

以水鸟保育为目标的水稻田构建技术及效果评估^{*1}

谢汉宾^{1, 2} 莫英敏¹ 张姚¹ 张伟¹ 李贲¹ 汤臣栋³ 王天厚^{1*}

(1. 华东师范大学生命科学学院, 上海 200062;

2. 上海科技馆上海自然博物馆自然史研究中心, 上海 200041;

3. 上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区, 上海 202183)

【摘要】:海岸带自然湿地具有重要的水鸟保育价值。近年来,大规模的海岸带围垦造成了海岸带自然湿地的消失和质量退化,导致水鸟栖息地面积和质量的急剧下降,严重降低了水鸟的保育效果。海岸带自然湿地围垦后,部分转化为水鸟保育效果较差的工业模式水稻田。提升水稻田的水鸟保育效果,关键在于改善水稻田的构建技术。根据海岸带水稻田的种植管理模式和水鸟的生境选择特点,提出了一种以水鸟保育为目标的水稻田构建技术,以生态工程手段提升水稻田的水鸟保育效果。该技术的核心内容为在水稻田中构建水池单元,并设置生境小岛等功能组件,建立水稻田复合生态系统,实现多种种植和养殖。在满足水稻田生产管理需要的同时,为水鸟提供丰富的食物和适宜的多样性栖息场所。为验证该技术的水鸟保育效果,2013年夏季在崇明东滩依此技术构建了10hm²水稻试验田。2013年秋季至2014年春季,对比工业模式水稻田,各选取总面积10hm²的调查样方,开展一个完整年度的水鸟群落调查,每个季度调查5次,共计15次水鸟调查。水稻试验田共记录到水鸟34种,平均密度为41.87±6.62只/hm²;工业模式水稻田共记录到水鸟12种,平均密度为2.08±0.45只/hm²,水稻试验田的水鸟种类和密度均显著高于工业模式水稻田。结果表明,水稻田构建技术能够显著增加水稻田的水鸟种类和数量,提升水稻田的水鸟保育效果,从而弥补海岸带自然湿地缺失对水鸟造成的影响。水稻田构建技术可以为海岸带水稻田的水鸟保育工作提供了科学依据,同时为海岸带受损湿地的修复和水鸟栖息地的优化改造提供了参考案例。

【关键词】:水稻田;水鸟保育;农田系统;构建技术;崇明东滩

【中图分类号】:Q958 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2017)11-1919-09

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201711021

海岸带是生物多样性较高的地区^[1],海岸带湿地为水鸟提供了重要的繁殖、中转和越冬栖息地^[2],中国海岸带湿地支撑了200余种水鸟^[3]。为满足经济快速发展对土地的需求,中国大量的海岸带湿地被围垦^[1],1950~2008年,中国围垦总面积为13380km²^[4]。自1949年以来,中国海岸带湿地面积急剧下降,累计减少约22000km²,约占中国海岸带湿地总面积的51.2%^[5]。水鸟位于

¹收稿日期:2017-02-22;修回日期:2017-05-21

基金项目:上海市科委基金项目(12231204703) [Science and Technology Commission of Shanghai Municipality(12231204703)]

作者简介:谢汉宾(1987~),男,博士研究生,主要研究方向为鸟类生态学和湿地生态学。E-mail:xiehanbinsd@126.com

*通讯作者 E-mail:thwang@bio.ecnu.edu.cn

食物链的较高等级，是湿地生态系统的关键物种，能起到判断湿地健康与否的指示性作用^[6]。围垦造成了海岸带湿地的消失或质量下降^[1]，导致湿地生态系统功能不断退化^[7]，造成水鸟栖息地丧失^[8]，对鸟类群落结构组成产生影响^[1, 3]，导致水鸟数量下降^[1, 9]，或迫使水鸟迁移到邻近的栖息地^[8]。

围垦后的海岸带湿地主要转变为农田、城市和工业用地^[10]，部分转变为水稻田^[3]。研究表明，水稻田可以为迁徙和越冬水鸟提供食物^[11, 12]和适宜栖息场所^[13, 14]，也能对一些繁殖鸟类提供适宜的繁殖条件^[15]。自然湿地数量和质量下降以后，水稻田作为主要的湿地生境显得尤为重要^[12~16]。Natuhara 等^[17]指出，水稻田可以提供类似自然湿地的生态服务功能。Elphick 等^[18~21]研究加州水稻田的水鸟时，指出适当管理的水稻田能成为水鸟重要的栖息地和繁殖场所。同时，适当管理可以提高水稻田的生态系统多样性^[22]。

研究表明，水稻田的管理模式和景观结构影响水稻田的水鸟保育效果^[22, 23]。中国海岸带湿地围垦后转变而来的水稻田，多为工业模式水稻田，生境单一，冬季抛荒，人为干扰较强^[24]。水稻田冬季抛荒，严重制约了水稻田的水鸟保育效果^[14, 18, 24]，使水稻田不能完全取代自然湿地的水鸟保育作用^[14, 25]。水稻田的管理模式，尤其是水稻田构建技术，严重制约了水稻田的水鸟保育效果^[23, 26]。

不同类群水鸟对栖息地生境的要求差异显著^[24, 27]，水位是影响水鸟栖息地选择的关键因子^[27~30]。由于体型、喙长、颈长、腿长等因素^[29, 30]，不同类群水鸟对水域面积和水深的需求不同^[31~34]。通过地形构建，创设梯度变化的水位，可以满足不同类群水鸟的多样水文条件需求。水鸟的食物需求多样化，包括植物性食物和动物性食物^[33~35]，要求栖息地兼具陆域生境和水域生境，实现陆生植物、水生植物和水生动物的多种种植养殖，为水鸟提供丰富的食物来源。人为干扰影响水鸟的觅食等行为^[9, 24, 34]，一定高度的植被能降低人为干扰对水鸟的影响^[33~35]，要求栖息地具有较高的隐蔽条件。综上，水鸟栖息地的构建必须满足不同类群水鸟的多样化生境需求，包括多样的水文条件，丰富的食物来源，一定的隐蔽条件等。

崇明东滩，是东亚—澳大利西亚鸟类迁飞路线上重要的中途停歇地，也是雁鸭类重要的越冬场所^[29, 30]。研究表明，崇明东滩的水鸟类群春秋季节以迁徙的鸕鹚类为主，冬季以越冬的雁鸭类和鸕鹚类为主^[30~32]。崇明东滩海岸带湿地由 1988 年的 41310hm²下降到 2002 年的 36669hm²，其中 11%转化为农业用地^[3]，围垦后形成的水稻田皆为工业模式水稻田。

如何提升海岸带水稻田的水鸟保育价值，尤其是提升工业模式水稻田的水鸟保育价值，亟待研究^[23, 36]。本研究提出了以水鸟保育为目标的水稻田构建技术，并依照此技术构建水稻试验田，开展水鸟调查，评估该技术的水鸟保育效果。本研究创新性地提出以生态工程手段提升水稻田的水鸟保育效果，弥补自然湿地缺失对水鸟造成的影响，为受损自然湿地的恢复和水鸟栖息地的优化改造提供了参考案例。

1 研究方法

本研究的设计思路为：总结水稻田的常规种植管理模式和不同水鸟类群的生境要求，从而提出既满足水稻田生产管理需要，又能提升水鸟保育效果的水稻田构建技术。按照提出的水稻田构建技术，构建水稻试验田，对比工业模式水稻田，进行水鸟种类和数量调查，从而评估该技术的水鸟保育效果。

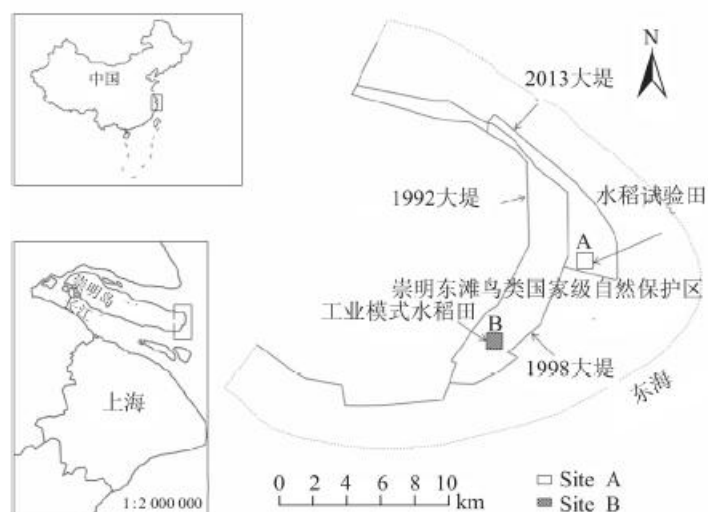
1.1 提出以水鸟保育为目标的水稻田构建技术

采用文献资料查阅并结合实地考察的方法，总结水稻田种植管理模式，包括地形构建、水系和道路系统设置、种植和管理等。根据已有研究成果，总结不同类群水鸟的生境选择特点，包括食物需求、水文条件和景观条件需求等。从而提出既满足水稻田生产管理需要，又能提升水鸟保育效果的水稻田构建技术。

1.2 水稻田构建技术的水鸟保育效果的评估

1.2.1 研究区域

为验证水稻田构建技术的水鸟保育效果，2013 年夏季在崇明东滩按照此技术构建了 10hm² 水稻试验田，对比工业模式水稻田(图 1)，并开展一个完整年度的水鸟调查。



Site A: 水稻试验田, 总面积 10 hm²; Site B: 工业模式水稻田, 总面积 600 hm²; Site A 和 Site B 均选取 10 hm² 的调查样方。

图 1 研究区域

Fig. 1 Study Region

崇明东滩(31° 25′ ~31° 38′ N, 121° 50′ ~122° 05′ E), 位于长江入海口的崇明岛最东段(图 1), 是我国规模最大、最为典型的河口型潮汐滩涂湿地之一, 也是拉姆萨国际重要湿地之一^[37], 属于全球 50 大生态敏感区之一^[38]。本区域为亚热带季风气候, 年平均温度为 15.7~15.9℃, 年平均降雨量约为 1273mm, 日照时长为 2038h, 无霜期为 244d^[39]。崇明东滩海岸带湿地围垦后, 部分转变工业模式水稻田^[3] (图 1)。

水稻试验田(SiteA), 位于崇明东滩 1998 大堤外围的崇明东滩鸟类国家级自然保护区的试验区, 保护区试验区的总面积为 200hm², 主要生境为开阔水域、芦苇光滩和裸地等。按照提出的水稻田构建技术, 在此区域构建了 10hm²水稻试验田, 水稻试验田由 15 个面积为 0.5~1.0hm²的小面积水稻田组成。

工业模式水稻田(SiteB), 位于崇明东滩 1998 大堤内侧的耀全农场, 与水稻试验田(SiteA)仅以 1998 大堤相隔, 总面积为 600hm², 为工业模式水稻田, 属于机械化生产的集约型大规模农场, 生境单一。5 月份开始种植水稻, 11 月份收割, 收割后持续抛荒(部分地块种植蚕豆等旱生作物)直至次年 5 月份的下一轮水稻种植^[24]。

本研究将总面积为 10hm² 的 15 个小面积水稻试验田作为一个调查样本。为保证取样的系统性和科学性, 选择总面积为 10hm² 的 15 个面积为 0.5~1.0hm²的小面积工业模式水稻田作为一个对比样本。同期开展水鸟调查, 对比研究水稻试验田的水鸟保育

效果。

1.2.2 水鸟调查方法

根据崇明东滩水鸟的栖息时间段,将四季划分如下:秋季(南迁季)(8月中旬~11月初),冬季(越冬季)(11月~次年三月中旬),春季(北迁季)(3月中旬~5月中旬)、夏季(繁殖季)(5月中旬~8月中旬)^[29, 30]。研究表明,崇明东滩的水鸟主要出现在春季、秋季和冬季,夏季较少^[2, 30, 40, 41]。因此,本研究选择2013年秋季、冬季和2014年春季,从2013年8月中旬至2014年5月中旬,开展一个完整年度的水鸟调查。

水鸟调查每半个月进行一次,一个季度有效调查5次,总计15次水鸟调查。调查当日尽可能避免恶劣天气,一般从7:00开始,18:00结束。水稻田的水鸟调查,沿水稻田周围的田埂和道路进行^[13]。水鸟计数时,统计调查区域内停留的水鸟,飞过的水鸟不记录。为确保统计数据的准确性,采用最大值保留法统计水鸟数量,即数次统计数据中的最大值代表水鸟出现的数量^[42]。

参考已有研究[9, 40, 41],将崇明东滩水稻田的水鸟类群划分为4大类:鸻鹬类(Charadriidae)、雁鸭类(Anatidae)、鹭类(Ardeidae)和其他类(Others)。其中,其他类为小(Tachybaptus ruficollis)、黑水鸡(Gallinula chloropus)、骨顶鸡(Fulica atra)和普通鸬鹚(Phalacrocorax carbo)等其他目水鸟。

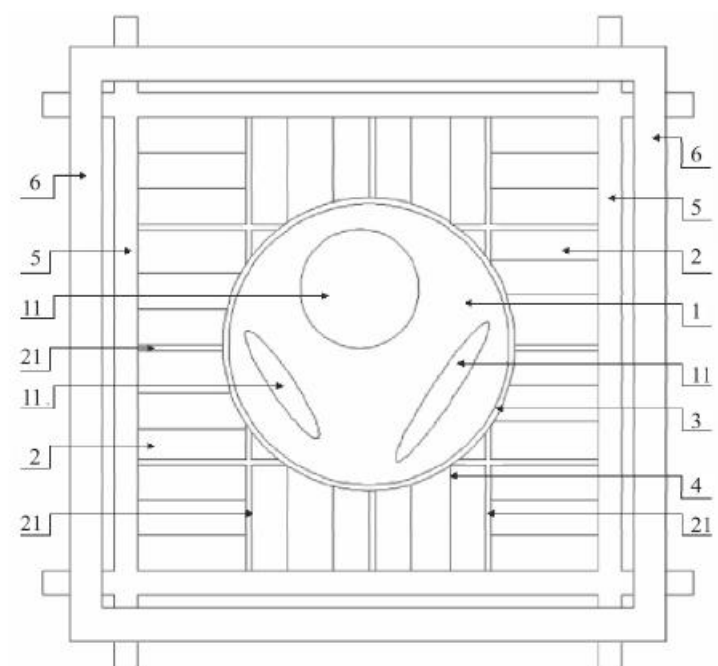
1.2.3 数据统计分析方法

统计水鸟的种类和密度。根据调查区域的面积,计算水稻试验田和工业模式水稻田的水鸟密度,以平均值±标准误(Mean±SE)表示,单位为:只/hm²。数据进行差异性分析时,先进行正态分布检验,然后进行t检验。如果不符合正态分布,对数据进行转换,转换后仍不符合正态分布,进行Kruskal-WallisH法非参数检验^[24]。p<0.05认为差异显著,p<0.01认为差异极显著。数据处理在SPSS20.0软件进行。

2 研究结果

2.1 以水鸟保育为目标的水稻田构建技术

本研究总结海岸带水稻田的种植管理经验,结合水鸟的生境选择特点,遵照生态工程的系统性和整体性要求,提出了既能满足水稻田生产管理需要,又能提升水鸟保育效果的水稻田构建技术(图2)。水稻田构建技术的核心内容为在水稻田中设置开阔水域和生境小岛等功能组件,主要结构包括水池单元(开阔水域和生境小岛)、种植单元(水稻田)、隔断单元(围堰、田埂和生态驳岸)与水位控制单元(引水渠和小排水渠)(图2)。水稻田构建技术的生态工程学原理为:构建种植单元和水位控制单位,满足水稻田的生产管理需要;构建水池单元和生态驳岸,为水鸟提供开阔水域和梯度变化的水位,满足水鸟对水文条件的要求;构建生境小岛,为水鸟提供陆域停歇场所;同时,陆域生境和水域生境的构建,加以水生植被和陆生植被的梯度配置,并进行水生动物养殖,为水鸟提供多样的栖息生境和丰富的食物来源。



1 开阔水域, 2 水稻田, 3 生态驳岸, 4 小排水渠, 5 引水渠, 6 围堰, 11 生境小岛, 21 田埂.

图2 以水鸟保育为目标的水稻田构建技术模式图

Fig. 2 Structure of Rice Paddies for Waterbird Conservation

水稻田结构单元整体为正方形(图2), 参照常规水稻田, 面积一般控制在 $0.5\sim 1.0\text{hm}^2$, 可以根据实际情况合理调整。水池单元设置生境小岛, 种植单元设置在水池单元外围, 水位控制单元用于调节种植单元的水位(图2)。水池单元与水稻种植单元的面积比例控制在为 $1:3\sim 1:2$ 。水池单元形状不规则, 以圆形或椭圆形为宜, 增加水陆交界面积, 提升边缘效应。

水池单元中设置多个大小和形状不同的生境小岛(图2), 供水鸟停歇驻足。生境小岛的总面积和开阔水域的面积比例控制在 $1:4\sim 1:3$ 。开阔水域和水稻田的交界处, 以及生态小岛和开阔水域的交界处均设置生态驳岸。生态驳岸的坡度小于 30° , 为具有浅水区域和梯度水位变化的水域坡岸。

为满足水稻田的生产管理需要, 结构单元的外围设置围堰(图2), 围堰上设置道路, 方便人员和车辆通行。引水渠位于围堰的两侧、水稻田的外围(图2), 通过水闸与水稻田连通, 根据水稻的生长需要, 为水稻田提供灌溉用水, 也可将水稻田存水排出。水稻田结构单元中的围堰与外部道路连通, 引水渠与外部水源连通, 从而构成了水稻田系统的结构完整性。

根据水稻田的生产管理实际, 参考水稻田的常规管理模式, 水稻田中设置宽 $0.5\sim 1.0\text{m}$, 高 $0.2\sim 0.3\text{m}$ 的土质田埂, 分割细划水稻田, 有利于水稻田水位的精准控制(图2)。水稻田设置宽 $0.1\sim 0.2\text{m}$, 深 $0.1\sim 0.2\text{m}$ 的小排水渠, 有利于水稻田积水的及时排出(图2)。

2.2 水稻田构建技术的水鸟保育效果

为验证水稻田构建技术的水鸟保育效果, 2013年夏季在崇明东滩依此技术构建了 10hm^2 水稻试验田(图1), 对比工业模式水稻田, 开展水鸟调查。

2.2.1 水鸟种类

2013 年 8 月中旬至 2014 年 5 月中旬, 一个完整年度的 15 次水鸟调查, 共记录到水鸟 40 种, 1648 只/次。其中, 水稻试验田记录到水鸟 34 种, 工业模式水稻田记录到水鸟 12 种(图 3)。水稻试验田水鸟种类总数高于工业模式水稻田。考虑水鸟种类的季节性差异, 水稻试验田的水鸟种类秋季为 21 种, 冬季为 17 种, 春季为 11 种; 工业模式水稻田水鸟种类秋季为 8 种, 冬季为 6 种, 春季为 4 种(图 3)。秋季、冬季和春季 3 个季节, 水稻试验田的水鸟种类总数均高于工业模式水稻田(图 3)。

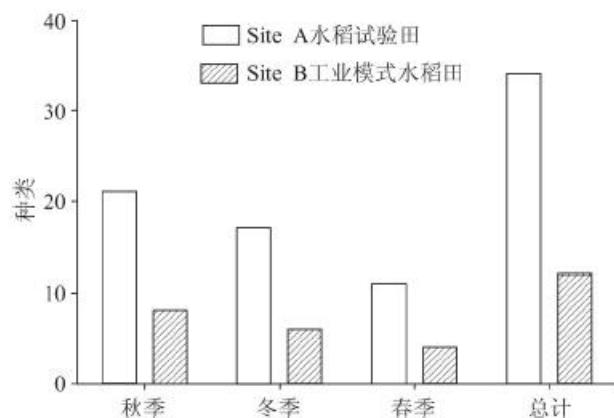


图 3 崇明东滩水稻田的水鸟种类总数

Fig. 3 Total Number of Waterbird Species Recorded in Rice Fields in Chongming Dongtan

2.2.2 水鸟密度

崇明东滩水稻田开展的 15 次水鸟调查, 共记录到水鸟 1648 只/次。其中, 水稻试验田记录到水鸟 1570 只/次, 占水鸟总数的 95.27%; 工业模式水稻田记录到水鸟 78 只/次, 占水鸟总数的 4.73%(图 4)。水稻试验田的水鸟密度为 41.87 ± 6.62 只/ hm^2 (Mean $\pm$ SE, 下同), 工业模式水稻田的水鸟密度为 2.08 ± 0.45 只/ hm^2 (图 4)。水稻试验田的水鸟密度极显著高于工业模式水稻田 ($n=15$, $p<0.001$)。考虑季节性差异, 水稻试验田的水鸟密度秋季为 47.76 ± 17.39 只/ hm^2 , 冬季为 51.92 ± 6.90 只/ hm^2 , 春季为 25.92 ± 5.96 只/ hm^2 ; 工业模式水稻田的水鸟密度秋季为 2.88 ± 0.44 只/ hm^2 , 冬季为 2.16 ± 0.95 只/ hm^2 , 春季为 1.20 ± 0.87 只/ hm^2 (图 4)。3 个季度, 水稻试验田的水鸟密度均极显著高于工业模式水稻田 ($n=5$, $p<0.01$)。

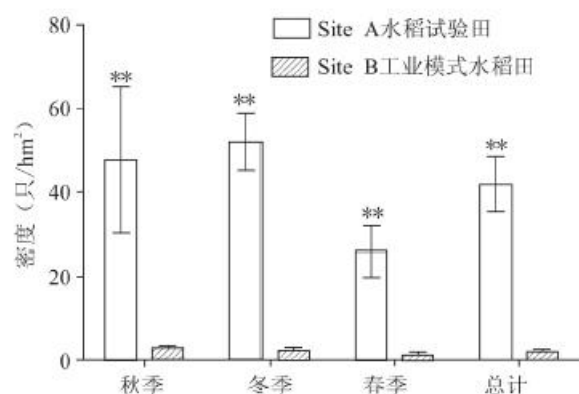


图4 崇明东滩水稻田的水鸟密度

Fig. 4 Density of Waterbird Recorded in Rice Fields in Chongming Dongtan

2.2.3 水鸟群落结构

崇明东滩不同水稻田的水鸟群落结构差异显著(图5)。水稻试验田的水鸟类群以鸕鹚类(769 只/次, 占 48.98%)和雁鸭类(746 只/次, 占 47.52%)为主。工业模式水稻田的水鸟类群以鹭类(47 只/次, 占 60.26%)和其他类(22 只/次, 占 28.21%)为主, 未观察到雁鸭类(图5)。考虑季节性差异, 水稻试验田的水鸟类群秋季为以鸕鹚类为主(581 只/次, 占 97.32%), 冬季以雁鸭类(493 只/次, 占 75.96%)和鸕鹚类(119 只/次, 占 18.34%)为主, 春季以雁鸭类(248 只/次, 占 76.54%)和鸕鹚类(69 只/次, 占 21.30%)为主。工业模式水稻田的水鸟类群, 秋季以鹭类(33 只/次, 占 91.67%)为主, 冬季以其他类(18 只/次, 占 66.67%)和鹭类(6 只/次, 占 22.22%)为主, 春季以鹭类(8 只/次, 占 53.33%)、鸕鹚类(4 只/次, 占 26.67%)和其他类(3 只/次, 占 20%)为主(图5)。

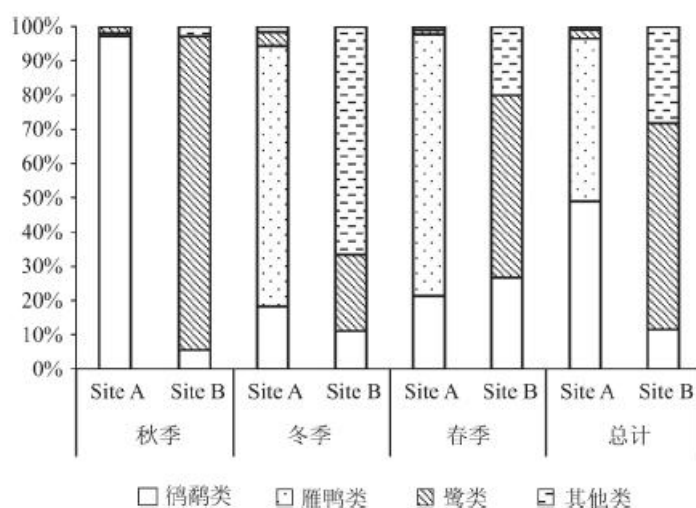


图5 崇明东滩水稻田的水鸟群落结构

Fig. 5 Percentages of Waterbird Groups Recorded in Rice Fields in Chongming Dongtan

3 讨论

3.1 水稻田构建技术的水鸟保育效果

本研究依照提出的以水鸟保育为目标的水稻田构建技术,在崇明东滩构建了 10hm² 水稻试验田,对比工业模式水稻田,开展一个完整年度的水鸟调查。水稻试验田的水鸟数量占水鸟总数的 95.27%,工业模式水稻田的水鸟仅占 4.73%(图 4),表明水稻试验田的水鸟保育效果高于工业模式水稻田,工业模式水稻田的水鸟保育效果较差。水稻试验田的水鸟种类和密度均显著高于工业模式水稻田(图 3 和图 4),表明相对于工业模式水稻田而言,本研究提出的水稻田构建技术能够显著提高水稻田的水鸟种类和数量,有效提升水稻田的水鸟保育效果。

崇明东滩位于东亚—澳大利西亚鸟类迁飞路线上,春季和秋季以迁徙鸕鹚类为主,冬季以越冬雁鸭类和鸕鹚类为主^[29, 30]。本研究构建的水稻试验田的水鸟类群以鸕鹚类(占 48.98%)和雁鸭类(占 47.52%)为主(图 5),表明水稻试验田为崇明东滩的主要水鸟类群提供适宜的栖息地,能够显著增加水稻田的鸕鹚类和雁鸭类的种类和数量。工业模式水稻田的水鸟类群以鹭类(占 60.26%)和其他类(占 28.21%)为主,且未观察到雁鸭类(图 5)。工业模式水稻田观察到灰头麦鸡(*Anellus-cinereus*),研究表明灰头麦鸡可能利用抛荒的工业模式水稻田作为繁殖场所^[11]。本研究野外调查期间,仅在工业模式水稻田观察到 1 只绿翅鸭(*Anascrecca*),因位于样方之外,而未作统计。研究结果表明,工业模式水稻田对崇明东滩的主要水鸟类群鸕鹚类和雁鸭类的保育效果较差,尤其是雁鸭类。

海岸带围垦造成自然湿地破坏,导致水鸟栖息地面积和质量的下降,影响了区域的水鸟保育价值^[1, 5, 7, 9]。海岸带受损湿地的恢复和鸟类栖息地的优化改造,有不同的方法和途径^[2]。本研究的结果表明构建水稻田可以作为水鸟的补充栖息地,弥补自然湿地破坏和缺失对水鸟造成的影响。张姚等^[24]2014 年在崇明东滩开展的不同类型人工湿地的水鸟保育效果的研究,表明人工修复湿地的水鸟密度为 31.82±8.20 只/hm²。张美等 2013 年在崇明东滩湿地公园开展的水鸟研究^[34],表明崇明东滩湿地公园水鸟密度春季为 12.02±6.39 只/hm²,冬季为 25.78±12.57 只/hm²。本研究构建的水稻试验田的全年水鸟密度为 41.87±6.62 只/hm²,高于崇明东滩人工湿地和东滩湿地公园的水鸟密度。表明与同类型人工湿地相比,水稻试验田具有较好的水鸟保育价值,也印证了适当的管理能提升水稻田水鸟保育效果的论断^[43, 44]。

目前,提升水稻田的水鸟保育效果的研究工作主要侧重于不同稻田管理模式对水鸟的影响。本研究水稻试验田记录到水鸟 34 种,冬季水鸟 17 种,与 Elphick 等^[19]2003 年冬季在加州水稻田记录到 24 种水鸟的结果相似,略低于 Tourenq 等 2001 年冬季在法国南部水稻田记录的 30 种^[14]。今后,水稻田水鸟保育工作的开展,应同时着重水稻田的构建和水稻田的管理,包括水稻田不同耕种模式^[45],水稻种植期和收割后的水位管理^[46, 47],尤其是冬季水稻田的管理更为关键^[18, 19, 47]。

3.2 水稻田构建技术的优势分析

不同类群水鸟的生境需求存在显著差异^[24, 27],水位是影响水鸟栖息地选择的重要因子^[27~31]。鸕鹚类为小型涉禽,喜好浅水区域、滩涂等生境;雁鸭类为游禽,喜好水域开阔和较深水位生境^[9, 27, 33, 34]。水稻田水鸟保育效果的提升,需要满足不同类群水鸟的多样性生境要求。本研究提出的水稻田构建技术,在水稻田中设置水池单元,为水鸟提供一定的水域面积和适宜的水深条件。在生境小岛和开阔水域、水稻田和开阔水域的水陆交界处设置坡度较小的生态驳岸,形成具有梯度变化的水位,满足不同类群水鸟的水位要求。崇明东滩在冬季以越冬雁鸭类和鸕鹚类为主^[29, 30],工业模式水稻田冬季抛荒,严重制约了冬季水稻田的水鸟保育效果^[18~20]。本研究提出在水稻田内部设置开阔水域,维持一定水位(>0.3m),尤其是冬季仍保持淹水状态,为越冬雁鸭类提供良好的水文条件,提升了冬季水稻田的水鸟保育效果。

水鸟的食物需求多样,包括植物性食物和动物性食物^[29, 30],本研究提出的水稻田构建技术,在水稻田中设置水池单元,为水生植物和水生动物提供了有利的生存条件。水稻田的常规操作中,会在水稻收获前排干水稻田存水,促进稻粒成熟,开阔水

域的设置作为水稻田的水生动物提供了临时避难所。水稻田开展多种种植和养殖，形成多样的陆生植物、水生植物和水生动物，为水鸟提供了丰富的植物性食物和动物性食物。

人为干扰影响水鸟的觅食等行为^[9, 24, 34]，水鸟对人为干扰有一定的警戒距离^[9]，丰富的植被能降低人为干扰的影响^[9, 24, 34]。本研究提出的开阔水域和生境小岛设置在水稻田内部，与田埂和道路隔离，增加了隐蔽性，降低人为干扰对水鸟的影响，为水鸟提供了良好的栖息场所。

总之，本研究提出的水稻田构建技术，为水鸟提供了良好的栖息地，满足了不同类群水鸟对食物、水文条件、隐蔽条件等多样性需求，显著增加了水稻田的水鸟种类和数量，提升了水稻田的水鸟保育效果。

3.3 水稻田构建技术的不足之处

水稻田水鸟保育效果的评估，不仅要考虑主要水鸟类群(如鸕鹚类和雁鸭类)数量的增加，还要兼顾濒危鸟类尤其是重点保护鸟类的保育效果。白头鹤(*Grusmonacha*)为国家一级保护动物，也是崇明东滩的明星物种。相关研究表明崇明东滩的水稻田是白头鹤重要的觅食生境之一^[48]。由于调查区域面积和调查时长的限制，本研究在水稻田中未调查到白头鹤。水稻田生境对水鸟的影响是渐变的过程，水鸟对水稻田生境变化的响应处于动态变化之中，对栖息地建设效果的反应具有滞后性。今后研究工作的开展，需要扩大水稻试验田的面积，关注水稻田水鸟保育效果的长效研究，并加强对白头鹤等重点保护物种的研究。

以水鸟保育为目标的水稻田构建技术的推广，工程建设成本和收益的关系至关重要。今后工作的开展，应当兼顾工程建设的收支比例关系，完善相关费用和计算依据，如单位面积投资与鸟类数量增幅的关联性等，建立生态工程建设成效的评价标准。在确保生态保育最佳成效的前提下，如何控制生态工程的建设成本，探求生态保育和经济发展的平衡点，保障生态工程的可持续发展，需要深入研究。

4 总结

海岸带围垦造成自然湿地减少，导致水鸟栖息地面积减少和质量退化，严重威胁了迁徙水鸟的生存。本研究提出了一种全新的水稻田构建技术，在水稻田的基础上构建适合水鸟栖息的人工湿地，既能满足水稻田的生产管理需要，又能满足水鸟对栖息地的生境需求。该技术的核心内容为在水稻田中设置开阔水域和生境小岛，为水鸟创设良好的栖息场所，满足了水鸟对食物、水位、隐蔽条件等的需求。依此技术构建的 10hm² 水稻试验田的水鸟种类和数量均显著高于工业模式水稻田，表明该水稻田构建技术能够显著提升水稻田的水鸟保育效果。

本研究通过探索海岸带水稻田系统的生态构建模式，提升了水稻田的水鸟保育效果，为海岸带受损湿地的修复和水鸟栖息地的优化提供参考案例，探索了一条经济发展和生态保育的新途径，符合国家生态建设需求。

致谢:野外工作的开展得到了上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区的大力支持，论文的修改得到了华东师范大学汪承焕老师的指导和帮助，特此感谢。

参考文献:

- [1] MA Z J, MELVILLE D S, LIU J G, et al. Rethinking China's new great wall [J]. Science, 2014, 346: 912-914.
- [2] MA Z J, LI B, ZHAO B, et al. Are artificial wetlands good alternatives to natural wetlands for waterbird:

A case study on Chongming Island, China [J] . Biodivers Conserv, 2004, 13:333—350.

[3] MA Z J, WANG Y, GAN X J, et al. Waterbird population changes in the wetlands at Chongming Dongtan in the Yangtze River Estuary, China [J] . Environmental Management, 2009, 43: 1187—1200.

[4] WANG W, LIU H, LI Y, et al. Development and management of land reclamation in China [J] . Ocean and Coastal Management, 2014, 102: 415—425.

[5] AN S, LI H, GUAN B, et al. China' s natural wetlands: past problems, current status, and future challenges [J] . AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2007, 36: 335—342.

[6] KINGSFORD R. Aerial survey of waterbirds on wetlands as a measure of river and floodplain health [J] . Freshwater Biology, 1999, 41: 425—438.

[7] TIAN B, ZHOU Y X, THOM R M, et al. Detecting wetland changes in Shanghai, China using Formosat and Landsat TM imagery [J] . Journal of Hydrology, 2015, 529: 1—10.

[8] MACKINNON J, VERKUIL Y I, MURRAY N. IUCN situation analysis on East and Southeast Asian intertidal habitats, with particular reference to the Yellow Sea (including the Bohai Sea) [J] . Occasional Paper of the IUCN Species Survival Commission, 2012, No. 47. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

[9] NIU J Y, ZOU Y A, YUAN X, et al. Waterbird distribution patterns and environmentally impacted factors in reclaimed coastal wetlands of the eastern end of Nanhui county, Shanghai, China [J] . Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae, 2013, 59: 171—185.

[10] TIAN B, WU W, YANG Z, et al. Drivers, trends, and potential impacts of long-term coastal reclamation in China from 1985 to 2010 [J] . Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 170:83—90.

[11] FUJIOKA M, ARMACOST J W, YOSHIDA H, et al. Value of fallow farmlands as summer habitats for waterbird in a Japanese rural area [J] . Ecological Research, 2001, 16: 555—567.

[12] FUJIOKA M, LEE S D, KURECHI M, et al. Bird use of rice fields in Korea and Japan [J] . Waterbird, 2010, 33: 8—29.

[13] IB EZ C, CURC A, RIERA X, et al. Influence on birds of rice field management practices during the growing season: a review and an experiment [J] . Waterbird, 2010, 33: 167—180.

[14] TOURENQ C, BENNETTS R E, KOWALSKI H, et al. Are ricefields a good alternative to natural marshes for waterbird communities in the Camargue, southern France? [J] . Biological Conservation, 2001, 100(3) : 335—343.

[15] LANE S J, FUJIOKA M. The impact of changes in irrigation practices on the distribution of foraging egrets and herons (Ardeidae) in the rice fields of central Japan [J] . Biological Conservation, 1998, 83(2) : 221—230.

-
- [16] ELPHICK C S, BAICICH P, PARSONS K C, et al. The future for research on waterbird in rice fields[J]. *Waterbird*, 2010, 33: 231–243.
- [17] NATUHARA Y. Ecosystem services by paddy fields as substitutes of natural wetlands in Japan[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 56: 97–106.
- [18] ELPHICK C S, ORING L W. Winter management of California rice fields for waterbird [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35: 95–108.
- [19] ELPHICK C S, ORING L W. Conservation implications of flooding rice fields on winter waterbird communities [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94: 17–29.
- [20] ELPHICK C S, TAFT O, LOURENCO P M. Management of rice fields for birds during the non-growing season [J]. *Waterbird*, 2010, 33: 181–192.
- [21] ELPHICK C S. Why study birds in rice fields? [J]. *Waterbird*, 2010, 33: 1–7.
- [22] MALTCHIK L, STENERT C, BATZER D P. Can rice field management practices contribute to the conservation of species from natural wetlands? Lessons from Brazil [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2017, 18: 50–56.
- [23] SETTELE J, SPANGENBERG J H, HEONG K L, et al. Agricultural Landscapes and Ecosystem Services in South-East Asia the LEGATO-Project [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2016, 16(8) : 661–664.
- [24] 张姚, 谢汉宾, 曾伟斌, 等. 崇明东滩人工湿地春季水鸟群落结构及其生境分析[J]. *动物学杂志*, 2014, 49(4) , 490–504.
- 【ZHANG Y, XIE H B, ZENG W B, et al. Analysis on the waterbird community structure and its habitat on the artificial wetlands in spring in Chongming Dongtan, China [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2014, 49(4) : 490–504. 】
- [25] MA Z J, LI B, ZHAO B, et al. Are artificial wetlands good alternatives to natural wetlands for waterbirds? - A case study on Chongming Island, China [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2004, 13(2) : 333–350.
- [26] CAI F, VAN VLIET J, VERBURG P H, et al. Land use change and farmer behavior in reclaimed land in the middle Jiangsu coast, China [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2017, 137: 107–117.
- [27] 赵平, 袁晓, 唐思贤, 等. 崇明东滩冬季水鸟的种类和生境偏好 [J]. *动物学研究*, 2003, 24(5) : 387–391.
- 【ZHAO P, YUAN X, TANG S X, et al. Species and habitat preference of waterbirds at the eastern end of Chongming Island(Shanghai) in winter [J]. *Zoological Research*, 2003, 24(5) :387–391. 】
- [28] 葛振鸣, 王天厚, 周晓, 等. 上海崇明东滩堤内次生人工湿地鸟类冬春季生境选择的因子分析 [J]. *动物学研究*, 2006, 27(2) : 144–150.

【GE Z M, WANG T H, ZHOU X, et al. Factor analysis on habitat selection of the avian community at the artificial wetlands behind the Chongming Dongtan seawall during winter and spring [J]. Zoological Research, 2006, 27(2) : 144—150. 】

[29] 王天厚, 钱国桢. 长江口及杭州湾北部滩涂的生物群落特征分析 [J]. 生态学杂志, 1987, 6(2) : 35—38.

【WANG T H, QIAN G Z. Analyses on characters of biotic communities around Changjiang River Estuary and Northern Hangzhou Bay [J]. Journal of Ecology, 1987, 6(2) : 35—38. 】

[30] 王天厚, 钱国桢. 长江口杭州湾鸻形目鸟类 [M]. 上海:华东师范大学出版社, 1988.

【WANG T H, QIAN G Z. Shorebirds in the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay [M]. East China Normal University Press, Shanghai. 1988】

[31] TIAN B, Y X, ZHOU L Q, et al. Analyzing the habitat suitability for migratory birds at the Chongming Dongtan Nature Reserve in Shanghai, China [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2008, 80, 296—302.

[32] 葛振鸣. 长江口滨海湿地迁徙水禽群落特征及生境修复策略 [D]. 上海: 华东师范大学博士学位论文, 2007: 12—20.

【GE Z M. The research on the characters of migratory waterbird communities and the habitats restoration strategy at the Yangtze River Mouth [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007: 12—20. 】

[33] 牛俊英, 衡楠楠, 张斌, 等. 上海市南汇东滩围垦后海岸带湿地冬春季水鸟生境选择 [J]. 动物学研究, 2011, 32(6) : 624—630.

【NIU J Y, HENG N N, ZHANG B, et al. Waterbird habitat selection during winter and spring in reclaimed coastal wetlands in Nanhui Dongtan, Shanghai [J]. Zoological Research, 2011, 32(6) : 624—630. 】

[34] 张美, 牛俊英, 杨晓婷, 等. 上海崇明东滩人工湿地冬春季水鸟的生境因子分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(7) : 858.

【ZHANG M, NIU J Y, YANG X T, et al. Environmental impact on the waterbird distribution during winter and spring at the artificial wetlands in Chongming Dongtan, Shanghai [J]. Resources Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(7) : 858. 】

[35] 杨晓婷, 牛俊英, 罗祖奎, 等. 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(13) : 4050—4058.

【YANG X T, NIU J Y, LUO Z K, et al. The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13) : 4050—4058. 】

[36] MALTCHIK L, STENE R T C, BATZER D P. Can rice field management practices contribute to the conservation

of species from natural wetlands? Lessons from brazil [J] . Basic and Applied Ecology , 2017, 18: 50—56.

[37] 国家林业部. 中国湿地保护行动计划 [M] . 北京: 中国林业出版社, 2000.

【China Forestry Bureau. China national wetlands conservation action plan [M] . China Forestry, Beijing, 2000. 】

[38] MAFF L, OVIEDO G, LARSEN P B. Indigenous and traditional peoples of the word and ecoregion conservation: an integrated approach to conserving the word' s biological and cultural diversity. WWF Research Report. Gland: WWF International and Terralingua, 2000: 145—145.

[39] HUANG Y, ZHANG T, WU W, et al. Rapid risk assessment of wetland degradation and loss in low-lying coastal zone of Shanghai, China [J] . Human and Ecological Risk Assessment: AnInternational Journal, 2017, 23: 82—97.

[40] ZOU Y A, LIU J, YANG X T, et al. Impact of coastal wetland restoration strategies in the Chongming Dongtan wetlands, China: waterbird community composition as an indicator [J]. Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae, 2014, 60: 185—198.

[41] ZOU Y A, TANG C D, NIU J Y, et al. Migratory waterbird response to coastal habitat changes: conservation implications from long-term detection in the Chongming Dongtan wetlands, China [J] . Estuaries and Coasts, 2016, 39: 273—286.

[42] HOWES J. Shorebird studies manual [M] . Kuala Lumpur: Asian Wetland Bureau, 1989: 143—147.

[43] STAFFORD J D, KAMINSKI R M, REINECKE K J, et al. Waste rice for waterfowl in the Mississippi Alluvial Valley [J] . Journal of Wildlife Management, 2006, 70: 61—69.

[44] STAFFORD J D, KAMINSKI R M, REINECKE K J. Avian foods, foraging and habitat conservation in world rice fields [J] . Waterbird, 2010, 33: 133—150.

[45] PERNOLLET C A, CAVALLO F, SIMPSON D, et al. Seed density and waterfowl use of rice fields in Camargue, France [J] . The Journal of Wildlife Management, 2017, 81: 96 —111.

[46] RAMACHANDRAN R, KUMAR A, SUNDAR K S G, et al. Hunting or habitat drivers of waterbird abundance and community structure in agricultural wetlands of southern India [J] . Ambio, 2017, 25: 1—8.

[47] STRUM K M, REITER M E, HARTMAN C A, et al. Winter management of California ' s rice fields to maximize waterbird habitat and minimize water use [J] . Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 179: 116—124.

[48] 敬凯, 唐仕敏, 陈家宽, 等. 崇明东滩越冬白头鹤觅食地特征的初步研究 [J] . 动物学研究, 2002(1) : 84—88.

【JING K, TANG S M, CHEN J K, et al. Primary research on the characteristics of feeding sites of *Grus monacha*

in the East Tide Flat of Chongming [J] . Zoological Research, 2002 (1) :84—88. 】