第41卷第5期 水生态学杂志 Vol.41,No.5
2020年 9月 Journal of Hydroecology Sep. 2020

DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.05.013

面向鸟类栖息地保护的洪泽湖湿地植被种植方案研究

邱新天,尹心安,刘洪蕊,秦敬岚,王宇喆

(北京师范大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100875)

摘要:依据鸟类及植物对水位过程的需求提出植物种植方案,为洪泽湖湿地植被恢复及鸟类栖息地保护提供科学依据。选择须浮鸥(夏候鸟)和白骨顶(冬候鸟)为示范保护鸟类,莲、菰、芦苇、水蓼4种挺水植物和眼子菜、苦草、黑藻3种沉水植物作为种植对象,依据洪泽湖湖底高程,结合不同植物的生长水位要求以及植物发挥鸟类觅食及遮蔽两大功能的水位需求,水位过程简化为以3月和7月的水位值确定,将调整3月和7月水位值作为水位过程管理的手段。结果表明:历史极端水位过程下,仅能种植芦苇1种水生植物,对鸟类栖息地恢复作用有限;多年平均水位过程下,可种植植物增加到4种,包括2种挺水植物莲、芦苇和2种沉水植物眼子菜、苦草,有利于扩展鸟类栖息地面积,但可种植植物种类及面积依然有限;优化水位过程下,能种植全部7种水生植物,并有效恢复鸟类栖息地面积。在洪泽湖实际水位调控中,应尽量避免极端水位过程的出现。在多年平均水位过程下,降低3月水位,是优化植物种植方案的有效措施。

关键词:水生植物;鸟类;水位过程;种植设计

中图分类号:X176,X171.4 **文献标志码:**A

文章编号:1674-3075(2020)05-0107-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

淡水湖泊型湿地拥有较大的淡水湖面,有着丰富的生物资源,为鸟类的生存繁衍提供了得天独厚的自然条件,是重要的水鸟栖息地(纪涛,2007)。而湿地植被是鸟类栖息地的重要组成部分,能为鸟类提供食物、隐蔽场所及繁殖场所,直接影响鸟类的生存环境,是最重要的自然因子(康洪莉,2005)。不同水生植物能够为水鸟提供不同的生存环境。一方面,水鸟通常选择在挺水植物旁营建巢穴,以提高隐蔽性,使水鸟主要休息区域与周边环境隔离,降低人为活动的影响(陈庆,2018);另一方面,众多杂食性和植食性水鸟,将沉水植物的块茎冬芽以及底栖生物作为主要食物来源(宋昀微等,2019),而沉水植物又能有效防止底栖生物的退化(蒙仁宪,1979;刘政源等,2001)。此外,水生植物作为初级生产者,能为无脊椎动物提供能量来源,而这些无脊椎动物也可能成为水鸟的食物来源(陈庆,2018)。因此,保障一定面积的水生植物对于鸟类栖息地保护具有重要意义。然而,近年来,由于人类活动的干扰,湖泊湿地生态环境日益退化,植被数量急遽减少,对湖泊湿地候鸟的生存造成了严重威胁(廖丹霞,2014)。

人工种植是恢复水生植物的有效途径。目前,人工种植水生植物已经在实际水体生态修复中得到较多应用。Nickuth(1977)首次提出水生植物的种植会对水环境产生影响。Pressl & perfler(2001)发现,种植水生植物可以显著改善水质。陈小鸟等(2011)运用竹签扦插法、水泥涵管覆土种植法、麻袋沉栽法和箩筐覆土种植法等方法,在淀山湖5 000 m^2的种植区域分3块进行水生植物种植,通过水生植物来吸收水体中的氮、磷等营养物质,从而降低水体富营养化水平。陈飞星等(2002)选取水葫芦等9种水生植物在北京动物园建立种植试验区,探究不同植物对水体的净化效果。毛竹(2016)对石佛寺水库的荷花种植情况及2009-2015年的水质进行全面监测,利用单因子指数评价法、综合指数评价法和水环境容量计算方法,分析了荷花种植对石佛寺水库水质、水环境容量以及生态、社会经济效益的影响。水生植物的种植也常用于植物恢复或景观建设。韩庆泽(2018)采用工程与植物种植措施相结合的方法,建设了滨湖堤岸生态修复和多样性示范带。夏伟(2018)在汾河水生植物景观构建中提出,在种植水生植物时,要根据应用地条件和水生植物本身特征,及需要体现的景观效果,采用不同的种植方式。在北京水环境治理的实际工程中,也逐渐形

收稿日期:2020-07-07

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404504);国家自然科学基金创新研究群体项目(51721093)。

作者简介:邱新天,1996年生,男,硕士研究生,主要从事湖泊生态修复研究。E-mail:qiuxintian@mail.bnu.edu.cn

通信作者:尹心安,男,主要从事生态水利、水生态系统保护与修复研究。E-mail:yinxinan@bnu.edu.cn

成了以水体曝气推流结合水生植物种植的治理思路，一方面水生植物可以吸收部分污染物质，净化水质，同时还可以起到逐步恢复水生态系统的作用，从而增强水体的自净能力(关保华等，2002)。

从已有的植物种植设计案例可以看出，目前水生植物种植主要侧重于对水体的水质影响研究以及具体的种植方法研究，对于植物生长水位需求考虑较少，导致水生植物种植成活率不高。而不同生长类型的植物有不同适宜生长的水深范围，应根据不同的水位深度选择不同的植物类型及植物种类配置栽种(孙红梅等，2008)。水生植物种植深度，即水深适应性，是指水生植物在一定水深范围内能够正常生长发育和繁衍的生态学特性。水生植物根据其类型不同，其种植深度亦有差异(曾爱平等，2008)。对于湖泊而言，水位具有时间差异性和空间差异性，因此，水生植物的种植需要综合考虑植物的水位需求，依据湖泊的水位过程，找到不同植物适宜的种植区域，从而提高种植植物成活率。另一方面，目前的水生植物种植工程主要是面向水质改善或景观改造，对于鸟类栖息地的恢复研究较少，一般只是单纯地扩大栖息地植物面积，没有考虑鸟类对植物结构的需求。因此，以鸟类栖息地保护为种植设计目标时，不仅需要考虑植物是否能够存活，还需要考虑这些植物是否能发挥为鸟类提供食物以及遮蔽、筑巢环境的功能，使水生植物种植设计更有针对性。

本研究以洪泽湖湖底高程图为基础，依据不同水位过程，结合植物的生长水位要求，同时考虑洪泽湖保护鸟类对不同植物的需求，确定不同水位过程下各类植物的可种植区域，并根据洪泽湖鸟类保护目标及现有植被情形确定植被种植方案，为洪泽湖湿地生态修复和鸟类栖息地保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

洪泽湖是中国第4大淡水湖，面积1 597 km^2，平均水深1.77 m(戴洪刚等，2002)。洪泽湖国家湿地自然保护区位于洪泽湖西北部，北纬33°10′40″～33°20′27″、东经118°13′9″～118°28′42″，处于温带和亚热带气候的过渡地带，总面积493.65 km^2(章雷，2008)。洪泽湖湿地保护区有着较大的淡水湖水面积，是一个重要的淡水湖湿地生态系统区域，其丰富的湿地植物为鸟类提供了良好的栖息或觅食地，保护区主要保护对象就是湿地生态系统和珍贵候鸟(翟水晶等，2008)。洪泽湖建闸以后，为保证防洪调蓄和农田灌溉，每年自8、9月至翌年4月关闸蓄水，湖泊水位升高；夏初为环湖农田的用水高峰期，结合防洪要求，需要在雨季来洪之前腾空湖中大部分库容量，这时又必须开闸放水，导致湖泊水位急剧降低，并且这样的低水位要一直持续到雨季到来前；雨季结束再关闸蓄水，水位上升。这样年复一年的调控，导致湖区水生植被大量消失，约2/3的湖区无植物分布(葛一冬等，2015)，对当地鸟类生存构成了较大的威胁。

1.2 鸟类栖息地需求植物及其适宜水位

洪泽湖国家湿地自然保护区是重要的候鸟栖息地，每年都有大量以白骨顶(*Fulica atra*)、斑嘴鸭(*Anas zonorhyncha*)、白额雁(*Anser albifrons*)、白鹤(*Grus leucogeranus*)、小天鹅(*Cygnus columbianus*)等为代表的冬候鸟及以须浮鸥(*Chlidonias hybrida*)、白鹭(*Little Egret*)、池鹭(*Ardeola bacchus*)、水雉(*Hydrophasianus chirurgus*)、震旦鸦雀(*Hydrophasianus chirurgus*)为代表的夏候鸟在此生活繁殖。这些鸟类主要依靠栖息地的水生植物作为食物或筑巢场所。栖息地植被特征对鸟类群落的影响源于不同鸟类对生活环境的选择以及它们对栖息地环境变化的不同反应(Joseph et al，1999)。水生植物的选择，应根据鸟类的实际需求，考虑植物的短缺情况，并尽可能地利用当地优势种(南楠等，2011)。根据2016年版本的《江苏泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区科学考察报告》(王国祥等，2014)，洪泽湖的候鸟中，须浮鸥(夏候鸟)和白骨顶(冬候鸟)是数量最多的鸟类，分别占鸟类总数的39.48%和21.80%，因此，本研究将这2类鸟类作为示范保护鸟类。白骨顶为杂食性鸟类，一般在挺水植物旁筑巢，主要食用眼子菜、苦草、黑藻等植物的冬芽块茎(程鲲，2008)；须浮鸥也为杂食性鸟类，水草是其重要食物来源，一般在芦苇旁筑巢(陈雪龙等，2012)。同时，根据报告(王国祥等，2014)及实地调研，确定芦苇、菰、水蓼、莲等为挺水植物中的优势物种，而眼子菜、苦草、黑藻等也是沉水植物中的主要优势物种，但目前的面积均难以满足水鸟的实际需求。因此，将莲、菰、芦苇、水蓼等4种挺水植物和眼子菜、苦草、黑藻等3种沉水植物作为种植对象。

对于每种水生植物，都存在其正常生长和繁衍的水深范围，只有水深区间在其水深适应性范围内，植物才能存活，从而发挥其鸟类栖息地作用(Pagter，et al，2005；Ahn et al，2007)。7种植物的水深适应范围见表1。

表 1　不同水生植物的水深适应范围

Tab.1　Preferred water depth of different aquatic plants

植物类型	名　　称	水位阈值/m	参考文献
挺水植物	莲 *Nelumbo nucifera*	-0.4～1.2	金晓媚等，2014
	菰 *Zizania latifolia*	-0.1～1.5	胡振鹏等，2010
	芦苇 *Phragmites australis*	-1～3	金晓媚等，2014
	水蓼 *Polygonum hydropiper*	-0.1～1.41	李旭，2010
沉水植物	眼子菜 *Potamogeton distinctus*	0.3～2	李满良，2006
	苦草 *Vallisineria natans*	0.3～4	潘芬，2008
	黑藻 *Hydrilla verticillata*	0.3～1.2	曹昀，2007

鸟类对植被的筑巢及觅食水深有一定的要求。其中，白骨顶筑巢地水深要求为 20～80 cm（程鲲，2008），须浮鸥筑巢地水深要求为 65～116 cm（陈雪龙等，2012）。同时，这些鸟类在以沉水植物为食时，可获取食物的最大水深为 1.5 m，即沉水植物水深不能超过 1.5 m。因此，植物种植区域的水深不仅要满足植物生长的水深需求，也要满足鸟类筑巢与觅食的水深需求。

1.3　植物种植设计方法

1.3.1　水生植物种植设计　应用 GIS 与水位过程相结合进行水生植物种植设计，方法如图 1。首先结合湖底高程数据及水位数据，构建湖泊水深模型。综合鸟类的筑巢及觅食需求，以及各种植物自身的水深适应性，计算得到适宜种植水生植物的区域，并运用 GIS 进行图形展示和面积计算。最后，根据当前的鸟类需求植物情况，确定种植设计方案，从而达到工程设计要求。同时，由于保护区内某些区域已经存在植物，但不能满足鸟类栖息地的需求，因此，将种植方案分为只在水面区域进行扩展种植和在所有区域内进行种植——即可将现有存在的植物替换为其他植物。

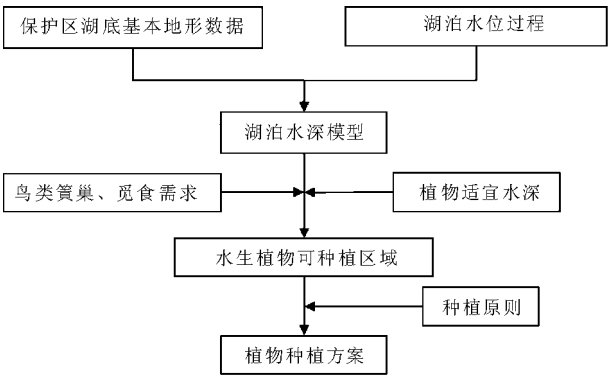


图 1　水生植物种植设计路线

Fig.1　Design flow chart for the planting scheme of aquatic plants

洪泽湖由于人为调控，呈现反季相特征，水位 3-7 月成逐渐下降趋势。而对于水生植物来说，3 月正值种子萌芽期，水位偏高、水下光照不足会抑制其萌发和生长，7 月一般是水生植物生长旺盛期，水位骤降且长期处于低水位会导致挺水植物缺水死亡，面积显著下降，植被覆盖度降低。当 3 月及 7 月水位满足其生长需求，且 4、5、6 月水位在 3 月及 7 月水位范围内，则可认为植物能够存活并发挥鸟类栖息地作用。因此，本研究将水位过程简化为以 3 月和 7 月的水位值确定，将调整 3 月和 7 月水位值作为水位过程管理的手段。

考虑 3 种水位过程：1）历史极端水位过程：将历史多年 3 月水位最高值、7 月水位最低值作为水位过程；2）多年平均水位过程：即将 3 月、7 月的多年平均水位作为水位过程；3）优化水位过程：3 月水位在多年平均水位基础上降低 0.25 m，7 月水位保持多年平均水位（由于洪泽湖防洪限制，7 月份洪水水位为 12.5 m，因此，7 月水位难以增加，从管理者角度出发，可适当降低 3 月水位，为水库调度管理者提供借鉴）。表 2 是 3 种水位过程下 3 月及 7 月水位数值。

表 2　3 种水位过程下的 3 月及 7 月水位值

Tab.2　Water levels in March and July regulated at three water level processes

水位情景	3 月水位/m	7 月水位/m
极端水位过程	13.53	11.54
多年平均水位过程	13.25	12.34
优化水位过程	13.00	12.34

当每种植物的可种植区域确定后，由于各类植物存在可种植区域的交集，所以需要制定种植原则，形成最终的种植结构方案，从而达到工程设计的要求。由于种植设计针对鸟类栖息地保护，需要考虑鸟类的实际需求以及当前的植物短缺情况，从而使种植方案更科学，更具有针对性。通过对保护区 2018 年植被的现场观测及遥感影像解译，目前保护区沉水植物的面积远小于挺水植物的面积。在沉水植物中，黑藻的面积小于眼子菜和苦草；在挺水植物中，菰和水蓼的面积远小于莲、芦苇。因此，制定如

下3条种植原则:1)优先种植沉水植物;2)对水鸟作用相同的植物,优先种植目前面积较小的植物;3)在满足前两条原则的前提下考虑增加物种多样性。基于上述3条原则,确定最终的种植方案。

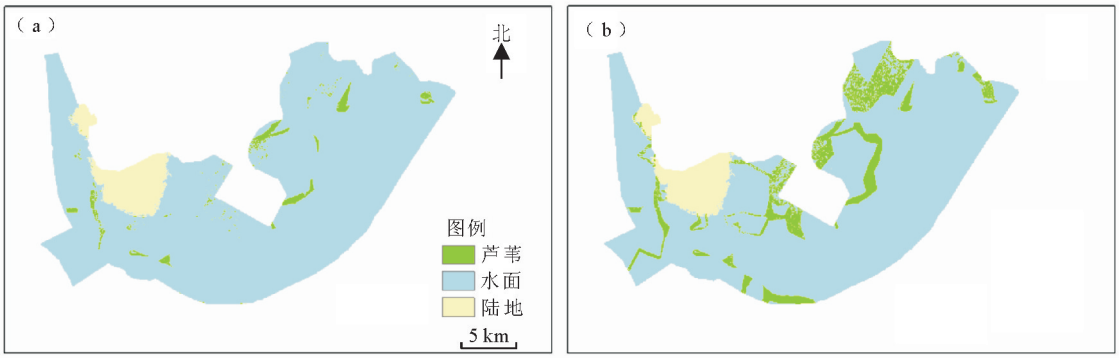
1.3.2　数据分析　将保护区高程数据导入matlab 2016a中,计算不同水位下的各种植物可生长区域及面积,生成ASCII码。利用arcgis10.2软件,将ASCII码转换成GIS的矢量数据,从而得到不同水位不同植物种植区域图,最终形成种植方案。

2　结果与分析

2.1　历史极端水位过程下植物种植方案

图2是历史极端水位过程下植物可种植种类及种植区域。在最不利水位条件下,仅能种植芦苇这1种水生植物。结合表1可以看出,这是由于芦苇的水位适应性阈值最广,这与当前洪泽湖芦苇广泛分布的现状相符,而由于3月水位值过高或7月水位值过低,导致其他6种水生植物均无法存活。对比图2-a与图2-b,当在水面区域进行种植时,可种植面积为10.43 km^2;当以所有区域为种植区时,可种植面积为47.76 km^2,远远高于仅在水面区域种植的面积。推测在这些多余的区域,虽然存在植物但并不符合鸟类栖息地的需求,因此,在植物种植设计时,将鸟类对植物水深的需求考虑进去是必要的。

历史极端水位是反季相特征最为明显的水位过程,与大多数水生植物生长节律严重相悖。在历史极端水位过程下,由于只能种植1种水生植物,考虑到当前洪泽湖自然保护区芦苇面积较多,因此,为节约成本,采取只在水面区域种植这一方案(图2-a),可以实现鸟类筑巢遮蔽区域面积增加10.43 km^2。同时,可以看出,历史极端水位过程下,由于现有芦苇面积较大,而沉水植物缺少,这对于主要食用沉水植物块茎、冬芽的植食性水鸟来说,虽然筑巢遮蔽面积增大,但无法增加其食物来源,对于鸟类栖息地的增加作用有限。因此,该种植方案可作为应对极端水位出现的一种应急方案。在洪泽湖实际水位调控中,应尽量避免极端水位过程的出现。



(a)在水面区域种植;(b)在所有区域种植

图2　极端水位过程下植物可生长区域

(a) Planting in water; (b) Planting in all areas

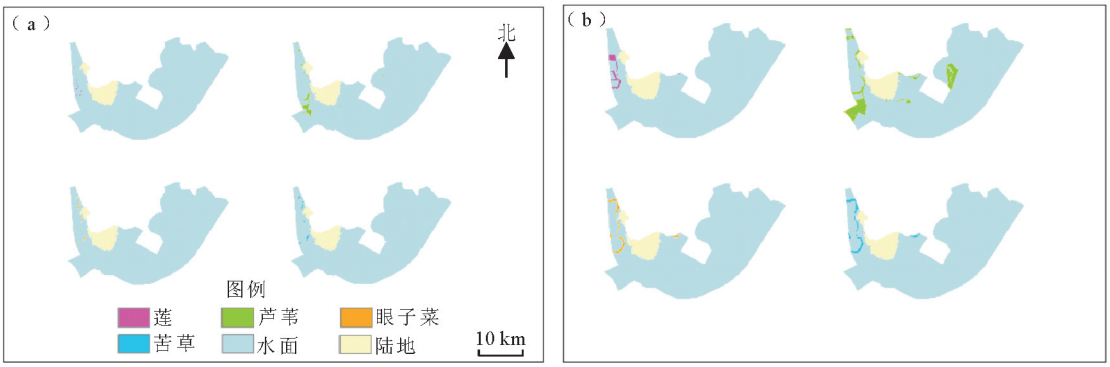
Fig.2　Plantable areas for hydrophytic plants at the extreme water level

2.2　多年平均水位过程下植物种植方案

图3是多年平均水位过程下植物可种植种类及种植区域。在多年平均水位过程下,可种植植物增加到4种,包括2种挺水植物莲、芦苇和2种沉水植物眼子菜、苦草。当以无植物区作为种植区时,4种植物的可种植面积分别为0.46、4.54、0.95和0.95 km^2;当以所有区域作为种植区时,4种植物的可种植面积分别为4.10、23.63、4.43和4.47 km^2。可以看出,相较于历史极端水位,虽然挺水植物可种植面积有所减少,但增加了较多的沉水植物可种植面积,有利于缓解洪泽湖保护区沉水植物缺少的现状。当所有区域都作为种植面积时,可种植面积的增加比仅在非植物区种植大幅增加,有利于鸟类栖息地面积的增加。但同时也可以看出,在多年平均水位过程下,可种植植物种类及面积依然有限,因此,对水位过程进行优化,将有利于植物种植种类及面积的扩增。

在多年平均水位过程下,由于只在水面区域种植,面积过小难以有效提高栖息地面积,因此,选择在所有区域进行种植。依据种植原则,应优先种植沉水植物,即眼子菜和苦草2种水生植物。由图3可以看出,眼子菜及苦草可种植区域基本重叠,由于二者发挥作用相同,且现存面积接近,因此,在这些区域,可分别种植一半面积的眼子菜和苦草。芦苇

与 2 种沉水植物可种植区域存在重叠，在重叠区域之外种植芦苇。莲与 3 种植物可种植区不存在重叠，因此在该区域全部种植芦苇。在该种植方案下，鸟类筑巢遮蔽面积可增加约 23 km^2，鸟类觅食面积可增加 4.47 km^2，在不对洪泽湖保护区进行水位调控情况下，能有效增加保护区鸟类栖息地。



(a)在水面区域种植；(b)在所有区域种植

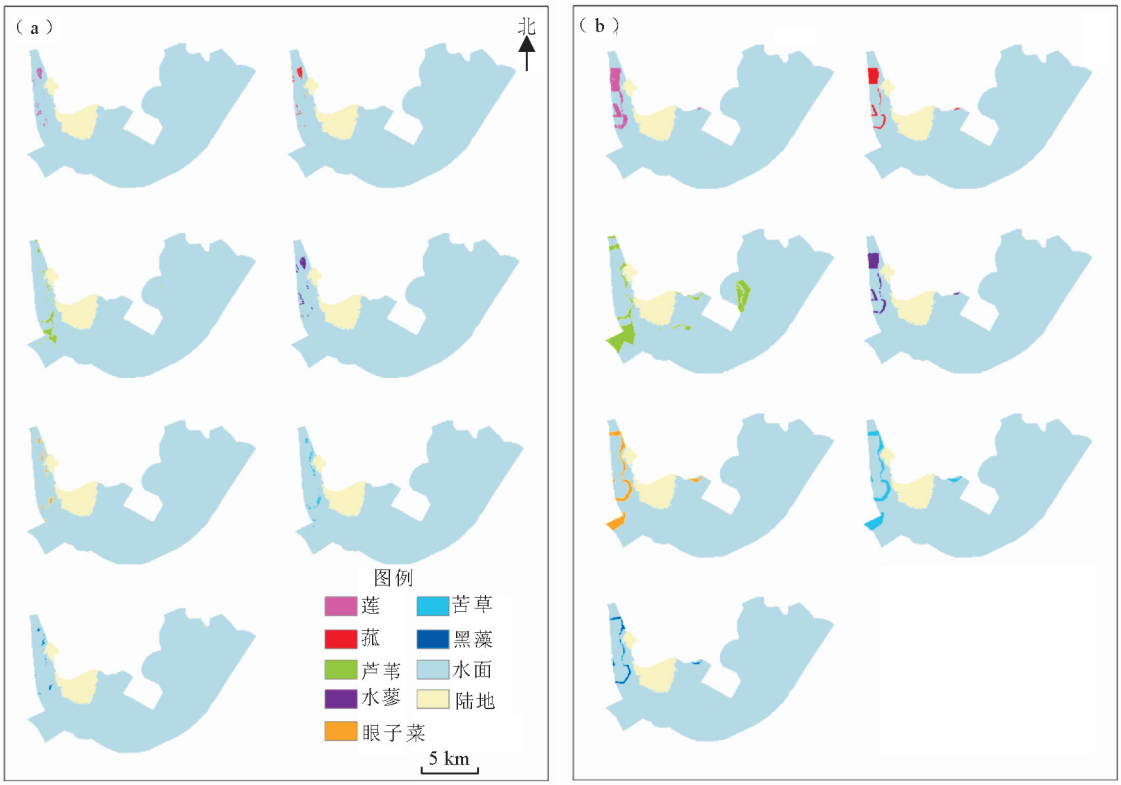
图 3　多年平均水位过程下植物可生长区域

(a) Planting in water; (b) Planting in all areas

Fig.3　Plantable areas for hydrophytic plants at the annual average water level

2.3　优化水位过程下植被种植方案

图 4 是优化水位过程下植物可种植种类及种植区域。在优化水位过程下，可种植莲、菰、芦苇、水蓼、眼子菜、苦草、黑藻 7 种水生植物。当以无植物区作为种植区时，7 种植物的可种植面积分别为 2.09、1.62、4.54、1.62、1.94、1.94 和 0.81 km^2；当以所有区域作为种植区时，4 种植物的可种植面积分别为 10.72、6.60、23.63、6.16、11.89、11.97 和 3.79 km^2。与图 3 进行比较，在降低 3 月水位值的优化水位过程下，可种植的植物种类和面积均有显



(a)在水面区域种植；(b)在所有区域种植

图 4　优化水位过程下植物可生长区域

(a) Planting in water; (b) Planting in all areas

Fig.4　Plantable areas for hydrophytic plants at the optimal water level

著增加。因此,在多年平均水位过程下,降低3月水位,是优化植物种植方案的有效措施。同时,在沉水植物中增加了黑藻这一当前面积较少的鸟类觅食植物,在挺水植物中增加了菰、水蓼这2种较为缺少的鸟类遮蔽植物,对于鸟类栖息地的改善具有重要作用。

与多年平均水位过程相似,优化水位过程下只在水面区域种植所增加植物面积依然有限,因此,考虑在所有区域进行种植,优先种植沉水植物。在沉水植物中,考虑到黑藻现有面积较少,因此,在黑藻与眼子菜及苦草的重叠区优先种植黑藻,其余区域分半种植眼子菜和苦草。挺水植物中,优先种植菰和水蓼,由于两者面积基本重叠,可分别种植一半面积,其余区域依次优先种植莲、芦苇。该方案将水位管理与植物种植相结合,在该种植方案下,鸟类筑巢遮蔽面积可增加约22 km^2,鸟类觅食面积可增加约12 km^2,相比于多年平均水位过程下的种植方案,大大增加了可种植植物种类和沉水植物的种植面积,在实现鸟类栖息地恢复的同时,能有效增加植物多样性,优化湿地保护区的植物结构。

3 讨论

以往的水生植物种植管理研究,往往着眼于改善湿地或湖泊的水质(秦伯强等,2007),因此更加关注植物的数量(即植物面积),而对植物的类型、结构和分布关注较少。然而,湿地水鸟由于其自身生活习性,对于栖息地遮蔽与觅食植物存在水位要求。因此,在面向水鸟栖息地的水生植物种植方案确定过程中,需要将水鸟对水生植物的水位需求考虑进去。另一方面,水位过程可以显著影响水生植物的生长和分布,是影响种植结构的关键因素(Kors et al,2012)。水位过程的变化导致湿地不同区域的水深发生变化,导致可种植植物种类和面积发生变化,并影响种植结构(Xu et al,2014)。因此,水位过程是影响植物种植方案的关键因素。

本研究,在历史极端水位过程、多年平均水位过程以及优化水位过程3种情形下,可种植水生植物种类分别为1、4和7种。但相较于后2种水位情景,历史极端水位过程下的植物可种植面积明显要多,历史极端水位更加适于芦苇的生长,而不利于其他水生植物的生存。但历史极端水位过程下只能增加水鸟筑巢地面积,而不利于增加沉水植物面积,限制了杂食性尤其是植食性水鸟的食物来源,对鸟类栖息地改善作用有限;多年平均水位过程下的植物种植方案,兼顾了鸟类的筑巢需求与食物需求,但该水位过程依然不能满足菰、水蓼、黑藻这3种水生植物的种植要求,不利于增加生物多样性,且种植面积相对有限,是不进行水位过程调整情况下的常规方案;优化水位过程依据植物种植对水位的需求,对水位过程进行调整,使得水生植物可种植种类和面积都有效增加,是增加鸟类栖息地面积、优化栖息地结构的最优方案,也为水位过程管理与植物种植相结合提供借鉴。

尽管本研究充分考虑了水鸟栖息地和植物生长的需要,但仍存在一些不足。在目标鸟类的选择上,选择了2种代表性鸟类作为保护目标,没有考虑到所有水鸟;此外,植物生长不仅与水位有关,与其他环境要素也息息相关,如光照、水温、水质变化、养分富集、沉积物组成和水位波动(Dawson et al,1999),这些因素也会影响植物群落的分布和组成。未来的研究中可以同时将湖泊水动力、水质因素与适宜种植水深因素进行叠加,通过多目标综合分析,给出适宜水生植物生长的区域,使得水生植物种植设计更有针对性,给出不同情境的种植方案。

参考文献

曹昀,2007.江滩湿地植物恢复的影响因子与技术研究[D].南京:南京师范大学.

程鲲,2008.自然保护区生态旅游特征界定及旅游活动对白骨顶繁殖行为的影响[D].哈尔滨:东北林业大学.

陈庆,2018.水鸟栖息地影响因素及修复技术研究综述[J].湿地科学与管理,14(4):59-63.

陈小鸟,王海珍,2011.人工种植水生植物对淀山湖水质的影响研究[J].环境科学与技术,34(5):30-34.

陈雪龙,杨焕民,齐艳萍,等,2012.大庆龙凤湿地须浮鸥巢址选择研究[J].湿地科学,10(3):339-343.

陈飞星,朱斌,2002.利用水生植物改善北京动物园水环境的研究初探[J].上海环境科学,(8):469-472,510.

戴洪刚,杨志军,2002.洪泽湖湿地生态调查研究与保护对策[J].环境科学与技术,(2):37-39,50.

葛一冬,刘得潭,甘敏,2015.洪泽湖建闸和南水北调东线工程对洪泽湖生态的影响[J].科技致富向导,(8):164-164.

关保华,葛滢,常杰,等,2002.富营养化水体中植物的元素吸收与净化能力的关系[J].浙江大学学报(理学版),(2):190-197.

韩庆泽,2018.南四湖湖滨带植被过滤带的生态效应研究[D].济南:山东大学.

胡振鹏,葛刚,刘成林,等,2010.鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究[J].长江流域资源与环境,19

(6):597－605.

纪涛，2007.洪泽湖湿地国家级自然保护区物种多样性与生态规划研究[D].南京：南京林业大学.

金晓媚，刘金韬，夏薇，2014.柴达木盆地乌图美仁区植被覆盖率变化及其与地下水的关系[J].地学前缘，21(4)：100－106.

康洪莉，2005.武汉沉湖湿地鸟类群落与生境之关系及保护研究[D].武汉：武汉大学.

李旭，2010.洞庭湖典型湿地植被特征及其分布的环境解释[D].长沙：湖南农业大学.

李满良，2006.北京湿地主要植物群落对水因子的响应[D].北京：首都师范大学.

廖丹霞，2014.洞庭湖湿地生态环境演变及其对候鸟栖息地的影响研究[D].长沙：湖南师范大学.

刘政源，徐文彬，王岐山，2001.白头鹤在升金湖上湖越冬期环境容纳量的研究[J].长江流域资源与环境，10(5)：454－459.

蒙仁宪，1979.升金湖的水生植物[J].安徽大学学报(自然科学版)，3(1)：71－80.

毛竹，2016.荷花种植对滞洪型水库水体环境质量及生态效益的影响[D].沈阳：沈阳农业大学.

南楠，张波，李海东，等，2011.洪泽湖湿地主要植物群落的水质净化能力研究[J].水土保持研究，18(1)：228－231，235.

潘芬，2008.淡水森林湿地植被恢复与构建适生树种筛选研究[D].北京：中国林业科学研究院.

秦伯强，2007.富营养化湖泊开敞水域水质净化的生态工程试验研究[J].环境科学学报，(1)：1－4.

孙红梅，李霄宇，郝建清，2008.对水生植物配置及种植设计的几点体会[J].河北林业，(2)：29.

宋昀微，周立志，2019.生境变化对升金湖越冬水鸟群落时空动态的影响[J].安徽农业大学学报，46(4)：610－617.

王国祥，马向东，常青，2014.洪泽湖湿地：江苏泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区科学考察报告[M].北京：科学出版社.

夏伟，2018.水生植物在太原汾河景区景观建设中的应用分析[D].晋中：山西农业大学.

章雷，2008.洪泽湖湿地国家级自然保护区生态旅游开发研究[J].中国林业经济，(3)：9－11.

翟水晶，胡维平，钱谊，2008.江苏泗洪洪泽湖湿地自然保护区生态服务功能价值评估[J].生态与农村环境学报，(1)：24－28.

曾爱平，刘洪见，徐晓薇，等，2008.水生植物的种植与栽后管理[J].农业科技通讯，(11)：172－173.

Ahn C，Moser K F，Sparks R E，et al，2007. Developing a dynamic model to predict the recruitment and early survival of black willow (salix nigra) in response to different hydrologic conditions [J]. Ecological Modelling，204(3/4)：315－325.

Dawson F H，Szoszkiewicz K，1999. Relationships of some ecological factors with the associations of vegetation in British rivers [J]. Hydrobiologia，415：117－122.

Joseph M，Wunderle，Jr M，1999. Avian distribution in Dominican shade coffe plantation：Area and habitat relationships [J].Journal of Field Ornithol，70(1)：58－70.

Kors A，Vilbaste S，Kairo K，et al，2012. Temporal changes in the composition of macrophyte communities and environmental factors governing the distribution of aquatic plants in an unregulated lowland river (Emajogi，Estonia) [J]. Boreal Environment Research，17(6)：460－473.

Nickuth R，1977. Degardation and incorporation of nutrients from rural wastewaters by plant rhizosphere under Limnis Conditions [M]. Leiden，the Netherlands：Back－guys Publishers.

Pagter M，Bragato C，Brix H，2005. Tolerance and physiological responses of Phragmites australis to water deficit [J]. Aquatic Botany，(81)：285－299.

Pressl A，Perfler R，2001. Studies on the hydraulic pattern of the vertical-flow constructed wetland [J]. Acta scientiae sircumstantantlae，6(21)：720－725.

Xu Z H，Yin X A，Yang Z F，2014. An optimisation approach for shallow lake restoration through macrophyte management [J]. Hydrology and Earth System Sciences，18(6)：2167.

（责任编辑　张俊友　郑金秀）

Optimized Scheme for Planting Aquatic Plants to Protect Waterfowl Habitat in Hongze Lake Wetland

QIU Xin-tian, YIN Xin-an, LIU Hong-rui, QIN Jing-lan, WANG Yu-zhe

(State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

Abstract: Planting aquatic plants is an important means for restoring waterfowl habitat. The planting design of aquatic plants for lakes has been primarily aimed at water quality control. Little research has focused on waterfowl habitat protection and the effect of water level on planting success. In this research, we took Hongze Lake National Wetland Nature Reserve as a case study and proposed a new planting scheme for aquatic plants used to restore waterbird habitat that considered lake water level along with plant growth characteristics. The summer bird *Chlidonias hybrida* and winter bird *Fulica atra* were selected as the target species and seven aquatic plants were selected for planting, based on the needs of local waterbird habitat and plant conditions in the reserve. Based on the lake bottom elevation of Hongze Lake and the water level requirements of different plants, the planting scheme was intended to provide waterbird forage and shelter under three water level regimes: historical extreme water level (lowest in July and highest in March), historical average water level and the optimal water level. Only one aquatic plant, *Phragmites australis*, was suitable for planting at the historical extreme water level and had little effect on the restoration of waterbird habitat. Four species were suitable at the historical average water level and were beneficial for waterbird habitat restoration. All seven species could be planted at the optimal water level and waterbird habit restoration was the most successful. Based on the water levels preferred by waterbirds and aquatic plants, we recommend that the water level of Hongze Lake should be regulated so as to avoid extremes. Decreasing the water level in March, with an otherwise average water level, is optimal for planting aquatic plants. This study provides a reference for restoring vegetation and protecting waterbird habitat in the Hongze Lake wetland.

Key words: aquatic plant; waterbirds; water level process; planting scheme