bioindicators of environmental change. *Colonial Waterbirds*, 1993, **16**(2):223-251.
- [58] Custer TW, Rattner BA, Orlendorf HM *et al.* Herons and egrets proposed as indicators of estuarine contamination in the United State. *Acta Congr Int Ornithol*, 1991, **20**:2474-2479.
- [59] 李 峰, 丁长青. 持久性有机污染物对鸟类的影响. *动物学杂志*, 2006, **41**(2):128-134.
- [60] 安 琼, 董元华, 王 辉等. 鼈头渚不同年龄夜鹭卵中多氯联苯污染状况及分布特征. *环境科学*, 2004, **25**(2):157-161.
- [61] 董元华, 安 琼, 龚钟明等. 太湖湿地生态系统有机氯污染的夜鹭生物指示. *应用生态学报*, 2002, **13**(2):209-212.
- [62] 董元华, 龚钟明, 王 辉等. 无锡鼈头渚夜鹭体内重金属残留与分布特征. *应用生态学报*, 2002, **13**(2):213-216.
- [63] 阮禄章, 张迎梅, 赵东芹等. 白鹭作为无锡太湖地区环境污染指示生物的研究. *应用生态学报*, 2003, **14**(2):263-268.
- [64] Zhang Y, Ruan L, Fasola M *et al.* Little Egretes (*Egretta Garzetta*) and trace-metal contamination in wetlands of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **118**:355-368.
- [65] Boncompagni E, Muhammad A, Jabeen R *et al.* Egrets as monitors of trace-metal contamination in wetlands of Pakistan. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **45**:399-406.
- [66] Sanpera C, Ruiz X, Jover L *et al.* Persistent organic pollutants in wetlands from Pakistan: using egrets eggs as monitoring tools. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **44**:360-368.
- [67] Malik RN, Zeb N. Assessment of environmental contamination using feathers of *Bubulcus ibis* L., as a biomonitor of heavy metal pollution, Pakistan. *Ecotoxicology*, 2009, **18**:522-536.
- [68] Fox GA, Gilbertson M, Gilman AP *et al.* A rationale for the use of colonial fish-eating birds to monitor the presence of developmental toxicants in Great Lakes Fish. *Journal of Great Lakes Research*, 1991, **17**(2):151-152.
- [69] Hebert CE, Norstrom RJ, Zhu JP *et al.* Historical changes in PCB patterns in Lake Ontario and Green Bay, Lake Michigan, 1971 to 1982, from Herring Gull egg monitoring data. *Journal of Great Lakes Research*, 1999, **25**(1):220-233.
- [70] Burger J. Heavy metal and selenium levels in feathers of Franklin's gulls in interior north America. *The Auk*, 1996, **113**(2):399-407.
- [71] 黄海魁, 朱 江, 杨晓珊. 红嘴鸥与环境关系初探. *云南环境科学*, 1999, **18**(2):10-12.
- [72] 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):274-279.
- [73] 杨桂山, 马荣华, 张 路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 2010, **22**(6):799-810.
- [74] Fang J, Wang Z, Zhao S *et al.* Biodiversity changes in the lakes of the Central Yangtze. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, **4**(7):369-377.