

DOI: 10.5846/stxb202106121567

刘静萍, 金晓斌, 韩博, 林金煌, 张晓琳, 梁鑫源, 周寅康. 农业空间半自然生境内涵、特征与识别. 生态学报, 2022, 42(22): 9199-9212.

Liu J P, Jin X B, Han B, Lin J H, Zhang X L, Liang X Y, Zhou Y K. Connotation, characteristics and recognition of semi-natural habitats in agricultural space. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9199-9212.

农业空间半自然生境内涵、特征与识别

刘静萍^{1,2}, 金晓斌^{1,2,3,*}, 韩 博^{1,2}, 林金煌^{1,2}, 张晓琳^{1,2}, 梁鑫源^{1,2}, 周寅康^{1,2,3}

1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023

3 江苏省土地开发整理技术工程中心, 南京 210023

摘要: 维护农业空间生态安全是国土综合整治与生态修复的重要目标, 处于自然生境和人工生境过渡性地带的半自然生境是自然要素与人工要素强烈交互作用下形成的人与自然“共享空间”, 其以自然发展规律为核心, 又依靠人类活动延续独特的结构、过程和功能, 具有资源类型多样化、景观格局复杂化和生态功能多元化的特征, 是保障和提升农业空间生态系统健康的关键区域。通过对半自然生境内涵与特征的解析, 以四川省罗江区为例, 基于格局视角对农业空间半自然生境进行识别, 结果表明: (1) 罗江区半自然生境比例达 27.28%, 主要聚集于农林混交区, 城乡交错带次之, 农业集中区半自然生境比例偏低, 其内部存在生境面积微小、斑块细碎、连通阻断等问题; (2) 生态型半自然生境比例为 17.28%, 主要分布于农业集中区边缘地带, 人工型半自然生境比例为 10.00%, 主要分布于大型居民聚集区周边和用地混杂山区; (3) 从整体空间上看, 区域形成农业集中区—生态型半自然生境—人工型半自然生境—人工/自然生境的渐进分布格局, 其景观格局可总结为“片核—环屏—廊道—斑块”4 种模式; (4) 在国土空间规划新时代, 农业空间半自然生境研究需联动城镇空间与生态空间实现系统化保护修复, 为我国当前粮食安全保障国策和生态文明建设战略约束下的国土空间管控提出适应性策略。

关键词: 半自然生境; 农业空间; 内涵; 特征; 识别

Connotation, characteristics and recognition of semi-natural habitats in agricultural space

LIU Jingping^{1,2}, JIN Xiaobin^{1,2,3,*}, HAN Bo^{1,2}, LIN Jinhuang^{1,2}, ZHANG Xiaolin^{1,2}, LIANG Xinyuan^{1,2}, ZHOU Yinkang^{1,2,3}

1 College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China

3 Jiangsu Provincial Land Development and Consolidation Technology and Engineering Center, Nanjing 210023, China

Abstract: Maintaining the ecological security of agricultural space is an important goal of comprehensive land remediation and ecological restoration. The semi-natural habitats (SNHs) in the transitional zone between natural and artificial habitats can be called “shared space”, which are formed under the strong interaction of natural elements and artificial elements. SNHs have ecological assemblages which have been substantially modified in their composition, balance or function by human activities. They have evolved through traditional agricultural, pastoral or other human activities and depended on their continuation to retain their characteristic composition, structure and function. Despite not being natural, these habitats and ecosystems often have the characteristics of diversification of resource types, complex landscape pattern and diversification of ecological functions, providing high value in terms of biodiversity and other ecosystem services. There is no

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971234, 41971235); 南京大学博士研究生创新研究项目 (CXJ21-45)

收稿日期: 2021-06-12; **网络出版日期:** 2022-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinxb@nju.edu.cn

gainsaying that it is a key area to ensure and improve the ecosystem health of agricultural space. By analyzing the connotation and characteristics of SNHs, taking Luojiang District of Sichuan Province as an example, the SNHs in agricultural space were identified from the perspective of pattern. The results showed that: (1) the proportion of SNHs in Luojiang District was 27.28%, mainly concentrated in the mixed agricultural and forestry areas, followed by the urban and rural areas. The agricultural concentration areas had a relatively low proportion of SNHs, and there had problems such as small habitat area, fragmented patches, and blocked connectivity. (2) The proportion of ecological SNHs was 17.28%, that was mainly distributed in the fringes of agricultural concentration areas. And the proportion of artificial SNHs was 10.00%, which was mainly distributed in the surrounding areas of large residential areas and in mountainous areas with mixed land use. (3) From the perspective of overall space, the region formed a gradual distribution pattern of agricultural concentration areas-ecological SNHs-artificial SNHs-artificial habitats or natural habitats. And the landscape pattern could be summarized as four patterns of “sheet core-environmental screen-corridor-patch”. (4) In the new era of territorial space planning, the research on semi-natural habitats in agricultural space needs to link urban space and ecological space to achieve systematic protection and restoration, so as to provide adaptability for the management and control of territorial space under the constraints of China’s current national policy of food security and ecological civilization construction strategy.

Key Words: semi-natural habitats; agricultural space; connotation; characteristics; identification

生态系统健康是人类社会健康发展的重要基础,维护全球生物多样性、保护生态系统健康是当前国际社会高度关注的问题。关于生态系统健康,多数研究者主要关注自然系统保护修复及社会系统可持续利用。对于复合自然—人类社会的农业系统研究,学者多聚焦于“土地整治”^[1]、“耕地保护”^[2]、“粮食产量”^[3]等围绕产能效益为主体的方向,而政府相关规划与政策均以“增量提质促产能”为核心实行耕地保护与利用,加速了集约化农业步伐。近几十年来,中国农业现代化发展在保障粮食安全方面取得重大成就,但土地过度利用也威胁了农业空间社会系统与生态系统的良性耦合^[4]。农业扩张活动进一步加快了人类生态足迹发展速度^[5],传统低密度农业向高密度农业转换,集约化农田大量蚕食小规模生态用地导致的农业空间生物多样性退化、环境调节功能下降、农业景观同质化等问题不容忽视^[6-7]。

20 世纪 90 年代以来,欧盟颁布了栖息地指令、鸟类指令、共同农业政策等一系列有关生态系统健康、环境保护和生物多样性保护的法规政策^[8],调整相关的土地整治与土地管理方式,提出半自然生境保护条例,加大对高自然农田、乡村景观的管理,通过实施低放牧、低投入农业生产,促进土地整治由简单向综合发展,增强景观异质性和连通性,保护生物多样,维护和恢复生态系统服务功能^[9-10]。生物多样性与生态系统服务政府间科学—政策平台(the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Service, IPBES)在最新报告中明确提出保护生产系统中的自然和半自然生境,必要时可采用一定手段恢复或重构破碎化生境^[11-12]。在生态文明建设浪潮的推动下,我国提倡“山水林田湖草生命共同体”理念系统观和生命观,以新理念引导国土综合整治与生态保护修复实施。其中,《省级国土空间生态修复规划编制指南(征求意见稿)》中提出农业空间需重点评价农田生境丰富度、生物多样性、周边区域生态连通性、生态基础设施状况以及生态廊道建设可行性等,维护恢复农田半自然生境,增加农田生物多样性,维护提升林牧业生态功能与生态价值。

在当前全球一系列维护生态系统健康的计划和行动下,中国、欧盟及相关组织均将保护恢复半自然生境作为农业系统生态功能和生态价值维护和提升的重要载体。近些年,国内外学者对半自然生境做了大量研究,其中国外学者研究较早,微观尺度主要集中于的农田景观配置^[13]、生态系统服务功能^[14]、生物多样性保护^[15]等方面,宏观尺度更侧重土地利用强度变化^[16]、气候变化^[15]、农业政策制定^[17]等方面。国内学者一方面从国土规划布局和政策建议出发,讨论城市边缘区半自然生境保护^[18]、城市多重生境网络^[19-20]、土地综合整治及管理方式^[9]等;另一方面则从农田管理出发,研究样方尺度下半自然生境中病虫害控制^[21]、授粉^[22]、

昆虫多样性^[23]、植被多样性^[24]等,半自然生境的内涵及其区域特征等研究鲜有。本研究从半自然生境理论解析出发,重点分析农业空间半自然生境内涵与特征,并基于格局视角,以四川省德阳市罗江区为例,构建半自然生境的识别框架,探索农业空间半自然生境格局分布特征,以期为国土综合整治与生态保护修复提供新的整治修复理念和范式。

1 内涵与特征

生境,又称栖息地,指生物个体或种群生存繁衍的空间区域,以及该空间区域所包含的各种环境条件、资源禀赋和生物与生物之间、生物与非生物环境之间错综复杂的关系^[19]。在人工与自然多重叠合中,生物空间与人居空间在不同尺度上呈现不同方式的多元组合,依据人工与自然叠合程度的完整性可分化出自然-半自然-人工生境。从人类活动影响出发,地球上几乎难以找到无人影响影响的纯自然生境,但传统认知上,可将保留完整生态属性,遵循自然发展规律,受人为干扰较小的生态系统认定为自然生境^[25]。自然生境在人类社会发极致干预下形成以人类活动为主体的人工生境。自然生境和人工生境的过渡性地带即为半自然生境,是自然要素与人工要素强烈交互作用下形成的人与自然“共享空间”,其由农耕、畜牧或其他人类活动演化而来,以自然发展规律为核心,又依靠人类活动延续独特的结构、过程和功能^[25],是反应人与自然和谐相处的社会—生态系统。在一定区域尺度下,半自然生境所呈现的资源类型多样化、景观格局复杂化和生态功能多元化是保障自然-半自然-人工生境必要物质与能量联系的媒介,同时扮演自然生境与人工生境的“补给者”。

自然-半自然-人工生境不同发展阶段,由于受到的外部干扰不同,在一定空间尺度上,其自身恢复力、生境资源丰度和景观破碎程度均存在较大差异(图1)。自然生境受人为干扰强度较小,自然恢复力强,其自然资源以优势种为主,景观均一化程度较高。人工生境历经人类对自然高度地形改造和开发建设,内部要素主要由建设用地、集约化农业生产用地等主导,景观趋向平整规模化,资源丰度和景观破碎化程度低。介于自然生境与人工生境的半自然生境是人类社会对自然直接和间接干扰下的残留物,三者对比之下,其景观内部规模小、斑块细碎、类型混杂,布局分散,自身抵抗外部干扰能力有限,自然恢复力较弱。

从地理学视角看,以农村居民生产生活为主要功能的农业空间具有显著的半自然生境人与自然共享属性,

是人与自然相互作用的过渡区和渐变区。在自然基底环境背景下,传统碎片化农业生产用地作为生态入侵者存在,为以鸟类、昆虫为主的物种提供了食物来源,初步呈现与自然生境不同的生产、生态功能,其景观结构单一,且物种丰度、系统生产力和抗干扰能力较低,初步具备半自然生境雏形。伴随着人类活动空间范围和规模的扩张,农业生产用地逐渐蚕食周边自然生境由单一斑块逐步形成小规模连片农业景观,自然生境残留的生态用地以成片聚集或条带罗网形式并存于农业景观内部及边缘区,并承担用地权属划分职责,该阶段半自然生境景观结构复杂,类型多样。工业革命以来,粮食需求和农业科技进步使得农业生产用地规模快速膨胀,大量传统农田、林草地、水域被人为机械化、农药化改造蚕食,农业生产用地发展为区域基底景观,作物品种单一,农田基础设施过度硬化,形成高强度集约化人工系统,林草地、水域等重要生态要素演变为农业生产用地景观的异质镶嵌体,景观规模大量缩减,区域生态网络断裂,危及生物多样性维持且影响物种对特殊环境的适应性。同时,传统碎片化农业生产用地作为生态入侵者角色长久存在,而城镇扩张也在一定程度上反向推动规模农业生产用地的再碎片化^[26]。在复杂的人类活动中,农业空间半自然生境发展历程凸显了其易受外部

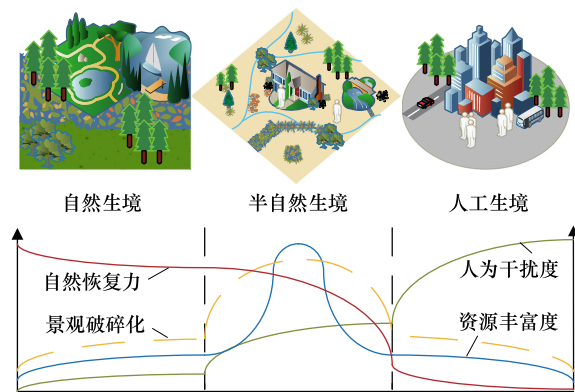


图1 自然-半自然-人工生境特征理论模型

Fig. 1 The theoretical model of natural-semi-natural-artificial habitat characteristics

调控的易变性、脆弱性和风险性,在不同空间尺度下也逐步形成多样性的土地覆被类型和异质性的景观格局。

农业空间半自然生境土地覆被类型及其景观格局变化直接影响区域物质循环、能量传递及生物在景观中的运动等过程,进而影响生境生态服务功能^[27]。异质性半自然生境在维持农业生态系统的稳定性及物质循环等方面发挥着巨大的作用,如为传粉昆虫类群提供丰富的食物来源、适宜性栖息地和繁殖地等有效维持生物多样性功能^[28],中小规模生态用地是水文、大气循环等生态过程承载空间的重要组分,其有利于保护生态过程完整性,并促进空气净化、固碳减碳、水质净化、土壤改善、虫害防治等生态调节和支持功能发挥^[29—30]。农业空间半自然生境虽不具有高度粮食生产效益,但昆虫授粉^[31]、益鸟效应^[32]等对促进农业生产水平有显著性作用,同时,半自然生境具有食品、药物、材料等生产功能^[33],可为周边居民聚集区提供多种农副产品供给,维持一定自给自足水平。高生物多样性的半自然生境景观具有明显的交织性和混杂性,有利于维持田园景观风貌,成为户外娱乐空间,可与丰富的民俗、农耕文化等协调发展为乡村游憩场所^[34—35]。总体而言,半自然生境促进生态多样性保护、环境调节、区域产品供给、文化服务等复合生态功能的发挥,保障了自然-半自然-人工生境必要的物质与能量联系,具有维持稳定农业空间生态系统的自我调节能力。

作为农业空间的重要生态功能区,理论上讲,农业空间半自然生境资源类型为生态用地,但中国现有的土地利用分类体系对土地生态属性考虑不足,缺乏生态用地分类统一标准^[36]。针对生态用地的区分,不同学者在区域尺度上形成了“生态要素决定论”^[37]、“生态功能决定论”^[38]和“主体功能决定论”^[39]三种观点,前两者从土地覆盖类型和土地生态功能角度认为除人工硬质化表面的建设用地外,其余用地均可视为生态用地,包括农田、林地、草地、水域等;后者在此基础上从人为干扰视角出发,认为以经济产出为核心的农业生产用地,如耕地、园地、养殖水面等不作为生态用地考虑^[40]。生态用地类型划分争议主要在于对农业生产用地的存疑,而农业生产用地是促成农业空间半自然生境形成的核心要素,单纯以生态要素和生态功能定义半自然生境用地类型过于广泛,但仅以主体功能定义完全抹去农业生产用地,则过分强调土地功能与土地类型有关,忽视了空间格局对土地功能的影响^[39]。本研究认为,农业空间半自然生境是在不同空间尺度上对维护农业空间生态过程和功能具有重要意义的土地空间^[38],在立足于土地管理和生态保护修复目标下,土地利用变化通过对生态格局的影响改变生态服务功能,对农业空间半自然生境资源类型的界定应以主体功能为准则,明晰农业空间半自然生境生态要素及其发挥的生态功能,从格局视角出发,确定农业生产用地的“量”、“质”及其空间位置,对于强调发挥经济产出确保粮食安全而不是维持区域生态环境健康的具有规模化特征的农业生产用地不宜作为半自然生境资源类型考虑。因此,农业空间半自然生境资源类型可界定为除建设用地和具备规模化特征的农业生产用地外的其余用地,包括碎片化农业生产用地、林地、草地、水域、沼泽等在内的、地表无人工铺装的、具有透水性的地面。根据半自然生境概念定义,立足于农业生产用地在农业空间的主导地位,综合考量不同空间尺度下农业生产用地景观分布特征及其与周边其余生态用地空间从属关系,将农业空间半自然生境类型划分为两类:一是生态型半自然生境,是景观中以嵌套或过渡缓冲形式分布于具备规模化特征的农业生产用地内部或周边的生态用地,如林地、草地、水域、沼泽等;二是人工型半自然生境,是景观中分布于人工或自然生境中资源规模小、资源类型丰富、景观聚集度低、用地碎片化程度高的低强度农业产业用地,其具有高自然价值农田属性。

2 研究区与研究方法

2.1 研究区概况

四川省德阳市罗江区坐落于成都平原东北边沿丘区,介于东经 104°19′15″—104°42′33″,北纬 31°12′08″—31°26′37″,全区土地面积 447.90 km²,是成德绵经济带的重要走廊(图 2)。境域属于红层丘陵区,主要为平坝和低山,地势西高东低,大部分地区海拔介于 500—580 m,沟谷宽缓,纵坡小。气候类型为中亚热带湿润季风气候区,气候温和,四季分明,年均气温 16—18℃,年均降水量 813 mm,年无霜期 271 d,年均日照时数 1260 h。罗江区农业垦殖历史悠久,垦殖指数高,自然植被保存量少,被农作物大量替代,其农林用地占行政总面积的

76.54%,建成蜜柚杂柑、贵妃枣、青花椒、优质梨、稻菜轮作、水稻—油菜制种等“六大万亩产业示范园”。境内耕地资源丰富,占农林用地总面积的 62.12%,而水田面积占耕地总面积的 72.21%,主要分布于略坪镇、金山镇、鄯家镇东部和新盛镇西部。罗江区实施多项土地整治工程,开展高标准农田建设,粮食产量持续增加,2020 年农林及渔业增加值达 25.5 亿元,农村居民人均可支配收入 18014 元,现代农业园区初具雏形。

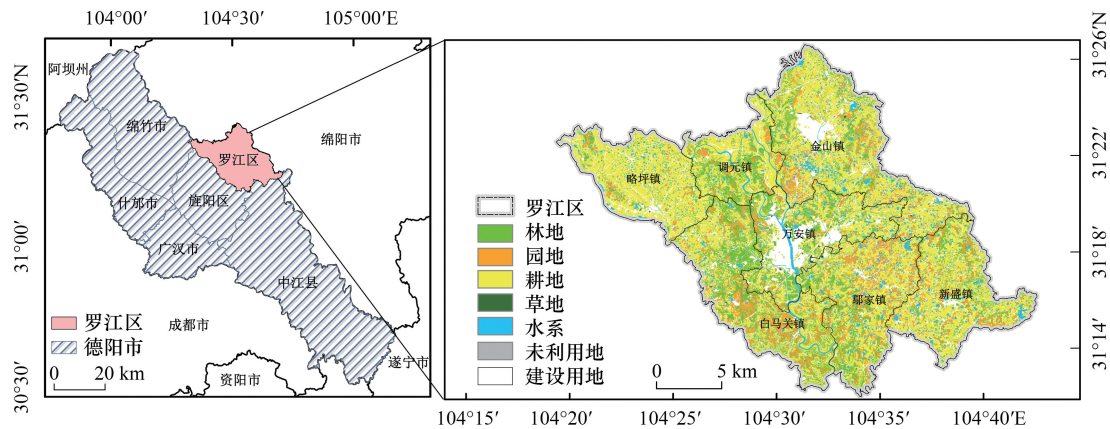


图 2 四川省罗江区区位图

Fig.2 Location of Luojiang District, Sichuan Province

2.2 指标体系构建

根据农业空间半自然生境资源类型界定,为提取农业空间具备规模化特征农业生产用地以确定人工型和生态型半自然生境范围,并进一步识别生态型半自然生境内部生态用地景观格局特征,本研究从资源规模度、资源丰富度、景观聚集度三个层面构建农业空间半自然生境资源与景观格局评价指标体系(表 1)。基于 ArcGIS 及 Fragstats 平台,利用基础数据与景观格网粒度分析结果,分别对研究区农业生产用地和生态型半自然生境中的生态用地进行景观指数计算(图 3),为确保数据评价标准统一和经验理解便利性,对正向和负向指标属性分别采取正向、逆向归一化处理,并以“1-各指标加权线性和”的标准值构建农业生产用地碎片化指数(AFI)^[41],以“指标加权线性和”的标准值构建半自然生境生态综合指数(SHEI),采用自然断裂法将资源规模度、资源丰富度、景观聚集度、农业生产用地碎片化指数和半自然生境生态综合指数等 5 种景观类型分别划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级。相关指数计算具体计算公式如下所示:

$$AFI = 1 - 1/3(RS + RA + SA) \quad (1)$$

$$SHEI = 1/3(RS + RA + SA) \quad (2)$$

$$RS = \sum_{i=1}^z (S_i) \times \frac{1}{a} \quad (3)$$

$$RA = \sum_{j=1}^z (T_j) \times \frac{1}{b} \quad (4)$$

$$SA = \sum_{k=1}^z (U_k) \times \frac{1}{c} \quad (5)$$

式中,AFI 为农业生产用地碎片化指数;SHEI 为半自然生境生态综合指数;RS 表示资源规模指数;RA 表示资源丰度指数;SA 表示景观聚集指数;式(3)中, a 为 RS 中的指标数量, S_i 为第 i 个指标的计算值;式(4)中, b 为 RA 中的指标数量, T_j 为第 j 个指标的计算值;式(5)中, c 为 SA 中的指标数量, U_k 为第 k 个指标的计算值。

2.3 数据分析与处理

本研究采用四川省德阳市罗江区 2018 年土地利用变更调查数据,将建设用地在源数据中做剔除处理,考虑到景观评价指标可操作性应用,需结合栅格数据计算,因此参考相关学者关于景观评价指标适用性分析结

果^[42],基于 ArcGIS 平台将土地利用变更调查矢量数据重采样为像元大小为 10 m×10m 精度的栅格数据。

表 1 农业空间半自然生境资源与景观格局综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of semi-natural habitats resources and landscape patterns in agricultural space

类型 Type	景观指数 Landscape index	指标含义 Indicator meaning	指标属性 Indicator properties
资源规模度 Resource scale	景观总面积 (TA)	表征景观格局中农业生产用地或生态型半自然生境中生态用地的规模	+
	平均斑块面积 (AREA_MN)	表征景观格局中农业生产用地或生态型半自然生境中生态用地斑块的平均面积	+
	斑块密度 (PD)	表征景观格局中单位面积农业生产用地或生态型半自然生境中生态用地斑块数量	-
资源丰富度 Resource abundance	香浓多样性指数 (SHDI)	表征景观格局中农业生产用地或生态型半自然生境中生态用地的景观异质性	+
	斑块多度 (PR)	表征景观格局中农业生产用地或生态型半自然生境中生态用地的景观类型丰富性	+
景观聚集度 Landscape agglomeration	聚集度 (AI)	表征景观格局中农业生产用地或生态型半自然生境中生态用地斑块的空间聚集度	+
	平均欧式邻近距离 (ENN_MN)	表征景观格局中农业生产用地或生态型半自然生境中生态用地斑块的平均距离	-
	蔓延度 (CONTAG)	表征景观格局中农业生产用地或生态型半自然生境中生态用地优势斑块的连接性	+

“指标属性”列中“+”表指标为正向属性,“-”表指标为负向属性

尺度作为划分空间单元的度量单位,对景观空间异质性特征存在显著性的影响,不同格网尺度下浓缩出的景观格局信息存在较大的差异,往往造成评价结果的失真。根据欧盟经验,约 1hm²田块基本上能满足规模化机械化需求,100 hm²以上的农场则需保持 8%—10%的半自然生境^[7]。为选取适宜性景观格局粒度以正确体现景观指数在空间上的表达,本研究设置 200m×200m,300m×300m,500m×500m,1000m×1000m 4 种景观格局粒度,利用 ArcGIS 和 Fragstats 软件对不同格网粒度下的半自然生境景观指数(表 1)进行计算,采用克里金模型交叉验证法和半方差函数对 4 种景观格局粒度下不同景观指数结果进行评价。

交叉验证法是假设每个格网单元的景观指数未被测定,通过克里金插值模型根据其余格网单元的景观指数进行估算,分析拟合度 R^2 (实测值与估算值间的拟合程度)和残差 RSS(实测值与估算值间的差平方和)检验模型的合理性,拟合度 R^2 越接近 1,残差 RSS 越小,模型拟合效果越好^[43]。克里金插值模型通过半方差函数计算模型参数,用于说明区域化变量在一定尺度下的空间异质性和空间相关性,其中参数块金值反应了由于尺度差异而形成的景观指数随机性误差、基台值揭示了景观指数的空间异质性程度,变程体现了景观指数具有相关性的最大距离、块金效应即块金值与基台值之比反应了随机性因素对空间变异度的贡献率^[44]。本研究借助 GS+10.0 软件对 8 种景观指数进行采样分析,由于半方差函数计算景观指数需符合正态分布,且克里金交叉验证分析中不同景观指数实测值与估算值拟合度存在较大差异,因此,剔除不符合正态分析及交叉验证分析中 R^2 值小于 0.5 景观指数,遴选出景观总面积(TA)表征资源规模,斑块多度(PR)表征资源丰度,聚集度(AI)表征景观聚集。

从半方差函数参数结果(表 2)来看,不同景观格局粒度中的不同景观指数在各参数中存在较大差异。相比景观指数 AI,TA 和 PR 的块金值均随尺度的增加而下降,在不同尺度上受随机因素影响较大,其中 TA 的块金值变化幅度达 0.023,200m 尺度与 300m 尺度块金值存在 0.011 的大幅随机性误差。TA 和 AI 基台值最高值和最低值均分别处于 1000m 和 300m 格网粒度,对于中观尺度研究区而言,偏大尺度和偏小尺度下资源规模度和资源聚集均存在较强的空间异质性;斑块多度基台值随尺度增大而减少,这主要由于大尺度景观格局类型丰富度偏高,空间异质性较小,小尺度景观格局类型多样性分异,空间异质性显著。各景观指数变程、块金效应基本分别随格网粒度呈同向、反向变化,尺度越大,景观指数具有相关性的最大距离越远,对空间变异的贡献率也越小。从 R^2 和 RSS 取值可得 200m 尺度相比其余尺度模型模拟效果较差。总体而言,200m 小

尺度景观格网可窥探更多细节,但会破坏景观内部结构,其变程数值偏低,受随机因素影响过高,且其模型模拟效果较差;而 1000m 和 500m 大尺度格网掩盖了局部空间的变异,揭示更多宏观变异特征,半方差自相关性占据主导地位。因此,综合考虑半方差函数模型的拟合效果,确定 300m 格网为较适宜中观尺度研究区尺度。

表 2 不同格网粒度和景观指数下半方差函数参数

Table 2 Semivariance parameters under different grid granularity and landscape index

景观指数 Landscape index	格网尺度 Grid scale/m	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range	块金效应 Nugget effect/%	拟合度 R-Squared	残差 Residual sum of squares
景观总面积 Total area	1000	0.007	0.075	7680	9.26	0.932	0.000
	500	0.014	0.058	6900	24.96	0.980	0.000
	300	0.019	0.054	5550	34.39	0.939	0.000
	200	0.030	0.060	5340	49.87	0.903	0.000
斑块多度 Patch richness	1000	0.022	0.044	7430	49.89	0.754	0.000
	500	0.029	0.059	14850	49.91	0.863	0.000
	300	0.030	0.061	3590	49.92	0.728	0.000
	200	0.033	0.061	1020	54.19	0.499	0.001
聚集度 Aggregation index	1000	0.005	0.011	25380	45.50	0.987	0.000
	500	0.003	0.006	13560	49.92	0.964	0.000
	300	0.002	0.004	4830	49.86	0.881	0.000
	200	0.001	0.005	780	12.61	0.329	0.000

2.4 识别流程

根据农业空间半自然生境内涵与特征解析,依照基础数据与景观格网粒度分析结果,在农业空间半自然生境资源与景观格局综合评价指标体系构建的基础(图 3):(1)依照研究区农业结构特点确定农业生产用地类型为耕地、园地和养殖水面,筛选景观格网中农业生产用地面积大于 0 格网即为农业空间半自然生境有效影响范围,基于 Fragstats 平台对农业生产用地资源规模度、资源丰富度和景观聚集度和农业生产用地碎片化指数进行景观指数计算,并采用自然断裂法将 4 种类型划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级,明晰农业空间半自然生境资源类型分布特征,确定景观格网中农业生产用地是否具备规模化特征,为分析不同类型半自然生境景观格局提供基础条件;(2)将农业生产用地资源规模度低、或资源丰富度高、或景观聚集度低、或农业生产用地碎片化指数高的景观格网确定为人工型半自然生境影响范围,分析研究区人工型半自然生境空间分布特征;(3)剔除人工型半自然生境景观格网即为生态型半自然生境影响范围,以半自然生境生态综合指数表征生态型半自然生境,综合分析生态型半自然生境中生态用地资源规模度、资源丰富度和景观聚集度和半自然生境生态综合指数空间分布特征;(4)综合人工型半自然生境和生态型半自然生境,分析研究区农业空间半自然生境总体分布情况。

3 结果分析

3.1 半自然生境资源类型分布

罗江区农业生产用地资源规模度、资源丰富度、景观聚集、农业生产用地碎片化指数均存在显著的地域差异(图 4)。从资源规模度来看,罗江区农业生产用地资源规模度空间分异显著,总体呈现中心—外围低、其余区域普高的圈状格局,农业生产用地资源规模度高值区主要位于西北部和东部地势平坦的水田集中区,低值区主要位于大型居民聚集区周边及西部用地混杂山区。从资源丰富度来看,罗江区农业生产用地资源丰富度总体呈北低南高的态势,高值区主要集中于西部农林混杂区和南部耕园混杂区,低值区主要位于西北部重要水田集中区,而围绕大型居民聚集区及行政边界存在的农业生产用地资源丰富度普遍偏低,这主要与格网内部用地要素少和规模小有关。从景观聚集度来看,罗江区农业生产用地景观聚集度高值区主要位于西北部和

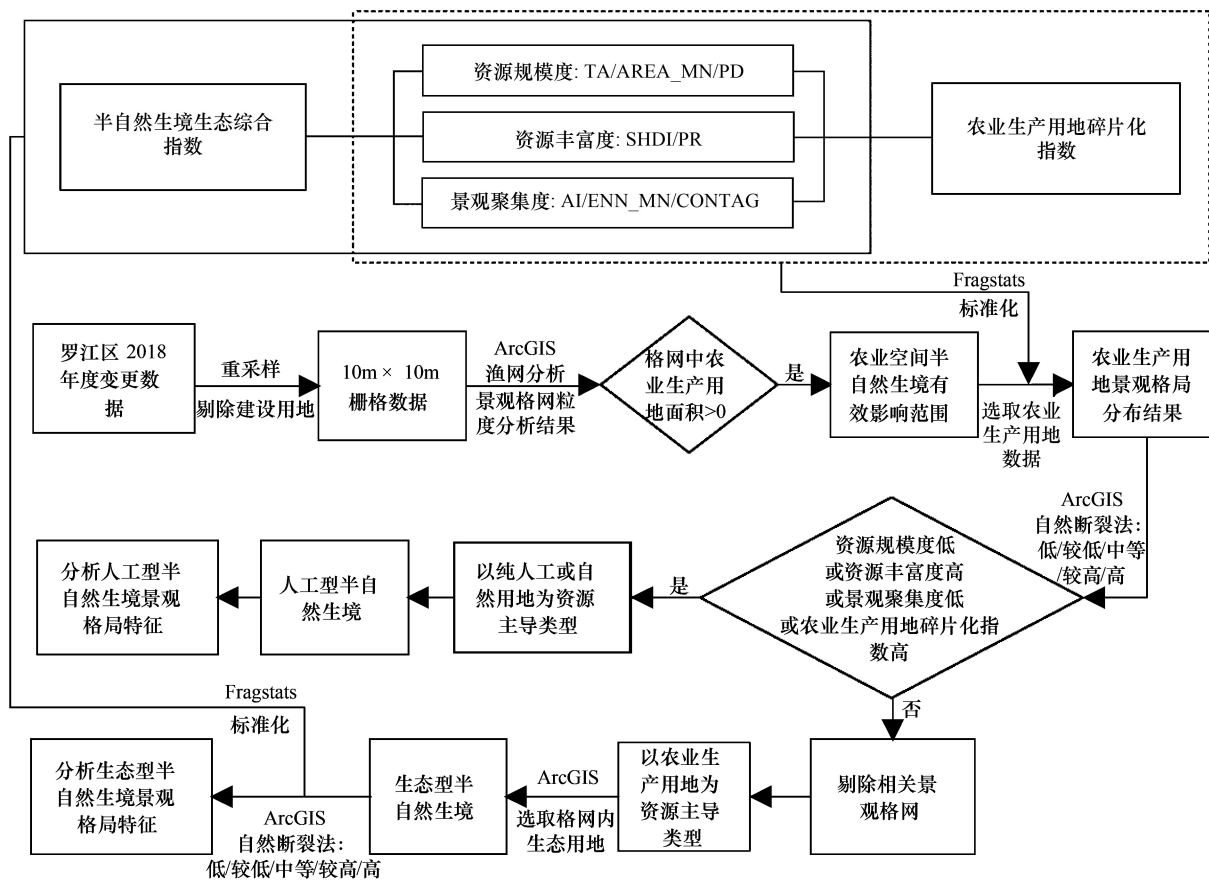


图3 技术路线图

Fig.3 Technology roadmap

TA: 景观总面积 Total area; AREA_MN: 平均斑块面积 Mean patch area; PD: 斑块密度 Patch density; SHDI: 香浓多样性指数 Shannon's diversity index; PR: 斑块多度 Patch richness; AI: 聚集度 Aggregation index; ENN_MN: 平均欧式邻近距离 Mean Euclidean nearest neighbor distance; CONTAG: 蔓延度 Contagion

东部地势平坦的水田集中区, 低值区集中在大型居民聚集区周边、西部用地混杂山区和研究区行政边界。从农业生产用地碎片化指数来看, 农业生产用地碎片化指数较为稳定, 均值为 0.919, 标准差为 0.088; 在空间上, 罗江区西北部水田集中区农业生产用地碎片化程度低, 主要分布于略坪镇; 东部地区农业生产用地交错分布, 呈现明显的碎片化低值区被中高值带包围, 如金山镇、新盛镇、鄢家镇等; 西部山区农业生产用地碎片化程度整体偏高, 碎片化程度较低的规模化农业生产用地以“孤岛”形式伫立, 以白马关镇最为典型。

3.2 半自然生境景观格局分布

3.2.1 人工型半自然生境

根据罗江区人工型半自然生境分布结果显示(图 5), 从空间上看, 人工型半自然生境成片分布于罗江区白马关镇农林混杂地带, 以组团形式嵌入区域小型生态集中区中; 万安镇和金山镇大型居民聚集区被人工型半自然生境以线性环绕态势包围; 金山镇、鄢家镇等耕园混交区遍布规模大小不均、分布方向不一的线性人工型半自然生境; 是西北部和东部农业集中区分布有零星斑块状人工型半自然生境。从行政区划看(表 3), 白马关镇是人工型半自然生境主要分布区域, 人工半自然生境用地占全域面积的 15.91%, 金山镇和新盛镇等耕园混杂区次之, 略坪镇和调元镇等水田集中分布区人工型半自然生境分布最少。总体而言, 受地形条件和人为因素影响, 人工型半自然生境主要分布于大型居民聚集区周边和用地混杂山区, 为农业空间与生态空间、城镇空间提供过渡缓冲作用。

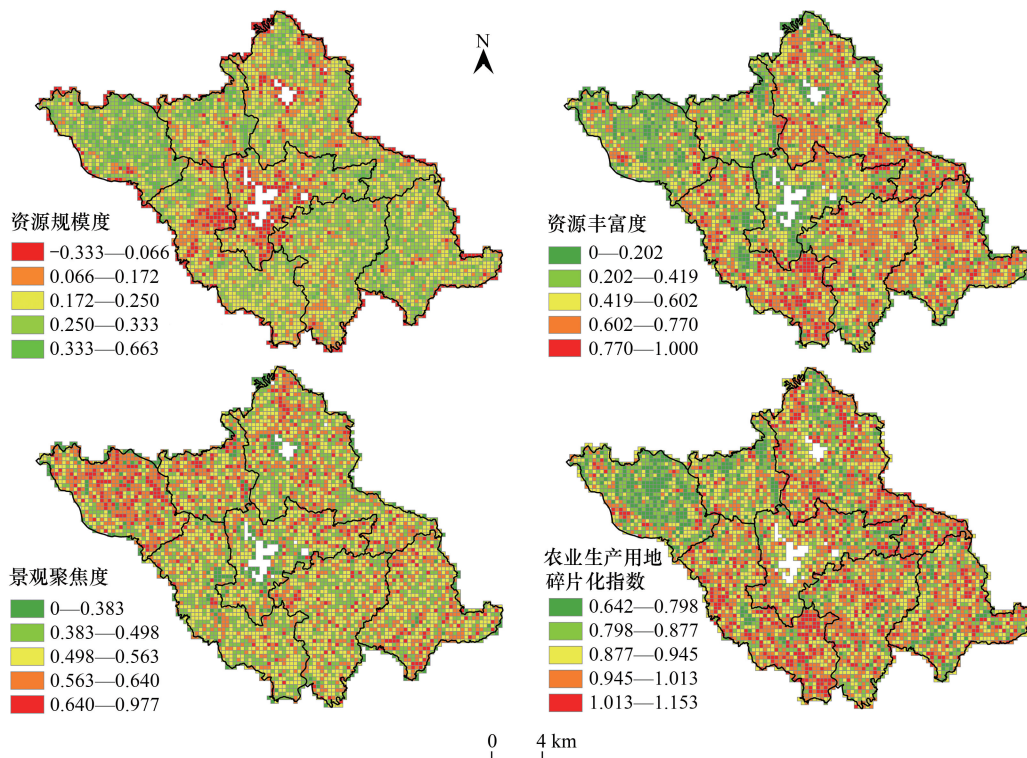


图 4 罗江区农业空间半自然生境资源类型分布

Fig.4 Distribution of semi-natural habitats resources in agricultural space in Luojiang District

3.2.2 生态型半自然生境

罗江区生态型半自然生境资源规模度总体受地形地势影响而形成较显著的西高东低空间分异,其高值区成片分布于调元镇和鄯家镇西部片区,以线性形式贯穿中部,低值区聚集于西北部和东部农业集中区,零星高值斑块散布其中,从区域整体来看,北部自西向东呈现低—高—低的生态型半自然生境资源规模分布(图 6)。资源丰富度与资源规模度呈现相反发展趋势,整体表现为较显著的东高西低空间格局,高值区成片聚集于金山镇重点农业集中区内部和略平镇水田集中区边缘,并线性环绕万安镇大型居民聚集区分布,低值区集中于调元镇、鄯家镇和白马关镇等农林混杂区;区域北部资源丰富度总体呈现高—低—高空间格局,南部总体偏低。景观聚集度空间上呈现西北—东南部部分区域高聚集分布,金山镇与略平镇西部低聚集分布,其余区域处于中等和较高水平。总体而言,重点农业集中区生态型半自然生境资源规模度低,资源丰富度较高,景观聚集度不强,表明其内部存在生态型半自然生境面积微小、斑块细碎、连通阻断等问题。

根据半自然生境生态综合指数分布结果(图 6),罗江区生态型半自然生境在空间上自西向东总体呈现低—高—低的分布特征,西北部、东部等重点农业集中区及西南部重要园地区的半自然生境生态综合指数总体上以低—高的规律由中心向外围蔓延。高值生态型半自然生境成片分布于调元镇和鄯家镇西部,其分别为

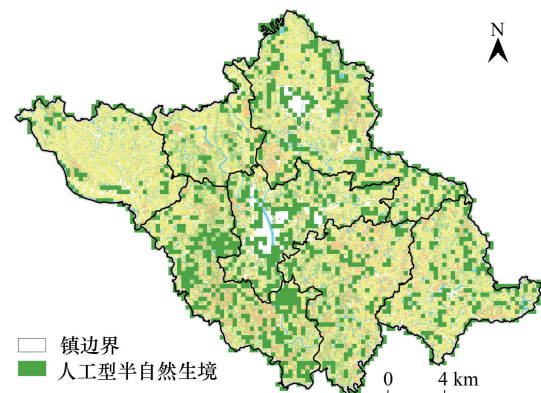


图 5 罗江区农业空间人工型半自然生境景观格局分布

Fig.5 Landscape pattern distribution of artificial semi-natural habitats in agricultural space in Luojiang District

北部略平镇和金山镇两大重点水田集中区过渡地段以及南部白马关镇重点园地集中区和新盛镇、鄢家镇重要水田集中区交错地带,而东部重点农业集中区内部及边缘区亦存在小面积高值生态型半自然生境聚集。万安镇大型居民聚集区由高值生态型半自然生境线性环绕,形成城镇空间与农业空间的生态屏障;区域东北部存在小规模成片高值生态型半自然生境环绕居民聚集区和重要水田集中区组合形成外部缓冲屏障带。从区域整体来看,高值生态型半自然生境贯穿区域南北,以成片聚集组合模式自北部两大重点水田集中区过渡地段及其边缘带—中部城镇空间与农业空间生态环屏带—南部重要园地集中区和重要水田区的交错带,形成自北向南“Y”型线性廊道特征;局部空间中,以水系、防护林等形式存在于农业集中区内部及边缘地带的高值生态型半自然生境形成线性景观阻隔状态。零星碎片化斑块式生态型半自然生境大量分布于农业集中区内部及边缘地带,是整体景观中分布最广的生态型半自然生境形态。从行政区划看(表3),调元镇、白马关镇和鄢家镇等农林混杂区高值生态型半自然生境分布区域,其生态型半自然生境用地比例均超过19%,万安镇等重点居民聚集区次之,略平镇等水田集中区生态型半自然生境综合指数最低,生态型半自然生境比例仅占13.4%。

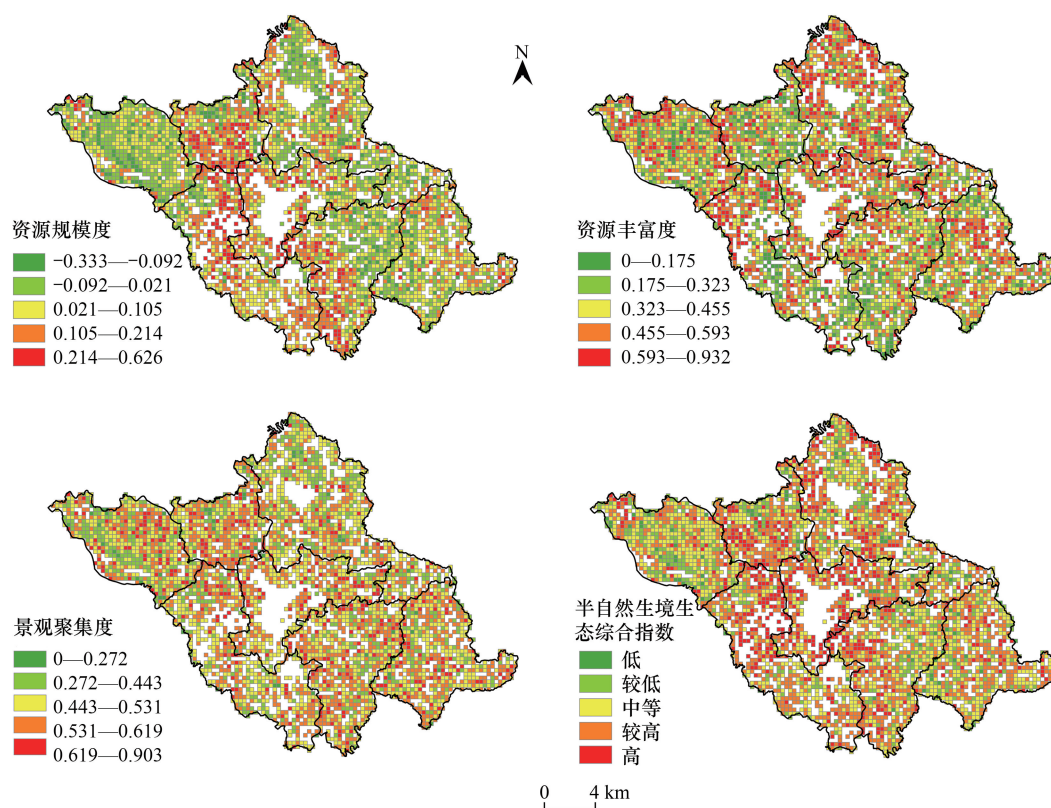


图6 罗江区农业空间生态型半自然生境景观格局分布

Fig.6 Landscape pattern distribution of ecological semi-natural habitats in agricultural space in Luojiang District

3.2.3 半自然生境

罗江区半自然生境面积占区域总面积的27.28%,半自然生境类型以生态型为主,人工型为辅,其分别占区域总面积的17.28%和10.00%(表3)。从空间分布上看(图7),生态型与人工型半自然生境具有连续性、包围性特征,生态型半自然生境以不同景观格局形态大面积分布于农业集中区内部及周边,人工型半自然生境作为农业空间与城镇空间、农业空间与生态空间的过渡缓冲区,形成生态型半自然生境包围人工型半自然生境的态势,以万安镇和白马关镇表现最为典型,由此可看出,生态型半自然生境在一定时空范围内亦为农业集中区与人工型半自然生境的景观隔离带,形成农业集中区—生态型半自然生境—人工型半自然生境—人工/自然生境的空间分布格局。从行政区划上看,罗江区半自然生境地域差异显著,主要分布于调元镇和白马关

镇等农林混杂区,略平镇等重要水田集中区半自然生境规模偏小。总体而言,半自然生境大规模聚集于农林混交区,而农业集中区内部半自然生境比例值普遍偏低,仅有零星高值以斑块或线性形式镶嵌。

表 3 半自然生境比例

Table 3 The proportion of semi-natural habitats

地区 Area	人工型半自然生境 Artificial SNHs/%	生态型半自然生境 Ecological SNHs/%	半自然生境 SNHs/%
万安镇	7.94	17.00	24.94
鄢家镇	9.48	19.20	28.68
金山镇	11.32	15.07	26.39
略坪镇	4.84	13.40	18.24
调元镇	6.59	24.98	31.57
新盛镇	11.34	15.38	26.72
白马关镇	15.91	19.47	35.39
罗江镇	10.00	17.28	27.28

SNHs: 半自然生境 Semi-natural habitats

4 讨论

根据研究区农业空间半自然生境景观格局分布发现,人工型半自然生境和生态型半自然生境在空间上均存在显著性的分布特征,依照其景观规模大小、聚集形态、发挥效用等可将半自然生境景观格局归纳总结为“片核-环屏-廊道-斑块”等 4 种模式。片核模式具备一定的景观连片规模,类型结构复杂,为区域半自然生境生态功能的发挥提供稳定的核心环境,其规模大小直接决定农业空间的生态效应,在格局上主要存在两种形式,一是夹杂于相邻农业集中区之间,发挥过渡缓冲作用,二是组团聚集于规模化人工或自然生境内部。环屏模式主要分布于城乡交错带,空间上以环带状形式将农业空间与城镇空间分隔开,在一定程度上指示了城镇建设活动对农业系统的影响,是农业空间的生态屏障。廊道模式是半自然生境以线性连续分布形式存在于具备规模化特征的产业生产用地内部或边缘区,如水系、防护林带等,其物质流、信息流和能量流交换频繁,具有景观隔离作用,是农业空间生态网络连通的关键要素,其规模大小和连通程度决定了农业空间半自然生境的生态辐射潜力。斑块模式空间上由具备规模化特征的农业生产用地包围,与其他生态用地无任何空间邻接关系,以小型孤立生境如坑塘水面等形式存在,若斑块模式半自然生境为区域优势格局特征,则表明区域农业生产用地高度集约规模化。

在当前全人类共同关注生态系统健康,致力于保护和修复生态系统,倡导“修复一代”活动的时机,半自然生境保护理念脱离传统土地整治、高标准农田建设等单一生产目标活动,强调农业空间生态用地及传统农业生产用地的维护和数量、质量的提升,侧重于农业系统中生态景观格局连通,构筑多样化半自然生境景观镶嵌体,组合农田、村庄、道路等要素,形成农业空间多样化生态系统,促进农业可持续生产,打造乡村景观的多功能性,推动农业空间生态环境改善^[45]。面对我国当前粮食安全保障国策和生态文明建设战略,针对农业空间半自然生境格局特征,提出两点认识:

(1) 面对资源类型迥异、景观功能不一的生态型半自然生境和人工型半自然生境需采取不同的管理方式。生态型半自然生境需充分考虑粮食安全和生态安全协同并进目标,防止过度追求新增耕地面积指标、农

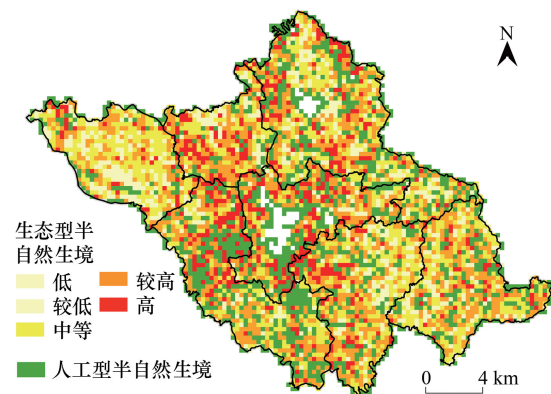


图 7 罗江区农业空间半自然生境景观格局分布

Fig.7 Landscape pattern distribution of semi-natural habitats in agricultural space in Luojiang District

农业生产用地高度工程化而破坏半自然生境;生态型半自然生境的保护修复侧重于资源数量、质量的提升以及景观生态网络连通性和多样性构建,同时,需基于“自然修复,人工辅助”的原则,重视生物多样性保护和重建促进农业生产用地质量提升,重视粮食高产稳产所需的田间气候调节、传粉服务、害虫生物控制等生态服务功能,深刻认识原生生境物种价值,打造具有高异质性和高复杂性的农业景观。人工型半自然生境可采取“投资自然”方式,鼓励降低农用化学品需求,利用自然提高农业生产力,与周围自然生境、人工生境组合形成区域多样化景观。

(2) 农业空间中片核模式、环屏模式半自然生境不仅是区域生态效应发挥的核心,也是农业空间生态网络的枢纽中心,与局部廊道模式、斑块模式以面-线-点形式共同构筑农业空间生态网络格局。针对不同时空尺度下半自然生境生态网络连通性、多样性和稳定性需求,以及局部农业集中区内部半自然生境斑块细碎、生境连通阻断等问题,建议在国土空间规划中根据区域农业空间自然、人文、生态环境等特点规划建设农业空间绿色基础设施,基于原生生境特点研发适用于当地的生态基础设施技术,整合区域问题制定适应性政策管理措施和生态补偿机制,确保农业空间半自然生境实施的有效性和可持续性。

本研究通过半自然生境内涵与特征解析,以主体功能为准则,明晰农业空间半自然生境生态要素及其发挥的生态功能,从格局视角出发将半自然生境划分为生态型半自然生境与人工型半自然生境。受数据精度制约,半自然生境资源类型与景观格局综合评价指标体系主要围绕农业生产用地规模水平展开,缺乏对集约化水平的分析,半自然生境分类方法缺乏与其他方法的对比应用,有待后续研究中进一步深入拓展。中国已进入国土空间规划新时代,如何采用有效手段维护农业空间生态安全,联动城镇和生态空间系统保护与修复是实现国土综合整治与生态修复的重要环节。目前而言,国内关于半自然生境研究尚属起步阶段,参考欧盟经验,未来半自然生境研究需针对中国多类型农业区开展不同时空尺度的类型、格局、功能演变分析,探讨半自然生境与自然、人工生境的空间连接性,并基于自然解决方案(nature-based solutions, NbS),在确保粮食安全的基础上,对中国半自然生境保护提出适应性策略^[46]。

5 结论

半自然生境是自然要素与人工要素强烈交互作用下形成的人与自然“共享空间”,以自然发展规律为核心,又依靠人类活动延续独特的结构、过程和功能,是保障农业空间生态安全的关键区域。本研究依据半自然生境内涵及其资源类型多样化、景观格局复杂化和生态功能多元化的特征,以主体功能为准则,综合生态要素与生态功能,从格局视角出发,将农业空间半自然生境类型划分生态型半自然生境和人工型半自然生境,并以四川省德阳市罗江区为例进行农业空间半自然生境识别,得到以下结论:

(1) 罗江区半自然生境比例达 27.28%;生态型半自然生境比例为 17.28%,主要分布于农业集中区边缘地带;人工型半自然生境比例为 10.00%,主要分布于大型居民聚集区周边和用地混杂山区。农业集中区半自然生境比例偏低,其内部存在生境面积微小、斑块细碎、连通阻断等问题。

(2) 从整体空间上看,区域形成农业集中区-生态型半自然生境-人工型半自然生境-人工/自然生境的渐进分布格局,其景观格局可总结为“片核-环屏-廊道-斑块”4 种模式。

(3) 从半自然生境领域未来发展看,需针对中国多类型农业区开展不同时空尺度的类型、格局、功能演变分析,并联动城镇、生态空间实现全域系统保护修复,为粮食安全保障和生态文明建设战略下的国土管控提出适应性策略。

参考文献(References):

- [1] Liu J, Jin X B, Xu W Y, Sun R, Han B, Yang X H, Gu Z M, Xu C L, Sui X Y, Zhou Y K. Influential factors and classification of cultivated land fragmentation, and implications for future land consolidation: a case study of Jiangsu Province in Eastern China. *Land Use Policy*, 2019, 88: 104185.
- [2] Liang X Y, Jin X B, Sun R, Han B, Liu J, Zhou Y K. A typical phenomenon of cultivated land use in China's economically developed areas;

- Anti-intensification in Jiangsu Province. *Land Use Policy*, 2021, 102: 105223.
- [3] 吴心怡, 金晓斌, 韩博, 徐伟义, 任婕, 孙瑞, 周寅康. 2001—2017 年四川省耕地产能变化与潜力特征分析. *农业工程学报*, 2021, 37(03): 238-249.
- [4] Li L, Hu R, Huang J, Bürgi M, Zhu Z, Zhong J, Lü Z. A farmland biodiversity strategy is needed for China. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(6): 772-774.
- [5] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, Allan J R, Behr J, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-11.
- [6] 汤西子. 城市边缘区小微生境保护规划——欧盟高自然价值农田管控对我国城市区域生物多样性维持的启示. *国际城市规划*, 2021, 36(02): 74-83+116.
- [7] Batúry P, Báldi A, Ekroos J, Gallé R, Grass I, Tschardt T. *Biologia Futura: landscape perspectives on farmland biodiversity conservation. Biologia Futura*, 2020, 71(1): 9-18.
- [8] Schüpbach B, Weiß S B, Jeanneret P, Zalai M, Szalai M, Frör O. What determines preferences for semi-natural habitats in agrarian landscapes? A choice-modelling approach across two countries using attributes characterising vegetation. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 206: 103954.
- [9] 罗明, 宇振荣, 应凌霄. 从生态系统健康视角看土地综合整治. *中国土地*, 2020, 2: 4-8.
- [10] Jeanneret P, Lüscher G, Schneider M K, Pointereau P, Arndorfer M, Bailey D, Balázs K, Báldi A, Choisis J P, Dennis P, Diaz M, Eiter S, Elek Z, Fjellstad W, Frank T, Friedel J K, Geijzendorffer I R, Gillingham P, Gomiero T, Jerkovich G, Jongman R H G, Kainz M, Kovács-Hostyánszki A, Moreno G, Nascimbene J, Oschatz M L, Paoletti M G, Sarthou J P, Siebrecht N, Sommaggio D, Wolfrum S, Herzog F. An increase in food production in Europe could dramatically affect farmland biodiversity. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 1-8.
- [11] IPBES. IPBES global assessment summary for policymakers. [2019-05-07]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>.
- [12] 侯焱臻, 赵文武, 刘焱序. 自然衰退“史无前例”, 物种灭绝率“加速”——IPBES 全球评估报告简述. *生态学报*, 2019, 39(18): 6943-6949.
- [13] Rotchés-Ribalta R, Ruas S, Ahmed K D, Gormally M, Moran J, Stout J, White B, Ó hUallacháin D. Assessment of semi-natural habitats and landscape features on Irish farmland: New insights to inform EU Common Agricultural Policy implementation. *Ambio*, 2021, 50(2): 346-359.
- [14] Bengtsson J, Bullock J M, Egho B, Everson C, Everson T, O’Connor T, O’Farrell P J, Smith H G, Lindborg R. Grasslands-more important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 2019, 10(2): e02582.
- [15] Gonthier D J, Ennis K K, Farinas S, Hsieh H Y, Iverson A L, Batúry P, Rudolphi J, Tschardt T, Cardinale B J, Perfecto I. Biodiversity conservation in agriculture requires a multi-scale approach. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 281(1791): 20141358.
- [16] Herzog I, Raatikainen K J, Wehn S, Rüşa S, Helm A, Cousins S A O, Rašomavičius V. Semi-natural habitats in boreal Europe: a rise of a social-ecological research agenda. *Ecology and Society*, 2021, 26(2).
- [17] Sobotta C. The European Union legal boundaries for semi-natural habitats management in Natura 2000 sites. *Journal for Nature Conservation*, 2018, 43: 261-267.
- [18] 汤西子, 邢忠. 融合城市边缘区半自然生境保护的环城绿带建设研究. *风景园林*, 2021, 28(2): 90-95.
- [19] 干靛. 人与自然叠合视角下城市多重生境分类初探. *中国城市林业*, 2018, 16(03): 1-5.
- [20] 刘晖, 许博文, 陈宇. 城市生境及其植物群落设计——西北半干旱区生境营造研究. *风景园林*, 2020, 27(4): 36-41.
- [21] Wang M N, Axmacher J C, Yu Z R, Zhang X Z, Duan M C, Wu P L, Zou Y, Liu Y H. Perennial crops can complement semi-natural habitats in enhancing ground beetle (Coleoptera: Carabidae) diversity in agricultural landscapes. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107701.
- [22] Shi X Y, Xiao H J, Luo S D, Hodgson J A, Bianchi F J, He H M, Werf W V, Zou Y. Can landscape level semi-natural habitat compensate for pollinator biodiversity loss due to farmland consolidation? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107519.
- [23] Wang M N, Yu Z R, Liu Y H, Wu P L, Axmacher J C. Taxon- and functional group-specific responses of ground beetles and spiders to landscape complexity and management intensity in apple orchards of the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 323: 107700.
- [24] 陈曦, 张旭珠, 金池, 李安, 高萌萌, 卢彤, 张晓华, 李良涛. 太行山区不同农业景观生境的蜘蛛群落结构特征及其影响因子. *中国生态农业学报*, 2020, 28(10): 1488-1498.
- [25] European Investment band. Environmental and social standards (PDF). [2018- 10-08]. https://www.eib.org/attachments/strategies/environmental_and_social_practices_handbook_en.pdf
- [26] 苏伟忠, 马丽雅, 陈爽, 杨桂山. 城市生态空间冲突分析与系统优化方法. *自然资源学报*, 2020, 35(03): 601-613.
- [27] Pelorosso R, Gobattoni F, Geri F, Monaco R, Leone A. Evaluation of Ecosystem Services related to Bio-Energy Landscape Connectivity (BELC) for land use decision making across different planning scales. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 114-129.
- [28] Hooftman D A P, Bullock J M. Mapping to inform conservation: a case study of changes in semi-natural habitats and their connectivity over 70

- years. *Biological Conservation*, 2012, 145(1): 30-38.
- [29] Rusch A, Chaplin-Kramer R, Gardiner M M, Hawro V, Holland J, Landis D, Thies C, Tschardt T, Weisser W W, Winqvist C, Woltz M, Bommarco R. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 198-204.
- [30] Williams B A, Grantham H S, Watson J E M, Alvarez S J, Simmonds J S, Rogéiz C A, Silva M D, Forero-Medina G, Etter A, Nogales J, Walschburger T, Hyman G, Beyer H L. Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(1): 014001.
- [31] Garibaldi L A, Steffan-Dewenter I, Kremen C, Morales J M, Bommarco R, Cunningham S A, Carvalheiro L G, Chacoff N P, Dudenhöffer J H, Greenleaf S S, Holzschuh A, Isaacs R, Krewenka K, Mandelik Y, Mayfield M M, Morandin L A, Potts S G, Ricketts T H, Szentgyörgyi H, Viana B F, Westphal C, Winfree R, Klein A M. Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecology Letters*, 2011, 14(10): 1062-1072.
- [32] Tarjuelo R, Benítez-López A, Casas F, Martín C A, García J T, Viñuela J, Mougeot F. Living in seasonally dynamic farmland: the role of natural and semi-natural habitats in the movements and habitat selection of a declining bird. *Biological Conservation*, 2020, 251: 108794.
- [33] Peciña M V, Ward R D, Bunce R G H, Sepp K, Kuusemets V, Luuk O. Country-scale mapping of ecosystem services provided by semi-natural grasslands. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 212-225.
- [34] 刘云慧, 宇振荣, 罗明. 国土整治生态修复中的农业景观生物多样性保护策略. *地学前缘*, 2021, 28(4): 48-54.
- [35] Uchida K, Koyama A, Ozeki M, Iwasaki T, Nakahama N, Suka T. Does the local conservation practice of cultural ecosystem services maintain plant diversity in semi-natural grasslands in Kirigamine Plateau, Japan? *Biological Conservation*, 2020, 250: 108737.
- [36] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 王静, 刘爱霞. 生态用地分类初步研究. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 1-7.
- [37] 董雅文, 周雯, 周岚, 周慧. 城市化地区生态防护研究——以江苏省南京市为例. *城市研究*, 1999, (2): 6-8+10.
- [38] 王静, 王雯, 祁元, 何挺, 吴瑞娟, 陈媛媛. 中国生态用地分类体系及其 1996—2012 年时空分布. *地理研究*, 2017, 36(03): 453-470.
- [39] 俞孔坚, 乔青, 李迪华, 袁弘, 王思思. 基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例. *应用生态学报*, 2009, 20(08): 1932-1939.
- [40] 喻锋, 李晓波, 张丽君, 徐卫华, 符蓉, 王宏. 中国生态用地研究: 内涵、分类与时空格局. *生态学报*, 2015, 35(14): 4931-4943.
- [41] 刘晶, 金晓斌, 徐伟义, 杨绪红, 曹帅, 徐翠兰, 隋雪燕, 刘敏, 周寅康. 江苏省耕地细碎化评价与土地整治分区研究. *地理科学*, 2019, 39(5): 817-826.
- [42] 孙瑞, 金晓斌, 项晓敏, 曹帅, 徐翠兰, 隋雪艳, 刘敏, 周寅康. 土地整治对耕地细碎化影响评价指标适用性分析. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 279-287.
- [43] 戴俊杰, 董婧雯, 杨晟, 孙毅中. 基于空间突变特征的城市边缘区提取方法. *地球信息科学学报*, 2021, 23(08): 1401-1421.
- [44] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 曲衍波. 大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例. *生态学报*, 2013, 33(17): 5363-5374.
- [45] 江娟丽, 杨庆媛, 张忠训, 苏康传. 农业景观研究进展与展望. *经济地理*, 2021, 41(6): 223-231.
- [46] 罗明, 翟紫含, 陈妍. 生态文化的回归——我国生态文明建设中 NBS 理念的应用. *中国土地*, 2021(06): 9-12.