

王志强,唐海鹰,闻熠,等.长江中游地区稻田生态系统服务功能价值评估研究进展[J].华中农业大学学报,2022,41(6):89-100.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.010

长江中游地区稻田生态系统服务功能 价值评估研究进展

王志强¹,唐海鹰²,闻熠¹,肖涛¹,缪建群³,
杨文亭⁴,杨滨娟⁴,周泉⁴,黄国勤⁴

1.九江学院资源环境学院/江西省长江流域产业生态模拟与环境健康重点实验室,九江 332005;
2.湖南人文科技学院农业与生物技术学院,娄底 417000; 3.江西农业大学计算机与信息工程学院,南昌
330045; 4.江西农业大学生态科学研究中心,南昌 330045

摘要 长江中游地区是我国重要的水稻生产基地,为全国粮食安全和生态系统安全健康作出了重要贡献。科学合理评估稻田生态系统服务功能价值,可为其服务功能价值演变、改善和推广稻田绿色可持续发展模式提供重要依据。本文在梳理稻田生态系统服务功能内涵和服务功能价值评估体系、方法的基础上,对评估长江中游地区不同稻田生态系统服务功能的方法进行了分类对比,并归纳总结了该区稻田生态系统服务功能价值评估研究框架和研究思路。因稻田类型、稻区分布区域和价值评估指标体系不同,各稻田生态系统服务功能价值评估的方法和单位面积服务功能价值量存在一定差异,认为未来研究需要不断完善不同稻田生态系统服务功能价值评估指标体系,改进评估方法,提高评估准确性;同时本文还对长江中游地区部分稻田的服务功能进行了分析,发现研究主要集中在稻田微观试验和省市县区域宏观测算2个维度上,对稻田生态系统某一部分服务功能或系统整体服务功能价值进行了静态评估,而对其价值评估的长期动态跟踪研究不足,对稻田生态系统服务功能净价值研究也有待于进一步深入。

关键词 长江中游;稻田生态系统;服务功能价值;价值评估;稻田绿色可持续发展

中图分类号 S181.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0089-12

长江中游地区(包括湖南、湖北和江西)是我国华中地区重要的单双季稻生产基地,为全国粮食安全和生态系统健康安全作出了重要贡献。根据湖南、湖北和江西省统计局官网数据,2016—2021年,3省的水稻种植面积呈现稳中微降趋势,3省6年内水稻的年平均产量分别为1 898.71万、2 678.54万和2 088.06万t,保持产量总量水平基本稳定;3省水稻种植面积总和占全国水稻种植面积的比由2016年的33.06%下降至2021年的31.39%,其水稻产量总和占全国水稻产量总和由2016年的31.92%下降至2020年的30.94%,2021年上升至31.18%。

长江中游地区稻田生态系统多年所取得的粮食生产成就引起了社会各界对稻田生态系统产品生产

功能的重视,但对稻田生态系统的其他功能(诸如气候调节、维持土壤肥力、涵养水源、景观美学等)的关注还有待于提升。近些年来,随着世界自然生态环境的恶化及各国各级政府和人民对生态环境保护问题的逐渐重视,尤其是对农田生态环境的保护越来越重视,稻田生态系统的非粮食生产功能才逐渐引起重视。因此,稻田生态系统服务功能和价值评估研究也从此成为研究热点之一。

1 稻田生态系统服务功能及其价值评估

稻田生态系统是一种半自然半人工系统,是由稻田生物系统、环境系统和人为干扰调节控制系统

收稿日期:2022-04-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300208);国家自然科学基金项目(41661070);中国工程院咨询研究项目(2017-XY-28);教育部产学研实践条件和实践基地建设项目(202102136057);九江学院博士科研启动金项目(8692809)

王志强,E-mail:289459509@qq.com

通信作者:黄国勤,E-mail:hgqjxes@sina.com

组成的复杂系统,具有生产、生态和社会等复合功能,还具有波动性、多样性、人为性和经济生态社会等特性,稻田生态系统可为人类提供极为丰富的物质财富,还为人类提供各种各样功能性服务,具有重要的生态服务价值,对稻田生态系统服务功能价值评估具有重要的现实意义。

1.1 稻田生态系统服务功能的内涵

自1997年Costanza等^[1]提出生态系统服务价值以来,生态系统服务功能引起了世界各国的广泛关注,并开展了大量相关研究。农业多功能的理念起源于1998年经济合作与发展组织农业部长会议公报提出的农业多功能性的指导性定义和日本1999年颁布的《食物·农业·农村基本法》,认为农业除了提供食物与纤维生产外,还能塑造提供优美的自然景观环境,农业生态系统所提供的服务可为农业地区的经济社会发展提供支持^[2-3]。在20世纪末21世纪初,日本^[4]、韩国^[5]、中国^[6-7]等先后开展了农业系统的多功能性探讨,但研究主要局限于世界贸易组织规则,对农业系统多功能性的探讨还不广泛。

随着生态系统服务功能概念及内涵的不断丰富,生态系统服务功能对人类的影响也在不断扩大,如稻田生态系统、湖泊湿地生态系统和林草地生态系统等重要生态系统,各特定生态系统的服务功能及内涵不断丰富。稻田生态系统除生产供应农产品及副产品外,更重要的是为支撑与维持自然及人类生命健康可持续发展提供相应服务。当前,众多研究人员从生态系统与功能间的对应关系出发,从生态系统服务功能评价体系的角度^[8],将稻田生态系统服务功能主要分为提供初级产品、调节人类生命系统的自然生态功能和丰富人类精神世界的社会功能3大类^[9-10],稻田生态系统中提供初级产品的功能主要是提供稻谷与秸秆,也称为经济性服务功能;第二类服务功能主要是为人类的生存环境提供保障和支撑,诸如气体调节、水质净化、水土保持、营养物质循环、维持生物多样性等功能;第三类服务功能主要是为人类提供景观休闲娱乐等社会性功能。文献^[11]认为稻田生态系统服务功能分为产品供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4大类,共20子类,调节和支持服务主要是支持稻田生态环境可持续发展方面的功能,产品供给服务是人类从稻田系统中获得的物质效益,稻田生态系统的文化服务是稻田系统为人类生活提供了休闲、娱乐与美学享受。从已有稻田生态系统服务功能研究文献的内容和框架来

看,基本围绕产品供给、调节服务、支持服务和文化服务展开,对相应的服务功能进行了价值评估。

1.2 稻田生态系统服务功能价值评估的现实意义

在明确稻田生态系统服务功能范畴的基础上,对稻田生态系统服务功能价值大小进行评估具有重要的理论和现实意义。从稻田生态系统本身看,一方面,评估稻田生态系统服务功能可以准确了解其各生态服务功能价值量的大小,也可为探索在不同施肥措施^[12]、保护性耕作措施^[13]和不同种植模式^[14-15]对稻田各服务功能价值的作用机制、影响过程和影响大小提供数据支持,为稻田生态系统健康可持续发展提供理论依据。如在长江中下游地区采用免耕秸秆还田保护性耕作模式^[13]、紫云英+优化施肥措施^[12]有利于提高稻田生态系统的生产服务功能价值和生态服务功能价值(调节气候、涵养水分等)。因此,通过合理科学的人为措施优化调节稻田生态有利于提升稻田生态系统服务功能价值;另一方面,稻田生态系统服务功能的实现也是有一定的生态成本,如水稻生产过程中所消耗的化肥、农药、水资源和使用机械设备等给稻田生态系统带来的负面损失,如果水稻生产中的生态成本太高,既不利于稻田生态系统本身的健康,也不利于生态环境健康和农民增收,甚至会影响城乡协调与社会和谐发展稳定^[16]。因此,对稻田生态系统服务功能成本的估算也是建立完善稻田生产者补偿的依据之一,亦可为保障粮食安全和稻田生态安全提供决策参考。

1.3 稻田生态系统服务功能价值评估的方向

生态系统服务功能价值的重要性逐渐得到人们的高度重视。Costanza团队测算出2014年全球生态系统的生态系统服务价值为124万亿~145万亿美元(<https://www.huanbao-world.com/foreign/109662.html>)。20世纪80年代,我国学者也从不同空间尺度对不同的生态系统进行了服务功能价值研究,如对陆地生态系统^[6]、自然草地生态系统^[17]、农田生态系统^[18]进行了相关服务功能价值评价,主要是从不同的生态系统功能、结构和特征等方面进行了特定功能价值评估,相关评估还未形成系统性,如对稻田生态系统的土壤保持价值、气体调节和蓄水防洪等价值部分服务功能进行了评估^[19]。随后众多学者根据不同区域稻田生态系统服务功能进行了更为广泛全面的研究,如台湾稻田涵养地下水的价值为290亿元/a^[20]、上海五四农场稻田生态系统的气体调节价值达5467~12842元/(hm²·a)^[21]、湖

南省稻田生态系统因施用农药化肥而造成的生态服务功能损失高达 2.9×10^7 元/a^[22]。陈源泉等^[23]对中国粮食主产区农田生态服务价值总体进行了评价,认为粮食主产区的生态服务功能价值总体高于全国水平14%,主要稻区之间人均和单位农田的服务价值也有较大差异。肖玉等^[24]对中国十大类稻田生态系统服务进行了价值评估,认为中国稻田生态系统服务价值为8 605~21 405美元,除初级产品(稻谷和秸秆)外,其他生态系统服务价值约占74%~89%,说明稻田生态系统中的非生产性服务功能价值巨大,要引起社会各界高度重视。

传统价值观认为稻田生态系统服务价值主要体现在粮食生产功能上,而其对生态环境与社会的负面影响受到忽视^[8,25-26]。与人类经济社会其他生产活动一样,稻田生态系统的生产具有外部性特征。正外部性主要表现为稻田生态系统为维持自身以及为生态自然环境的可持续发展发挥积极正面作用的功能^[27],诸如蓄水防洪、调节气温、涵养地下水源^[28]、水质净化、废弃物消纳、生物多样性保持和文教景观等功能^[14,29-30];同时随着生态环境保护意识的提高和对稻田生态系统可持续发展的高度重视,人们越来越重视稻田生态系统来自于施用化肥农药、水稻田排放的温室气体、水资源消耗等方面所产生的负外部性价值^[14,27,31]。因此,针对稻田生态系统服务功能净值展开研究将可能是未来一个重要的研究方向之一。

2 长江中游稻田生态系统服务功能价值评估的指标体系及评估方法

在梳理稻田生态系统服务功能的内涵、价值评估现实意义及研究方向后,结合长江中游地区稻田生态系统特点,对稻田生态系统服务功能类型进行分类,针对功能类型构建相应指标体系,确定其评估方法是稻田生态系统服务功能价值评估的关键。

2.1 长江中游稻田生态系统的服务功能价值类型

针对生态系统的不同服务功能,依据不同的标准,国内外学者对生态系统类型划分的研究较多,但并没有形成统一标准。Freeman^[32]提出按功能将生态系统分为4大类,Daily^[33]则分为两大类共十小类,Costanza等^[1]分为17类。联合国千年生态系统评估将生态系统分为供给服务、支持服务、调节服务和文化服务四大类服务,共二十子类^[11]。将前人针对生态系统服务功能分类思想及方法引入稻田生态系

统,需要考虑稻田生态系统的自然属性和人工属性。不同地区、不同类型的稻田生态系统其生态服务功能价值不同,但导致服务功能价值量大小不同的原因也较为复杂。同一地区不同类型稻田生态系统(如梯田稻田、城乡结合部周边稻田、综合种养共生稻田以及常规稻田之间),其生态系统服务功能价值评价的侧重点也有所差异。如稻田生态系统中的梯田生态系统服务功能,可能更多地关注梯田生态系统中的生态功能(如保持水土资源功能、提高土壤肥力功能、清洁水源功能、维持生物多样性功能等)和文化功能(如旅游休闲功能和科教文化功能)等正向功能效应^[34]。稻田生态系统为人类带来正向效应的同时,也会产生一定的负面影响,例如农药化肥的过量使用而带来的环境破坏等。

长江中游地区汛期一般出现在每年的5—10月,也正值水稻生产周期,该区强降雨周期长、蓄水防洪能力较弱和耕地面积减少等往往导致洪涝灾害频发。在水稻生产周期内,大量使用的农药、化肥可能导致长江中游地区面源污染加剧,在对长江中游地区稻田生态系统服务功能评估时应重点考虑由农药、化肥而带来的环境损害成本。另外,由于历史原因,长江中游的江汉平原地区、环鄱阳湖和洞庭湖地区,曾经围垦水面而创造了大量的圩田、垸田,造成江河湖泊湿地生态系统服务功能减弱,增加的稻田也为增加温室气体排放创造了条件。因此,根据已有经典分类^[1,11],本研究依据稻田生态系统服务功能净价值的研究方向和思路,将稻田生态系统服务功能类型概括为经济功能、生态功能和社会功能三大类型,并从稻田生态系统服务功能的正向收益和负向收益(稻田生态系统服务功能成本)的角度,确定了长江中游地区稻田生态系统服务功能价值类型,提出稻田生态系统主要有3大类正向服务功能,1类负向服务功能,共计18项服务功能类型(表1)。

一方面,将稻田生态系统的服务功能类型划分为提供初级产品服务的经济功能、调节维持稻田生态系统的生态功能和提供文化科教服务的社会文化服务功能三大类正向服务功能:(1)经济服务功能(2项):指稻田生态系统提供粮食和秸秆的服务;(2)生态服务功能(10项):指从稻田生态系统的调节、维持、发展作用中获得的各种生态效益的功能,即土壤保持、蓄水防洪、水源涵养、气体调节、气温调节、处理生活废弃物、净化污水、净化空气、维持生物多样性和病虫害控制功能;(3)社会文化服务

功能(2项):指从稻田生态系统获得的景观文化传承和旅游科教休闲服务功能。

另一方面,稻田生态系统与其他生态系统不同,稻田生态系统具备许多特殊的功能。由于人类活动的强烈干扰,稻田生态系统给人类带来一定的正面效益的同时也带来了负面效应,也即以消耗水资源、围湖造田^[31]、施用农药化肥^[27]、温室气体排放^[12]等为代表的4方面负向功能,给自然生态系统带来一定的“负外部性”,这也正为稻田生态服务功能净价值计算提供了理论依据^[27]。本文根据稻田生态系统服务功能收益和成本进行指标构建,并对相应服务功能价值评估方法进行了梳理。

2.2 长江中游稻田生态系统服务功能价值评估的指标体系及评价方法

稻田生态系统服务功能收益是指稻田生态系统对人类经济社会发展的贡献在于人类可以从稻田生产中获得实际利用或潜在利用的效益,所获得负向效益为稻田生态系统服务功能成本^[11]。目前,国内外对稻田生态系统服务功能评估的方法和评估指标体系还没有统一的标准,有些研究是直接套用或者微调了相关研究方法、价格参数,导致对不同的稻田生态系统服务功能估算结果的差异较大,但也有因稻田类型差异^[35]、不同土壤类型^[36]、人类干扰措施(施肥、不同冬季种植模式、节水节药、保护性耕作措施等)差异导致了各稻田生态系统服务功能评估结果差异较大^[12-13]。在评估稻田生态系统各服务功能、对同一服务功能价值进行评估时,不同学者采用的方法有所差异。同时针对不同类型的稻田生态系统及特点,各评估方法和侧重点也有所不同。如对于梯田和种养结合稻田生态系统而言,其粮食生产、水调节、温度调节、旅游观光、景观维持、化肥农药污染等服务功能价值相对常规稻田而言其价值较大,相对于稻田生态系统其他服务功能价值来说也是较大的。根据郑春利等^[37]估计的2011年元阳梯田稻田生态系统的水调节价值是所有服务功能价值最高的,同时估算得出元阳梯田相比其经济社会价值其生态价值最大,这可为合理评估梯田稻田生态系统服务功能价值提供参考,而对于一般稻田而言,可能稻田的产品生产服务功能价值量较大。因此,根据

前人研究成果,本研究从稻田生态系统服务功能的收益和成本2个维度,整理总结了稻田生态系统不同生态服务功能价值评价的指标体系及评价方法(表1),为未来长江中游地区稻田生态系统服务功能净价值评估提供参考。

从表1可知,稻田生态系统粮食生产和秸秆生产功能基本上是采用公认的市场价值法进行评估。气体调节功能主要有造林成本法和替代成本法,差异主要体现在成本换算方法选择上的差异和计算便利性的差异。气温调节功能价值估算上,如果选取固定参数(1.3℃)或者按市场价值法计算,可能难以体现稻田区域、气候差异和种植中稻与双季稻温差等方面的差异,在对长江中游地区进行评估时还应考虑相应差异而采用合适的评估方法。改善土壤质量服务功能一般采用机会成本法,通过改善土壤质量而减少化肥输入带来的环境污染成本。目前长江中游基本做到了稻田秸秆还田,秸秆替代而减少了化学肥料的使用,故营养物质循环功能采用影子价格法计算较为合理。蓄水防洪功能用替代成本法计算,对于一般稻田而言,可以采用防洪水库建设及维护运营费用代替,但对于梯田而言,采用梯田蓄水能力及工程费用计算可能更为合理;对于水源涵养功能、净化污水功能、净化环境功能和消纳废弃物功能价值,分别采用市场价值法、替代成本法、成果参照法和治理费用法,使用市场价值法和治理费用法评估时既要考虑区域经济社会发展水平差异,同时还要考虑稻田系统特征差异;对于美学景观功能价值评估,主要采用价格替代、市场价值法或影子工程法进行评估。长江中游地区稻田与其他地区稻田具有较多共性,存在价值量差异主要是由稻田生态系统的类型、特征、特点、稻田与第二第三产业融合的程度和稻田农业文化属性所致。另外,鉴于长江中游地区稻田面积之大,使用农药化肥量之多,稻田基本上环湖沿江特点,本文重点讨论了长江中游地区稻田生态服务功能成本的评估,对农药化肥污染功能、水资源消耗、温室气体排放和围湖造田功能价值一般均可采用影子工程法进行评估,但也可根据各功能的实际成本利用市场价值法进行评估。

表1 稻田生态系统服务功能价值评估的指标体系、评价方法及适用稻田特点

Table 1 Evaluation index system, evaluation method and applicable rice field characteristics of rice field ecosystem service function value

服务价值类型 Type of service value	功能类型 Function type	功能子类型 Functional subtype	功能说明 Function Description	价值效应 Value effect	价值评估方法 Valuation methods	对应价值评估方法下的计算方法及其说明 Calculation method and explanation under the corresponding value assessment method	适用稻田类型及特点 Applicable paddy field types and characteristics
稻田生态系统服务功能收益 The benefits of rice field ecosystem services	供给功能	粮食生产功能	提供粮食	正向	市场价值法 ^[34, 38-39]	$MV_y = TRV - TRC$, 其中 MV_y 为粮食生产价值, TRV 为粮食生产总价值, TRC 为粮食生产总成本。	常规稻田/普遍性
		秸秆生产功能	提供秸秆	正向	市场价值法 ^[34, 39-41]	$V_p = M \times P$, 其中 V_p 是农田生态系统提供的秸秆总价值; M 为秸秆的年产量; P 为秸秆的市场价格。	常规稻田/普遍性
		气体调节功能	固定大气中的 CO_2 、释放 O_2 , 减缓温室效应	正向	造林成本法 ^[34, 42] ; 替代成本法 ^[43-44]	$V_{O_2} = 1.19 \times NPP \times A_{CO_2}$, $V_{CO_2} = 1.63 \times NPP \times A_{CO_2}$, 其中 V_{O_2} 、 V_{CO_2} 、 NPP 、 A_{CO_2} 与 A_{CO_2} 分别代表释放 O_2 的价值、固定 CO_2 的价值、水稻干物质总量、释氧的造林成本和固碳的造林成本。	常规稻田/普遍性
	调节功能	气候调节功能	调节稻田周边气温	正向	成果参数和市场价值法 ^[34] ; 替代成本法 ^[43-44] ; 蒸腾蒸发模型法 ^[45]	$MVT = Hf \times 30 \times 1.3 \times 6 \times Pe$, 其中 MVT 为稻田降温约 $1.3^\circ C$, 有效降温时间为 $30 d$ 左右, 每天降温约 $6 h$, 稻田覆盖家庭户数为 Hf , Pe 为电的市场价格, MVT 为气温调节价值; $E_{T_0} = [0.408 \Delta R_n - G] + 900 \gamma u_2 (e_s - e_a) / (T + 273) / \Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)$, 其中 E_{T_0} 是作物蒸散量, (mm/d) , Δ 是蒸汽压力-温度曲线的斜率 $(kPa/^\circ C)$, R_n 是净辐射 $(MJ/(m^2 \cdot d))$, G 是土壤热通量 $(MJ/(m^2 \cdot d))$, γ 是心理测量常数, $(kPa/^\circ C)$, T 是日平均气温 $(^\circ C)$, u_2 是平均每日风速 $2 m$ 高度处的速度 (m/s) , e_s 是饱和蒸汽压 (kPa) , e_a 是实际蒸汽压, kPa 。	城乡结合部周边稻田/特殊性
		土壤有机质积累功能	改善土壤质量		机会成本法 ^[14, 41]	$V = S \times T \times q \times OM \times C_{SOM}$, 其中 V 表示土壤有机质积累价值, S 为作物种植面积, T 为耕层厚度, q 为土壤容重, OM 为土壤有机质含量, C_{SOM} 为土壤有机质价格。	常规稻田/普遍性
		营养物质循环功能	改良土壤, 减少化肥使用	正向	采用影子价格法 ^[14]	$V = Lr \times (CN + CP + CK \times P)$, 其中 V 表示营养物质循环价值, Lr 为各作物产量, CN 为各类型作物 N 的百分比, CP 为各类型作物 P 的百分比, CK 为各类型作物 K 的百分比, P 为化肥平均价格。	常规稻田/普遍性
		蓄水防洪功能	蓄水防洪	正向	替代成本法 ^[43-44]	$MVf = (Hr - Dw) \times Cd$, 其中 MVf 为防洪价值, Hr 为田埂的平均高度, Dw 为日常平均水深, Cd 为单位调洪容量的防洪水库建设成本及维护运行费。	常规稻田/普遍性
		水源涵养功能	对地下水源起支配作用	正向	市场价值法 ^[19, 38]	$MVg = Ir \times Ar \times Di \times P$, 其中 MVg 为涵养水源的价值, Ir 为土壤水分的渗透率, Ar 为稻田面积, Di 为淹水天数, P 为水市场的价格。	常规稻田/普遍性
		净化污水功能	可降解水体中的 BOD 等物质	正向	替代成本法 ^[38, 46]	$MVd = (CI - CO) \times VI \times PC$, 其中 MVd 为净化污水的价值, CI 为灌溉用水中的污染物浓度, CO 为流出浓度, VI 为灌溉用水量, PC 为净化污染物的市场价格。	常规稻田/普遍性
		净化环境功能	吸收空气中的 SO_2 、 HF 、 NOx 等有害气体和粉尘	正向	成果参照法市场价值法 ^[37, 46]	$V = (Qf \times Pf + Qs \times Ps + Qh \times Ph + Qn \times Pn) \times A$, 其中 V 为稻田生态系统净化空气质量的值, Qf 、 Qs 、 Qh 、 Qn 为稻田生态系统吸收粉尘、 SO_2 、 HF 、 NO_x 的日均通量, Pf 、 Ps 、 Ph 、 Pn 为稻田生态系统吸收粉尘、 SO_2 、 HF 、 NO_x 的成本, A 为稻田的面积。	常规稻田/普遍性
消纳废弃物功能	减少废弃物对环境的污染	正向	治理费用法 ^[14]	$V = EP \times Cf$, 其中 V 表示消纳废弃物的价值, EP 为作物单位面积畜禽粪便施入量, Cf 为粪便处理平均成本。	常规稻田/普遍性		

续表 1 Continued Table 1

服务价值类型 Type of service value	功能类型 Function type	功能子类型 Functional subtype	功能说明 Function Description	价值效应 Value effect	价值评估方法 Valuation methods	对应价值评估方法下的计算方法及其说明 Calculation method and explanation under the corresponding value assessment method	适用稻田类型及特点 Applicable paddy field types and characteristics
稻田生态系统服务功能收益 The benefits of rice field ecosystem services	保持多样性功能	保持生物多样性功能	保持生物多样性	正向	当量因子法 ^[38, 34]	$M=SV \times A$, 其中 M 为保持生物多样性价值, SV 为维持生物多样性单位价值 ^[40] , A 稻田面积; $PUYGA=PUYESR \times RESR + PUYELSR \times RELSR + PUYD-SLR \times RDSLR + VBioC = EQF \times PUYGA \times PG \times (7 \times k)^{-1} EVNFP = PUYGA \times PG \times 7^{-1}$, 其中 $PUYGA$ 表示单位面积农田平均粮食产量, $PUYESR$ 表示单位面积稻田早稻的产量, $RESR$ 表示早稻种植面积比例, $PUYELSR$ 表示单位面积中稻和一年晚稻产量, $RELSR$ 表示中稻和一年晚稻种植面积比例, $PUYDSLR$ 表示单位面积农田双季晚稻产量, $RDSLR$ 为双季晚稻种植面积比例, $VBioC$ 表示生物多样性保护价值, EQF 表示农田生态系统生物多样性保护的当量因子, PG 表示研究区平均粮食单价, k 为修正系数, $EVNFP$ 指自然粮食产量的经济价值。	梯田稻田、城乡结合部周边稻田、综合种养共生稻田/特殊性
	美学景观功能	美学景观功能	维持景观文化	正向	旅行费用法 ^[47] 、条件价值评估法 ^[48] 、当量因子法 ^[43-44]	$V = \sum v_i$, 其中 V 为景观文化价值, v_i 为第 i 种费用的实际支出, 包括交通费、门票费、住宿费、餐饮费和时间费用等; 问卷调查, 即通过虚拟市场法, 选择累积频率为 50% 的支付额度作为所评估的环境物品的年人均制度意愿 WTP 值, 经过校正后, 乘以合适范围的总人数; $V = S \times A$, 其中 V 为景观文化价值, S 为景观休闲的单位面积价值, A 为景观面积。	梯田稻田、城乡结合部周边稻田、综合种养共生稻田/特殊性
	旅游休闲功能	旅游休闲功能	观光旅游	正向	价格替代法 ^[34]	$TR = \sum TR_i$, 其中 TR 为稻区年旅游总收入, TR_i 为包括门票、旅馆、景点内消费、收取旅游费等收入。	梯田稻田、综合种养稻田/特殊性
	支持文化服务功能	文化传承功能	传承文化	正向	市场价值法 ^[34]	$TC = \sum TC_i$, 其中 TC 为总费用, TC_i 为各项支出, 包括申请中国重要农业文化遗产及开展相关保护措施和传承活动等实际支出费用等。	梯田稻田、综合种养稻田/特殊性
	化肥农药污染功能	化肥农药污染功能	对水体、土壤、空气造成污染	负向	防护费用 ^[38, 43-44] 、防护费用法 ^[18] 、市场价值法 ^[49, 46]	$MPV = TVP \times C$ 其中, MPV 为农药化肥污染的负经济价值, TVP 为稻谷总产量, C 为每公斤稻谷产生的农药化肥的外部成本; $VP = M \times (1 - R) \times P$, 其中 VP 为农药化肥污染的负经济价值, M 为农药化肥使用量, $(1 - R)$ 为农药化肥利用系数, P 为农药化肥价格; $TC = P \times Q \times 1\%$, 其中 TC 为为农药化肥污染的负经济价值, P 为粮食价格, Q 为粮食总产量, 1% 为成本系数。	常规稻田/普遍性
稻田生态系统服务功能成本 The cost of rice field ecosystem services	水资源消耗功能	水资源消耗功能	消耗水资源	负向	替代成本法/影子工程法 ^[18] ; 替代成本法/影子工程法 ^[38]	$V_w = W \times R \times C_w$, 其中 V_w 为水资源消耗的负经济价值, W 为各地农业用水量, R 为各地农业耗水率, C_w 为农业用水蓄水成本; $V_r = W_r \times V_r \times C_w$, 其中 V_w 为水资源消耗的负经济价值, W_r 为总面积, V_r 为水稻单位面积需水量, C_w 为农业用水蓄水成本。	常规稻田/普遍性
	温室气体排放功能	温室气体排放功能	主要排放 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 三种温室气体	负向	影子价格法 ^[43-44, 50] 、固碳造林成本法 ^[12, 34]	$VGWP = \sum (F_i \times 24 \times n \times 0.01 \times GWP_i) \times AC_{CO_2}$, 其中 F_i 和 GWP_i 分别为不同气体的平均非放通量和增温趋势, 对于 100 a 时间尺度的气候变化, CH_4 和 N_2O 的 GWP_i 分别为 25 和 298 ^[10] (1 kg 的 CH_4 和 N_2O 分别相当于 25 kg 和 298 kg 的 CO_2 所产生的温室效应), n 为水稻生长天数, AC_{CO_2} 为固碳的造林成本。	常规稻田/普遍性
	围湖造田	围湖造田	对江河湖泊等湿地造成损害	负向	影子工程法 ^[9]	$EC = S \times A \times Q \times W \times P$, 其中 EC 为围湖造田的负经济价值, S 为每亩 1 km ² 湿地湖滩减少的有效蓄水量, A 为围垦总面积, Q 为围垦中用于水稻种植的比例, W 为排干减少有效调蓄水量需增加的电排装机量, P 为排涝抗旱用电价。	常规稻田/普遍性

3 长江中游不同尺度下稻田生态系统服务功能价值评估

对湖南、湖北和江西地区稻田生态系统服务功能价值评估研究已积累了较多成果,基本遵循稻田供给功能、稻田调节功能、稻田支持文化服务功能和稻田生态系统服务成本四大功能的研究脉络和研究思路,根据功能构建相应的指标体系,并采用适当的评估方法进行。主要从试验田微观尺度和省市县宏观尺度2个研究维度进行了稻田相关服务功能评估。

3.1 试验田微观尺度下的稻田生态系统服务功能价值评估

试验田微观尺度的稻田生态系统服务功能价值的评估,主要是探索试验田内的不同施肥措施、不同耕作措施、节肥节水节药措施和不同种植模式(或不同的冬季种植模式)等的一种或多种措施对稻田生态系统服务功能差异的影响,试图筛选出长江中游地区更优、高效和环保的稻田种植模式和种植方式,为提高稻田生态系统服务功能提供参考。

在不同施肥措施对稻田生态系统服务功能价值的影响方面,通过优化施肥措施提高稻田生态系统服务功能。马艳芹等^[12]将翻压冬种绿肥紫云英与冬闲进行比较,得出江西(余江县)稻田生态系统服务功能总价值增加15.15%~41.39%,其中以紫云英+优化施氮处理最高。肖玉等^[51]通过测定水稻生长季的不同时段不同施肥处理下温室气体和稻田生物量生产的价值,认为在施氮肥量在0~525 kg/hm²时该区稻田生态系统的气体调节功能价值在5 470~12 840元/hm²,为稻田生态系统的调节服务价值提供了依据。也有通过对试验稻田的长期施肥跟踪,探索了稻田生态系统的碳汇效应和收益,为土壤有机质积累服务功能价值估算提供参考。如彭华等^[52]对洞庭湖地区1981—2007年间长期施肥条件下双季稻田生态系统服务功能进行了评估,认为有机无机配施能够带来较高的生态系统生产力,其碳汇效应和经济效益较好。在20 a长期施用猪粪有机肥背景下,稻田生态系统的服务功能价值的正面影响远远大于负面影响,但随着施用年份的增加其负面效应可能进一步扩大^[53]。彭程琳等^[40]对江西鄱阳湖流域赣抚平原灌区稻田的温室气体排放功能进行了研究,认为间歇灌溉和减施氮肥有利于降低温室气体排放负面价值。

不同耕作措施对稻田生态系统服务功能价值的影响方面,在秸秆还田条件下,耕作措施对双季稻田的碳循环和生态系统服务功能的影响较大。肖玉等^[24]认为,免耕秸秆还田有利于减少碳排放,免耕分别比翻耕和旋耕减少碳排放61.69和35.70 kg/hm²。谢志坚等^[28]对紫云英-早稻-晚稻农田系统的服务功能进行了评估,认为农产品与轻工业原料供给功能占系统功能服务总价值的比例超过60%,大气调节与净化和水分涵养等功能服务价值占比15%~22%,土壤养分累积的服务价值最低(占比<2%)。其他多数研究也主要是集中在不同保护性耕作模式对稻田生态系统服务功能价值方面的影响,以探索出提高稻田生态系统服务的耕作措施^[12,30]。

在不同种植模式对稻田生态系统服务功能价值的影响方面,种植模式多是结合优化施肥处理对稻田生态系统服务价值共同产生较大影响。在长江上游地区,普燕爽等^[14]对农业农村部大理综合试验站稻田进行了不同种植模式下稻田生态系统服务功能价值评估研究,结果表明,70%化肥+30%牛粪-水稻-黑麦草和70%化肥+30%牛粪-水稻-紫花苜蓿处理稻田生态系统服务功能价值分别为169 669和168 405元/hm²,优化施肥轮作处理的供给农产品价值、气体调节、消纳废弃物和美学景观价值均显著高于常规施肥处理。稻田多熟种植模式是江南丘陵区稻田耕作的主要模式,王开磊等^[39]对2008—2009年江南稻区稻田不同种植模式的生态服务功能总价值进行了测算,认为稻田生态系统的经济价值平均为19 519.16元/hm²,占总服务价值的26.44%。在综合种养稻田生态系统中,稻、虾(蟹)等种养模式对稻田生态系统理化性质、微生物种类、数量及服务功能影响较大。有研究表明,综合种养模式利于提高稻田系统生物多样性和文化服务功能,但对于稻田粮食供给和温室气体排放功能的影响各异,需要进一步深入跟踪研究^[54]。

3.2 省市县宏观尺度稻田生态系统服务功能价值评估

从省市县尺度稻田生态系统服务功能价值评估角度,众多研究者在考虑稻田生态系统水稻的生产成本时,主要聚焦在某地区稻田生态系统服务某一或某些功能大小的估算上,同时比较研究不同地区(同省不同市县、不同稻区)稻田生态系统服务功能差异,研究探讨了稻田生态系统服务功能净值。从

省市县角度,对稻田生态系统的服务价值进行评价对整个农业生态系统及区域农业生态环境保护研究也具有重要意义。如薛宝林等^[55]对湖南省2016年稻田生态系统服务价值进行了评估,认为稻田系统提供的初级产品价值、涵养水源功能价值占比分别为50.78%和34.40%,气体调节服务功能价值、气候调节功能价值和其他服务功能价值占比分别为5.36%、3.98%和5.48%,三者服务功能价值占比相对较小,但对稻田生态系统服务功能价值具有重要影响。还有研究表明,区域内不同地区稻田生态系统服务功能价值差异也较大,付珍萍等^[46]对2011—2018年湖南省各市州稻田生态系统服务功能净值进行了研究,认为湖南省内区域存在服务价值净值不平衡,常德市2018年的生态净值高于其他市州。向平安等^[56]对洞庭湖区稻田生态系统的农药污染、化肥污染、温室气体排放、地膜残留、稻田潜育化和围湖造田6项环境成本进行了测算,水稻生产的成本高达当年水稻生产总值的26.8%,呼吁水稻生产过程中务必重视水稻生态系统服务功能成本。陈清华等^[42]也对湖北荆州市稻田的调节功能和科技文化等公益性功能价值进行了评估,2008年荆州市稻田生态系统的公益功能价值高达61.14亿元,占荆州市当年GDP的9.8%,稻田生态系统服务公益性功能价值要引起高度重视。从区域层面也可以比较稻田生态系统服务功能价值或净价值,如杨腾等^[27]通过对中国30个省、自治区和直辖市2007—2016年的稻田生态系统服务功能价值进行净价值评价,认为2007—2013年中国稻田生态系统净价值达到顶峰,随后有下降趋势,同时还认为安徽、湖北、湖南的生态成本较高,可能是生产中使用了较多的农药、化肥所致,稻田生态系统净价值的估算可为稻田生态系统绿色发展和生态补偿提供决策依据。

4 展 望

国内外已在稻田生态系统服务功能价值评估的研究领域积累了较多研究成果,现有研究不断拓展延伸了稻田生态系统服务功能的内涵,同时也逐渐完善了稻田生态系统服务功能价值评估体系和方法。长江中游地区稻田生态系统服务功能价值评估研究的角度主要有:从稻田生态系统单一服务功能的价值研究到多功能综合系统研究,从微观尺度研究到中观、宏观尺度研究,从常规稻田到特色稻田

(城乡结合部、梯田稻田和综合种养稻田)研究,从服务功能价值总量研究到服务价值净价值总量研究,从稻田静态服务价值研究到动态服务价值研究,从区域内稻田生态系统服务价值研究到区域间稻田服务价值比较研究,从对稻田不同干扰措施对稻田生态系统服务价值的影响研究到提高稻田生态系统服务价值的策略研究。上述研究角度,都可以从某一方面(或系统地)直接或间接反映稻田生态系统服务功能价值,但不同的研究角度、不同的研究区域和不同的稻田类型,在评估稻田生态系统服务功能价值时,由于研究区域收集数据难易程度和稻田特点不同,各研究者所采用的评估方法有所差异,其所评估得到的单位面积稻田生态系统服务功能价值大小也有一定差异,这给研究者在评估特定稻田生态系统服务功能价值时指标体系和评估方法的选取带来了一定难度。

稻田生态系统服务功能价值评估研究的关键在于建立合理科学的评估指标体系和方法,同时明确研究目标、找准研究角度,通过选用适当的评价指标体系和方法,对特定稻田生态系统服务功能价值(或净价值)进行评估。未来首先还需对特定稻田生态系统服务功能价值评估的指标体系和评价方法进行不断完善,建立与所研究的稻田生态系统特点相适应的评估指标体系,选取合适的评估方法。其次,稻田生态系统服务功能价值是个动态的概念,需要后续研究者对相关稻田生态系统服务功能价值进行动态研究,长期跟踪探索不同肥、水、药、农艺和耕作制度措施等影响下稻田生态系统服务功能价值变化规律和特点,为掌握稻田生态系统服务功能演变规律提供依据。第三,稻田生态系统服务功能价值不仅具有正外部性效应,也有一定的负外部性效应,在评估稻田生态系统服务功能净价值时,静态(或某一年)的净价值评估难以合理反映稻田生态系统真正的服务净价值,对筛选科学合理的稻田生态系统绿色发展路径和方法增加了不确定性。同时不同类型和不同特点的稻田生态系统,在综合评价稻田生态系统服务净价值时要注意其可比性,为不同地区制定稻田生态系统价值补偿标准差异提供参考。第四,基于长江中游稻田生态系统的整体、长期动态的价值评估研究较少,需要加快开展流域内稻田生态系统服务功能净价值动态评估研究步伐,

这对强化流域内稻田面源污染及生态环境管理具有重要意义。

参考文献 References

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(2): 253-260.
- [2] 李瑞扬. 浅析农业多功能性与农业的可持续发展[J]. *经济视角(上)*, 2008(5): 51-53. LI R Y. A brief analysis on the multifunctionality of agriculture and the sustainable development of agriculture[J]. *Economic vision (Part 1)*, 2008(5): 51-53 (in Chinese).
- [3] Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). *Environmental indicators for agriculture methods and results*[M]. Paris: OECD, 2000.
- [4] YOSHIDA K. An economic evaluation of the multifunctional role of agriculture and rural areas in Japan[J]. *Ecosystems and environment*, 2007, 120(1): 21-30.
- [5] KIM T C, GIM U S, KIM J S, et al. The multifunctionality of paddy farming in Korea[J]. *Paddy and water environment*, 2006, 4(2): 169-179.
- [6] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640. OUYANG Z Y, WANG R S, ZHAO J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 1999, 10(5): 635-640 (in Chinese with English abstract).
- [7] LIU C W, ZHANG S W, LIN K H, et al. Comparative analysis of temporal changes of multifunctionality benefit of two major rice paddy plains in Taiwan[J]. *Paddy and water environment*, 2010, 8(2): 199-205.
- [8] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 40-43. LI W H. *Theory, method and application of ecosystem service value evaluation* [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2008 (in Chinese).
- [9] 高东. 稻田生物多样性构建的生态效应[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1999-2003. GAO D. Ecological effect of biodiversity in paddy field ecosystem[J]. *Ecology and environmental sciences*, 2010, 19(8): 1999-2003 (in Chinese with English abstract).
- [10] TURNER K. *Economics and wetland management* [J]. *AMBIO*, 1991, 20(2): 59-63.
- [11] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystem and human well-being: synthesis* [M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [12] 马艳芹, 黄国勤. 紫云英配施氮肥对稻田生态系统服务功能的影响[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1755-1765. MA Y Q, HUANG G Q. Effects of combined application of chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and nitrogen fertilizer on ecological service function of paddy field[J]. *Journal of natural resources*, 2018, 33(10): 1755-1765 (in Chinese with English abstract).
- [13] 白小琳, 徐尚起, 汤文光, 等. 不同耕作措施下双季稻田生态系统碳循环及其生态服务价值[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2489-2494. BAI X L, XU S Q, TANG W G, et al. Ecosystem service value and carbon cycle of double cropping paddy under different tillage[J]. *Journal of agro-environment scienc*, 2009, 28(12): 2489-2494 (in Chinese with English abstract).
- [14] 普燕爽, 陈建军, 祖艳群, 等. 洱海流域不同种植模式稻田生态系统服务价值评估[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 1-13. PU Y S, CHEN J J, ZU Y Q, et al. Evaluation of the service function value of rice field ecosystem with different planting patterns in Erhai Lake Basin [J]. *Journal of agricultural resources and environment*, 2021, 38(5): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王淑彬, 王开磊, 黄国勤. 江南丘陵区不同种植模式稻田生态系统服务价值研究——以余江县为例[J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(4): 636-642. WANG S L, WANG K L, HUANG G Q. A Study on ecosystem service value of paddy fields in multiple cropping systems in southern hilly areas of China: taking Yujiang County as an example[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(4): 636-642 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张卫建, 丁艳锋, 王龙俊, 等. 稻田生态系统在保障环太湖环境健康与经济持续增长中的重要作用[J]. *科技导报*, 2007, 26(17): 24-29. ZHANG W J, DING Y F, WANG L J, et al. The significance of paddy ecosystems in environmental health and sustainable development of economy in the regions around Tai Lake [J]. *Science & technology review*, 2007, 26(17): 24-29 (in Chinese with English abstract).
- [17] 谢高地, 张懿铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 47-53. XIE G D, ZHANG Y L, LU C X, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China [J]. *Journal of natural resources*, 2001, 16(1): 47-53 (in Chinese with English abstract).
- [18] 孙新章, 谢高地, 成升魁, 等. 中国农田生产系统土壤保持功能及其经济价值[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 156-159. SUN X Z, XIE G D, CHENG S K, et al. Services for soil conservation and its monetary value of chinese cropping system [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2005, 19(4): 156-159 (in Chinese with English abstract).
- [19] 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 191-199. XIE G D, XIAO Y, LU C X. Study on ecosystem services: progress, limitation and basic paradigm [J]. *Journal of plant ecology*, 2006, 30(2): 191-199 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王彦武, 牛莉婷, 张峰, 等. 黄土区高标准梯田生态服务功能及其价值[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 190-196. WANG Y W, NIU L T, ZHANG F, et al. Ecological service function and its value of high-standard terrace in Loess Region [J]. *Journal of soil and water conservaion*, 2019, 33(6): 190-196 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [21] 肖玉,谢高地.上海市郊稻田生态系统服务综合评价[J].资源科学,2009,31(1):38-47.XIAO Y,XIE G D.Comprehensive valuation of the ecosystem services of rice paddies in Shanghai [J].Resources science,2009,31(1):38-47(in Chinese with English abstract).
- [22] 聂佳燕.湖南稻田生态系统多功能性价值研究[D].长沙:湖南农业大学,2012.NIE J Y.Comprehensive valuation of the multifunctionality of paddy field ecosystem in Hunan Province [D].Changsha:Hunan Agricultural University,2012(in Chinese with English abstract).
- [23] 陈源泉,高旺盛.中国粮食主产区农田生态服务价值总体评价[J].中国农业资源与区划,2009,30(1):33-39.CHEN Y Q,GAO W S.General evaluation on the value of farmland ecological service in major grain production regions of China [J]Chinese journal of agricultural resources and regional planning,2009,30(1):33-39(in Chinese with English abstract).
- [24] 肖玉,安凯,谢高地,等.中国10类典型稻田生态系统服务评价(英文)[J].Journal of resources and ecology,2011,2(4):328-337.XIAO Y,AN K,XIE G D,et al.Evaluation of ecosystem services provided by 10 typical rice paddies in China [J].Journal of resources and ecology,2011 2(4):328-337(in English with Chinese abstract).
- [25] SYLVIE F,MBOLATIANA R.Agricultural activities,rural areas and natural environment:drawing up the frontiers of the multifunctionality concept [J].Rural landscapes and agricultural policies in Europe,2009,14:21-34.
- [26] GUIDO V H,VALERIEA V,ENY M,et al.Multifunctionality of agriculture:a review of definitions evidence and instruments [J].Living reviews in landscape research,2007(3):1-38.
- [27] 杨腾,孙艳华.中国稻田生态系统服务净价值评估[J].华中农业大学学报,2020,25(3):159-172.YANG T,SUN Y H.Evaluation of the net value of paddy ecosystem services in China [J].Journal of China Agricultural University,2020,25(3):159-172(in Chinese with English abstract).
- [28] 谢志坚,贺亚琴,徐昌旭.紫云英-早稻-晚稻农田系统的生态功能服务价值评价[J].自然资源学报,2018,33(5):735-746.XIE Z J,HE Y Q,XU C X.Appraisal on ecological services from Chinese milk vetch-early rice-late rice cropping ecosystem [J].Journal of natural resources,2018,33(5):735-746(in Chinese with English abstract).
- [29] 尹飞,毛任钊,傅伯杰,等.农田生态系统服务功能及其形成机制[J].应用生态学报,2006,17(5):929-934.YIN F,MAO R L,FU B J,et al.Farmland ecosystem service and its formation mechanism [J].Chinese journal of applied ecology,2006,17(5):929-934(in Chinese with English abstract).
- [30] 李福夺,尹昌斌.南方稻区绿肥生态服务功能及生态价值评估研究[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(2):327-336.LI F D,YIN C B.Assessment of the functions and ecological services values of green manure in paddy fields in South China [J].Chinese journal of eco-agriculture,2019,27(2):327-336(in Chinese with English abstract).
- [31] 胡晓燕,吴健,张象枢.稻田生态系统多功能性价值评估方法体系研究[J].环境保护科学,2017,43(5):75-81.HU X Y,WU J,ZHANG X S.Study of the methodology of evaluating paddy ecosystem's multifunction [J].Environmental protection science,2017,43(5):75-81(in Chinese with English abstract).
- [32] FREEMAN A M III. The measurement of environmental and resources values:theory and methods [M].Washington DC:Resource for the Future,1993.
- [33] DAILY G C. Nature's services:societal dependence on natural ecosystems [M].Washington DC:Island Press,1997.
- [34] 缪建群,王志强,杨文亭,等.崇义客家梯田生态系统服务功能[J].应用生态学报,2017,28(5):1642-1652.MIU J Q,WANG Z Q,YANG W T,et al.Ecosystem services of Chongyi Hakka terraces [J].Chinese journal of applied ecology,28(5):1642-1652(in Chinese with English abstract).
- [35] 方福平.挖掘生态服务功能价值 建立稻田生态补偿机制[J].农村工作通讯,2018,25(8):12-14.FANG F P.Mining the value of ecological service function and establishing the ecological compensation mechanism of paddy field [J].Rural work newsletter,2018,25(8):12-14(in Chinese).
- [36] 袁大鹏,石磊,赵雪杉,等.基于土壤类型区的冀西北间山盆地生态服务价值研究——以怀来县为例[J].水土保持研究,2018,252:307-314.YAN D P,SHI Y,ZHAO X S,et al.Study on the ecological service value of the mountainous basin in the northwest of Hebei Province based on the soil type region [J].Research of soil and water conservation,2018,252:307-314(in Chinese with English abstract).
- [37] 郑春利,郭先华,祖艳群,等.元阳梯田稻田生态系统服务价值评价[J].生态科学,2018,37(2):124-130.ZHENG C L,GUO X H,ZU Y Q,et al.Evaluation on service value of paddy field ecosystem in Yuanyang terraces [J].Ecological science,2018,37(2):124-130(in Chinese with English abstract).
- [38] 陈浩,聂佳燕,向平安.湖南水稻生产的多功能性价值评价[J].生态经济,2013,8(2):21-27.CHEN H,NIE J Y,XIANG P A.Multifunctional value evaluation of rice production in Hunan Province [J].Ecological economy,2013,8(2):21-27(in Chinese with English abstract).
- [39] 王开磊,黄国勤,罗奇祥,等.江南丘陵区稻田多熟种植系统的生态服务价值评估[J].江西农业学报,2010,22(11):157-160.WANG K L,HUANG G Q,LUO Q X,et al.Evaluation of ecological service value of rice field multi-cropping planting system in the hilly area of Jiangnan [J].Acta agriculturae Jiangxi,2010,22(11):157-160(in Chinese).
- [40] 彭程琳,崔远来,才硕,等.水肥管理对鄱阳湖流域稻田温室气体排放的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):85-93.PENG Z L,CUI Y L,CAI S,et al.Effects of different water and fertiliz-

- er managements on greenhouse gas emissions of rice fields in Poyang Lake Basin [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36 (16):85-93(in Chinese with English abstract).
- [41] 谢宁宇. 武汉市稻田生态系统服务功能评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008. XIE N N. Evaluation services of the paddy field ecosystem in Wuhan [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [42] 陈清华, 任俭, 刘章勇. 荆州市稻田部分公益功能的经济评价初探[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(16): 3641-3643, 3645. CHEN Q H, REN J, LIU ZHANG Y. Research on economic value evaluation for the part of public welfare function of paddy field in Jingzhou [J]. Hubei agricultural sciences, 2012, 51(16): 3641-3643, 3645 (in Chinese with English abstract).
- [43] 刘利花, 尹昌斌, 钱小平. 稻田资源价值体系构建及价值评估——以南京市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(2): 29-37. LIU L H, YIN C B, QIAN X P. Construction of value system of paddy resource and its value evaluation: taking Nanjing as an example [J]. Chinese journal of agricultural resource and regional planning, 2015, 36(2): 29-37 (in Chinese with English abstract).
- [44] 刘利花, 尹昌斌, 钱小平. 稻田生态系统服务价值测算方法与应用——以苏州市域为例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(1): 92-99. LIU L H, YIN C B, QIAN X P. Calculation methods of paddy ecosystem service value and application: a case study of Suzhou City [J]. Progress in geography, 2015, 34(1): 92-99 (in Chinese with English abstract).
- [45] FANG F P, FENG J F, LI F B, et al. Impacts of the north migration of China's rice production on its ecosystem service value during the last three decades (1980—2014) [J]. Journal of integrative agriculture, 2017, 16(1): 76-84.
- [46] 付珍萍, 刘倩, 杨腾. 湖南省稻田生态系统服务净价值评估[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2021, 33(2): 58-62. FU Z P, LIU Q, YANG T, et al. Evaluation of the net value of paddy ecosystem services in Hunan province [J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (natural science edition), 2021, 33(2): 58-62 (in Chinese with English abstract).
- [47] 闵庆文, 何露, 孙业红, 等. 中国 GIAHS 保护试点: 价值、问题与对策[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 668-673. MIN Q W, HE L, SUN Y H, et al. On the value, conservation and sustainable development of GIAHS pilot sites in China [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2012, 20(6): 668-673 (in Chinese with English abstract).
- [48] 赵天瑶, 曹鹏, 刘章勇, 等. 基于 CVM 的荆州市稻田生态系统的景观休闲旅游价值评价[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 498-503. ZHAO T Y, CAO P, LIU Z Y, et al. Evaluation of landscape, leisure and tourism value of paddy field in Jingzhou by the contingent valuation method [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3): 498-503 (in Chinese with English abstract).
- [49] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13. XIE G D, XIAO Y, ZHEN L, et al. On the value, conservation and sustainable development of GIAHS pilot sites in China [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2005, 13(3): 10-13 (in Chinese with English abstract).
- [50] FORSTER P, RAMASWAMY V, ARTAXO P, et al. Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [51] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 稻田生态系统气体调节功能及其价值[J]. 自然资源学报, 2004, 19(5): 617-623. XIAO Y, XIE G D, LU C X, et al. The gas regulation function of rice paddy ecosystems and its value [J]. Journal of natural resources, 2004, 19(5): 617-623 (in Chinese with English abstract).
- [52] 彭华, 纪雄辉, 刘昭兵, 等. 洞庭湖地区长期施肥条件下双季稻田生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2526-2532. PEN H, JI X H, LIU Z B, et al. Evaluation of net carbon sink effect and economic benefit in double rice field ecosystem under long-term fertilization [J]. Journal of agro-environment science, 2009, 28(12): 2526-2532 (in Chinese with English abstract).
- [53] 全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 等. 长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1406-1415. LIU X F, YAN X Y, WANG S W, et al. Effects of long-term application of organic materials on the ecosystem services of paddy fields [J]. Journal of agro-environment science, 2017, 36(7): 1406-1415 (in Chinese with English abstract).
- [54] 李文博, 刘少君, 叶新新, 等. 稻田综合种养模式对土壤生态系统的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(10): 1292-1300. LI W B, LIU S J, YE X X, et al. Effects of the co-culture of rice and aquatic animals on soil eco-system: a review [J]. Journal of ecology and rural environment, 2021, 37(10): 1292-1300 (in Chinese with English abstract).
- [55] 薛宝林, 张路方, 张铁亮, 等. 稻田生态系统服务价值评价——以湖南省为例[J]. 中国农村水利水电, 2020, 44(1): 52-57. XUE B L, ZHANG L F, ZHANG T L, et al. Evaluation of paddy field eco-system's service value: taking example Hunan Province for example [J]. China rural water and hydropower, 2020, 44(1): 52-57 (in Chinese with English abstract).
- [56] 向平安, 黄璜, 燕惠民, 等. 湖南洞庭湖区水稻生产的环境成本评估[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2187-2193. XIANG P A, HUANG H, YAN H M, et al. Environmental cost of rice production in Dongting Lake area of Hunan Province [J]. Chinese journal of applied ecology, 2005, 16(11): 2187-2193 (in Chinese with English abstract).

Research progress on value evaluation of paddy field ecosystem services in middle reaches of Yangtze River

WANG Zhiqiang¹, TANG Haiying², WEN Yi¹, XIAO Tao¹, MIAO Jianqun³,
YANG Wenting⁴, YANG Binjuan⁴, ZHOU Quan⁴, HUANG Guoqin⁴

1. *School of Resources and Environment, Jiujiang University/Jiangxi Provincial Key Laboratory of Industrial Ecological Simulation and Environmental Health in the Yangtze River Basin, Jiujiang 332005, China;*

2. *College of Agriculture and Biotechnology, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China;*

3. *School of Computer and Information Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;*

4. *Research Center for Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China*

Abstract The middle reaches of the Yangtze River is an important rice production base in China, which has made great contributions to the national food security and ecosystem safety and health. Scientific and reasonable evaluation of the service function value of paddy field ecosystem can provide an important basis for the evolution, improvement and promotion of its service function value and the promotion of the green sustainable development model of paddy field. On the basis of sorting out the connotation of paddy field ecosystem service function and the evaluation system and methods of service function value, this paper classified and compared the methods of evaluating the ecosystem service function of different paddy fields in the middle reaches of the Yangtze River, and summarized the research framework and research ideas of the evaluation of paddy field ecosystem service function value in this region. Due to the differences in types, distribution areas and value evaluation index systems of paddy fields, there are some differences in the evaluation methods of ecosystem service function value and the value of service function per unit area. It is suggested that future research should constantly modify the evaluation index system of different paddy ecosystem services value, improve the evaluation method, and raise the evaluation accuracy. At the same time, this paper also analyzed the service function of some paddy fields in the middle reaches of the Yangtze River, and found that the research perspectives mainly focused on the micro experiment of paddy fields and the macro measurement of provinces, cities and counties. The static evaluation of the service function value of a certain part of the paddy ecosystem or the overall service function value of the system was carried out, but the long-term dynamic tracking research on its value evaluation was insufficient. The research on the net value of paddy field ecosystem services also needs to be further studied.

Keywords the middle reaches of the Yangtze River; paddy field ecosystem; service value; value assessment; green sustainable development of paddy field

(责任编辑:张志钰)