

# 耦合生态服务供需的县域农业空间 生态保护修复分区 ——以宜兴市为例

王林艳, 夏 敏, 邹 伟

(南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

**摘要:** 开展县域尺度农业空间生态保护修复分区研究, 差异化推进区域生态保护与修复, 对协调人地耦合系统、促进自然—社会的可持续发展具有现实意义。以宜兴市农业空间为研究对象, 耦合生态系统服务的供给格局与需求格局, 构建供需综合安全格局进行生态保护修复分区。结果发现: (1) 宜兴市农业空间各项生态系统服务需求格局在自然因素和人类活动共同作用下, 空间差异较大。土壤保持服务需求呈现东北高、西南低的总体格局; 食物供给服务需求整体较高, 空间上与人口分布类似; 碳固存服务需求格局表现为“北高南低”; 水源涵养服务需求在空间分布上较为均匀; 生境质量保持服务需求在空间上呈八块状分区。(2) 宜兴市农业空间土壤保持、碳固存、水源涵养以及生境质量保持生态系统服务的供给格局均表现出“南强北弱”的特征, 而食物供给服务的高值区位于研究区东北方向及西部腰线区域。(3) 依据供需综合安全水平, 宜兴市农业空间可分为农业生态重塑区、农业生态优化区、农业生态护养区以及农业生态保育区。结合各分区土地利用现状, 分别提出全局治理与重点区域生态重塑、整体优化与关键区域生态修复、综合生态养护与局部生态整治、严格生态保护与控制开发强度等差异化生态保护修复措施。研究为宜兴市及其他类似地区生态文明建设与农业空间规划提供参考。

**关键词:** 农业空间; 生态系统服务; 供需评估; 供需安全格局; 生态保护修复

生态系统服务是人类赖以生存的资源, 关乎人类福祉。农业空间作为介于生态空间与城镇空间之间的自然—人工空间, 既是最大的生态空间, 又是经济价值、生态价值复合生产的物质能量生产空间 (<https://www.zgxcfx.com/sannonglunjian/110459.html>), 承载着农业生产、农村居民生活以及复杂农业生态系统服务供给的使命, 在自然生态与人类社会协调发展的过程中承担着难以替代的、关键的作用。然而, 在“山水林田湖草沙”生命共同体理念持续深化的背景下, 农业空间的生态系统服务功能仍然没有得到有效发挥<sup>[1]</sup>, 农业空间面临着土地退化、农村环境恶化、生态系统服务供给能力下降等负外部性问题<sup>[2,3]</sup>, 亟需对其采取有效的生态保护修复措施, 维护和提升农业空间生态系统功能。2020年, 《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》印发, 明确应“对山水林田湖草等各类自然生态要素进行保护和修复”, “提高社会—经济—自然复合生态系统弹性”; 2021年《“十四五”推进农业农村现代化规划》印发, 强调要“加强农村生态文

收稿日期: 2023-09-18; 修订日期: 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071221); 江苏省自然资源科技计划项目(2022033)

作者简介: 王林艳(1997-), 女, 浙江嘉兴人, 博士研究生, 主要从事土地规划与社会—生态系统研究。

E-mail: 2022209032@stu.njau.edu.cn

通讯作者: 邹伟(1972-), 男, 四川渠县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地经济与乡村土地利用研究。

E-mail: zw@njau.edu.cn

明建设”;2023年中央“一号文件”也进一步提出要“发展绿色农业,加强生态环保力度”。农业空间生态系统服务在外界环境影响下呈现出空间异质性,科学合理分析生态系统服务供需空间分异和集聚特征,并据此划分农业生态管理区域,制定针对性的生态保护修复措施,对农业空间生态系统服务进行有效保护和精细化管理有着重要的意义<sup>[4]</sup>。农业空间生态保护修复分区综合考虑区域生态要素的关联性、空间尺度的生态异质性以及保护与修复概念的协同性,是对生态保护修复工作在哪里开展以及为什么开展的回答,也是自然资源开发和生态环境保护空间差异化管控的重要依据<sup>[5]</sup>。因此,厘清生态文明建设背景下农业空间生态系统服务供需现状,据此开展农业空间生态保护修复分区,对协调人地耦合系统、促进自然—社会生态系统的稳定持续发展具有重要意义。

近年来,围绕农业空间开发与保护的研究日益增多,包括对农业空间流动要素网络结构探究,据此制定土地利用规划以优化发展布局<sup>[6]</sup>、识别农业空间主要面源污染并开展针对性防治<sup>[7]</sup>、围绕农业空间内特定植被群落进行多样性恢复和生物栖息地重建<sup>[8]</sup>以及建立农业空间范围内的耕地利用与保护分区,差异化开展分区管控等<sup>[9]</sup>。其中,对农业空间的分区管控多从耕地“三位一体”保护<sup>[9]</sup>、粮食安全守护<sup>[10]</sup>、人居环境改善<sup>[11]</sup>、农业农村低碳发展<sup>[12]</sup>以及三生功能实现<sup>[13]</sup>等视角展开,农业空间的生态功能逐渐引起重视,但现有文献中基于生态保护修复视角的农业空间分区研究尚不多见。同时,在生态保护修复分区方面,众多学者基于自己的专业领域和独特视角,针对区域土地利用类型<sup>[14]</sup>、生态评价指标体系<sup>[15]</sup>、景观安全格局<sup>[16]</sup>、主体功能区划分<sup>[17]</sup>以及生态系统服务供需<sup>[18]</sup>开展了广泛的研究。随着InVEST模型、Circuitscape电路理论模型等新方法的引入<sup>[19]</sup>,生态保护修复分区逐渐转向“生态安全格局构建”<sup>[20]</sup>、“生态重要性—生态敏感性”二维关联矩阵<sup>[21]</sup>等视角,为综合生态功能提升和关键生态问题修复提供了理论基础与科学支撑。也有一些学者通过区域生态系统服务供需平衡分析,构建区域国土生态保护修复的分区框架、实施路径以及指标体系展开研究<sup>[4,22,23]</sup>。然而,已有研究多是从自然或经济角度展开,忽略了利益相关者在区域生态保护修复过程中的作用,导致相关生态保护修复举措的推行难以获得利益相关者的支持,现实操作性不强。同时,当前生态保护修复分区研究主要集中于大尺度的典型流域和高敏感区域,针对县域尺度的传统农业空间生态保护修复分区研究尚有不足。县级是贯彻国家、省级农业保护政策的基本单元,也是联结农村的重要节点,承担着“承上启下”的作用。相较于跨省市的大尺度研究区域,针对县域开展的生态保护修复分区研究能够做到与地方国土空间规划进行有效衔接,具有突出的针对性与操作性。因此,亟需开展基于利益相关者调研的县域尺度农业空间生态保护修复分区研究,厘清区域农业空间主要生态系统服务及其供需状况,据此进行生态保护修复分区并针对性提出差异化生态保护修复策略,促进农业空间多功能水平提升与整体生态保护修复。

江苏省宜兴市素有“三山两水五分田”之称,拥有江苏省乃至长三角最优越的山水资源、生态禀赋,且农业资源丰富,是苏南地区最大的农业板块<sup>①</sup>,农业生产用地和农村生活用地集中。然而,宜兴市地处苏南经济高度发达地区,旅游地产、工业建设、人口集聚等活动不断干扰环境及自然空间、挤占生态空间,生态系统整体稳定性遭到破坏。

① <http://www.yixing.gov.cn/doc/2023/04/13/1131098.shtml>.

如何在经济快速发展的过程中实现生态系统服务整体保护和关键修复,使其充分发挥农业空间的经济—生态服务功能,推动经济、生态协调发展是宜兴市生态文明建设面临的现实问题。鉴于此,本文从生态系统服务供需评估的视角出发,结合利益相关者对宜兴市农业生态系统服务的直观感受和客观模型模拟,全面评估宜兴市农业空间生态系统服务的供给格局与需求格局,在此基础上耦合生态系统服务供需,基于景观安全格局理论构建宜兴市生态系统服务供需综合安全格局并分区。根据各分区的土地利用特点与生态系统服务供需情况提出针对性的生态保护修复对策与建议,为宜兴市及其他同类地区因地制宜开展差异化国土空间生态保护修复工作提供参考。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

宜兴市为江苏省辖县,由无锡市代管,位于 $31^{\circ}07'N\sim 31^{\circ}37'N$ 、 $119^{\circ}31'E\sim 120^{\circ}03'E$ 的太湖西部(图1)。作为沪宁杭三角中心,其区位优势显著,是华东地区典型的经济发达县域。宜兴市属亚热带季风气候,降雨量充沛,年平均气温 $16.1^{\circ}C$ ,全年温暖湿润,从而拥有草地、森林、灌丛、湿地、农田与城镇等多种生态系统类型<sup>[24]</sup>。根据第三次全国国土调查成果,宜兴市土地总面积 $19.92$ 万 $hm^2$ ,地势南高北低,有“三山、二水、五分田”的美称,北部与西部分别为太湖平原区和低洼圩区,西北部地势平坦,是宜兴市主要的粮油产地,东部为太湖滨区,适合种植蔬菜,南部为浙江天目山余脉,多为丘陵山区。

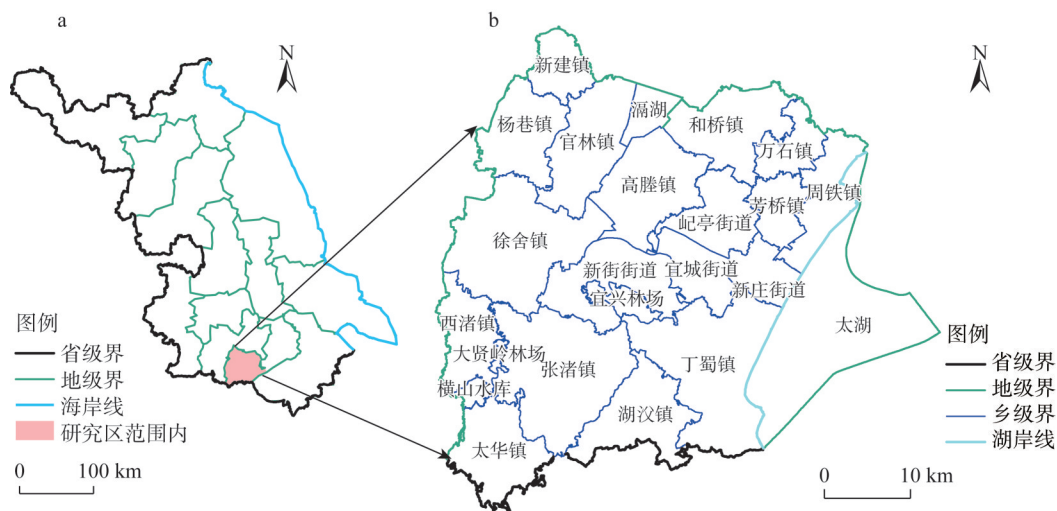


图1 宜兴市地理区位

Fig. 1 Administrative divisions of Yixing

### 1.2 数据来源与预处理

土地利用数据源于第三次全国土地调查;数字高程模型(DEM)、植被指数(NDVI)数据源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),DEM数据进一步用于提取坡度、坡向等数据;降水、蒸散发数据源于国家气象数据共享平台(<http://data.cma.cn>)



及江苏省气象局,以附近8个气象站点监测年平均数值通过克里金插值计算得到;土壤数据源于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集;人口、交通及经济数据源于宜兴市交通运输局、江苏省统计年鉴(2021年)、无锡市统计年鉴(2021年)。各类生态系统服务及其需求影响因素权重数据来源于问卷调查。为保证数据的统一性与精准性,研究所用数据在ArcGIS 10.3软件支持下统一为30 m空间分辨率。

根据“三类空间”定义,农业空间指以农业生产和农村居民生活为主体功能,承担农产品生产和农村生活功能,保障国家粮食安全的核心区域。在前人研究成果的基础上<sup>[7,25]</sup>,本文综合考虑农业空间的生产—生活—生态复合功能,将农业空间界定为“以农业及涉农产业生产、农村生活以及稳定农业生态为主要功能的空间范围”,并以宜兴市城镇开发边界和生态保护红线范围之外的区域作为宜兴市农业空间展开具体研究,其土地利用类型包括耕地、林地、园地、草地、居住用地、农业设施建设用地以及陆地水域7类(图2),总面积11.26万hm<sup>2</sup>。

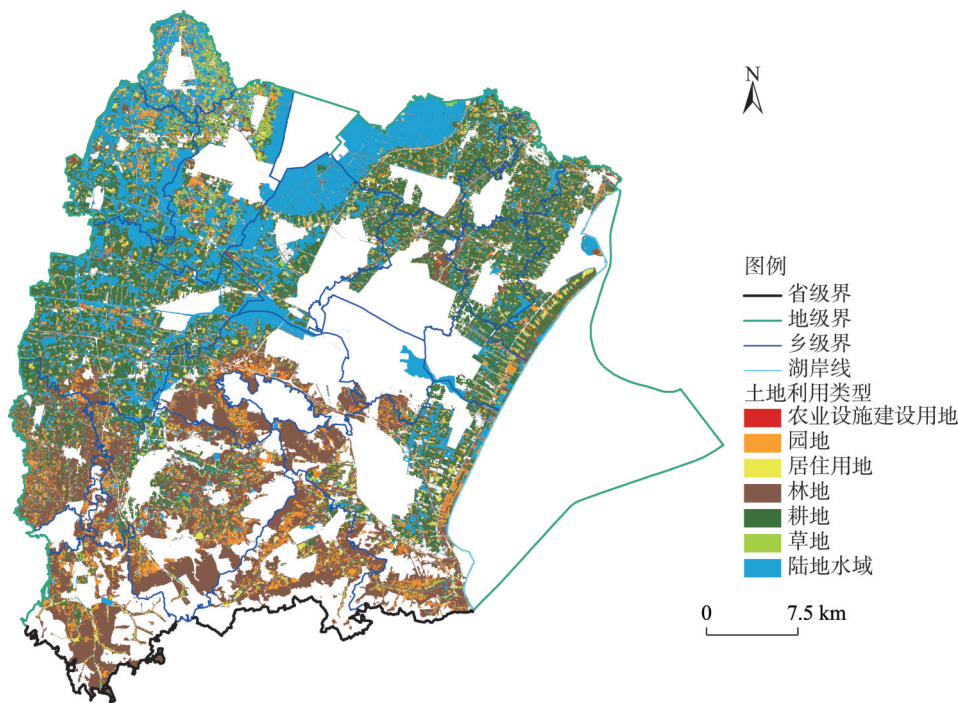


图2 宜兴市农业空间范围

Fig. 2 Agricultural spatial scope in Yixing

### 1.3 研究思路与方法

#### 1.3.1 研究思路

研究总体思路可以分为生态系统服务供需格局识别、生态系统服务供需耦合分析与生态保护修复分区三部分(图3)。(1)生态系统服务供需格局识别。首先,通过利益相关者调研,识别研究区主要生态系统服务类型与影响各项生态系统服务需求的主要因素,并进行重要程度分析;其次,依据需求影响因素调查结果构建各项生态系统服务的需求格局,借助InVEST模型等评估方法构建各项生态系统服务的供给格局。(2)生态系统服

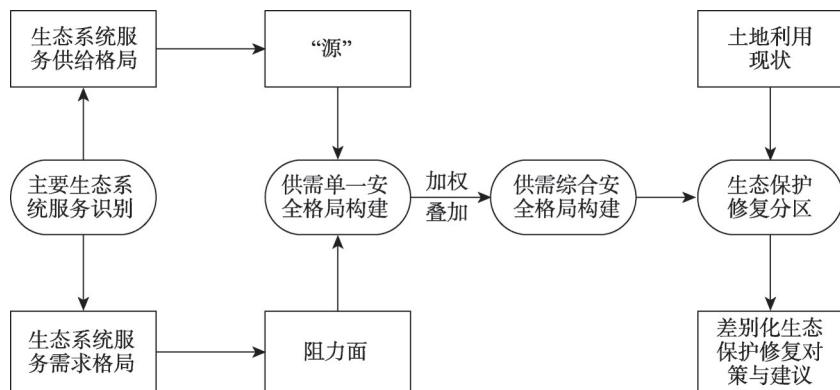


图3 研究思路

Fig. 3 Research framework

务供需耦合分析。为克服供需计算结果量纲不一致、难以对比分析的问题,研究借助景观安全格局理论。首先,综合各项生态系统服务高供给区域和生态红线边界确定供给源地;其次,结合自然、经济、社会等多要素构建与各项生态系统服务对应的需求格局作为阻力面;最后,应用最小累计阻力模型建立各生态系统服务供需单一安全格局,并基于调研确定的不同生态系统服务的相对重要性程度,加权叠加各供需单一安全格局得到供需综合安全格局。(3)生态保护修复分区。结合研究区土地利用现状与供需综合安全格局进行生态保护修复分区,根据各分区内土地利用特点与生态基础,分别提出针对性的生态保护修复对策与建议。

### 1.3.2 问卷设计与调查

采用问卷调查以及村民访谈的形式。考虑到城市发展、自然风景名胜区以及重点水域保护会对附近农业空间生态系统存在影响,因此分别选择具有代表性的宜兴市城市近郊、农村地区、自然风景名胜区以及重点水域附近共18个点位,采用随机抽样法进行调研,识别农业空间主要生态系统服务类型及其权重,判断宜兴市农业空间中居民对于各项生态系统服务的偏好与影响各类生态系统服务需求的具体因素,结合研究区实际情况和专家意见,确定不同生态系统服务的需求影响因素权重。由于生态系统服务不仅能满足当地居民的需求,还能满足附近及外来人员的部分生态需求,因此调研兼顾了对游客需求的考察。

问卷共分为三个部分进行设计:第一部分是受访者的基本信息收集。主要包括:受访人性别、年龄、教育水平、居住地空间位置、是否为原住民以及居住时间等;第二部分为宜兴市农业空间主要生态系统服务识别,旨在从人们的认知角度了解宜兴市农业空间各生态系统服务功能的重要性以及实际供给情况;第三部分为生态系统服务需求及其影响因素调研,从需求的角度了解被访者视角宜兴市农业空间各类生态系统服务的被需求程度以及需求的影响因素。

调查共计回收386份有效居民调查问卷,16份环境专家和管理者有效问卷,识别并修正获得宜兴市农业空间主要的五类生态系统服务:土壤保持服务、食物供给服务、碳固存服务、水源涵养服务以及生境质量保持服务。

1.3.3 宜兴市农业空间需求格局的识别方法

综合考虑宜兴市城市近郊、农村地区、自然风景名胜區以及重点水域附近居民对农业空间各项主要生态系统服务的需求影响因素调查结果来构建宜兴市农业空间各项生态系统服务的需求格局。

分别对坡度、土地利用类型等影响因素分级/分类赋值，以表征各影响因素不同级别/类型对各项生态系统服务需求的影响能力<sup>[24]</sup>。其中，对土地利用类型分类主要依据谢高地等<sup>[26]</sup>制定的生态系统服务价值当量中对土壤形成、水源涵养等服务的价值。在识别人们对各项生态系统服务需求的影响因素及其权重的基础上，利用 ArcGIS 10.3 栅格叠加功能对各项生态系统服务影响因素的影响能力值进行加权求和，构建宜兴市农业空间各项生态系统服务的实际需求格局。

1.3.4 宜兴市农业空间生态系统服务供给格局的识别方法

考虑到宜兴市农业空间数据的可获取性以及适用性，选取各项生态系统服务供给衡量指标及评估方法如表 1 所示。对土壤保持服务采用土壤保持量衡量其对泥沙沉积量的拦截能力；对食物供给服务采用各类食物的热量来反映其提供维持人类生存所需能量的能力；对碳固存服务采用生态系统的碳储存能力表征其大气碳氧平衡的调节作用；对水源涵养服务采用 InVEST 模型的产水量模块以及水源涵养计算公式衡量其维持区域各类用

表 1 生态系统服务供给评估指标及方法  
Table 1 Evaluation indicators and methods for ecosystem service supply

生态系统服务类型	供给量化指标	评估方法	量化模型简介
土壤保持	土壤保持量	InVEST 模型土壤保持模块	根据吴娜等 <sup>[27]</sup> 文中所列公式，InVEST 模型土壤保持模块克服了通用土壤流失方程的缺陷，在通用土壤流失方程的基础上，用上坡来沙量和下坡沉积物滞留率之间的乘积来计算其所表示的地块泥沙持留量，用地块潜在侵蚀量与其实际侵蚀量之间的差额来计算该地块由于受到植被覆盖或水土保持等措施而增加或减少的土壤侵蚀量 <sup>[28]</sup> ，二者的差即为土壤保持量
食物供给	热量值	食物供应热量法	根据张红娟 <sup>[29]</sup> 文中所列公式，该模型利用宜兴市农业空间生产的各类食物的热量来反映区域食物供给能力，热量越高代表食物供给服务能力越强。根据植被覆盖程度将各类食物供给的能量按对应的土地覆盖类型进行平均分配。具体来说，将主要粮食的能量赋给耕地，蔬菜的能量赋给园地和耕地，水果的能量赋给林地和园地，水产品的能量赋给陆地水域等。宜兴市畜牧业主要以家庭饲养为主，整体表现为人工饲养和半天然饲养结合，因此将畜牧业的能量赋给草地、林地以及居住用地
碳固存	碳储存量	InVEST 模型碳固存模块	根据王晓琪等 <sup>[30]</sup> 文中所列公式，该模型基于四种类型的碳库（地上生物碳、地下生物碳、死亡有机碳和土壤碳库）和土地利用覆被数据来估算不同生态系统对碳的吸收能力，并计算宜兴市农业空间碳储存总量
水源涵养	水源涵养量	InVEST 模型产水量模块与水源涵养计算公式	采取 “InVEST 模型产水量模块 <sup>[31]</sup> +水源涵养计算公式 <sup>[32]</sup> ” 的方式测算宜兴市农业空间水源涵养服务供给能力，即在产水量计算的基础上，利用地形指数、土壤饱和导水率以及流速系数对产水量进行修正获得研究区实际水源涵养服务供给量
生境质量	生境质量	InVEST 模型生境质量模块	根据尚俊等 <sup>[33]</sup> 文中所列公式，该模型利用 “不同生境威胁源敏感性不同” 的特性，建立各种土地利用类型与威胁源之间的联系，通过景观类型敏感性 <sup>及</sup> 外界威胁因子威胁强度计算生境质量指数并生成生境质量地图

水需求及生态系统本身的水循环能力；对生境质量服务采用生境质量指数进行评估。其中，土壤保持服务、碳固存服务、水源涵养服务和生境质量服务均需利用InVEST模型的相应各模块进行量化评估。

### 1.3.5 供需安全格局构建与生态保护修复分区方法

#### (1) 源地的选取

源地是指能够持续提供高质量生态系统服务功能或发挥重要辐射作用的斑块，通过自然断点法将各项生态系统服务供给能力分别划分为五个等级，选择供给能力最高的区域，结合生态红线划定区域，利用栅格叠加计算共同确定各项生态系统服务供给源地。在初步识别的基础上，剔除了面积较小的细碎源地斑块，将分布集中、面积较大的源地斑块整合，以保证生态系统的完整性和连续性。

#### (2) 建立阻力面

将各项生态系统服务需求的不同影响因素在空间上的影响能力分布图作为各个单子阻力面，将宜兴市农业空间各项生态系统服务的需求格局作为对应的综合生态阻力面，以反映生态阻力的空间差异性。

#### (3) 最小累计阻力表面的构建

采用最小累计阻力模型(MCR)建立生态系统服务流动扩散的最小累计阻力面。MCR模型通过计算物种从源地到目的地过程中所需代价来模拟物种的移动路径，主要考虑三个方面的因素，即源、距离和景观基面特征。基本公式如下：

$$MCR = f \min_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (1)$$

这一公式根据Knaape等<sup>[34]</sup>的模型和地理信息系统中常用的费用距离修改而来。其中 $f$ 是一个未知的正函数； $D_{ij}$ 是物种从源 $j$ 到空间某一点所穿越的某景观的基面 $i$ 的空间距离； $R_i$ 是景观 $i$ 对宜兴市农业空间生态系统服务扩散的阻力； $D_{ij} \times R_i$ 之积累值可以被认为从源到空间某一点的某一路径的相对易达性衡量指标。

#### (4) 供需安全格局构建

对不同生态系统服务的最小累计阻力表面进行空间分析得到格点频率序列图，以阻力阈值为关键点，将变化序列发生较为明显转折的地方作为拐点进行重分类，共分为由高到低四个等级的安全水平，即宜兴市农业空间各项生态系统服务的供需单一安全格局。利用调研数据确定不同生态系统服务的相对重要性程度，加权叠加归一化处理之后的供需单一安全格局，得到宜兴市农业空间供需综合安全格局。

#### (5) 农业空间生态保护修复分区

厘清传统农业空间和嵌套其中的自然—人工复合空间的相互关系，分析农业空间生态保护修复逻辑，依据不同安全水平下的生态系统服务供需综合安全格局，确定生态保护修复分区，结合各分区土地利用现状特征提出针对性的差异化生态保护修复对策与建议。

## 2 结果分析

### 2.1 问卷调查统计分析

#### 2.1.1 主要生态系统服务的类型与权重分析

基于对宜兴市城市近郊、农村地区、自然风景名胜区以及重点水域附近共18个点位



居民调查和对环境专家、管理者的调研结果分析，最终识别宜兴市农业空间主要的五类生态系统服务为土壤保持服务、食物供给服务、碳固存服务、水源涵养服务以及生境质量保持服务，权重分别为0.2666、0.3518、0.0774、0.2021以及0.1021。

2.1.2 主要生态系统服务需求影响因素分析

基于问卷调查结果，识别出影响宜兴市农业空间五项主要生态系统服务需求水平的关键因素（表2）。

表2 宜兴市农业空间主要生态系统服务需求影响因素  
Table 2 Influencing factors of main ecosystem service demand of agricultural space in Yixing

生态系统服务类型	影响因素及权重
土壤保持服务	人们对土壤保持服务的需求主要源自于土壤的潜在侵蚀 <sup>[35]</sup> ，土壤潜在侵蚀量越大，土壤流失加剧，人们可利用土壤减少，对土壤保持的需求也随之增加。识别出影响土壤潜在侵蚀的主要因素为坡度、植被覆盖度、土地利用类型以及人口密度，权重分别为0.2128、0.4324、0.1903以及0.1645
食物供给服务	人们对生态系统服务中食物供给的需求量主要受到与人类活动密切相关的社会因素影响，识别出影响食物供给服务需求的主要因素为地均GDP、土地利用类型以及人口密度，权重分别为0.3325、0.1396以及0.5278
碳固存服务	识别出人口密度、距交通干线距离、植被覆盖度以及土地利用类型是衡量碳固存服务需求的重要指标，权重分别为0.2015、0.4254、0.1248以及0.2483
水源涵养服务	对水源涵养服务的需求包括维持良好生态功能的生态需水和人们生产生活的用水需求，识别出影响水源涵养服务需求的因素为坡度、植被覆盖度、土地利用类型以及距交通干线的距离，权重分别为0.1438、0.2701、0.4249以及0.1613
生境质量保持服务	识别出高程、植被覆盖度、人口密度以及土地利用类型是衡量生境质量保持服务需求的关键因素，权重分别为0.1052、0.2398、0.4496以及0.2054

2.2 生态系统服务供需格局分析

2.2.1 生态系统服务需求格局分析

图4为宜兴市农业空间各项生态系统服务的需求格局：土壤保持服务需求格局呈现东北高、西南低的总体格局，且高需求区域面积大于低需求区域面积，与宜兴市农业空间土地利用广泛、北部大面积开垦耕地的现实情况一致。食物供给服务的需求整体较高，且需求格局表现出与人口分布类似的空间特征，即食物供给服务需求的高值区位于人口密布的研究区东北角和东南角。碳固存服务需求格局在空间上南北差异突出，北部陆地水域及居住用地分布广泛，碳固存能力较差，需求旺盛；南部分布大量林地、园地，有天然竹林及樟树、枫香等乔木，固碳能力突出，相对需求较低。水源涵养服务需求格局在空间上分布较为均匀，这主要是因为宜兴市降水充沛、地形较为平坦且农业空间植被覆盖度较高，整体水源涵养能力较强，仅有少量“耕住一体”的区域由于不透水面对地表径流的阻断作用，使得水源涵养能力相对较弱，需求相对较高。生境质量保持服务需求格局在空间上呈现明显的块状分区，大致可分为八个块状区域，东北角和东南角区域人类活动频繁，生物多样性减弱，生境质量较差，需求旺盛；西北角区域是草地集中分布区，生境质量一般，需求较大；腰部三块区域生态状况较为平稳，对生境质量服务的需求位于中等水平；西南角和南部区域林地密布，是动植物生存繁殖的最佳区域，具有良好的生物多样性以及生境质量，需求相对较低。

2.2.2 生态系统服务供给格局分析

图5为宜兴市农业空间各项生态系统服务的供给格局：土壤保持服务受降水条件、



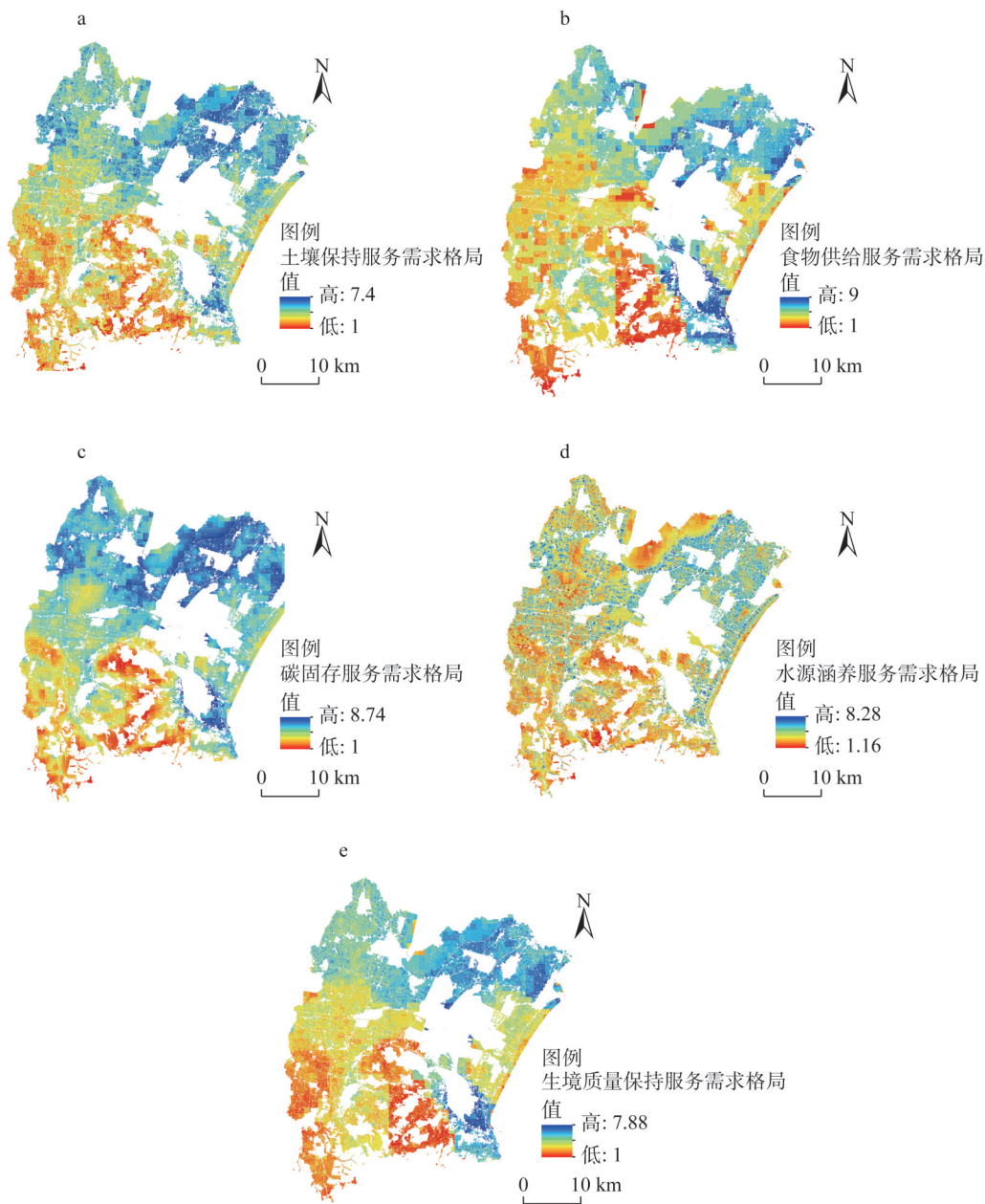


图4 生态系统服务需求格局  
Fig. 4 The demand pattern for ecosystem services

土壤属性、土地覆被类型等因素综合影响，使得供给格局在空间上分布不均，整体呈现南部高、北部以及东西两侧低的态势。食物供给服务的低值区集中在研究区南部，该区域土地利用方式以林地为主，而林地为人类提供的肉类以及奶类等食物占食物总产量的比例较低；食物供给服务的高值区集中在研究区东北方向和西部中间区域，此类区域耕地分布广泛，是宜兴市农业空间进行农业生产的重点区域。碳固存服务供给格局在空间上呈现“南强北弱”的特征，这与宜兴市农业空间南部林地的大量分布具有密切关系，

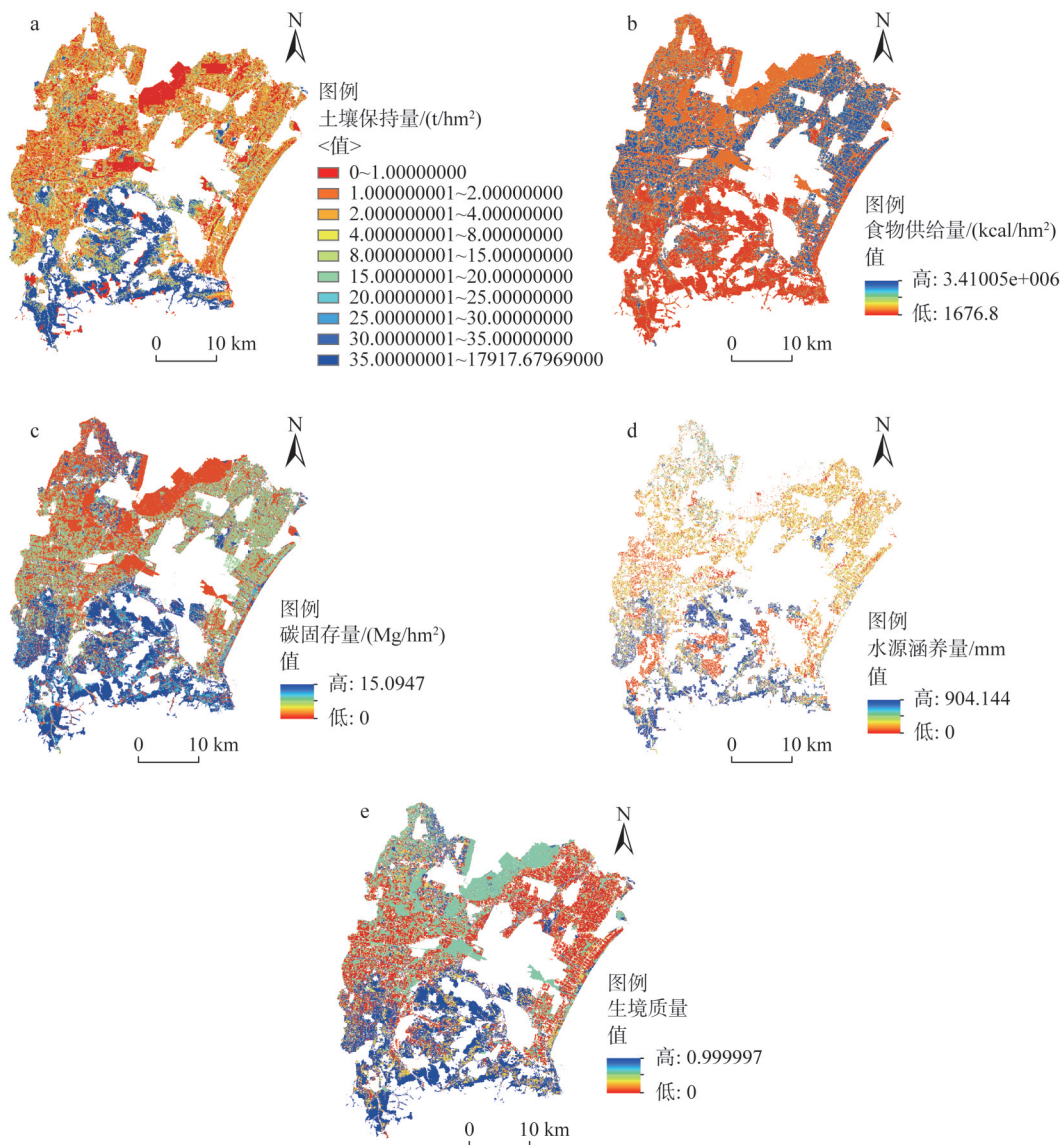


图5 生态系统服务供给格局

Fig. 5 The supply pattern for ecosystem services

林地在固碳能力方面相较于其他土地利用类型具有突出优势。水源涵养服务供给格局在空间上分区明显，高值区集中于研究区南部，与林地的分布呈现较高的空间关联性；低值区集中于研究区西侧；研究区北部与南侧的水源涵养总量位于平均水平。研究区生境质量保持水平介于0~1之间，其供给格局在空间上差异较大，高生境质量保持区域同样集中于林地密布的研究区南部，是研究区生态系统最为稳定的区域；低生境质量保持区域相对面积最大、分布最为广泛，与居住用地和耕地空间分布较为相似，而居住用地和耕地为研究区生境质量最大的威胁因子。

### 2.2.3 供需安全格局分析

对土壤保持、食物供给、碳固存、水源涵养以及生境质量保持五项供需单一安全格局

按照 0.2666、0.3518、0.0774、0.2021 以及 0.1021 的权重进行加权叠加,得到宜兴市农业空间综合供需安全格局(图6),并基于综合供需安全格局统计不同安全水平区域的土地利用类型面积分布(表3)。

宜兴市农业空间供需综合安全格局高安全水平区域面积为 2.45 万  $\text{hm}^2$ , 占研究区总面积的 21.76%。该安全水平的区域主要分布在研究区西南角和东南角,结合生态系统服务需求与供给格局可以发现,此类区域中人们对各项生态系统服务的需求整体较低,而在供给方面,除食物供给服务外,土壤保持服务、碳固存服务、水源涵养服务以及生境质量保持服务的供给水平均处于较高水平,即区域整体处于生态系统服务“低需求—高供给”的状态,区域生境质量优渥,适合各类动植物的生存发展。

供需综合安全格局中等安全水平区域占据了宜兴市农业空间总面积的 42.18%, 共有 4.75 万  $\text{hm}^2$ , 是供需综合安全格局中面积最大的一类安全水平格局,说明研究区总体景观安全水平较高,生态系统服务供需整体较为平衡。中等安全水平的区域集中分布在研究区中部与南部,空间分布广泛。从生态系统服务需求角度来看,此类安全水平区域内人们对土壤保持、食物供给、水源涵养以及生境质量保持服务的需求处于中等或较低水平,对碳固存服务的需求则处于中等或相对较高水平。而从生态系统服务供给角度来看,不同空间位置的各项生态系统服务供给能力差异较大。研究区中部的中等安全水平区域内,土壤保持服务和生境质量保持服务的供给能力相对较弱,碳固存服务和水源涵养服务供给能力位于中等水平,而食物供给服务的供给能力较高。研究区南部的中等安全水平区域内,土壤保持服务、碳固存服务、水源涵养服务以及生境质量保持服务一致处于较高的供给水平,食物供给能力则较弱。综合来看,区域内各项生态系统服务中,“低需求—低供给”“低需求—一般供给”“低需求—高供给”“一般需求—高供给”等情况均有出现,但该区域整体供需安全仍呈现出中等水平。

较低安全水平和低安全水平区域在空间上位于研究区北部,分别占研究区总面积的 18.12% 和 18.03%, 面积差距较小。此类区域是人类活动较为丰富的地区,高密度的人口使得区域内人们对各项生态系统服务的需求均呈现较高水平,而各项生态系统服务供给能力则在该区域内主要表现为中等或较弱。具体而言,土壤保持服务在研究区北部的整体供给能力较弱;食物供给服务受人口密度和土地利用类型的影响,供给能力在空间上表现为西北部中等、东北部较高;碳固存服务和生境质量保持服务在研究区北部整体表现为供给能力较弱,同时存在部分地块的局部供给能力处于中等水平;水源涵养服

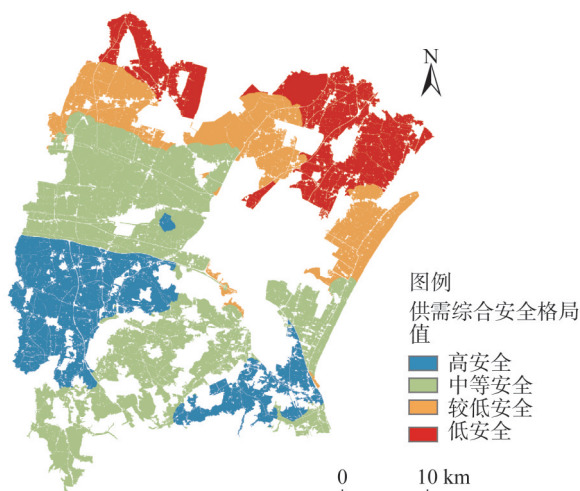


图6 宜兴市农业空间供需综合安全格局

Fig. 6 The comprehensive supply and demand security pattern of agricultural space in Yixing



表3 基于供需安全格局的土地利用类型面积分布

Table 3 Land use type area distribution based on supply and demand security pattern

土地利用类型	高安全		中等安全		较低安全		低安全		合计	
	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/%
耕地	0.61	24.80	1.30	27.34	0.75	36.82	0.88	43.23	3.53	31.36
农业设施建设用地	0.04	1.77	0.08	1.70	0.04	1.91	0.04	1.87	0.20	1.79
草地	0.03	1.09	0.07	1.58	0.05	2.53	0.13	6.17	0.28	2.47
居住用地	0.13	5.47	0.26	5.55	0.12	6.04	0.14	6.74	0.66	5.84
陆地水域	0.37	14.99	1.31	27.59	0.85	41.80	0.65	31.93	3.18	28.20
林地	1.02	41.69	1.36	28.51	0.12	6.03	0.12	6.05	2.62	23.27
园地	0.25	10.19	0.37	7.72	0.10	4.87	0.08	4.01	0.80	7.07
合计	2.45	100.00	4.75	100.00	2.04	100.00	2.03	100.00	11.26	100.00

务在较低安全水平和低安全水平区域内的供给能力均处于中等水平。综合来看，此类区域内各项生态系统服务供需情况主要集中在“高需求—低供给”“高需求—一般供给”及“一般需求—低供给”等类别，区域生态系统服务供需失衡，生态破坏可能性较大，需要引起重视。

2.3 宜兴市农业空间生态保护修复分区

2.3.1 分区结果

基于生态保护修复的自然原则、综合性原则和宜兴市农业空间整体生态保护与重点修复的目标，根据宜兴市生态系统服务供需综合安全格局及其土地利用现状划分农业空间生态保护修复分区。具体如下：

生态系统服务供需低安全格局的区域包括新建镇、万石镇全域，以及芳桥镇、官林镇、和桥镇、周铁镇和屺亭街道的部分区域，区域内土地利用类型以耕地、居住用地以及农业设施建设用地为主，农业生产活动集中、人口密度大，是经济发展的快速区。同时，区域内植被覆盖季节特征明显，植被较少且结构简单，生物量贫乏，亟需对其农业生态环境进行彻底的修复乃至重塑。因此，将此区域划分为农业生态重塑区。

生态系统服务供需较低安全格局的区域包括杨巷镇、官林镇、高塍镇、和桥镇、芳桥镇、周铁镇、屺亭街道、新庄街道以及新街街道，共涉及六个镇和三个街道，尽管区域面积不大，但空间分布广泛。此类区域具有一定条件的生态本底，地形平坦开阔，热量条件充足，耕地和园地景观较多，水源涵养、食物供给等生态系统服务供给能力较强，且区域内还拥有一定草地以及林地等生态用地，具有优化与修复的潜力。然而此类区域的均质性较差，农业开发强度较大，在进行生态优化的时候应兼顾社会属性和自然属性。因此，将此区域划分为农业生态优化区。

生态系统服务供需中等安全格局的区域包括张渚镇、太华镇全域，以及杨巷镇、官林镇、高塍镇、徐舍镇、丁蜀镇、湖汭镇和新街街道的部分区域，具有面积大、分布广的特征，是宜兴市农业空间整体面积占比最大的区域。此类区域内动植物资源丰富，是生物多样性的保存区，应当以完善生境质量为护养目标，持续提升域内物种多样性，同时适度扩大其生产效率，以提升农业空间应有功能的供给。因此，将此区域划分为农业



生态护养区。

生态系统服务供需高安全格局的区域包括西渚镇全域以及徐舍镇、张渚镇、丁蜀镇、湖汶镇和新街街道的部分区域。区域内整体开发利用程度小、受人类活动影响小,土地利用类型也以天然林地、草地、陆地水域为主,农业设施建设用地扩张速度缓慢,为各类兽禽提供了适宜的栖息地与充足的食物。对于此类区域,应当充分利用其生态优势,适度发展生态农业,实现区域生态环境长久高质发展。因此,将此区域划分为农业生态保育区。

### 2.3.2 生态保护修复措施

山水林田湖草生命共同体理念体现了对“社会—生态复合系统”的深刻理解和认知,农业空间生态保护修复则旨在平衡区域生态—生产—生活间的关系,保障区域生态安全和农业生产顺利开展。区别于以往国土空间生态修复分区,农业空间生态保护修复分区更加强调农业空间功能的过渡趋势和服务能力,兼顾农业生产、农村生活与自然生态保护等方面的协同发展。以自然资源部办公厅、财政部办公厅、生态环境部办公厅联合印发的《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》(以下简称“《指南》”)为导向,遵循《指南》提出的“问题导向,因地制宜”原则,在农业空间,因地制宜差异化推进全域国土整治和生态修复<sup>[36]</sup>,提出农业空间分区域生态保护修复逻辑(图7)。

农业空间是自然空间与人工空间复合的复杂空间,既是自然要素的生产者,也是自然要素的消耗者,自然空间的“调节”作用与人工空间的“干扰”作用持续发生。农业空间面临的生态困境绝大部分源于人类在利用资源时忽视其自然发展规律,不断地冲击和改造着自然空间<sup>[37]</sup>,引发资源浪费、水土流失、自然环境恶化等生态环境问题,使生态、经济、社会乃至未来的资源环境可持续发展面临特殊困境。具体而言,当自然空间

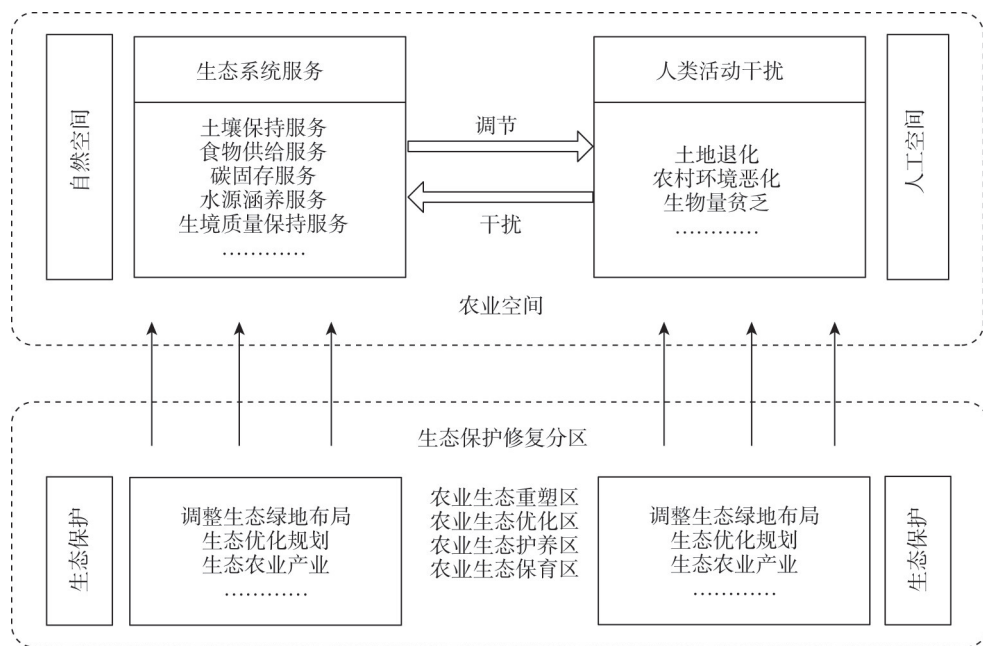


图7 农业空间分区域生态保护修复逻辑

Fig. 7 Logic of ecological conservation and restoration in agricultural spatial zoning

提供的生态系统服务调节能力大于人工空间中人类活动的干扰能力,农业空间能够持续健康发展,同时能够进行适当程度的农业开发与经营,提升农业空间的物质保障功能。而当人工空间中人类活动的干扰超出了自然空间生态系统服务的调节能力,生态系统安全遭到威胁,若不及时采取针对性的保护与修复措施,农业空间整体生态安全水平将持续下降,并最终影响到人类自身。因此,农业空间分区域生态保护修复逻辑应当是以农业空间内部自然—人工空间之间的调节与干扰作用分析为基础,借助景观安全格局理论,构建农业空间生态系统服务供需综合安全格局并依据不同安全水平进行分区。结合各个分区内土地利用现状,从生态保护和生态修复两个方面设计针对性的保护与修复措施。具体来说,对生态系统受损、生态系统服务功能下降的自然空间,依据受损水平与土地利用现状,采取生态绿地布局调整以及生态优化规划等保护措施。同时,辅助采取生态修复措施,通过生态修复工程以及设立预警机制等举措,减少人类活动对自然生态的负面干扰,最终实现农业空间中人与自然和谐共生、生态安全水平与农业经济水平共同提升的发展目标。因此,根据宜兴市农业空间各分区特点,提出以下生态保护修复措施:

对农业生态重塑区重点开展全局治理与重点区域生态重塑。(1) 调整农业空间生态绿地布局。对官林镇、新建镇等人口密集区域通过农村居民点整理、农业产业整合等方式,将原本分散的居民点及农业产业生产的各环节进行合并,为农业空间生态绿地的扩大提供可能。同时,依靠宜兴“三清三治”农村环境卫生专项整治行动,对违建违放等问题收紧处理,为农业生态绿地布局调整创造条件。(2) 完善农业基础设施,提高农业生产效率。农业生态重塑区人口密度大、耕地广泛分布,承担着宜兴市粮食生产的重要责任,应以稳定农业生产效率为前提,以刚刚经历大规模“退草还耕”的新建镇为例,通过“集中连片、规模建设、整体推进”等举措,全方位改善耕地基础设施条件,持续改善和提升耕地质量水平,在有限的土地上生产更多粮食,为区域农业生态治理打下坚实基础。(3) 加强区域生态修复工程动态监测与监督预警。通过专人负责机制,丰富宜兴市以“河长制”为代表的专人生态负责机制内涵,将生态保护的责任落实到个人,并制定明确的奖惩机制,激发区域内人们的生态保护积极性,推动区域总体安全水平稳定提升。

对农业生态优化区重点开展整体优化与关键区域生态修复。(1) 制定生态优化规划,明确区分生态涵养和农业开发两大功能区域。重点摸排涉及农业生态优化区的六个镇和三个街道的区域生态条件与农业开发条件,按照“宜林则林、宜农则农”等原则,在杨巷镇、周铁镇等农业生态优化区重点推进“宜兴市退耕还林水土涵养工程”,腾退不适宜农业经营的耕地,同时也要防止一味追求生态面积、忽视生态效率的退耕还林。(2) 丰富生态廊道,提高生态系统完整性。借鉴新庄街道“创建洁净街道两年行动计划”的成功经验,致力将美丽乡村汇成“生态走廊”,通过生态用地规划布局,贯通区域物质生态交换通道,增强生境间的连通度,为动植物迁移和生态能量流动提供渠道。(3) 开展农地生态整治,提升农业生产生态效益。以徐舍镇为例,围绕耕地数量、质量、生态“三位一体”保护建设目标,通过农地整治,改善土壤环境、提升耕地质量;发展现代农业技术,优化农作物品种,提高农作物单产、提升碳储存能量。(4) 坚持生态预警和生态风险防范机制。联合杨巷镇、官林镇以及高塍镇等相关镇区,共同建立生态预警机制,

防范可能出现的农业生态重大风险,守住来之不易的生态优化成果。

对农业生态护养区重点开展综合生态养护与局部生态整治。(1)调整农业产业结构,发展现代生态农业。依据农业生态护养区内张渚镇、太华镇、杨巷镇等各镇(涉农街道)的不同资源禀赋和产业发展现状,科学布局现代农业产业园区,精心确定特色主导产业。例如在张渚镇大力发展青梅产业的同时,延伸产业链,打造集农业、旅游观光、游客体验为一体的综合化农业生态园。注重农业产业结构调整,减少高能耗、高污染农业产业,发展立体农业等清洁农业以提高生态效益和提升区域生态系统服务供给水平。(2)有机结合生态农业与农业生态旅游。生态农业的建设为农业生态旅游创造机会,鼓励张渚镇、太华镇、湖洑镇等有条件的村庄向农业生态旅游转型,在维持乃至改善生态本底前提下大力发展旅游观光农业、提高农业休闲服务,实现区域经济、生态环境与人文环境同步提升。(3)开展土地整治,激发村庄建设潜力。在维持生境质量基础上,以官林镇为例,合理安排农用地整理、农村居民点整理、城镇低效用地再开发等土地整治活动,充分利用闲置土地。紧抓宜兴市作为全国农业科技现代化先行县、国家城乡融合发展试验区、省级农业高新技术产业示范区、无锡市现代农业科技园等契机,结合高新技术产业,实现更高的土地综合效益。

对农业生态保育区重点开展严格生态保护与控制开发强度。(1)严格限制区域开发强度,控制人口增长。此类区域开发需经过严格规划,控制开发规模,在不影响区域生境质量的大前提下适度开发;优化土地利用结构,依据土地生态特色,开展土地生态整治。以宜南山区为例,区域开发严格遵循《宜南山区保护和开发管控规划》,对于西渚镇、徐舍镇以及张渚镇等宜南山区范围内项目的评审,应当严格把关,确保每一个项目符合政策法规,都是紧缺功能、节约集约利用资源的项目。(2)发展有机农业,推动农业生态化建设。借助宜南山区保护性开发进程,在西渚镇等相关村镇发展富硒产业等低管理强度的有机农业,创建“味稻小镇”等生态农业品牌,同时加强林木培育与优质种子培育,结合林木资源与生态农业品牌发展生态旅游,提高区域游憩功能。(3)加强生态监督预警,提升防灾抗灾水平。加强农业基础设施建设、完善生态风险预警机制,推进农田防护林和生态林业工程,结合宜兴生态环境在线监控系统等高新技术切实提高区域防灾抗灾水平。在徐舍镇与张渚镇等农业生态保育区建立24小时在线监控值守工作制度,实时督办、调度预警信息处置情况,做好突发情况最后一道防线。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

以江苏省宜兴市为例,基于生态系统服务供需综合视角,从利益相关者角度识别宜兴市农业空间主要生态系统服务类型及其需求影响因素,并构建与之对应的需求格局,借助InVEST模型、食物能量法等手段构建各项生态系统服务的供给格局,耦合生态系统服务供给与需求格局,利用MCR模型构建研究区供需综合安全格局,针对区域不同安全水平进行生态保护修复分区,结合各个分区土地利用现状提出针对性优化生态系统服务的空间管控建议。主要研究结论如下:

(1) 利益相关者调研识别出宜兴市农业空间五类主要生态系统服务为:土壤保持服务、食物供给服务、碳固存服务、水源涵养服务以及生境质量保持服务。从需求格局来看,宜兴市土壤保持服务需求呈现东北高、西南低的总体格局;食物供给服务需求整体较高,空间上与人口分布类似;碳固存服务需求格局具有“北高南低”的空间差异;水源涵养服务需求在空间分布上较为均匀;生境质量保持服务需求在空间分布上呈现出明显的八块状分区。从供给格局来看,宜兴市生态系统服务土壤保持、碳固存、水源涵养以及生境质量保持四项生态系统服务供给均呈“南强北弱”趋势,与林地的空间分布具有较高关联性,而食物供给服务高值区位于研究区东北部及西部腰线,是宜兴市农业空间进行农业生产的重点区域。

(2) 宜兴市农业空间生态保护修复逻辑是以农业空间内部自然—人工空间之间的调节与干扰作用分析为基础,对不同供需综合安全水平的农业生态重塑区、农业生态优化区、农业生态护养区以及农业生态保育区采取差异化生态保护修复措施,对农业生态重塑区开展全局治理与重点区域生态重塑,对农业生态优化区开展整体优化与关键区域生态修复,对农业生态护养区开展综合生态养护与局部生态整治,对农业生态保育区开展严格生态保护与控制开发强度。

(3) 耦合生态系统服务供需的农业空间生态保护修复分区,能实现区域生态系统服务状态的整体评价与生态系统安全水平划分,使分区结果更有利于生态保护修复措施的针对性开展,具有可应用性和普适性。同时,对分区生态安全水平的判断,能实现在生态保护与修复的同时,兼顾经济的稳定发展。

### 3.2 讨论

本文以宜兴市农业空间为研究对象,基于利益相关者调研识别五项主要生态系统服务及其需求影响因素,运用多学科方法全面评估研究区生态系统服务供需格局。创新性地应用景观安全格局理论将供给格局和需求格局进行耦合,构建宜兴市农业空间生态系统服务供需综合安全格局,克服了生态系统服务供需研究中比较常见的量纲差异问题。基于供需综合安全格局不同安全水平等级进行生态保护修复分区,针对区域内生态环境与土地利用类型,提出或保护、或修复的具体建议,对宜兴市及其他同质地区的农业空间生态系统服务水平的整体提升具有指导作用。

生态系统具有其自身的独特性和发展变迁的复杂性,基于生态系统服务供需评价的区域空间管控目前并不完善,为了进一步深化农业空间生态系统服务的理论和实践研究,未来研究还需要:(1)因地制宜采用多样化评估方法衡量生态系统服务供给情况。受数据获取以及定量评估方法的限制,本文对于部分生态系统服务的供给格局评估可能存在欠缺。例如食物供给格局的构建忽略了区域土壤本身生产能力的差异,利用InVEST模型模拟土壤保持、碳固存和生境质量保持服务供给过程中缺乏部分研究区实测数据等,导致出现一定误差。(2)丰富利益相关者参与生态系统服务供需评估的形式,提高准确性。本文采用抽样调研的方式纳入利益相关者的意见,因受访对象认知水平的不同,对生态系统服务相关权重赋值可能存在因理解偏差导致的差异性,使得调查数据存在不确定性,以碳固存服务为代表的部分重要生态系统服务容易被忽视。(3)考虑“源”间廊道在生态保护与修复过程中的作用。基于供需综合安全格局与“源”间廊道进一步开展生态保



护与修复分区研究,促进生态系统服务在研究区内的流动。同时,对于生态保护修复分区边界的归属与管控措施需要进一步讨论与完善。

### 参考文献(References):

- [1] MCHALE M R, BECK S M, PICKETT S T A, et al. Democratization of ecosystem services: A radical approach for assessing nature's benefits in the face of urbanization. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2018, 4(5): 115-131.
- [2] 苏毅清, 秦明, 王亚华. 劳动力外流背景下土地流转对农村集体行动能力的影响: 基于社会生态系统(SES)框架的研究. *管理世界*, 2020, 36(7): 185-198. [SU Y C, QIN M, WANG Y H. The impact of farmland transfer on rural collective action under the scenario of labor outmigration: A research based on Social-Ecological System (SES) framework. *Journal of Management World*, 2020, 36(7): 185-198.]
- [3] 李长生, 严金明. 生态退耕背景下黄河流域耕地变化与农业生产和生态环境关系研究. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(10): 1-8. [LI C S, YAN J M. The relationship between cultivated land change and agricultural production, ecological environment in the yellow river basin under the background of grain for green program. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(10): 1-8.]
- [4] 管青春, 郝晋珉, 许月卿, 等. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区. *资源科学*, 2019, 41(7): 1359-1373. [GUAN Q C, HAO J M, XU Y Q, et al. Zoning of agroecological management based on the relationship between supply and demand of ecosystem services. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1359-1373.]
- [5] 彭建, 胡熠娜, 吕慧玲, 等. 基于要素—结构—功能的生态功能分区: 以大理白族自治州为例. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2251-2259. [PENG J, HU Y N, LYU H L, et al. Ecological function zoning based on element-structure-function: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8): 2251-2259.]
- [6] 闫卓冉, 李文博, 王冬艳. “哈长城市群”农业空间网络结构及要素优化配置. *农业工程学报*, 2023, 39(2): 194-202. [YAN Z R, LI W B, WANG D Y. Analysis of agricultural space network and optimized allocation of factors in Harbin-Changchun Urban Agglomeration. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(2): 194-202.]
- [7] 张秀红, 李任革, 赵月帅, 等. 基于DPeRS模型的西安市农业空间面源污染特征解析. *环境工程*, 2023, 41(12): 142-149. [ZHANG X H, LI R G, ZHAO Y S, et al. Analysis of diffuse pollution characteristics in agricultural space in Xi'an based on DPeRS model. *Environmental Engineering*, 2023, 41(12): 142-149.]
- [8] PINTO-CORREIA T, KRISTENSEN L. Linking research to practice: The landscape as the basis for integrating social and ecological perspectives of the rural. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 120: 248-256.
- [9] 钱凤魁, 项子璇, 王贺兴, 等. 基于国土空间三线融合的城市周边耕地分区保护研究. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(6): 1164-1173. [QIAN F K, XIANG Z X, WANG H X, et al. Research on protection of cultivated land zones around main urban areas based on the spatial three-line demarcation. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1164-1173.]
- [10] 朱晓华, 张燕, 朱媛媛. 大食物观视角下中国耕地保护的分区调控与区间协同. *地理学报*, 2023, 78(9): 2147-2162. [ZHU X H, ZHANG Y, ZHU Y Y. Regional regulation and interregional coordination of cultivated land protection in China from the perspective of "Greater Food" approach. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(9): 2147-2162.]
- [11] 马利邦, 石志浩, 李梓妍, 等. “人—地—业”协调与区位优势双重视角下农村居民点整理: 以河西走廊金昌市为例. *地理科学*, 2023, 43(3): 476-487. [MA L B, SHI Z H, LI Z Y, et al. Rural residential land consolidation based on "population-land-industry" coordination and location superiority: A case study in Jinchang city, Hexi corridor of Gansu province. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(3): 476-487.]
- [12] ZHENG H, XU Z, HU T, et al. A wavelet coherence approach to zoning supply-demand matching of carbon sequestration service. *Science of the Total Environment*, 2023, 901: 165641, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165641.
- [13] 安悦, 周国华, 贺艳华, 等. 基于“三生”视角的乡村功能分区及调控: 以长株潭地区为例. *地理研究*, 2018, 37(4): 695-703. [AN Y, ZHOU G H, HE Y H, et al. Research on the functional zoning and regulation of rural areas based on the production-life-ecological function perspective: A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Area. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 695-703.]

- [14] 黄培真, 赵华甫, 吴克宁, 等. 基于地球关键带类型的国土空间生态修复分区研究: 以河南省西峡县为例. 地质通报, 2023, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20230609.1751.002.html>. [HUANG P Z, ZHAO H F, WU K N, et al. Research on land-space ecological restoration zoning based on the type of Earth's critical zone: A case study of Xixia county, Henan province. Geological Bulletin of China, 2023, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20230609.1751.002.html>.]
- [15] 柯新利, 刘曼, 邓祥征. 湖泊营养物生态分区: 中国东北的分区试验. 自然资源学报, 2014, 29(5): 789-800. [KE X L, LIU M, DENG X Z. Ecoregion of lake nutrients: A case study of Northeast China. Journal of Natural Resources, 2014, 29(5): 789-800.]
- [16] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区: 以徐州市贾汪区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216. [NI Q L, HOU H P, DING Z Y, et al. Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: Taking Jiawang district of Xuzhou city as an example. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 204-216.]
- [17] 蔡海生, 陈艺, 查东平, 等. 基于主导功能的国土空间生态修复分区的原理与方法. 农业工程学报, 2020, 36(15): 261-270, 325. [CAI H S, CHEN Y, ZHA D P, et al. Principle and method for ecological restoration zoning of territorial space based on the dominant function. Transactions of the CSAE, 2020, 36(15): 261-270, 325.]
- [18] 岳文泽, 侯丽, 夏皓轩, 等. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略. 应用生态学报, 2022, 33(1): 149-158. [YUE W Z, HOU L, XIA H X, et al. Territorially ecological restoration zoning and optimization strategy in Guyuan city of Ningxia, China: Based on the balance of ecosystem service supply and demand. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1): 149-158.]
- [19] 包玉斌, 黄涛, 王耀宗, 等. 基于生态重要性及敏感性的六盘山区生态保护修复分区. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1778-1791. [BAO Y B, HUANG T, WANG Y Z, et al. Zoning for ecological conservation and restoration in Liupan Mountain Area based on ecological importance and sensitivity evaluation. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1778-1791.]
- [20] 马世发, 劳春华, 江海燕. 基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟: 以粤港澳大湾区为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3441-3448. [MA S F, LAO C H, JIANG H Y. Ecological restoration zoning of territorial space based on the pattern simulation of eco-security scenario: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3441-3448.]
- [21] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究. 生态学报, 2020, 40(3): 1065-1076. [HUANG X Y, ZHAO X M, GUO X, et al. The natural ecological spatial management zoning based on ecosystem service function and ecological sensitivity. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 1065-1076.]
- [22] KETEMA H, WEI W, LEGESSE A, et al. Quantifying ecosystem service supply-demand relationship and its link with smallholder farmers' well-being in contrasting agro-ecological zones of the East African Rift. Global Ecology and Conservation, 2021, 31: e01829, Doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01829.
- [23] YAN X, LIU C, HAN Z, et al. Spatiotemporal assessment of ecosystem services supply-demand relationships to identify ecological management zoning in coastal city Dalian, China. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(23): 63464-63478.
- [24] 文博, 朱高立, 夏敏, 等. 基于景观安全格局理论的宜兴市生态用地分类保护. 生态学报, 2017, 37(11): 3881-3891. [WEN B, ZHU G L, XIA M, et al. Ecological land classification protection based on the landscape security pattern in Yixing city. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3881-3891.]
- [25] 魏伟, 唐林. 三区空间视角下江汉平原农业空间时空演化及驱动机制分析. 水土保持研究, 2023, 30(2): 369-377. [WEI W, TANG L. Spatial and temporal evolution characteristics and driving mechanism of agriculture in Jiangnan Plain from the perspective of three regions. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 369-377.]
- [26] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196. [XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196.]

- [27] 吴娜, 宋晓谕, 康文慧, 等. 不同视角下基于 InVEST 模型的流域生态补偿标准核算: 以渭河甘肃段为例. 生态学报, 2018, 38(7): 2512-2522. [WU N, SONG X Y, KANG W H, et al. Standard of payment for ecosystem services in a watershed based on InVEST model under different standpoints: A case study of the Weihe River in Gansu province. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2512-2522.]
- [28] 饶恩明, 肖赓, 欧阳志云, 等. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素. 生态学报, 2013, 33(3): 746-755. [RAO E M, XIAO Y, OUYANG Z M, et al. Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 746-755.]
- [29] 张红娟. 基于供需视角的流域生态系统服务综合评估: 以西安市沣河流域为例. 西安: 西北大学, 2020. [ZHANG H J. A comprehensive assessment for watershed ecosystem services based on supply-demand perspective: A case study of Fenghe River Watershed in Xi'an. Xi'an: Northwest University, 2020.]
- [30] 王晓琪, 赵雪雁. 人类活动对国家公园生态系统服务的影响: 以祁连山国家公园为例. 自然资源学报, 2023, 38(4): 966-982. [WANG X Q, ZHAO X Y. Impacts of human activities on ecosystem services in national parks: A case study of Oilian Mountain National Park. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(4): 966-982.]
- [31] DANESHI A, BROUWER R, NAJAFINEJAD A, et al. Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125621, Doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125621.
- [32] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5. [YU X X, ZHOU B, LYU X Z, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(10): 1-5.]
- [33] 尚俊, 蔡海生, 龙月, 等. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖区生境质量时空演化及其变迁特征分析. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1901-1915. [SHANG J, CAI H S, LONG Y, et al. Temporal-spatial distribution and transition of habitat quality in Poyang Lake Region based on InVEST mode. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(8): 1901-1915.]
- [34] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [35] CHEN Y, ZHAI Y, GAO J. Spatial patterns in ecosystem services supply and demand in the Jing-Jin-Ji region, China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 361: 132177, Doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132177.
- [36] 宇振荣, 刘云慧. 强化农业空间生态保护修复. 中国自然资源报, 2020-10-14 (003). [YU Z R, LIU Y H. Strengthening the ecological protection and restoration of agricultural space. *China Natural Resources News*, 2020-10-14 (003).]
- [37] 田学斌. 实现人与自然和谐发展新境界: 认真学习领会习近平总书记生态文明建设理念. 社会科学战线, 2016, (8): 1-14. [TIAN X B. Achieving a new realm of harmonious development between humanity and nature: Conscientiously studying and understanding general secretary Xi Jinping's idea of building an ecological civilization. *Social Science Front*, 2016, (8): 1-14.]

## Ecological conservation and restoration zoning of county-level agricultural spatial ecology coupled with ecological service supply and demand: A case study of Yixing

WANG Lin-yan, XIA Min, ZOU Wei

(College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Conducting research on agricultural spatial ecological protection and restoration zoning at the county level, and implementing differentiated ecological protection and restoration measures, has practical significance for coordinating the human-land coupling system and promoting sustainable development of nature and society. This article takes the agricultural space of Yixing as the research scope, couples the supply and demand patterns of ecosystem services, and constructs a comprehensive supply and demand security pattern for ecological protection and restoration zoning. The results show that: (1) The demand pattern for various ecosystem services in the agricultural space of Yixing is significantly different due to the combined effects of natural factors and human activities. The demand for soil conservation services presents an overall pattern of high in the northeast and low in the southwest; The overall demand for food supply services is high, similar to the spatial distribution of population; The demand pattern for carbon sequestration services is characterized by "high in the north and low in the south"; The demand for water conservation services is relatively uniform in spatial distribution; The demand for habitat quality services is spatially divided into eight blocks. (2) The supply pattern of ecosystem services for soil conservation, carbon sequestration, water source conservation, and habitat quality maintenance in Yixing's agricultural space shows a "strong south and weak north" characteristic, while the high-value areas for food supply services are located in the northeast and western waistline parts of the research area. (3) Based on the comprehensive level of supply and demand security, the agricultural space can be divided into agricultural ecological reshaping area, agricultural ecological optimization area, agricultural ecological protection area, and agricultural ecological conservation area. Based on the current land use status, differentiated ecological protection and restoration measures are proposed for each district, such as global governance and key regional ecological reshaping, overall optimization and key regional ecological restoration, comprehensive ecological maintenance and local ecological remediation, strict ecological protection and control of development intensity. The study provides reference for the construction of ecological civilization and agricultural spatial planning in Yixing and other similar areas.

**Keywords:** agricultural space; ecosystem services; supply and demand assessment; supply and demand security pattern; ecological conservation and restoration