中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

稻鱼共生系统的推广潜力分析——以中国南方10省为例

胡亮亮，赵璐峰，唐建军，郭梁，丁丽莲，张剑，任伟征，陈欣

引用本文:
胡亮亮, 赵璐峰, 唐建军, 等. 稻鱼共生系统的推广潜力分析——以中国南方10省为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 981–993.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190203

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稻-鱼系统的发展与未来思考

Development of rice-fish system:Today and tomorrow

中国生态农业学报. 2015(3): 268–275 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150025

“稻鸭共生”生态系统重金属镉的转化、迁移及循环特征

Characteristics of heavy metal (cadmium) transformation, migration and cycling in rice-duck mutual ecosystem

中国生态农业学报. 2016, 24(9): 1206–1213 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160237

稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制

Regulation and mechanism of greenhouse gas emissions of circular agriculture ecosystem of planting and breeding in paddy

中国生态农业学报. 2018, 26(5): 633–642 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171068

四川稻作区优质稻生产气候生态条件适宜性评价及空间分布

Suitability evaluation of eco-climatic conditions for high quality rice production in Sichuan Province

中国生态农业学报. 2015(4): 506–513 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141208

基于GIS的福建农田氮磷地表径流流失与污染风险评估

GIS-based pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff in farmlands in Fujian Province

中国生态农业学报. 2018, 26(12): 1887–1897 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180118

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 7 月 第 27 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2019, 27(7): 981−993

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190203

胡亮亮, 赵璐峰, 唐建军, 郭梁, 丁丽莲, 张剑, 任伟征, 陈欣. 稻鱼共生系统的推广潜力分析——以中国南方 10 省为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 981−993

HU L L, ZHAO L F, TANG J J, GUO L, DING L L, ZHANG J, REN W Z, CHEN X. Extension potential of rice-fish co-culture system: A case study of 10 provinces in South China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 981−993

稻鱼共生系统的推广潜力分析*

——以中国南方 10 省为例

胡亮亮, 赵璐峰, 唐建军, 郭 梁, 丁丽莲, 张 剑, 任伟征, 陈 欣**

(浙江大学生命科学学院 杭州 310058)

摘 要: 稻田浅水环境为许多水产动物提供了生境, 也为稻鱼共生产业的发展提供了基础。但是, 一个区域的稻田是否适合发展稻鱼共生系统, 常常受到当地自然和社会条件的影响, 了解这些影响对有效推广稻鱼共生系统有重要意义。本文以我国南方 10 省为研究区域, 从自然和社会经济因素两个方面分析了稻鱼共生系统的推广潜力。研究利用气象资料和农业统计数据, 基于地理信息系统构建了研究区域内的稻田地理分布数据库, 确定了 15 个影响稻鱼共生系统推广效率的指标, 通过指标的层级模型和线性加权评分法对不同稻田的推广优先等级进行评估, 并构建了基于稻田总面积、推广率和单产水平下鱼产量估算的简易模型。结果表明, 综合自然和社会经济条件, 研究区域内的稻田可划分为 4 个推广优先等级, 面积占比分别为: 等级 1 占 29.6% (3.59×10^6 hm^2), 等级 2 占 16.9% (2.05×10^6 hm^2), 等级 3 占 24.2% (2.94×10^6 hm^2)和等级 4 占 29.4% (3.57×10^6 hm^2); 其中湖南、四川、江西和浙江 4 省的稻田 50%以上属于等级 1 和等级 2, 而在云南和贵州基本上所有的稻田都属于等级 3 和等级 4。等级 1 和等级 2 的稻田适合推广集约型稻鱼共生模式, 这两个等级的稻田每个生长季可产出最高鱼产量分别为 3.77×10^6 t 和 2.15×10^6 t; 而等级 3 的稻田适合进行粗放型和集约型模式相结合的推广方式, 粗放型和集约型模式最高鱼产量分别为 0.62×10^6 t 和 3.09×10^6 t。本研究主要结果为合理制定稻鱼共生系统推广策略提供借鉴, 也可为国内外稻田水产养殖产业发展规划的制定提供参考。

关键词: 稻鱼共生系统; 推广优先级; 地理信息系统; 自然因素; 社会经济因素; 鱼产量

中图分类号: Q143

文章编号: 2096-6237(2019)07-0981-13 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Extension potential of rice-fish co-culture system: A case study of 10 provinces in South China*

HU Liangliang, ZHAO Lufeng, TANG Jianjun, GUO Liang, DING Lilian, ZHANG Jian, REN Weizheng, CHEN Xin**

(College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Rice fields can provide habitats for a wide range of aquatic animals, including carps, crabs, crayfish, soft shell turtles, which makes it possible to couple rice culture with fish production. This is referred to as the rice-fish co-culture system. The suitability of rice fields in a specific region for the rice-fish co-culture system often depends on local natural and social

* 科技部重大专项(2016YFD0300905)和国家自然基金国际合作与交流项目(31661143001)资助

** 通信作者: 陈欣, 主要研究方向为农业系统中生物的互惠及其效应。E-mail: chen-tang@zju.edu.cn

胡亮亮, 主要研究方向为农业系统中生物的互惠及其效应。E-mail: zjuhull@126.com

收稿日期: 2019-03-19 接受日期: 2019-04-09

* This study was funded by the Major Projects of the Ministry of Science and Technology of China (2016YFD0300905) and the National Natural Science Foundation of China (31661143001).

** Corresponding author, E-mail: chen-tang@zju.edu.cn

Received Mar. 19, 2019; accepted Apr. 9, 2019

economic conditions. An understanding of the potential of rice fields for use in the rice-fish co-culture system would aid effective extension of rice-fish co-culture system and maximize the benefits of this extension. In this study, we assessed the effects of natural and social-economic conditions on the extension of the rice-fish co-culture system in 10 provinces of South China, and predicted the potential of fish yield from rice fields in the rice-fish co-culture system extension. We first built a geographical distribution database of all rice fields in the study area by using a geographic information system (GIS) comprising meteorological data and national statistics. We then assessed the extension priority of different rice fields with a hierarchy model of all assessment criteria and the weighted linear combination method. To assess the extension benefits, we further established a simple model that included rice field area, extension rate, and fish yield. The results showed that rice fields in our study region could be divided into four classes of extension priority based on natural and social-economic scores. The area proportions of four classes were: 29.6% for class 1 (3.59×10^6 hm^2), 16.9% for class 2 (2.05×10^6 hm^2), 24.2% for class 3 (2.94×10^6 hm^2), and 29.4% for class 4 (3.57×10^6 hm^2). However, the proportions of rice fields in the four classes were different in the ten provinces. For the provinces of Hunan, Sichuan, Jiangxi, and Zhejiang, half of rice fields were grouped into class 1 and 2, whereas all the rice fields of the provinces of Yunnan and Guizhou were grouped into class 3 and 4. The rice fields of class 1 and class 2 were suitable for the extension of the intensive rice-fish co-culture system, and able to produce a maximum yield of 3.77×10^6 t and 2.15×10^6 t of fish in a growing season, respectively. The rice fields of class 3 were suitable for extension of the extensive or intensive rice-fish co-culture systems, and able to produce a maximum yield of 0.62×10^6 t or 3.09×10^6 t of fish in a growing season, respectively. The rice fields of class 4 were not suitable for rice-fish co-culture system. Our results may provide an important basis for extending the rice-fish co-culture system in South China. The results may also be a reference for rice-fish co-culture system development in other rice culture areas.

Keywords: Rice-fish co-culture system; Extension priority; Geographic information system; Natural factors; Social-economic factor; Fish production

耕地和淡水资源是全球粮食可持续生产至关重要的基础，如何提高水土资源的利用效率，在保障粮食安全的同时减少环境负效应，是全球农业系统所面对的重大挑战[1]。对于人口密集、经济发展相对落后的亚洲大部分国家和地区而言尤其如此[2-3]。

水稻(*Oryza sativa*)和水产品是亚洲国家(尤其是中国)膳食结构的重要组成部分，随着社会经济的飞速发展，两者的需求量均在不断地增加[4]。据估测，到 2025 年中国水稻产量将比 2014 年提高 2.6%，而水产品产量的增加比例将高达 25.8%[5]。但是，由于未来全球捕捞业的发展空间将会进一步缩小，水产品产量的提高将几乎全部来自于养殖的方式。然而，水产养殖产业的快速崛起却因水土资源的限制及其集约化发展所引发的环境污染、疾病传播、生态系统退化等问题而饱受争议[6-10]。

稻鱼共生是在水稻生长季将水稻和水产动物放置在同一环境中生长的生态农业模式，是稻田水产养殖(稻渔综合种养)的最主要模式。稻鱼共生系统利用种养耦合的方式合理利用稻田生态系统的水土空间和养分，发挥水稻和水产动物之间的生态互惠作用，实现水稻种植和水产养殖双赢的经济、社会和生态效益[11-15]。稻鱼共生系统历史悠久，在提高当地居民生活水平、保护生物多样性和维持农业可持续发展等方面的作用也早已得到世界范围内的普遍认同[16-18]。联合国粮农组织等自 20 世纪 50 年代开始便在全球范围内持续地开展推广工作，并于 2005 年将我国南方山区梯田具有 1 200 多年历史的“青田稻鱼共生系统”评选为首批“全球重要农业文化遗产”[19]。

近年来，以稻鱼共生为主的稻田水产养殖得到越来越多的关注，在许多亚洲国家如孟加拉国、老挝、越南和印度尼西亚都有快速发展[20-22]。中国在 20 世纪的 50、80 和 90 年代多次在全国范围内大力推进稻田水产养殖的发展，成为了全球稻田水产养殖面积和产量最大的国家[1]。进入 21 世纪以来，相关产业取得了更多的政策支持和生产管理水平上的提升，呈现出加快发展的新趋势[23-25]。

据估计，全球 90%以上的稻田处于不同程度的淹水状态，约有 1.34 亿 hm^2 的稻田被认为能够开展水产动物的养殖[26]。很早便有观点认为，如果所有合适稻鱼共生系统的稻田都能够被利用起来，即使是较低的生产水平也能对水产品供给做出巨大的贡献[27]。然而，不论在亚洲其他国家还是中国，真正实践水产养殖的稻田比例远远小于人们的预期。

在中国，广袤的稻田对于水产养殖而言仍旧是有待开拓利用的潜在资源。目前用于水产养殖的稻田有 1.51×10^6 hm^2，占总稻田面积的 5%左右，而每年产出的水产品约 1.5×10^6 t，仅占淡水养殖总产量的 5%左右[28-29]。一方面，稻田水产养殖有着巨大的推广潜力；另一方面，进一步的推广仍需克服基础

理论、人才技术、经营销售和政策管理等多方面的不足[23,30-31]。从国家和区域的角度出发，为了保证稻田水产养殖产业的持续健康发展，必须根据产业基础、资源条件和要素条件进行合理的整体布局，使其跟上快速发展的需求[30]。因此，对全国的稻田资源进行科学的评估，通过分析不同区域的稻田分布及其开展水产养殖的适宜性特征以深入了解稻田水产养殖的推广潜力，是有效利用稻田资源、合理制定推广策略的重要基础。

目前几乎未见关于稻田水产养殖推广潜力的评估研究。中国稻作区内不同区域开展水产养殖的优势差异如何？如何结合各地区的特点制定合理的推广方案？大面积推广后所带来的经济、社会和生态效益如何？对于这些问题我们都缺乏科学的认识和经验总结。近年来，国内外研究者越来越多地将地理信息系统(GIS)和多准则决策分析(MCDA)相结合开展高精度的土地利用区划、适宜性分析和最佳选址等方面的分析，为包括水产养殖在内的不同土地利用的效应评估和决策制定带来了便利[32-36]。这些研究为稻田水产养殖的推广潜力分析提供了新的思路。

本研究以稻鱼共生系统为研究对象，以涵盖传统山区稻鱼共生系统的南方 10 省(湖南、四川、浙江、福建、江西、贵州、云南、重庆、广东和广西)为目标区域进行推广潜力分析。在构建南方 10 省的稻田空间分布和地理信息数据库的基础上，通过指标的层级模型和线形加权评分的方法，从自然因素和社会经济因素两个方面确定稻鱼共生系统不同推广优先等级的地理分布和面积规模，并估测了不同推广情形下稻田的鱼产量，了解南方稻区水产养殖的推广潜力，为有效利用稻田资源、合理制定推广策略提供参考。

1　研究方法

1.1　推广优先级评价指标和体系

本研究选取了影响稻鱼共生系统推广优先级的 15 个基础评价指标。根据指标的属性构建反映指标隶属关系的层级模型(图 1)。第 1 等级指标是自然因素和社会经济因素。自然因素等级之下可划分为气候资源、气候不稳定性和土壤条件 3 个方面；而社会经济因素等级之下可划分为稻田资源、推广便利

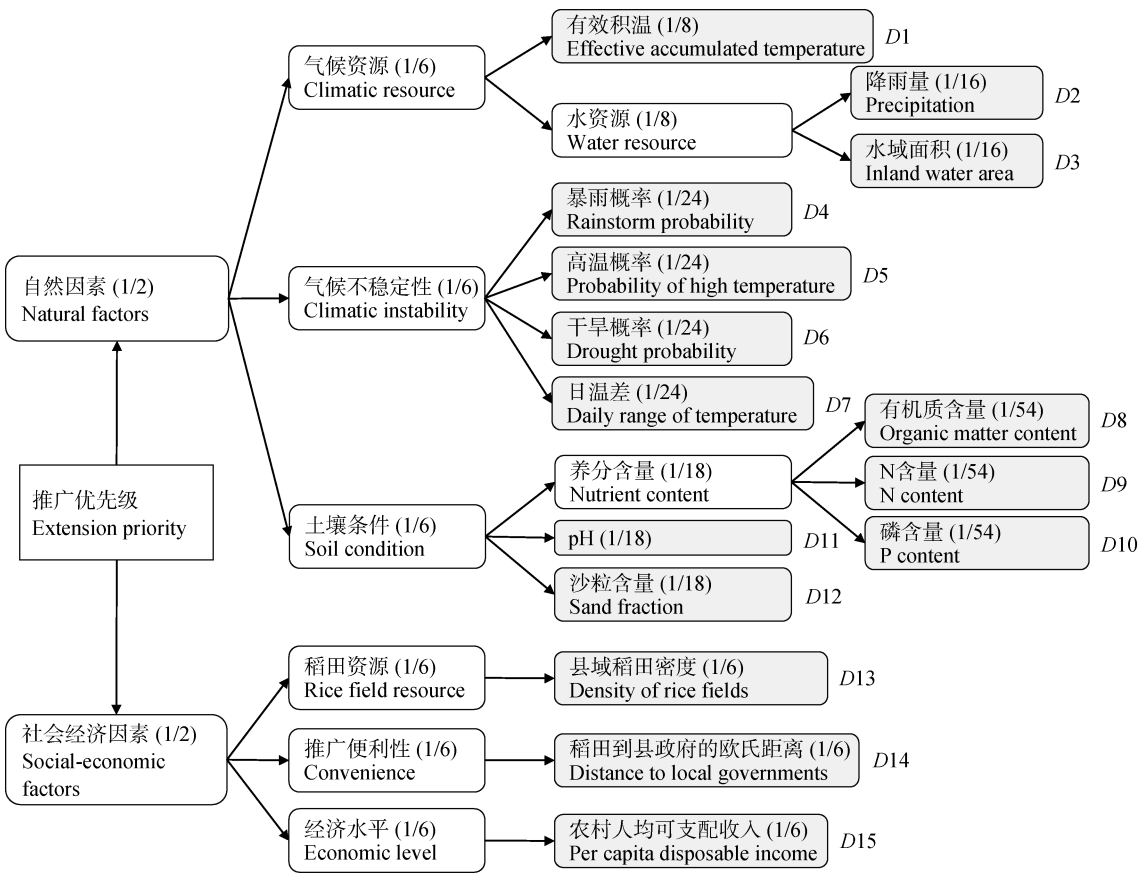

图 1　稻田用于稻鱼共生系统推广的优先级评价指标层次结构(括号内数字代表指标的权重，灰色格子内的是用于计算的基础指标，来源于 **1.2** 中的方法构建的 ***D*1-*D*15** 数据库)

Fig. 1　Hierarchical structure of extension priority evaluation indices for rice-fish co-culture system (Numbers in parentheses are weights of indexes. In the gray blocks are the basic indices used for calculation, which are detailedly explained in the table 1)

性和经济水平 3 个方面。

气候资源反映某地区在正常年份中的稻鱼共生系统生产力水平。与其他所有农业系统一样，稻鱼共生系统生产力的最大影响因素是水热资源的丰富度，特别是水资源的多少对稻田养鱼的可行性具有重要影响。因此，选择了南方地区稻鱼共生系统生长季内(基本处在 5 月 1 日至 10 月 31 日)的有效积温(*D*1)和降雨量(*D*2)两个指标，并加入了水域面积(*D*3)的指标来弥补降雨量在水资源丰富度上代表性的不足。

稻田的水层较常规水产养殖浅，鱼类更容易受到环境昼夜变化和季节波动的影响。气候的不稳定性不仅会增加稻田的改造等成本和田间管理投入，而且增加了减产甚至绝收的几率。我们选择了暴雨概率(*D*4)、高温概率(*D*5)、干旱概率(*D*6)和日温差(*D*7)4 个指标。

稻鱼共生系统通常在肥力高、中性偏碱性、保水性能好的田块上更能实现鱼类的高产。选择土壤的有机质(*D*8)、全氮(*D*9)和全磷(*D*10)、pH(*D*11)和土壤含沙量(*D*12)来反映土壤条件的适宜性。其中，pH 是双向指标，pH 接近 8 的环境最适合大多数鱼类的生长，酸度或碱度的增加均不利于鱼类的生长。

社会经济因素是对农民是否会采用稻鱼共生系统(即推广的难易程度)的考虑，主要涉及成本、效益、技术和销售等多个方面。采用 3 个复合型指标：1)稻田密度(*D*13)，反映水稻生产在当地农民生计中的重要性，也反映稻鱼共生系统的潜在规模效益；2)稻田到县政府的距离(*D*14)，反映稻田地理位置的优劣和交通便利性，与推广的难易程度和成功率相关；3)农村人口可支配收入(*D*15)，反映当地农户的投资能力，也能反映当地市场的消费水平。

评价指标的权重是根据指标的等级关系确定的。所有指标的总权重为 1，按照每个指标的下一级指标被赋予相同的权重的方法逐级分解权重，所得结果如图 1 所示，指标的具体说明见表 1。

1.2 数据来源和数据库构建

1.2.1 GIS 数据

中国最新行政区划 GIS 数据来自国家地理信息中心(http://www.tianditu.cn/)。

稻田和水域的空间分布数据(1 km×1 km 栅格)、1 km 分辨率高程数据和土壤含沙量数据分别来自中国科学院地理科学与资源研究所发布的“2015 年土地利用现状遥感监测数据”、“全国 DEM 1 km 数据”和“中国土壤质地空间分布数据”(http://www.resdc. cn)。

各县县政府经纬度数据通过 google 地图确定。

在 ArcMap 10.2 中计算每个稻田栅格(1 km×1 km)与其所在县县政府的欧氏距离，统计每个稻田栅格半径 30 km 范围内的水域栅格数量，数据赋值给稻田栅格后分别建成数据库 *D*14 和 *D*3。

1.2.2 气象数据

气象数据来自国家气象信息中心的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”(http://data.cma.cn/)。在该数据集中选取南方 10 省范围内的气象站点，提取每个站点 1998—2017 年 5 月 1 日—10 月 31 日的日均温、日最高温、日最低温、每日 20:00 至翌日 20:00 降雨量的逐日数据。通过日降雨量数据计算每个站点生长季降雨量和半月降雨量。

采用局部薄盘光滑样条法，以高程数据为协变量，对日均温、日最高温、日最低温、每日 20:00 至翌日 20:00 降雨量、生长季降雨量和半月降雨量进行空间插值(ANUSPLIN 4.4)。基于表 1 中指标的说明，对插值结果进一步运算得到 6 个气候因子指标，赋值给稻田栅格后建成数据库 *D*1、*D*2、*D*4、*D*5、*D*6 和 *D*7。

1.2.3 土壤数据

土壤有机质、氮和磷含量来自国家地球系统科学数据共享服务平台的土壤科学数据中心(http://www.geodata.cn/)。土壤 pH 来自 FAO 的 HWSD 土壤数据集(https://www.hwsd.org/)。将所有土壤数据赋值给稻田栅格，建成数据库 *D*8-*D*12。

1.2.4 统计数据

2016 年的渔业统计数据来自《中国渔业年鉴 2017》。县农村常住人口可支配收入来自各省、市、县的 2017 年统计年鉴(如果没有发表 2017 年的统计年鉴，则用最近年份的统计年鉴数据)。为稻田栅格赋值其所在县的数据，建成数据库 D15。

水稻播种面积来源于各省、市、县的 2014 年统计年鉴。若遇到某省市 2014 年数据未发表，则使用最近年份数据替代。为了获得尽可能高的空间分辨率，优先使用县级范围的数据。当某县级范围数据缺失时，依次采用以下 3 个方法直到获得数据：1)已知水稻产量，则假设空间位置接近的地区水稻单产水平一致，通过多个已知产量和面积的邻县的平均数据进行估计；2)合并缺失数据的县，通过其所属市与其他县的播种面积的差值进行估计；3)使用市级范围空间单元和数据。

利用播种面积估算稻田面积。对于单季稻稻作区，以播种面积作为稻田面积，而对于种植双季稻

表 1　稻田用于稻鱼共生系统推广的优先级评价指标说明

Table 1　Explanation of evaluation indices of extension priority for rice-fish co-culture system

	指标 Index	指标性质 1) Index nature1)	详细说明 2) Explanation2)
气候资源 Climate resources	*D*1 有效积温 Effective accumulated temperature (d·℃)	正向 Positive	生长季内≥10 ℃有效温度的总和 Effective accumulated temperature ≥10 ℃ in a growth season
	*D*2 降雨量 Precipitation (mm)	正向 Positive	生长季内总降雨量，不计微量降雨、雾、露和霜的降雨形式 Total precipitation in a growth season, excluding unmeasurable rainfalls, fogs, dews and frosts
	*D*3 水域面积 Inland water area (hm^2)	正向 Positive	稻田 30 km 半径范围内的内陆水域面积。水域类型包括了河渠、湖泊和水库坑塘 Total water area within 30 km of each rice field grid, including rivers, canals, lakes and reservoirs
气候不稳定性 Climate instability	*D*4 暴雨概率 Rainstorm probability (%)	负向 Negative	生长季内发生日降雨量≥50 mm 的天数所占比例 Percentage of days with daily precipitation over 50 mm in a growth season
	*D*5 高温概率 Probability of high temperature (%)	负向 Negative	生长季内日最高温≥35 ℃的天数所占比例 Percentage of days with maximum daily temperature over 35 ℃ in a growth season
	*D*6 干旱概率 3) Drought probability (%)3)	负向 Negative	1998—2017 年期间至少发生一次干旱的年份所占比例 Percentage of years that drought happened at least once in a year in the period of 1998–2017
	*D*7 日温差 Daily range of temperature (℃)	负向 Negative	生长季内日温差的总和 Sum of daily range of temperature in a growth season
土壤条件 Soil condition	*D*8 土壤有机质含量 Topsoil organic matter content (10^{-2} mg·g^{-1})	正向 Positive	表土层土壤的有机质含量 Organic matter content in the topsoil
	*D*9 土壤氮含量 Topsoil N content (10^{-2} mg·g^{-1})	正向 Positive	表土层土壤的氮含量 Nitrogen content in the topsoil
	*D*10 土壤磷含量 Topsoil P content (10^{-2} mg·g^{-1})	正向 Positive	表土层土壤的磷含量 Phosphorus content in the topsoil
	*D*11 土壤 pH Topsoil pH	双向 Two-way	表土层土壤的水浸 pH pH in the topsoil measured in a soil-water solution
	*D*12 土壤沙粒含量 Topsoil sand fraction (wt%)	负向 Negative	表土层土壤的沙含量 Sand percentage in the topsoil
稻田资源 Rice field resource	*D*13 稻田分布密度 Density of rice fields (%)	正向 Positive	县级稻田面积占县面积的比例 Percentage of rice field areas in total areas at the county level
推广便利性 Convenience	*D*14 稻田到当地政府的距离 Distance to local governments (m)	负向 Negative	稻田栅格到县政府的欧氏距离 Euclidean distance of each rice field grid to the location of county governments
经济水平 Economic level	*D*15 农村人口可支配收入 Per capita disposable income of rural population (¥)	正向 Positive	县农村常住人口的人均可支配收入 Per capita disposable income of rural residents in county level

1)正向指标指该指标值越大，指标对应的推广优先级得分越高，负向指标相反，双向指标指随着指标的增加，得分先增加后降低。2)气象指标(除了干旱概率)是 1998—2017 年 20 个生长季(5 月 1 日—10 月 31 日)的平均值。表土层厚度 30 cm。3)干旱的判断标准：降雨量连续一个月少于 20 年平均值的 20%，或连续两个月只达到 20 年平均值的 20%~50%，或连续 3 个月只达到 20 年平均值的 50%~75%。1) The positive indices refer to that a higher index value means a higher score for extension priority, the negative indices are opposite; while the two-way index mean as the index increases, the score increases first and then decreases. 2) Meteorological indices (except drought probability) are the average of all growth seasons (from May 1st to Oct 31st) from 1998 to 2017. Topsoil refers to a 0–30 cm soil layer. 3) Criterion for drought: precipitation is less than 20% of the average of 20 years for one month, or only 20%–50% of the average of 20 years for two months, or only 50%–75% of the average of 20 years for three months.

的区域估算稻田面积时需要扣除复种面积。扣除复种面积的近似做法为：对于有早稻(夏收)和晚稻(秋收)统计的区域，以早、晚稻中面积较大者作为稻田面积的估计值；对于有早稻、中稻和一季晚稻、双季晚稻统计的区域，以早稻、中稻和一季晚稻的总和作为稻田面积的估计值。经以上方法估计得到 10 省稻田面积共 12.15 ×10^6 hm^2。

根据以下公式计算各县的稻田密度，赋值给其所包含的稻田栅格，建成数据库 *D*13：

$$D_r = \frac{S_{rice}}{S_{total}} \times 100\% \tag{1}$$

式中：D_r 为稻田分布密度，S_{rice} 为县域内稻田面积，S_{total} 为县行政区域总面积。

1.2.5　稻田面积的栅格化空间分布

在计算栅格内稻田面积之前必须先确定栅格的有效性，即通过 *D*1-*D*15 数据库的合并对存在空缺

值、异常值和无效值的栅格分别进行填补、修正和删除。最终得到有效栅格 240 330 个和仅含有有效栅格的新数据库 *D*1-*D*15。

出于运算的可行性，认为各县内的稻田在所有稻田栅格中是均匀分布的。县稻田面积与县稻田栅格数量的比值即为各稻田栅格内稻田面积的估计值。

1.3 推广优先级评分

1.3.1 标准化得分

各评价指标经极差法标准化处理计算得分。正向指标的得分为:

$$S_{ij}=\frac{I_{ij}-\min_i}{\max_i-\min_i} \tag{2}$$

逆向指标的得分为:

$$S_{ij}=\frac{\max_i-I_i}{\max_i-\min_i} \tag{3}$$

式中: i 为指标(数据库)编号, j 为稻田栅格编号, $\max_i$ 和 $\min_i$ 分别为第 i 类指标的最大值和最小值。

土壤 pH 为双向指标，以 pH=8 双向的中心位置，得分为:

$$S_j=\frac{(8-|I_j-8|)-\min}{8-\min} \tag{4}$$

式中: j 为稻田栅格编号, min 为 pH 最小值。

1.3.2 打分

采用线性加权法构建各层级评价指标的得分。指标得分越高，表明在其所指示的方面越适合稻鱼共生系统，即推广优先级越高。推广优先级总得分(S_p)是自然因素得分(S_n)和社会经济因素得分(S_s)的线性加权之和:

$$S_p=\frac{1}{2}S_n+\frac{1}{2}S_s \tag{5}$$

式中: 1/2 是 S_n 和 S_s 的权重。

自然因素得分(S_n)是其下属的 12 类评价指标的加权总和:

$$S_n=\sum_{i=1}^{12}(w_i\times S_i)\times 2 \tag{6}$$

社会经济因素得分(S_s)是其下属的 3 类评价指标的加权总和:

$$S_s=\sum_{j=1}^{3}(w_i\times S_i)\times 2 \tag{7}$$

式中: i 和 j 是栅格编号, S 和 w 分别为评价指标的标准化得分和权重，系数 2 是为了使 S_n 和 S_s 取值映射到[0, 1]区间的转换系数(等于 S_n 和 S_s 权重的倒数)。

1.3.3 推广优先级分类和稻鱼共生模式

基于自然因素得分(S_n)和社会经济因素得分(S_s)，可将所有稻田栅格的推广优先级分为 4 个等级(表 2)，并为不同的推广等级制定相应的推广策略。不同推广策略的差异主要体现在生产目标和所采用的稻鱼共生模式的生产力水平上。集约型稻鱼共生模式的特点是现代化经营、高密度和高投入养殖，目的是市场供给能力和生产者经济收入的显著增加；而粗放型稻鱼共生模式的特点是小农户经营、低密度和低投入养殖，目的是自给自足和农户生活条件的改善[3,12]。

表 2 基于自然因素得分(S_n)和社会经济因素得分(S_s)的稻田用于稻鱼共生系统推广的优先级分类

Table 2 Classification of extension priority for rice-fish co-culture system based on natural factors score (S_n) and social-economic score (S_s)

等级 Class	判断标准 Criterion	策略 Strategy
1	S_n 和 S_s 都高于平均水平 1) S_n and S_s are above the average levels[1)]	推广优先级最高，适合大力推广集约型稻鱼共生模式 Highly prior. Suitable for major extension of intensive rice-fish mode
2	S_s 高于平均水平但 S_n 低于平均水平 S_s is above the average level, but S_n is below the average level	推广优先级较高，适合推广集约型稻鱼共生模式 Moderately prior. Suitable for extension of intensive rice-fish mode
3	S_s 低于平均水平但 S_n 高于平均水平 S_n is above the average level, but S_s is below the average level	推广优先级较差，适合根据实际情况推广粗放型或集约型稻鱼共生模式 Marginally prior. Intensive or extensive mode can be developed based on local conditions.
4	S_s 和 S_n 都低于平均水平 S_n and S_s are below the average levels	不适合推广，但可由农户自发性地采用稻鱼共生模式 Not suitable for extension, but farmers can spontaneously practice rice-fish co-culture system.

1)平均水平是所有稻田栅格经稻田面积加权的平均值。The average level is the mean of all rice field grids weighted by the rice field area of grids.

1.4 鱼预期产量估算

稻鱼共生系统鱼年总产出量(P)由单位稻田面积鱼产量和实行稻鱼共生系统的面积决定。从推广的角度而言，实行稻鱼共生系统的面积可分解成稻田总面积 A 和推广率 R(利用稻鱼共生系统的稻田占总稻田面积的百分率)两个部分。因此，在我们的研究中，稻鱼共生系统鱼的年总产出量(P)的估算可简化为所有稻田栅格的年产量之和:

$$P=\sum Y_i\times A_i\times R_i \tag{8}$$

式中: i 代表栅格编号, Y、A 和 R 分别表示栅格内稻鱼共生模式鱼的单产水平($kg\cdot hm^{-2}$)、稻田总面积(hm^2)和推广率。基于表 2 中 4 类推广优先级的含义

可将公式(8)做进一步简化:

$$P = y_1 \times a_1 \times r_1 + y_2 \times a_2 \times r_2 + y_3 \times a_3 \times r_3 \qquad (9)$$

式中: 下标数字代表推广优先等级, y、a 和 r 分别表示不同推广优先等级稻田中稻鱼共生系统鱼单产水平($kg \cdot hm^{-2}$)、稻田总面积(hm^2)和推广率。

基于面上调查数据[12]并出于计算方便的考虑, 将集约型模式鱼单产目标设定为 1 500 $kg \cdot hm^{-2}$, 粗放型模式为 300 $kg \cdot hm^{-2}$, 再经 70%的实现比例折算(在实际生产中平均可达到的目标产量的比例), 两种模式的鱼单产水平分别为 1.05 $t \cdot hm^{-2}$ 和 0.21 $t \cdot hm^{-2}$。

2　结果与分析

2.1　基于自然因素和社会经济因素的推广优先级分值

所有稻田栅格的自然因素和社会经济因素得分值之间具有显著的弱相关性(r=0.29, P<0.001), 但是社会经济因素得分值比自然因素得分值具有更大的变异, 如稻田栅格自然因素得分值为 0.401~0.705 (0.532±0.053), 而社会经济因素得分值变化范围为 0.033~0.815(0.416±0.094), 表明不同稻田发展稻鱼共生系统的适宜性在社会经济方面的差异更大。

在南方 10 省范围内, 自然因素在中部和西部地区的分值较高, 而社会经济因素在中部和东部地区的分值较高。四川盆地、长江中下游地区、沿海地区在自然因素和社会经济因素上均有较高的推广优先级, 云贵川高原在自然因素上非常适合稻鱼共生系统, 但是从社会经济因素来看不适合推广(图 2)。

2.2　适于推广稻鱼共生系统的稻田优先级的分布

根据推广稻鱼共生系统的优先级分类标准(表 2)对南方稻田栅格进行分类, 各类型的空间分布如图 3 所示。相同等级的稻田栅格具有明显的聚集分布效应, 符合临近地理空间的相似性原理。总体上来看, 等级 1 和 2 的稻田比等级 3 和 4 具有更高的聚集性。

推广优先级得分在所有稻田栅格中的变化范围为 0.249~0.721(0.474±0.060), 经分类后形成显著的等级差异。从等级 1 到等级 4 的平均得分体现出推广优先级逐级下降的趋势(表 3)。

属于最适合推广稻鱼共生系统的区域(等级 1)和最不适合推广的区域(等级 4)大约各占 1/3, 均约为 3.6×10^6 hm^2, 但是仅有 16.9%的稻田属于等级 2, 约为 2.0×10^6 hm^2(表 3)。

不同省份的稻田总面积差异很大, 而各等级稻田所占的比例也有显著的差异(图 4)。湖南、四川、江西和浙江 4 省包含了等级 1 和 2 的大部分稻田, 在省内面积占比都超过 50%。重庆的稻田中等级 1 和 2 的比例也达到 50%, 不过在总量上显著小于前 4 个省份。而在广西、广东、福建、云南和贵州, 等级 1 和 2 的比例都较小, 尤其是云南和贵州的稻田基本上都属于等级 3 和等级 4。

南方 10 省所有稻田目前仅有 8%的面积被用于水产养殖。四川、云南、贵州、湖南和浙江是面积最大的前 5 个省份, 其中, 四川、云南、贵州的比例都超过 10%, 远高于其他省份。

2.3　稻鱼共生系统鱼的预期产量

不同推广等级的最大鱼生产潜力具有很大的差异(表 3)。如图 5 所示, 鱼的预期产量(P)与推广率(r)成简单线性关系。为了说明稻鱼共生系统推广率与鱼生产潜力之间的关系, 我们首先考虑所有鱼产量均来自等级 1 和等级 2 稻田的情形。图 5 从二维的角度充分展示了鱼预期产量与 r_1(等级 1 稻田内稻鱼共生系统的推广率)和 r_2(等级 2 稻田内稻鱼共生系统的推广率)的关系。从计算结果看, 等级 1 和等级 2 的稻田若完全推广稻鱼共生系统, 能产生 5.9×10^6 t 鱼, 约等于目前 10 省池塘养殖产量的 55%。

等级 3 稻田适合进行粗放型(E)和集约型(I)相结合的推广方式, 在不同的推广率下也能获得可观的鱼产量。各地区的实际情况不同, 在粗放型(E)和集约型(I)比例上可能会有较大的差异, 因此在鱼产量预测上也有很大的变幅(图 6)。从完全采用粗放型模式推广, 到粗放型和集约型比例相同, 再到完全采用集约型模式推广, 等级 3 稻田推广率(r_3)与等级 1 推广率(r_1)相比, 将分别具有约 5∶1、2∶1 和 1.25∶1 的当量比(即两个等级的稻田产出等量的鱼所需要的推广率的比例)。

3　讨论与结论

3.1　推广优先级的可靠性

地理信息系统(GIS)和多准则决策分析(MCDA)相结合是目前大尺度地理空间上进行决策分析的主流方法论, 有助于避免片面信息和主观判断的不足, 能够为制定合理的决策方案提供巨大的便捷。评分指标的选择和相应权重的赋予对 GIS-MCDA 分析结果的可靠性和客观性具有重要影响。如何选择出一套合适的指标是具有严格标准的, 但是在实际研究中指标的选择往往受制于多方面的因素, 例如研究者对指标的可获得性[37]。本研究所选的 15 个指标(图 1)显然不能完全覆盖影响稻鱼共生系统推广的所有方面, 但已具有较好的代表性。相关性分析表明各指标两两之间仅有较小的相关性, 表明所选的指标没

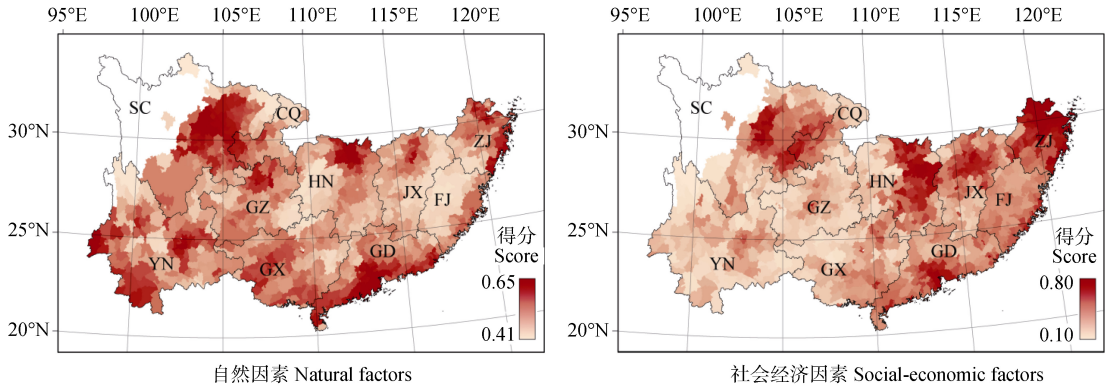

图 2 基于自然因素和社会经济因素的中国南方 10 省稻田适合推广稻鱼共生系统的得分值空间分布(图中展示的是以县为单元的分值，通过县内所有稻田栅格的平均得到。白色区域无稻田分布。SC: 四川; CQ: 重庆; ZJ: 浙江; HN: 湖南; JX: 江西; GZ: 贵州; FJ: 福建; YN: 云南; GD: 广东; GX: 广西)

Fig. 2 Spatial distribution of scores of rice fields suitable for extending rice-fish co-culture system in 10 provinces in South China based on natural and social-economic factors. The data shown in figure are the average scores of all rice field grids within a county. The white portion is no rice field. SC: Sichuan; CQ: Chongqing; ZJ: Zhejiang; HN: Hunan; JX: Jiangxi; GZ: Guizhou; FJ: Fujian; YN: Yunnan; GD: Guangdong; GX: Guangxi.

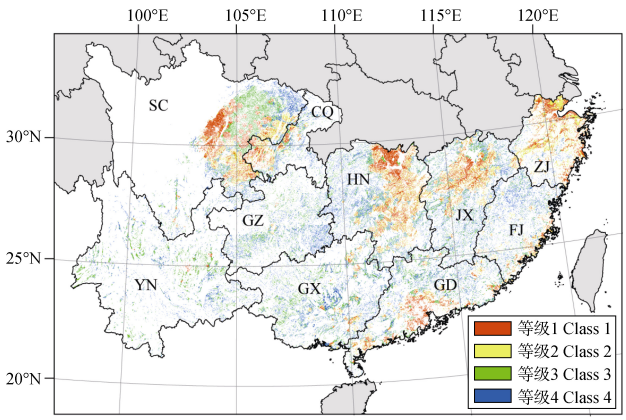

图 3 中国南方 10 省内稻田适合推广稻鱼共生系统优先等级的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of priority classes of rice fields suitable for extending rice-fish co-culture system in 10 provinces in South China

灰色区域为非研究区域，白色区域无稻田分布。SC: 四川; CQ: 重庆; ZJ: 浙江; HN: 湖南; JX: 江西; GZ: 贵州; FJ: 福建; YN: 云南; GD: 广东; GX: 广西。The gray portion is out of study area, and the white portion is no rice field. SC: Sichuan; CQ: Chongqing; ZJ: Zhejiang; HN: Hunan; JX: Jiangxi; GZ: Guizhou; FJ: Fujian; YN: Yunnan; GD: Guangdong; GX: Guangxi.

有太大的冗余性问题。对于 GIS 中常涉及到的地形因素(如坡度、田块破碎化)没有加以考虑，因为地形因素通常适合小尺度空间范围和高分辨率的分析，而本研究的空间分辨率是更适合大尺度分析的 1 km×1 km 栅格，没有达到地形因素所需要的精度要求。

在自然因素指标的选择上，主要考虑实行稻鱼共生系统的适宜性。由于已将选择区域限定在已有的稻田中，认为自然条件已能满足水稻的正常生产，我们只从水产生物的适宜性角度出发选择指标。中国南方许多地区都有开展稻鱼共生系统的传统，总体上而言大部分地区都能实行稻鱼共生系统的推广，但是由于山区地貌结构复杂，气候和土壤条件具有较大空间异质性，不同地区间在自然因素适宜性即推广的优先程度上会存在一定程度的差异。这在自然因素总得分值的空间分布上得到了充分的体现(图 2)。

从评价结果来看，社会经济因素与自然因素相比对推广优先级具有更大的影响。不过在本研究中隶属于社会经济因素的指标仅有 3 个，在分析效能上或许存在一定的不足，为了得到更符合实际的结果还有待对更多与推广效果直接相关的方面加以分析，如当地的消费习惯、水产品产业结构和市场消费度等。

指标权重是在评价过程中不同指标对评价结果贡献程度的反映，因此权重的确定是多准则决策分析中一个重要的问题。目前比较常用的赋权法有德尔菲法(Delphi)和层次分析法(AHP)等，这些方法都需要研究者(或专家团)对决策目标有比较深入的了解，否则也不易取得符合现实情况的赋权效果。但是本研究对各指标的重要性差异并没有前期研究背景支撑，也缺乏对各指标与推广优先级的非线性相关性的了解，因此采用了等权重法，为同一等级的指标赋予相同的权重，仅简单地利用指标的层级关系将权重进行分解，从而达到对各指标赋权的目的。等权重法虽然并没有体现出指标间重要性的真实差异，但也排除了由于缺乏对系统的深入了解而带来的人为主观性。而逐级分解权重的过程可有效地避免因同一类型指标过多造成权重分配不均的问题。当然，我们还可以选择除了德尔菲法和层次分析法以外的其他方法进行赋权，例如基于指标自身特征客观赋权方法[38]。不同的赋权法及其对评价结果的影响还有待进一步的分析。

表 3　研究区域内稻田不同推广优先等级的面积、平均得分和生产潜力

Table 3　Areas, average priority scores and potential productions of the rice fields in each class

等级 Class	稻田面积 Rice field area (10^6 hm^2)	面积占比 Area proportion (%)	得分 Score	推广模式 Extension mode	最大鱼产量 1) Maximum fish production (10^6 t)1)
1	3.59	29.56	0.54±0.04	集约型 Intensive	3.77
2	2.05	16.85	0.49±0.04	集约型 Intensive	2.15
3	2.94	24.20	0.46±0.03	粗放型 Extensive	0.62
				集约型 Intensive	3.09
4	3.57	29.40	0.41±0.03	—	—

1)最大鱼产量是指所有稻田都推广稻鱼共生系统时的鱼总产量。1) The maximum fish production is the total fish yield from the rice fields that are all explored for rice-fish co-culture system.

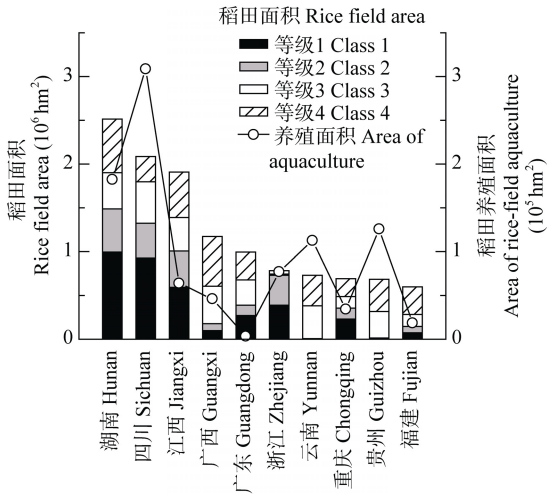

图 4　不同省份稻田不同推广优先级面积(左 *Y* 轴)和 2016 年稻田水产养殖面积(右 *Y* 轴)

Fig. 4　Areas of rice field of each suitable class for extending rice-fish co-culture system (left *Y* axe) and the area of rice-field aquaculture in 2016 (right *Y* axe) in the 10 provinces of South China

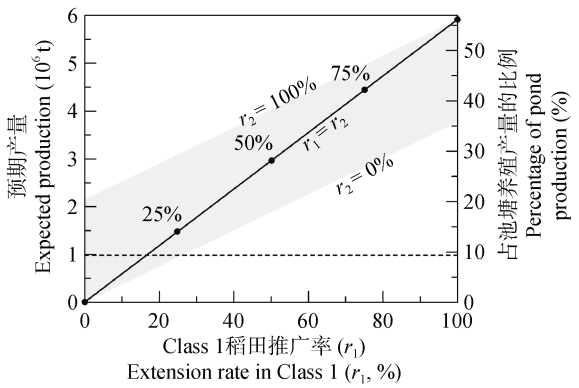

图 5　在等级 1 和等级 2 稻田中不同推广率(r_1 和 r_2)的鱼预期产量(左轴)和与其相当的 2016 年池塘养殖产量的比例(右轴)。图中实线表示在 r_1=r_2 的情形下，预期产量随着 r_1 增加的变化趋势。其中 r_1=r_2=25%、50%、75%和 100%时的产量点已突出标注。阴影部分代表预期产量的可能范围，阴影的上、下边沿分别代表 r_2=100%和 r_2=0%时预期产量随着 r_1 增加的变化趋势。虚线为南方 10 省 2016 年的稻鱼共生系统鱼总产量

Fig. 5　Predicted fish production (left *Y* axis) and corresponding percentage in pond production (right *Y* axis) under different extension rates of Class 1 and Class 2 (shown as r_1 and r_2) of rice-fish co-culture system in South China. The solid line shows the trend of predicted production along with the change of r_1 as r_2 keeps identical to r_1, where five special points (r_1 = r_2 = 0%, 25%, 50%, 75% and 100%) are labeled. The shading represents the possible range of predicted production. The upper and lower border lines show the situations of r_2 = 100% and 0%, respectively. The dashed line is the total fish production of 10 provinces of South China from rice-fish co-culture system in 2016.

从一些特定地区来看，我们的结果与现实情况能较好地吻合。例如，浙江青田县和贵州从江县都具有悠久历史的稻鱼共生系统，但是在社会经济发展上存在较大的差异，稻鱼共生系统发挥功能的侧重面也是不同的[39-41]。青田县经济稍发达、消费水平比较高，而从江县基本上还处于自给自足的小农经济。根据我们的实地考察，青田县主要以种植杂交稻的集约型模式为主，而从江县主要以种植传统水稻品种的粗放型模式。两地的差异在本研究结果中能得到很好的体现。青田县稻田主要属于等级 2，特点是自然因素得分不高而社会经济得分高，适合进行集约型模式推广；而从江县稻田主要属于等级 3，特点是自然因素得分高，而社会经济得分低，可根据实际情况进行集约型和粗放型相结合的推广方式。

除了中国南方的稻鱼共生系统以外，我们的评价体系大体上适用于其他的地区(如中国北方地区、东南亚热带地区)和更多的稻田水产养殖类型(如稻鱼轮作系统)，但是在具体运用时需要根据地区和模式特点重新构建指标数据库并适当地加入更多有代表性的新指标。

3.2　稻鱼共生系统的推广策略

中国南方地区是水稻种植的主要区域，也是稻鱼共生系统的发源地和重要分布区。从目前 10 省的稻田水产养殖面积来看(图 4)，稻鱼共生系统仍然具有巨大的推广潜力(表 3)。但是，不同条件的稻田所适合推广稻鱼共生系统的模式(集约型或粗放型)是

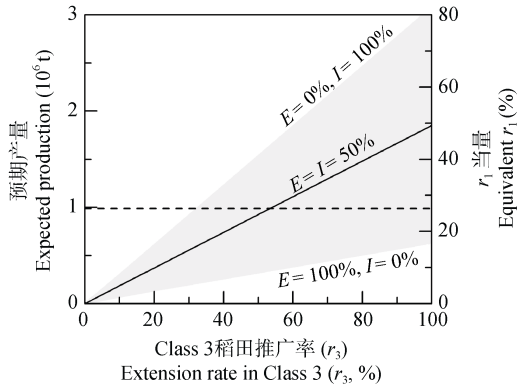

图 6 在等级 **3** 稻田中基于不同推广率**(r_3)**和推广模式比例的鱼预期产量(左轴)和与其产量相当的等级 1 稻田的推广率**(r_1**，右轴**)**。***E*: 粗放型模式的占比; *I*: 集约型模式的占比。图中实线表示粗放型模式和集约型模式等比例推广时，鱼产量随 r_3 增加的变化趋势。阴影部分代表预期产量的可能范围，阴影的上、下边沿分别代表全部推广集约化模式和全部推广粗放型模式下的预期产量随着 r_3 增加的变化趋势。虚线表示南方 **10** 省 **2016** 年的稻鱼共生系统鱼总产量。

Fig. 6 Predicted fish production in the rice fields (left axis) and corresponding extension rate of Class 1 (r_1) under different extension rates of Class 3 (r_3) of rice-fish co-culture system in South China. *E*: percentage of extensive mode; *I*: percentage of intensive mode. The solid line shows the trend of predicted production along with the change of r_3 when the percentage of the extensive mode is identical to the intensive mode. The shading represents the range of predicted production. The upper and lower border lines show the situations of 100% intensive mode and 100% extensive mode, respectively. The dashed line is the total fish production of 10 provinces from rice-fish co-culture system in 2016 in South China.

不同的，鱼的生产潜力也有较大的差异(表 3)，因此推广优先级(即推广的价值和必要性)是不一样的。推广工作必须对不同条件的稻田加以区分，把握全局重点、科学规划、合理布局，使推广效果最大化。这是本研究的主要出发点。我们的结果表明，推广优先级最高(等级 1)的稻田比例达到了 1/3。这些稻田应该成为推广的最优先选择目标。皮尔森相关性检验表明，等级 1 稻田面积越大的省份，其现有稻田水产养殖面积也越大(r=0.671，P=0.034)，一定程度上表明了分类结果的合理性。

不同省份的推广潜力是不同的，所采取的推广策略也应该加以区别。湖南、四川、江西、广东、浙江和重庆 6 省市现有稻田水产养殖面积远远没有达到等级 1 稻田面积(图 4)，应该首先着力在这些稻田上，大力推广集约型稻鱼模式；广西和福建的现有面积与等级 1 面积之间差距较小，应该在等级 1 稻田加以推广的同时，提高目前已有稻鱼共生系统的生产力水平，从粗放型和半粗放型模式向集约型模式转型。云南和贵州现有面积已经大大超过等级 1 面积，这主要是因为两省的社会经济条件相对于其他省份而言处于最低的水平，而根据我们的分类标准，两省的稻田 98%以上都属于等级 3 和等级 4。云南和贵州的少数民族人口比例大，稻鱼共生系统是他们保障粮食安全和提高生活水平的重要生计方式，因此在自然条件较好的等级 3 稻田中大力推广粗放型和半粗放型为主的模式是目前的重点，而且对现有稻鱼共生系统进行技术提升和政府资金支持也是非常重要的[42-43]。

近年来，随着稻田养殖技术的快速发展，蟹、虾、鳅、鳝、鳖等一批经济价值高、产业化条件好的名特优品种成为不少地区稻田养殖的主要品种[23]。推广过程中注重水产品种的选择搭配，能够提高供给侧产品多样化水平，缓解单一发展带来的负作用、实现经济效益最大化[44]。本研究针对稻鱼共生系统的推广优先级结果基本上也适用于其他水产品种的共生模式，但是在不同水产品种选择时仍然需要慎重考虑实际生产条件(例如苗种供应能力和市场需求)和水产品种的生物学特性。例如，和鲤鱼相比，鳖需要更高的积温,河蟹对高温的耐受能力更差，而小龙虾的掘洞习性对山区稻田易造成危害。本研究的结果并不适用于稻田连作为主的模式(水产品生长季不在水稻生长季内)，例如目前在湖区滩地等稻田发展迅速的稻虾连作模式。总体而言，越适合集约型模式的地区越适合水产品种的多样化发展，可通过养殖更高价值的水产品实现更高的经济效益。因此，等级 1 和等级 2 稻田比等级 3 稻田更加适合品种的多养化发展。

基于 GIS 的分析结果受到空间尺度的影响[32]，我们的分析是基于 10 省范围的大尺度空间，开展针对各省情况的具体分析很有必要。这将需要更高分别率的稻田空间数据和更多的影响因素，从而得到对各省而言更具有指导性的结果。

3.3 推广潜力的经济和生态效应

决策制定的同时往往需要对决策所带来的效益进行评估。本研究利用稻田鱼产量的估计值对稻鱼共生系统的推广效益进行初步分析(图 5、图 6)。目前水源地保护日益受到重视，水产养殖尤其是污染严重的网箱养殖受到限制。稻鱼共生系统在缓解鱼产品供给压力和减轻面源污染方面的重要性显得更为突出。本研究通过与池塘养殖的产量的比较，直观地体现出稻鱼共生系统的较大生产潜力。但是我们的估计仅仅基于简单的经验数据和数学模型，尽管简洁易懂，但是仍显粗糙。更为精准的估计还应该结合不同水产动物的稻田生产特性[12]以及和其他

环境因子的相关性进行分析。

推广稻鱼共生系统更需要结合其经济效益进行效益评估。稻鱼共生系统能够显著提升稻田的经济价值，这不仅在水产品价格优势上体现出来，还能通过增加稻米品质从而提高其商品附加值来实现。但是由于不同地区生产条件和市场环境的差异性，以及在局部区域推广后所导致的规模效应和市场竞争等情况的可能出现[44]，准确地预测推广稻鱼共生系统所带来的经济效益具有很大的难度。精确的效益评估更适合在较小的空间尺度上进行分析，不过仍然可以建立一个通用的评估方法体系和模型，这有待后续的进一步研究。

除了水产品供给和经济效益两个方面外，稻鱼共生系统作为中国生态农业现代化发展的重要举措，其在水稻生产过程中的化肥农药减量效应更应该引起重视[13,15,45-47]。农药减量效应一方面出于对水产品的保护和生态农业标准要求，另一方面也是因为鱼对水稻病虫草害的控制作用降低了水稻对农药的依赖；而化肥减量效应则是因为集约化的稻鱼共生模式有大量饲料输入，饲料中的养分经过鱼的取食后通过粪便等形式排放后可被水稻利用，这在一定程度上起到了替代部分化肥投入的作用。农药和化肥的减量效应不仅可以降低生产成本，而且大大减少了稻田面源污染问题。减量效应大小与生产条件和技术环节等许多方面密切相关，预测需要大量的经验数据作为基础。若能开展相关基础研究来准确地估计稻鱼共生系统的农药和化肥的减量效应，对其推广工作而言具有重大的理论和实践意义。

综上所述，本研究基于自然因素和社会经济因素，利用地理信息系统和多准则决策分析的方法，建立了评估我国南方地区稻鱼共生系统推广潜力的指标体系和产量预测模型；并将我国南方 10 个省市稻田划分为 4 个推广优先等级，其中，等级 1 和等级 2 稻田适合推广集约型稻鱼共生系统，面积分别占 29.6%和 16.9%，最大可获得鱼产量 5.92×10^6 t；等级 3 稻田面积占 24.2%，可根据实际条件进行集约型或粗放型稻鱼共生系统的推广，平均能获得鱼产量 1.85×10^6 t。这些结果为合理制定稻鱼共生系统推广策略提供借鉴，也可为国内外稻田水产养殖产业发展规划的制定提供参考。

参考文献 References

[1] FOLEY J A, RAMANKUTTY N, BRAUMAN K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. Nature, 2011, 478(7369): 337–342

[2] LIU J G, YANG W. Water sustainability for China and beyond[J]. Science, 2012, 337(6095): 649–650

[3] 胡亮亮, 唐建军, 张剑, 等. 稻–鱼系统的发展与未来思考[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 268–275
HU L L, TANG J J, ZHANG J, et al. Development of rice-fish system: Today and tomorrow[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 268−275

[4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT[EB/OL]. (2016). http://faostat3.fao.org/home/E

[5] OECD/Food and Agriculture Organization of the United Nations. OECD-FAO Agricultural Outlook 2015–2024[M]. Paris: OECD Publishing, 2015

[6] CABELLO F C. Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: A growing problem for human and animal health and for the environment[J]. Environmental Microbiology, 2006, 8(7): 1137–1144

[7] MAGALHÃES A L B, VITULE J R S. Aquarium industry threatens biodiversity[J]. Science, 2013, 341(6145): 457

[8] NAYLOR R L, GOLDBURG R J, PRIMAVERA J H, et al. Effect of aquaculture on world fish supplies[J]. Nature, 2000, 405(6790): 1017–1024

[9] PÉREZ J E, NIRCHIO M, GOMEZ J A. Aquaculture: Part of the problem, not a solution[J]. Nature, 2000, 408(6812): 514

[10] TROELL M, NAYLOR R L, METIAN M, et al. Does aquaculture add resilience to the global food system?[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(37): 13257–13263

[11] AHMED N, WARD J D, SAINT C P. Can integrated aquaculture-agriculture (IAA) produce “more crop per drop”?[J]. Food Security, 2014, 6(6): 767–779

[12] HU L L, ZHANG J, REN W Z, et al. Can the co-cultivation of rice and fish help sustain rice production?[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28728

[13] XIE J, HU L L, TANG J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(50): E1381–E1387

[14] 李嘉尧, 常东, 李柏年, 等. 不同稻田综合种养模式的成本效益分析[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1431–1438
LI J Y, CHANG D, LI B N, et al. Benefit-cost analysis of different rice-based production systems[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1431–1438

[15] 王晨, 胡亮亮, 唐建军, 等. 稻鱼种养型农场的特征与效应分析[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(5): 875–882
WANG C, HU L L, TANG J J, et al. Characteristics and the effects of the rice-fish integration based farms in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(5): 875– 882

[16] DELA CRUZ C R, LIGHTFOOT C, COSTA-PIERCE B A, et al. Rice-fish Research and Development in Asia[R]. Manila: International Center for Living Aquatic Resources Management, 1992

[17] CAI R K, NI D S, WANG J G. Rice-fish culture in China: The past, present, and future[M]//MACKAY K T. Rice-Fish Culture in China. Ottawa: International Development Research

Centre, 1995: 15–21

[18] RUDDLE K. Traditional integrated farming systems and rural development: The example of rice field fisheries in Southeast Asia[J]. Agricultural Administration, 1982, 10(1): 1–11

[19] LU J B, LI X. Review of rice-fish-farming systems in China — One of the globally important ingenious agricultural heritage systems (GIAHS)[J]. Aquaculture, 2006, 260(1/4): 106–113

[20] AHMED N, GARNETT S T. Integrated rice-fish farming in Bangladesh: Meeting the challenges of food security[J]. Food Security, 2011, 3(1): 81–92

[21] RADHEYSHYAM, SAHA G S, DE H K, et al. Status and economy of community fish farming in rural Odisha[J]. Indian Journal of Fisheries, 2013, 60(4): 59–67

[22] SHAMS N. Contribution of rice field ecosystems to food security strategies in Northwest Cambodia[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2007, 29(4): 109–133

[23] 李可心, 朱泽闻, 钱银龙. 新一轮稻田养殖的趋势特征及发展建议[J]. 中国渔业经济, 2011, 29(6): 17–21
LI K X, ZHU Z W, QIAN Y L. Trend characteristics and development proposals of a new round rice-fish culture[J]. Chinese Fisheries Economics, 2011, 29(6): 17–21

[24] 沈雪达, 苟伟明. 我国稻田养殖发展与前景探讨[J]. 中国渔业经济, 2013, 31(2): 151–156
SHEN X D, GOU W M. Research on rice paddy development and prospects in China[J]. Chinese Fisheries Economics, 2013, 31(2): 151–156

[25] 周江伟, 刘贵斌, 黄璜. 传统农业文化遗产稻田养鱼进步与创新体系研究[J]. 湖南农业科学, 2017, (9): 105–109
ZHOU J W, LIU G B, HUANG H. Progressand innovation system of fish farming in the paddy field of traditional agricultural heritage[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017, (9): 105–109

[26] HALWART M, GUPTA M V. Culture of Fish in Rice Fields[M]. Rome: FAO, 2004

[27] COCHE A G. Fish culture in rice fields. A world-wide synthesis[J]. Hydrobiologia, 1967, 30(1): 1–44

[28] 李娜娜. 中国主要稻田种养模式生态分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 27
LI N N. Ecological analysis of representative rice-based ecosystems in China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 27

[29] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业年鉴 2017[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. China Fisheries Yearbook 2017[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017

[30] 全国水产技术推广总站. 中国稻渔综合种养产业发展报告(2018)[J]. 中国水产, 2019, (1): 20–27
National Aquatic Technology Extension Station of the People's Republic of China. Report on the industry development of China's integrated rice-fish farming[J]. China Fisheries, 2019, (1): 20–27

[31] 谷婕, 吴涛, 黄璜, 等. 我国稻田养鱼经营的发展进程与展望[J]. 作物研究, 2017, 31(6): 597–601
GU J, WU T, HUANG H, et al. The development and prospect of the management of rice field fish farming in China[J]. Crop Research, 2017, 31(6): 597–601

[32] DÍAZ I, MELLO A L, SALHI M, et al. Multiscalar land suitability assessment for aquaculture production in Uruguay[J]. Aquaculture Research, 2017, 48(6): 3052–3065

[33] MALCZEWSKI J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(7): 703–726

[34] WIJENAYAKE W M H K, AMARASINGHE U S, DE SILVA S S. Application of a multiple-criteria decision making approach for selecting non-perennial reservoirs for culture-based fishery development: Case study from Sri Lanka[J]. Aquaculture, 2016, 459: 26–35

[35] 杜宁, 杨宁生, 孙英泽. 基于GIS的池塘养殖适宜性评价——以河南省为例[J]. 中国水产科学, 2008, 15(3): 476–482
DU N, YANG N S, SUN Y Z. GIS-based evaluation of aquaculture suitability in Henan Province[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(3): 476–482

[36] 林勇, 刘述锡, 关道明, 等. 基于 GIS 的虾夷扇贝养殖适宜性综合评价——以北黄海大小长山岛为例[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5984–5992
LIN Y, LIU S X, GUAN D M, et al. GIS-based Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*) aquaculture suitability assessment: A case study with the islands of Dachangshan and Xiaochangshan, North Yellow Sea, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5984–5992

[37] MALCZEWSKI J. On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches[J]. Transaction in GIS, 2000, 4(1): 5–22

[38] 陈述云. 综合评价中指标的客观赋权方法[J]. 上海统计, 1995, (6): 16–18
CHEN S Y. Objective weighting in comprehensive assessments[J]. Shanghai Statistics, 1995, (6): 16–18

[39] 常巧素. 稻鱼共生模式的经济生态社会效益分析——以 L 县苗族聚居区为例[J]. 山西农业科学, 2016, 44(11): 1723–1728
CHANG Q S. Analysis of the economic ecological social benefits of rice-fish symbiosis model — A case study of Miao Nationality area in L County[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(11): 1723–1728

[40] 刘某承, 张丹, 李文华. 稻田养鱼与常规稻田耕作模式的综合效益比较研究——以浙江省青田县为例[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 164–169
LIU M C, ZHANG D, LI W H. Evaluation of comprehensive benefit of rice-fish agriculture and rice monocropping — A case study of Qingtian County, Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 164–169

[41] 张丹, 闵庆文, 孙业红, 等. 侗族稻田养鱼的历史、现状、机遇与对策——以贵州省从江县为例[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 987–990
ZHANG D, MIN Q W, SUN Y H, et al. History, current state, opportunities and countermeasures of Dong Nationality rice-fish agrosystem — A case study of Congjiang County, Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4): 987–990

[42] 方世贞, 李正友, 罗永成, 等. 贵州省黔东南州稻田养鱼现

状及发展对策[J]. 贵州畜牧兽医, 2014, 38(1): 61–63
FANG S Z, LI Z Y, LUO Y C, et al. Status and developing countermeasures of rice-fish farming in Qiandongnan Prefecture, Guizhou Province[J]. Guizhou Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2014, 38(1): 61–63

[43] 游峥嵘. 云南省稻田养鱼产业现状及发展对策研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015
YOU Z R. The research on the status and development of raising fish in paddy field in Yunnan Province[[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015

[44] 黄璜, 刘小燕, 戴振炎, 等. 湖南省稻田养鱼生产与农业供给侧改革[J]. 作物研究, 2016, 30(6): 656–660
HUANG H, LIU X Y, DAI Z Y, et al. Rice-fish farming and agricultural supply side reform in Hunan Province[J]. Crop Research, 2016, 30(6): 656–660

[45] HU L L, REN W Z, TANG J J, et al. The productivity of traditional rice-fish co-culture can be increased without increasing nitrogen loss to the environment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 177: 28–34

[46] OEHME M, FREI M, RAZZAK M A, et al. Studies on nitrogen cycling under different nitrogen inputs in integrated rice-fish culture in Bangladesh[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79(2): 181–191

[47] ZHANG J, HU L L, REN W Z, et al. Rice-soft shell turtle coculture effects on yield and its environment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 224: 116–122