中国农业大学学报 2026,31(11):316-331
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

王燕,黄安,夏菁,刘烁,耿文利,唐甜,庄元. 土地利用变化对"三生"功能协同效应的影响机制研究——以呼包鄂地区为例[J]. 中国农业大学学报,2026,31(11):316-331.

WANG Yan, HUANG An, XIA Jing, LIU Shuo, GENG Wenli, TANG Tian, ZHUANG Yuan. Study on the impact mechanism of land use change on the synergistic effects of Production-Living-Ecological functions: A case study of the Hohhot-Baotou-Ordos region[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026,31(11):316-331.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.11.24

土地利用变化对"三生"功能协同效应的影响机制研究
——以呼包鄂地区为例

王 燕[1] 黄 安[1*] 夏 菁[2] 刘 烁[1] 耿文利[1] 唐 甜[1] 庄 元[3]

(1. 西安建筑科技大学 公共管理学院,西安 710055;
2. 合肥工业大学 建筑与艺术学院,合肥 230009;
3. 包头职业技术学院,内蒙古 包头 014030)

摘 要 为探明不同土地利用变化对"生产-生活-生态"(以下简称"三生")功能协同效应的影响,本研究以呼包鄂地区为例,集成统计、调查、遥感、POI等多源数据,采用人地关系理论、地理加权回归、GIS空间分析等理论和方法,建构"三生"功能协同效应定量化评估机理与影响路径。结果表明:1)呼包鄂地区草地面积占比最大,水域面积占比最小;2)"三生"功能协同效应呈现"中部高-南北低"的空间分布特征,高值区集中分布于呼包鄂接壤地区;3)耕地面积变化是影响"三生"功能协同效应变化的关键要素,且不同类型土地利用变化在不同区域对"三生"功能协同效应变化的影响具有显著的空间异质性。未来,注重城乡空间差异、优化土地利用结构、提升区域"三生"功能协同效应仍为呼包鄂地区规划的关键任务。本研究可为呼包鄂地区及其他资源型地区空间治理与土地政策制定提供理论、方法、实证参考。

关键词 土地利用变化;"三生"功能;协同效应;影响机制

中图分类号 F301.2 **文章编号** 1007-4333(2026)11-0316-16 **文献标志码** A

Study on the impact mechanism of land use change on the synergistic effects of Production-Living-Ecological functions: A case study of the Hohhot-Baotou-Ordos region

WANG Yan[1], HUANG An[1*], XIA Jing[2], LIU Shuo[1], GENG Wenli[1], TANG Tian[1], ZHUANG Yuan[3]

(1. School of Public Administration, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. School of Architecture and Art, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
3. Baotou Vocational & Technical College, Baotou 014030, China)

Abstract To explore the impacts of land use changes on the synergistic effects of Production-Living-Ecological (PLE) functions, this study takes the Hohhot-Baotou-Ordos region as the research area. Integrating multi-source datasets including statistical data, field survey data, remote sensing images and point of interest (POI) data,

收稿日期:2026-01-21;接受日期:2026-04-16
基金项目:国家自然科学基金项目(42201272);内蒙古自治区军民融合重点科研项目及软科学研究项目(JMRKX202205);内蒙古自治区自然科学基金项目(2023LHMS04003);软科学研究计划一般项目(2025KG-YBXM-036);包头职业技术学院科学研究项目(KJ202107)
第一作者:王燕(ORCID:0009-0003-4882-7197),硕士研究生,E-mail: www010827@163.com
通讯作者:黄安(ORCID:0000-0020-6711-9959),副教授,主要研究方向土地利用与空间治理,E-mail: hhanner@163.com

this research adopts theories and methodologies such as the human-land relationship theory, geographically weighted regression and GIS spatial analysis to construct a quantitative evaluation mechanism and influence pathways for the synergistic effects of PLE functions. The results reveal three major findings: 1) Grassland accounts for the largest proportion of land area in the Hohhot-Baotou-Ordos region, while water bodies occupy the smallest share; 2) The synergistic effects of PLE functions exhibit a spatial pattern of “high in the central area and low in the northern and southern zones”, with high-value agglomerations concentrated in the border areas of Hohhot, Baotou and Ordos; 3) Changes in cultivated land area constitute the core factor driving variations in the synergistic effects of PLE functions. Moreover, land use changes of diverse types exert significant spatially heterogeneous impacts on the synergistic effects across different sub-regions. In the future, prioritizing urban-rural spatial disparities, optimizing land use structure, and improving regional synergies among PLE functions will remain core tasks for spatial planning in the Hohhot-Baotou-Ordos region. This research can provide theoretical, methodological and empirical references for spatial governance and land policy formulation in the Hohhot-Baotou-Ordos region and other resource-based regions nationwide.

Keywords　land use change; Production-Living-Ecological functions; synergistic effect; impact mechanism

呼包鄂地区在快速城镇化和产业转型过程中[1]，土地利用结构持续演变[2]，引发生产空间扩张、生活空间重构与生态空间压缩等复杂空间交互过程，造成功能失衡、人地关系日趋紧张等一系列问题[3]。为此，围绕“生产-生活-生态”（以下简称“三生”）协同发展部署了诸多重大决策，如“两山”理念[4]、“区域高质量发展”[5]、“生态福祉”等[6]，旨在要求国土空间利用既要满足工业化城镇化发展、人口增加、经济增长、基础设施建设等对国土空间的巨大需求，又要为保障农产品供给[7]、维护生态安全不断扩大绿色生态空间，实现社会经济发展、人民生活改善和生态环境保护三者之间的良性互促[8]。呼包鄂地区作为内蒙古核心增长极以及黄河上游重要生态安全屏障，其土地利用与功能协同状况直接影响区域生态安全与经济社会可持续发展。

当前，“三生”功能协同效应研究主要集中在形成机理、评估方法、影响机制等方面。在形成机理研究方面，已有研究多从耦合协调[9]、绿色增长[10]等视角出发，以系统理论、人地关系理论、可持续发展理论、协同发展理论[11]等作为研究“三生”功能协同效应的理论依据；在协同效应评估方法研究方面，多运用贝叶斯信念网络（BBN）[12-13]、机械平衡模型[14]、空间相关分析法、SOM 算法[15]、冗余分析法[16]和相关性分析[17]等方法研究“三生”功能的相互关系；在影响机制研究方面，自然[18]、社会[19]、经济[20]等维度要素常作为自变量，被广泛用于探究“三生”功能协同效应的驱动因素。研究多基于耦合视角，以市[21]、县[22]等行政单元尺度，通过地理探测器等地理学方法[23]，多元回归分析、敏感性分析[24]、Logistic 回归模型等数学统计方法，以及随机森林回归模型等机器学习模型，深入探究土地利用变化对功能协同效应的影响机制。土地利用是人类社会经济活动与生态文明建设的重要空间载体，土地利用变化对“三生”功能的协同效应有着举足轻重的作用[25]。然而，当前研究多集中于土地利用变化对单一功能耦合协调关系的影响，且多集中于定量分析土地利用变化带来的生态环境影响，如对生态功能耦合协调关系及生态系统服务功能的影响[26-27]，鲜有研究定量化检测土地利用变化在多大空间以及程度上影响“三生”功能协同效应。尤其是在区域土地利用具有较大差异的背景下，如何选择适当的研究尺度探索不同区域的影响机制，是科学测度土地利用变化对“三生”功能协同效应影响机制的关键环节。

呼包鄂地区位于内蒙古自治区中西部的核心区域，包括呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市。呼包鄂地区经过高速发展，成为内蒙古最具活力的经济圈、城市带，被誉为内蒙古的“金三角”地区。在快速城镇化发展过程中，呼包鄂地区土地利用类型发生重大变化，建设用地面积逐年增加；“三生”空间开发格局发生剧烈转变，亟须量化“三生”功能、重组“三生”空间格局，以协同“三生”发展秩序。与此同时，其生态本底突出、城乡空间异质性显著的特征，使其成为探索城乡融合背景下“三生”功能协同规律的典型区域。鉴于此，本研究以呼包鄂地区为例，基于土地利用多功能理论构建单项功能评价指标体系，测度呼包鄂地区 2010 年、2015 年、2020 年单项生产、生活、生态功能；运用耦合协调度模型评

估呼包鄂地区“三生”功能的协同效应，分析呼包鄂地区“三生”功能协同效应的时空演化特征；运用地理加权回归模型进一步揭示土地利用变化对“三生”功能协同效应的影响机制，通过优化土地资源配置与土地利用结构提升区域“三生”功能协同效应，优化国土空间开发保护格局，以期为呼包鄂地区及类似区域“三生”功能协同可持续发展提供参考依据。

1 理论与方法

1.1 理论分析框架

土地利用变化是指由于土地自身和人类活动变化引起的土地利用方式、覆被和使用程度的变化，最终都会集中体现为不同土地利用类型在数量规模上的结构性转换，即各类用地面积的增减[23]。土地功能指土地在一定利用方式下，能够为人类社会、生态系统提供产品和服务的能力，如生产功能、生态功能、生活功能[37]。基于人地关系地域系统理论，将土地利用变化作为核心解释变量，系统解构土地利用面积变化对“三生”功能协同效应的影响关系如图1所示，其作用链路包含直接与间接2条路径：

首先，土地利用面积的变化是人类土地利用活动的数量化体现，通过调整不同功能用地的规模，直接改变功能供给的空间载体，耕地面积变化直接决定生产空间规模，建设用地面积变化直接影响人居空间的供给规模，林地、草地、水域等生态用地面积变化直接决定生态系统的空间本底。土地利用

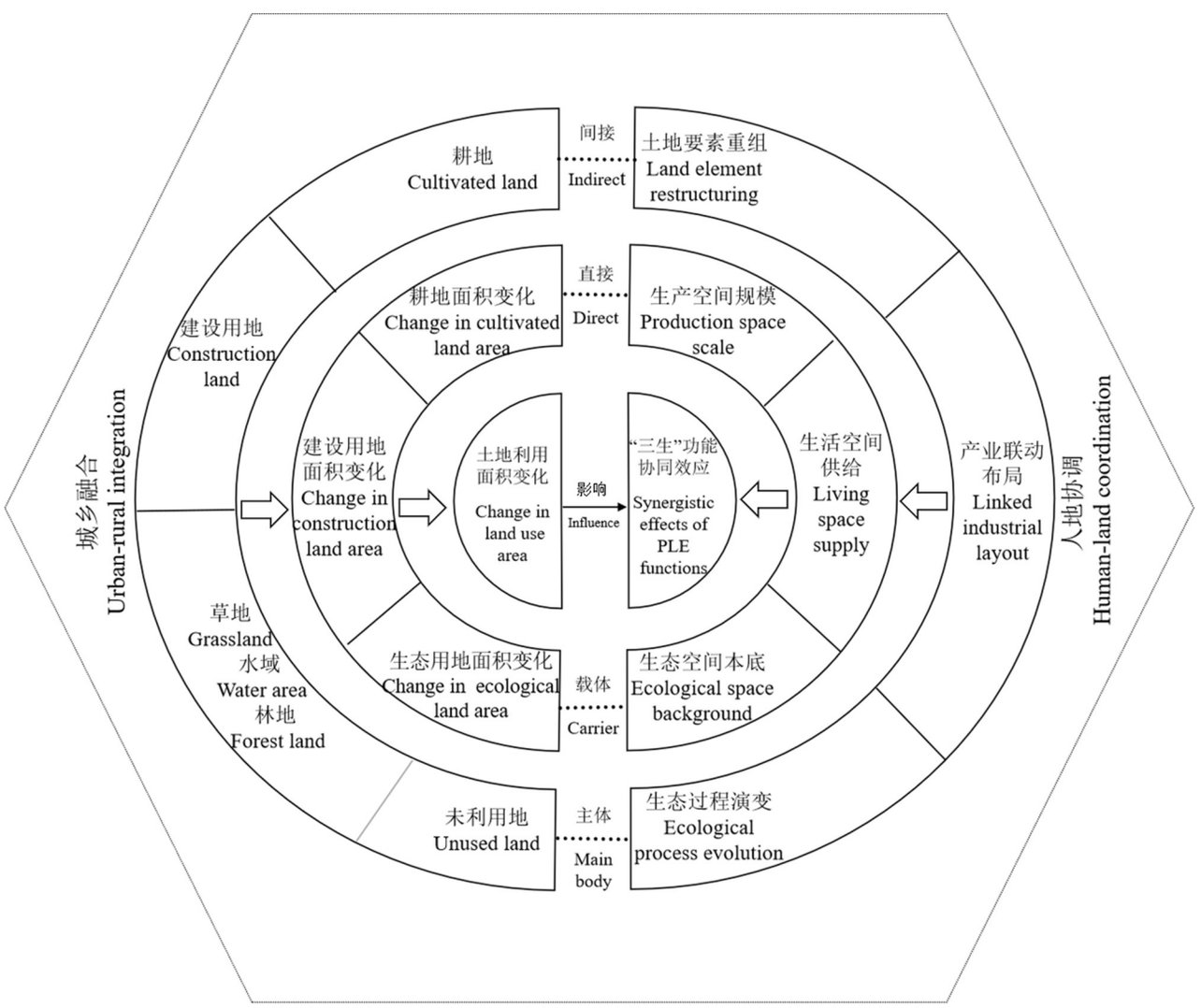


图1 “三生”功能协同效应作用机理

Fig. 1 Mechanism of the synergistic effect of the Production-Living-Ecological functions

面积变化通过用地规模的结构性调整，在直接作用于单项功能供给水平的同时，会进而改变功能间协同水平。如生态用地面积扩张，会直接提升生态功能，同时通过生态屏障作用保障耕地生产功能、优化人居生活功能，推动“三生”功能协同发展；建设用地无序扩张，会直接提升生活功能，但挤压耕地与生态用地面积，削弱生产与生态功能，引发功能间的权衡冲突。

其次，土地利用面积变化通过改变区域用地数量结构，进一步引发土地要素重组、产业联动布局、生态过程演变，构成对“三生”功能协同效应的间接传导路径。土地要素重组反映社会经济要素的空间再配置，耕地面积规模化增减，通过优化农业生产要素配置、推动技术应用，间接提升生产功能效率，同时兼顾生态、生活功能；产业联动布局体现农业、工业与服务业的结构调整与联动发展，建设用地面积扩张，通过引导人口集聚、产业结构升级，间接提升生产与生活功能的匹配度，同时通过城市生态修复弥补生态损耗；生态过程演变表征自然生态系统的物质循环与能量流动变化，生态用地面积变化，通过水文循环、碳汇调节等生态过程，间接影响农牧业生产稳定性与城乡人居环境质量，重塑“三生”功能的交互关系。分别从社会、经济、自然3个维度完整覆盖土地利用变化对功能实现的间接作用路径，能够全面阐释其对“三生”功能协同效应的间接影响机制。

可见，不同土地利用类型供给人类生产、生活、生态产品和服务的能力不同，其规模变化直接改变生产、生活、生态功能的供给强度与格局，进而调节功能间的竞争、兼容与共生关系，最终系统性地决定了城乡地域系统“三生”功能协同效应的状态与可持续性。土地利用变化作为人地关系的直接外在表征，解决人地矛盾、促进社会协调发展是研究人地关系的主要目标。而“三生”功能协同效应则为城乡融合水平测度的定量化指标，通过定量测度土地利用变化对“三生”功能协同效应影响贡献，将有助于直观解读土地利用变化对城乡融合水平的作用状态。

鉴于此，本研究在理清土地资源与系统功能间逻辑关系的基础上，充分考虑呼包鄂地区城乡空间格局，以城乡建设用地所在的车行“15 min生活圈”范围为半径（电动自行车按25 km/h的速度行驶15 min的距离），构建六边形格网作为基本研究单元，系统解构土地利用变化对“三生”功能协同发展影响作用的理论框架与方法体系，揭示城乡空间“三生”功能协同发展的科学问题，推进形成土地资源合理利用与“三生”功能协同发展的科学认知。六边形格网相对于当前常用的格网（正方形、菱形、不规则三角网），最接近于圆，每个单元与6个相邻单元连接，将生活圈面积尽可能包含到基础研究单元内，具有良好的空间连续性和邻接性，有助于提高空间分析的连续性和精确度。

1.2　研究思路及方法

首先，充分考虑城乡融合的基本诉求，集成当前“三生”功能评估方法，建构“三生”功能协同效应评估方法。其次，全面考虑土地利用变化的多类型特性，基于地理加权回归模型，建构土地利用变化对“三生”功能协同效应的影响贡献测度方法。最后，以呼包鄂地区2010年、2015年、2020年为研究基期，以城乡空间的“15 min生活圈”为评估单元，进行实证案例研究。

1.2.1　“三生”功能协同效应评估方法

首先，“三生”功能评价指标体系构建。单项生产、生活、生态功能测算是“三生”功能协同效应评估的前提条件。从人地系统视角出发，农业、乡域、村庄、城镇等子系统分别承载着维持人类生存需求的生产、生活、生态功能。因此，本研究结合既有“三生”功能相关研究以及呼包鄂地区的实际状况，系统建构“三生”功能评价指标体系，具体简介如表1所示。

生产功能主要包括农业生产功能和非农业生产功能，是各类产业发展状况及经济水平的表征[28]。农业系统的核心在于农产品种植与生产，以促进农业生产力的提升。乡域、城镇系统多涉及工业、商业等经济活动，少数区域涉及农业生产活动，承担着区域经济发展的重要任务。因此，研究等权叠加农业生产功能与经济发展功能表征生产功能，农业生产功能通过集成农业生产总值和表征耕地供给农业生产贡献能力的指标NPP，根据贡献系数法，进行空间化表征。经济发展功能通过集成夜间灯光数据、公司企业、住宿（宾馆）、餐饮、商场等空间点的核密度测算结果，等权相加后，获得经济发展的空间分布贡献系数，离散化二、三产业产值[29]。

生活功能本质上是满足居民的居住服务功能，

居住服务功能直接影响居民的基本生存条件和生活质量[30]，能够有效反映出生活功能的完整性和区域差异性，是评价生活功能的重要指标。为避免指标单一化缺陷，从空间供给、服务可达、活动集聚3个维度构建综合评价体系，具体通过综合叠加夜间活动集聚度、企业可达性、公共基础服务设施可达性3个方面实现量化。夜间活动集聚度是映射城市活动的重要指标，表征居民日常活动的空间密度。企业可达性关联生活功能与经济发展功能的协同性，体现职住空间的匹配程度。公共基础服务设施可达性反映居住配套服务的核心需求，涵盖教育、医疗、交通等民生服务供给水平，是居民获取生活服务功能的重要体现[31]。因此，等权叠加夜间活动集聚度、企业可达性、公共基础服务设施可达性，可综合表征居民的居住服务水平，即生活功能。

生态功能是固碳、水源涵养、土壤保持、防风固沙4项功能的等权叠加，因为自然环境状况是衡量生态功能的首选要素[29]。碳固定旨在减少大气中的温室气体含量，营造良好的生态环境[32]；水源涵养是生态系统对水源进行调控，以减少水土流失[33-34]；水土保持是通过合理的土地利用、植被覆盖等手段，减少水土流失，保持土壤质量和水源供给[35]；防风固沙旨在减少风沙侵蚀，保护土地免受沙化影响，从而维持生态平衡[36]。

表1 “三生”功能评价指标

Table 1 Indicators for evaluating the PLE functions

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	计算方法及概述 Calculation method and overview
生产功能 Production function	农业生产功能	$F_i = Y \times \frac{\mathrm{NPP}_i}{\sum \mathrm{NPP}_i}$ 通过集成农业生产总值和表征耕地供给农业生产贡献能力的指标NPP，根据贡献系数法，对农业生产功能进行空间化表征
	经济发展功能	$F_i = \mathrm{GDP}_i \times \frac{n_i}{\sum n_i}$，$\mathrm{IFI}_{Ri} = \frac{\mathrm{OLS}_i + \mathrm{CS}_i + \mathrm{ZS}_i + \mathrm{CY}_i + \mathrm{SC}_i}{5}$ 将二、三产业产值作为经济发展功能空间化的基础指标；将综合集成夜间灯光数据及公司企业、住宿、餐饮、商场等空间点的核密度测算结果，采用贡献系数法，将其离散化至栅格单元内
生活功能 Living function	居住服务功能	综合叠加夜间活动集聚度、企业可达性、公共基础服务设施可达性
生态功能 Ecological function	固碳	$C = \mathrm{NPP}_{\mathrm{mean}} \times 1.63 \times (12/44)$ C为固碳量；$\mathrm{NPP}_{\mathrm{mean}}$为多年植被净初级生产力平均值；1.63为净初级生产力转化为CO_2的系数；12/44为CO_2转化为碳的系数
	水源涵养	$\mathrm{WR} = \mathrm{NPP}_{\mathrm{mean}} \times F_{\mathrm{sic}} \times F_{\mathrm{pre}} \times (1 - F_{\mathrm{slo}})$ WR为生态系统水源涵养服务能力指数；$\mathrm{NPP}_{\mathrm{mean}}$为多年植被净初级生产力平均值；$F_{\mathrm{sic}}$为土壤渗流因子；$F_{\mathrm{pre}}$为多年平均降水量因子；$F_{\mathrm{slo}}$为坡度因子
	土壤保持	$S_{\mathrm{pro}} = \mathrm{NPP}_{\mathrm{mean}} \times (1 - K) \times (1 - F_{\mathrm{slo}})$ S_{pro}为水土保持服务能力指数；$\mathrm{NPP}_{\mathrm{mean}}$为多年植被净初级生产力平均值；$F_{\mathrm{slo}}$为坡度因子；$K$为土壤可蚀性因子
	防风固沙	$S_{\mathrm{ws}} = \mathrm{NPP}_{\mathrm{mean}} \times K \times F_q \times D$ S_{ws}为防风固沙服务能力指数；$\mathrm{NPP}_{\mathrm{mean}}$为多年植被净初级生产力平均值；$K$为土壤可蚀性因子；$F_q$为多年平均气候侵蚀力；$D$为地表粗糙度因子

其次，“三生”功能协同效应评估方法。包括“三生”功能单项指标归一化方法、综合评估方法、协同效应测算方法。具体如下：

“三生”功能单项指标归一化方法。归一化实质是一种线性变换，也被称为离差标准化，将数值映射到[0,1]，消除指标之间的数量级差距[37]。原始数据经过归一化处理，各指标处于同一数量级，使其具有可比性。各功能要素根据其对“三生”功能的正向和负向贡献，进行标准化处理。具体计算公式为：

$$X'=\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{1}$$

$$X'=\frac{X_{\max}-X}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{2}$$

式中：X'为归一化后的功能值；X为原始数据任意栅格单元上的功能值；$X_{\max}$为数据的最大值；$X_{\min}$为数据的最小值。其中，式(1)为正向归一化方法；式(2)为负向归一化方法。

“三生”功能综合评估方法。加权叠加法主要用于对多个评价指标进行综合考量，以综合评分的方式得出最终评价结果，该方法在综合评价、优选方案等领域广泛应用，其原理是将各指标赋予不同权重并叠加形成一个综合指数的过程[38]。利用ArcGIS中叠加分析工具，对归一化处理后的各项指标进行叠加，得到生产、生活、生态功能值，为“三生”功能协同效应定量化评估奠定基础。具体计算公式为：

$$F_i=\sum_{i=1}^{n} w_i x_i \tag{3}$$

式中：F_i为综合指数；w_i为第i项指标所占权重；x_i为第i项指标的值；n为指标总数。

“三生”功能协同效应测算方法。耦合源自物理学概念，指2个或2个以上系统或运动形式通过各种相互作用彼此影响的现象，耦合协调度可以反映系统内部协调发展水平的高低[39]。基于“三生”功能评价结果，运用耦合协调度测算模型深入探究呼包鄂地区“三生”功能彼此之间协同发展的可能关系。具体计算公式为：

$$C=\sqrt[3]{\frac{Q_1Q_2Q_3}{\left(\frac{Q_1+Q_2+Q_3}{3}\right)^3}} \tag{4}$$

$$D=\sqrt{C\times\frac{Q_1+Q_2+Q_3}{3}} \tag{5}$$

式中：Q_1、Q_2、Q_3分别为生产、生活、生态功能的综合评价指数；C为功能间的耦合度，取值范围0到1，耦合度越大，说明功能之间的相互影响程度越高；D为“三生”功能耦合协调度，D值越高，耦合协调程度越高，D值越低，耦合协调程度越低。

1.2.2　土地利用变化对“三生”功能协同效应的影响贡献定量测度方法

土地利用变化的处理方法。首先，通过转移矩阵描述不同土地利用类型在不同时段的转化情况，从而揭示土地利用类型的转移方向以及时空演化特征。其次，借助ArcGIS10.8中面积制表工具，统计每一个样本单元内各类土地的面积大小，并以相邻年份之间土地利用类型面积的变化量作为土地利用变化的度量指标，进一步分析其对“三生”功能协同效应的影响作用。转移矩阵计算公式为：

$$\boldsymbol{S}_{ij}=\begin{vmatrix} S_{11}\cdots S_{1n} \\ \vdots \quad\quad \vdots \\ S_{n1}\cdots S_{nn} \end{vmatrix} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{S}_{ij}$为土地利用类型i在基期转移到类型j的面积；n为土地利用类型的总数；S_{nn}为各类土地在研究期内维持不变的面积。

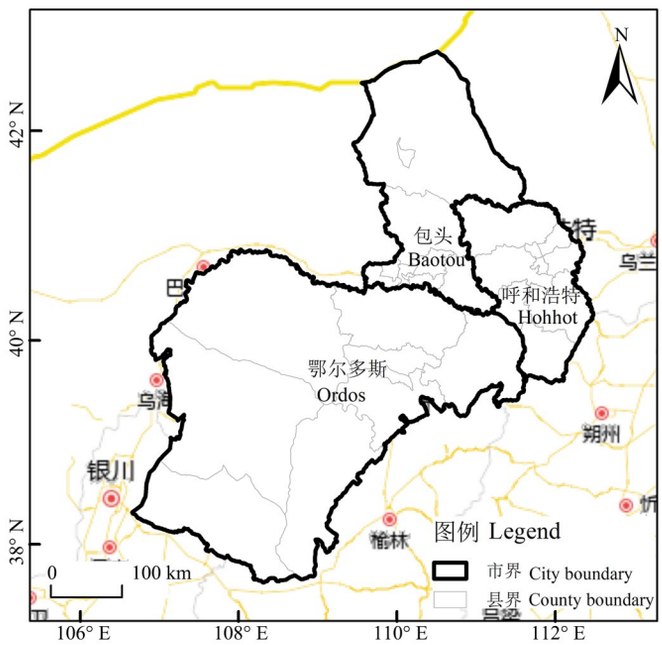
影响贡献定量测度方法。地理加权回归(Geographically weighted regression，GWR)是一种空间分析技术，是对普通线性回归模型的扩展。GWR通过建立空间范围内每个点处的局部回归方程，来探索研究对象在某一尺度下的空间变化及相关驱动因素，可用于对未来结果的预测，适用于研究对象的数据在空间上呈现出显著的地理差异性[40]。借助地理加权回归模型，分析各因素的影响贡献及其空间分布规律。具体公式为：

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^{p}\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}+\varepsilon_i \quad i=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

式中：y_i为被解释变量第i点的值；(u_i,v_i)为采样点i坐标；$\beta_0(u_i,v_i)$为常数项；$\beta_k(u_i,v_i)$为采样点i上的第k个回归参数；ε_i为干扰项。

1.2.3　研究区概况

呼包鄂地区位于内蒙古自治区的中西部，沿黄河呈条带状分布，地势平缓，地貌类型为河流谷地(图2)。黄河贯穿“金三角”腹地近千里，多年平均径流量为250亿～350亿m^3，土默川平原是优质水区，相对充足的水源为呼包鄂地区经济发展和生活用水提供了保障。2000年，自治区政府确立以呼包鄂为核心的特色经济圈建设的发展战略。2010年，《自治区政府工作报告》中提出“呼包鄂经济一体化”的概念，呼包鄂地区的发展由独立的、各自发展的“金三角”上升到协调统一发展的阶段。随后，呼包鄂一体化战略纳入国家发展改革委提出的主体功能区重点开发区范围。呼包鄂地区包括呼和浩特、包头、鄂尔多斯，呼和浩特是内蒙古自治区首府，政治中心；包头是内蒙古最大的城市，制造业中



基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2020)4619,底图无修改。

Based on the drawing review No. GS (2020) 4619 published on the Standard Map Service Website of the Ministry of Natural Resources with no modifications made to the base map.

图 2 研究区概况

Fig. 2 Overview of the study area

心;鄂尔多斯则是新型草原都市,能源核心。作为内蒙古自治区的重点开发区域和共建“一带一路”的重要节点,推进呼包鄂地区“三生”功能协同发展成为当前重要任务。

1.2.4 数据来源

研究基础数据为社会经济数据与地理空间数据2类。其中:社会经济数据包括2010年、2015年、2020年第一产业、第二产业、第三产业产值,来源于《内蒙古统计年鉴》[41];地理空间数据包括POI数据、30 m分辨率土地利用分类数据、NPP、内蒙古DEM数据等,主要来源于高德地图坐标拾取系统、地理空间数据云平台、中国科学院资源环境科学与数据中心等,并通过ArcGIS软件对搜集到的基础数据进行预处理,包括对POI数据的可达性、核密度分析,利用DEM数据提取研究区坡度、地形起伏度,利用30 m分辨率的土地利用分类数据提取呼包鄂地区耕地空间等。具体数据及来源汇总见表2。

2 结果与分析

2.1 土地利用类型时空演化特征分析

为了更加直观地展现土地利用类型变化情况,本研究选取2010年、2015年、2020年这3年的土地利用分类数据,利用ArcMap10.8展示呼包鄂地区各类用地空间分布状态,提取各类用地面积,揭示相邻年份各类用地转化情况,各类用地空间分布状态和各类用地转化情况分别见图3和图4。

由图3可见:呼包鄂地区草地面积占比最大,水域面积占比最小。呼包鄂地区位于内蒙古自治区中西部地区,其独特的自然环境和气候特点使得草地在土地利用中占据较大比例,2010年、2015年、2020年草地面积均超过7.5万km^2,约占总面积的60%;呼包鄂地区属于典型的温带大陆性气候,四季分明,降水量相对较少且集中,草地不仅能适应干旱和寒冷的环境,还能在一定程度上抵抗土地退化问题,因此导致草地生态系统在该地区的广泛分布。耕地面积也长期维持在中等水平,2010年、2015年、2020年耕地面积均超过1.5万km^2,约占总面积的10%;由于呼包鄂地区土地资源有限,特别是在水资源的供给和使用上,导致粮食作物种植难度较大,主要耕作类型为小麦、玉米等适应性作物。在呼包鄂地区范围内,耕地和草地在一定程度上是互补的,草地为畜牧业提供了重要的资源,而耕地则为农业生产提供了粮食和饲料作物。随着农业与畜牧业的融合发展,耕地面积虽然较草地面积

表 2　本研究数据类型及来源

Table 2　Data types and sources in this study

数据 Data	数据类型 Data type	数据来源 Data source
点位数据 Point data	POI 数据	利用网络爬虫技术，从高德地图获取内蒙古自治区 POI 数据
地形数据 Topographic data	高程 DEM（30 m×30 m 栅格）	地理空间数据云（http://www.gscloud.cn）
气象数据 Meteorological data	年平均降水量、风速、温度、湿度	中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn）
土地利用数据 Land use data	土地利用类型（30 m×30 m 栅格）	中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn）
土壤数据 Soil data	USDA 土壤质地分类（1 km×1 km 栅格）	国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn）
植被净初级生产力 Net Primary Productivity	NPP（250 m×250 m 栅格）	GEE 平台下载 MODIS 系列数据 MOD17A3H 植被初级生产力产品
一产、二产、三产数据 Primary, secondary and tertiary industries data	社会经济统计数据	《内蒙古统计年鉴》[41]
影响贡献测度样本单元数据 Sample unit data for impact contribution measurement	建设用地裁剪边界	基于城乡建设用地所在生活圈范围，选择样本单元

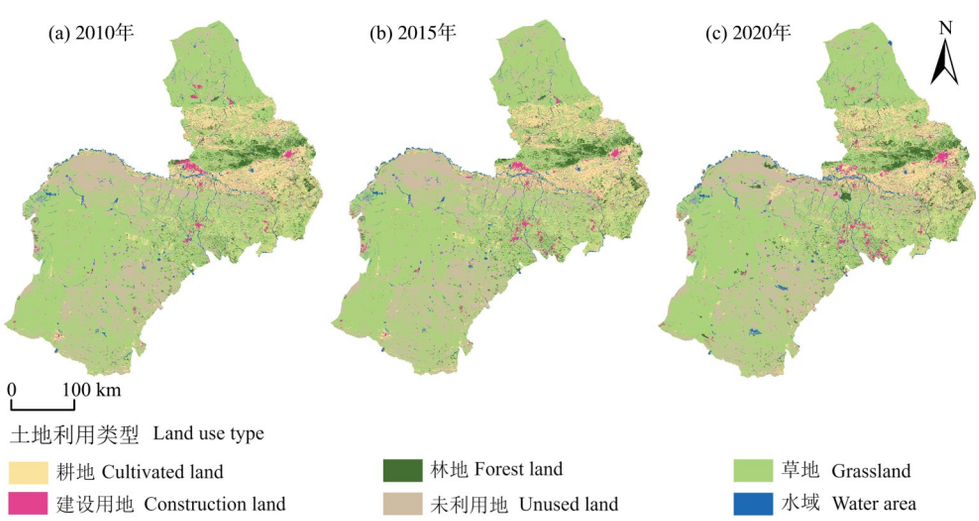


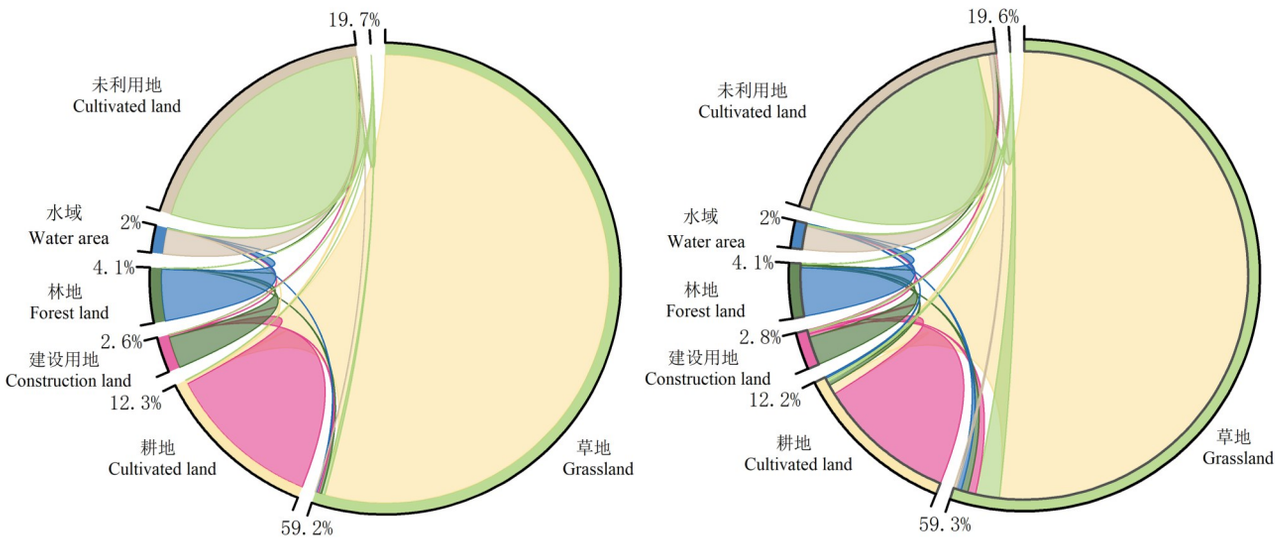
图 3　土地利用类型图

Fig. 3　Land use classification map

小，但在总体土地利用中仍占有重要地位。呼包鄂地区水资源相对匮乏，主要集中在一些湖泊区域，且多为季节性水域，水体面积受降水量和气候变化的影响较大；因此，水域面积在呼包鄂地区中占比最小，仅约为 2%。

由图 4 可见：未利用地向草地转变的面积最大。2010—2015 年，未利用地向草地转变的面积最大，约 447 km^2；2015—2020 年，同样为未利用地向草地转变的面积最大，约 1 232 km^2。由此可见，草地的主要来源为未利用地，草地的扩展通常不依赖于自然生态环境的破坏，而是通过开垦未利用地来实现。同时，草地也是耕地、林地、水域、建设用地的主要来源，主要原因是草地面积在所有土地类型中占比最大；在城市化快速发展的地区，建设用地需

求逐渐增加，通常占用开发难度较小的草地；部分草地可能因自然或人为原因转变为水域；在农业需求增加或城市化进程加速的背景下，草地的适耕性通常适合转化为耕地；由于生态恢复和自然环境改善的需求，退耕还林和草本植物种植使得草地和耕地逐渐向林地转化。



(a) 2010—2015年　　(b) 2015—2020年

图 4　土地利用类型转移矩阵

Fig. 4　Land use transition matrix

2.2　“三生”功能协同效应结果分析

“15 min生活圈”是近年来中国城市发展中提出的重要建设目标，从“以人为本”的理念出发，“15 min生活圈”不仅满足了居民的基本生活需求，也为实现城乡要素自由流动、功能互补和融合发展提供了有效路径。因此，本研究以电动自行车按25 km/h的速度行驶15 min的距离为半径，根据公式换算渔网参数，构建六边形格网作为基础研究单元。在单项生产、生活、生态功能测度的基础上，分区统计单项功能至各栅格单元范围内，采用耦合协调度模型，定量化测算2010年、2015年、2020年呼包鄂地区“三生”功能协同效应，其可视化结果见图5。可见：2010年、2015年、2020年呼包鄂地区“三生”功能耦合协调度均呈现“中部高-南北低”的空间分布特征，区域差异明显；高值区集中分布于呼包鄂接壤地带，位于整个地区的核心位置，包括九原区、昆都仑区、青山区、土默特右旗、土默特左旗、玉泉区、新城区、赛罕区、托克托县等区县。

结合已有研究，将“三生”功能耦合协调度分为5个等级，具体分级如下：0～0.4表示严重失调；0.4～0.5表示濒临失调；0.5～0.6表示基本协调；0.6～0.7表示中级协调；0.7～1.0表示优质协调。由图5可见：呼包鄂地区严重失调区域面积占比最高，约为37%；优质协调区域面积占比3年均不到8%。

1）严重失调区域主要分布于杭锦旗、鄂托克旗、鄂托克前旗、乌审旗、达尔罕茂明安联合旗等地区的边缘区域。究其原因主要包括以下3点：一是这些区域受地区辐射作用较小，政策扶持和治理能力相对较弱；二是城市化进程缓慢，主要以传统农业、资源开采等为主，缺乏高效、综合的产业体系，导致“三生”功能协同效应较低；三是白云鄂博矿区等部分区域，依赖矿产资源开采带动经济发展，而这些行业往往带来较大的生态压力，生产功能与生态功能之间存在严重失衡。

2）优质协调区域集中分布于呼包鄂接壤区域，即地区的中部地带。主要原因包括4点：一是呼和浩特、包头和鄂尔多斯的交会地带是地区的核心区域，具备交通便利、人口流动密集、城市化水平高、产业结构多元等优势；二是经济的多元化发展促进了生产、生活和生态功能的协同演进，使该区域成为“三生”功能高度协调的核心区域；三是新城区、赛罕区、九原区等典型区域通过绿色发展理念引导资源开发、推动产业升级，同时加强基础设施配套

与生态环境建设，维护了生产、生活与生态功能之间的平衡；四是政策扶持使得区域间合作紧密，资源共享成本较低，综合优势促使这些区域生产、生活和生态功能协同效应较强。

总体来看，2010—2020 年，呼包鄂地区高度协调区域面积占比较低，由此说明促进呼包鄂地区及全国范围内“三生”功能协同发展仍为国土空间规划中的一项关键任务。

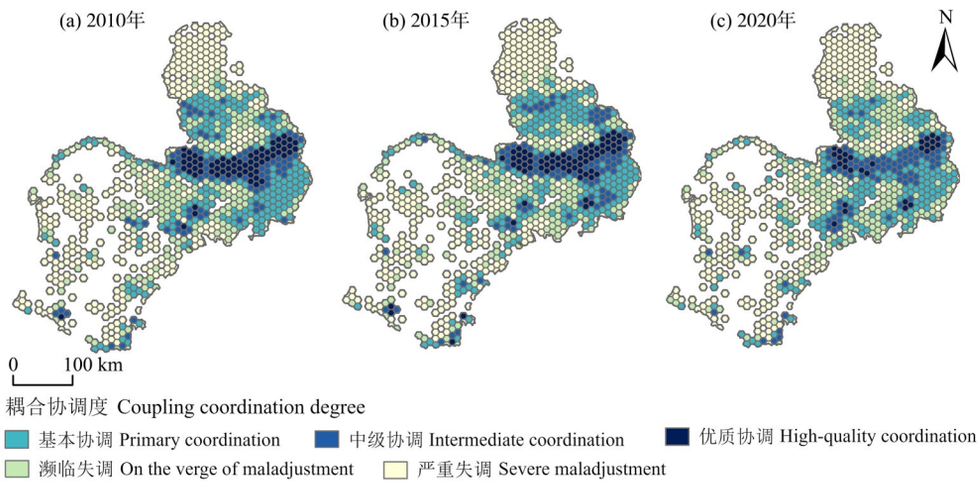


图 5　“三生”功能协同效应状况

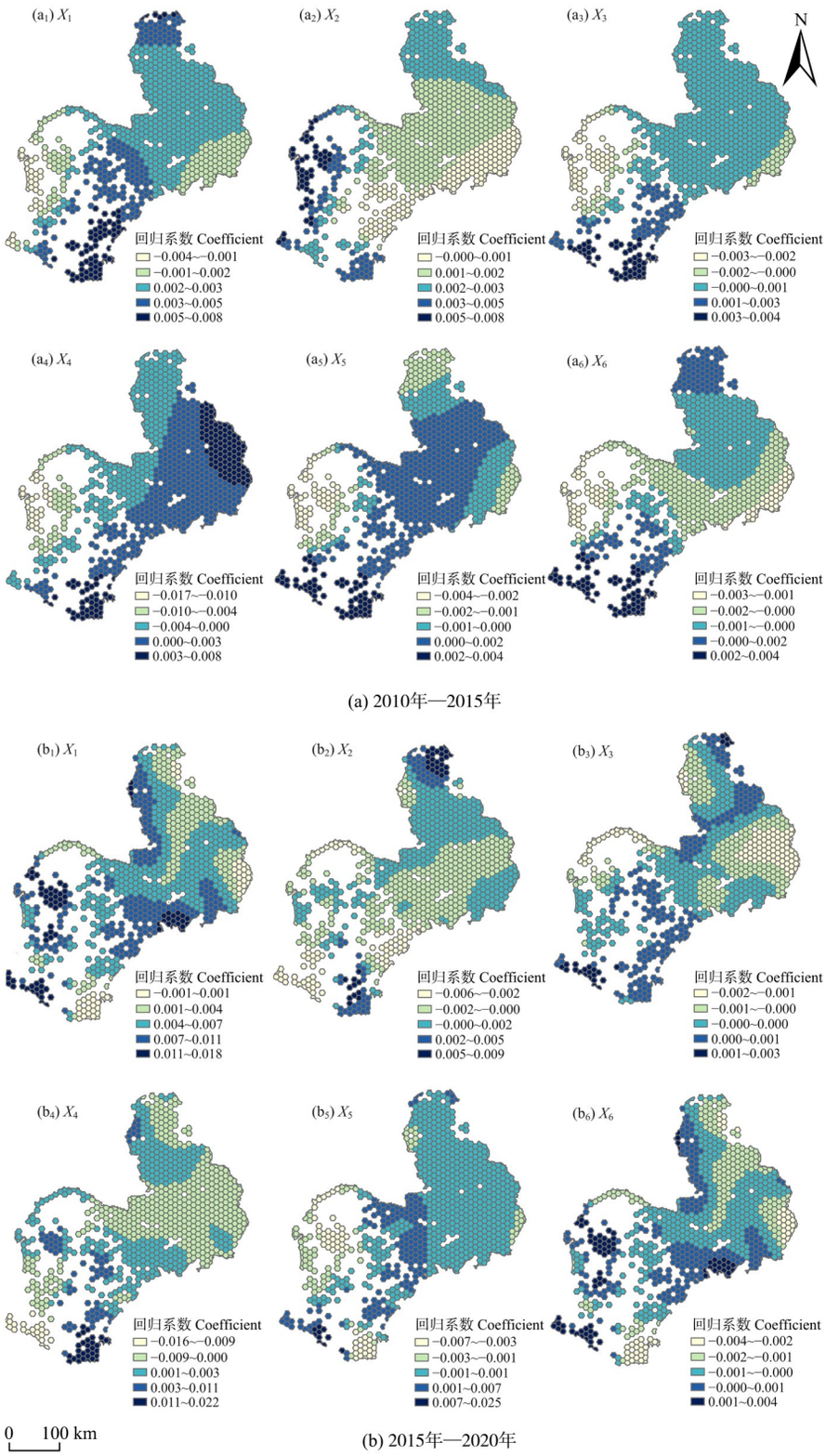
Fig. 5　Status of synergies among the Production-Living-Ecological functions

2.3　土地利用变化对“三生”功能协同效应的影响机制分析

为进一步探究土地利用变化对呼包鄂地区“三生”功能协同效应变化影响的空间分布状况，将上述变量导入地理加权回归模型中，得出 2010—2015 年、2015—2020 年各影响因素对“三生”功能协同效应的影响贡献。2010—2015 年、2015—2020 年拟合系数 R^2 分别为 0.118、0.543，调整后的 R^2 分别为 0.073、0.406。2010—2015 年 R^2 较低，拟合度较差，主要原因是 2010—2015 年栅格单元内各类土地面积变化微小，导致样本间数据存在高度共线性。而 2015—2020 年栅格单元内各类土地面积变化明显，回归模型拟合度较好。各类土地利用面积变化对呼包鄂地区“三生”功能协同效应影响的空间分布状况见图 6，各自变量回归系数分布特征见图 7。

由图 6 可见：耕地面积变化的回归系数表现出较强的空间异质性，说明该变量在不同区域对“三生”功能协同效应的影响存在显著差异；且多数地区表现为正向促进作用，尤其是杭锦旗与鄂托克旗接壤地带，农村居民点相对集中，耕地作为主要土地利用类型，面积扩张或质量提升增强农业产出、农户生计保障与生态系统服务能力，从而对“三生”功能协同发展具有正向显著影响。建设用地面积变化是制约“三生”功能协同发展的关键约束因素；其负向影响源于空间挤占-功能失衡-协同弱化的传导逻辑，在快速城镇化进程中，建设用地往往优先占用区位条件较好的耕地与生态用地等土地资源，导致农业生产空间压缩、生态系统结构与服务功能受损，对协同效应产生显著负向抑制。水域面积变化呈现显著的双向异质性影响，在乌审旗南部地区对“三生”功能协同效应表现为正向促进作用，在鄂托克前旗西南部地区表现为负向抑制作用；主要原因是乌审旗南部地区在 2015—2020 年实施了多项生态修复和水体恢复工程，形成了稳定且功能完善的水域系统；而鄂托克前旗西南部水域扩张多来源于矿区排水、雨水积存或人为干预下形成的暂时性水体，导致生态功能薄弱，难以有效支撑生产生活发展。林地、草地、未利用地面积变化起稳定性辅助影响作用，在生态保护和退牧还草政策的推动下，达尔罕茂明安联合旗北部地区林草覆盖率稳步上升，区域生态功能显著提升；未利用地面积变化对“三生”功能协同效应在多数区域表现为负向抑制作用，主要原因在于未利用地往往位于自然条件严酷或开发潜力不足的区域，其开发利用可能破坏原有生态平衡，进一步加剧了“三生”功能之间的矛盾。

由图 7 可见：研究期内耕地面积变化的回归系



X_1~X_6分别是耕地面积变化、林地面积变化、草地面积变化、水域面积变化、建设用地面积变化和未利用地面积变化。下同。

X_1 to X_6 represent changes in cultivated land area, forest land area, grassland area, water area, construction land area and unused land area, respectively. The same applies below.

图 6 土地利用面积变化对“三生”功能协同效应影响大小的空间分布特征

Fig. 6 Characteristics of the spatial distribution of the impact of land use change on the synergistic effects of the Production-Living-Ecological functions

数绝对平均值均最高，是驱动区域“三生”功能协同提升的核心主导因子；系数整体集中于正值区间，仅少量离散低值为微弱负值，说明耕地面积变化是推动“三生”功能协同提升的首要正向因素。林地面积变化的回归系数箱体跨正负区间，2015—2020年林地面积变化下探极值更低，但主体区间以正向作用为主，林地依托防风固沙、水土保持的生态基底作用，同步支撑林下产业、草原旅游发展，多数区域形成生态-生产-生活良性联动。草地面积变化的回归系数箱体紧贴0值，上下极值波动幅度远小于其他用地类型，是6类变量中空间分异程度最低的因子；整体来看草地对“三生”协同的促进作用平缓且均衡，退牧还草政策稳定提升区域生态承载力。水域面积变化的回归系数上下极值大幅向正负两端延伸，是所有变量中正负效应分化最突出的类型；多数网格单元水域对“三生”协同无显著影响，仅局部片区呈现极端正向或负向作用。建设用地面积变化回归系数的下极值长期处于负值区间，是制约“三生”功能协同的关键负面因子，建设用地粗放扩张挤占优质耕地与生态用地，造成生产空间压缩、生态功能退化。未利用地面积变化的回归系数箱体主体落在负值区间，相较于建设用地，未利用地对“三生”协同的抑制强度更低；未利用地多分布于生态脆弱区域，无序开发易诱发土地沙化，且缺乏产业与生活配套支撑，激化功能矛盾，但受开发规模限制，全域约束效应偏弱。

因此，合理优化耕地空间规模是实现区域“三生”功能协调发展的关键路径，国土空间规划应优先保障耕地资源保有量，以耕地生产价值为纽带联动城乡生活、生态系统同步提质。

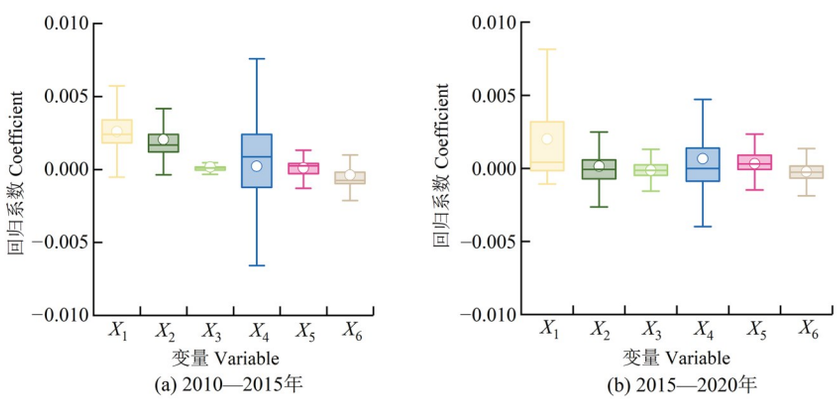


图7　自变量X_1—X_6的回归系数分布特征

Fig. 7　Distribution characteristics of regression coefficients of independent variables of X_1 to X_6

3　讨　论

探明土地利用变化如何影响“三生”功能协同效应变化，优化土地利用结构，积极推进区域“三生”功能协同发展，是城市发展及国土空间规划的重要内容。本研究以呼包鄂地区为例展开实证研究，本研究从理论、方法、实证等方面的创新为呼包鄂地区以及类似地区的土地结构优化和“三生”功能协同效应提升提供了理论和实践支撑。在理论上，“三生”功能协同效应变化的影响因素研究多从协同系统论[3]、可持续发展理论出发，选取自然禀赋、社会经济与政策导向等因素[42]；而本研究基于城乡融合视角构建了精细化甄别土地利用变化对“三生”功能协同发展影响作用的理论框架与方法体系，为定量化研究协同效应提供新的视角，为系统推动呼包鄂地区以及类似区域城镇化地区协同发展提供理论和案例参考。在方法上，前人多利用社会经济面板数据通过熵值法、移动窗口法、传统回归模型等[43]，评估“三生”功能协同效应并探究其影响机制；本研究集成遥感、POI数据以及GIS空间分析等，创建了“三生”功能协同效应精细化评估方法。在实践研究中，“三生”功能协同效应评估多以县域为基本研究单元[44]，而本研究识别了格网尺度的“三生”功能协同效应变化状况及其影响因素的空间异质性，有利于针对性优化土地利用结构以促进区域“三生”功能协同效应的整体提升，从而实现城市全面协调可持续发展。

本研究发现呼包鄂地区“三生”功能耦合协调

度高值区集中分布在呼包鄂接壤地带，位于整个地区的核心位置。该区域交通基础设施完善，高速公路、铁路、航空等立体交通体系健全，人流、物流、资金流、信息流高效流通，生产、生活、生态功能的融合度较高，并且呼包鄂地区产业结构互补，形成较强的经济协同效应，对呼包鄂地区交会地带具有较强的辐射作用。该结论与多数研究中“核心区位交通与产业集聚促进三生功能融合”的观点相吻合，进一步验证了交通通达性与产业分工协作是提升区域“三生”功能协同水平的重要驱动力。尽管本研究聚焦耦合协调度空间分异，长江中游城市群的研究侧重功能网络演化，但印证了交通条件、产业分工是推动交界区域“三生”功能深度融合的关键因素[45]。在影响机制研究方面，通过地理加权回归模型从空间上揭示不同土地利用类型变化对“三生”功能协同效应变化的影响作用，发现耕地面积变化为关键影响因素，合理调整耕地规模、布局有利于推动“三生”功能协同发展。与耕地“三生”空间耦合协调研究得出的结果相呼应，即结合耕地资源分布格局，以差异化耕地管控措施为基础，从据实设置种收补贴范围、适度机械化入田等方面促进耕地“三生”空间实现耦合协调发展[46]。

本研究仍存在不足之处。比如在评价指标的选取上，从生产功能、生活功能以及生态功能3个准则层选取7个指标构建评价指标体系，尤其是生活功能只选取了居住服务功能，但由于“三生”功能的复杂性，呼包鄂地区的生活、生产、生态功能远不止此，未来可进一步丰富、完善及扩充指标体系，并选取多年数据，从长时间序列维度研究土地利用变化对“三生”功能协同效应变化的影响趋势。

4 结 论

本研究利用土地利用分类数据，通过分类提取及转移矩阵深入分析呼包鄂地区2010年、2015年、2020年土地利用变化及分布状况，构建六边形格网作为基础研究单元，精细化评估“三生”功能协同效应，并利用地理加权回归模型探索2010—2015年、2015—2020年土地利用变化对呼包鄂地区“三生”功能协同效应空间异质性的影响状况，并验证了本研究建构的理论和方法的可行性。主要结论如下：

1）本研究基于城乡融合视角构建了土地利用变化对“三生”功能协同发展影响作用的理论框架与方法体系，栅格尺度的研究提升了城乡空间功能协同效应的评估精度与影响机制解析的空间细致性，为地区高质量协同发展研究提供了新路径。

2）2010年、2015年、2020年呼包鄂地区“三生”功能耦合协调度均呈现“中部高-南北低”的空间分布特征，高值区集中分布于呼包鄂接壤地带。且高度协调区域面积3年占比均不到8%，说明提升区域“三生”功能协同效应仍为呼包鄂地区规划中的重要任务。

3）不同土地类型变化对不同区域“三生”功能协同效应的影响具有明显的正向促进/反向抑制作用，耕地面积变化为关键影响因素，应注重优化土地利用结构以提升相应区域的“三生”功能协同效应，从而促进地区整体可持续发展。

参考文献 References

[1] 庄元，薛东前，匡文慧，迟文峰，潘涛. 中国半干旱区呼包鄂城市群地表覆盖等级结构时空特征研究[J]. 遥感技术与应用，2019，34(1)：197-206
Zhuang Y，Xue D Q，Kuang W H，Chi W F，Pan T. Study on the pattern of land cover hierarchy in Hohhot-Baotou-Ordos Cities in the semi-arid region of China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*，2019，34(1)：197-206 (in Chinese)

[2] 冯琰玮，甄江红. 国土空间功能演变及协同/权衡关系研究：以内蒙古呼包鄂地区为例[J]. 干旱区研究，2022，39(5)：1642-1654
Feng Y W，Zhen J H. Study on the adaptation of the Land's functions and its synergy/trade-off relationship：A case study of Hohhot-Baotou-Ordos region，Inner Mongolia[J]. *Arid Zone Research*，2022，39(5)：1642-1654 (in Chinese)

[3] 林佳，宋戈，张莹. 国土空间系统“三生”功能协同演化机制研究：以阜新市为例[J]. 中国土地科学，2019，33(4)：9-17
Lin J，Song G，Zhang Y. Synergistic evolution mechanism of “production-living-ecology” functions in spatial planning system：A case study of Fuxin City[J]. *China Land Science*，2019，33(4)：9-17 (in Chinese)

[4] 韩旭东，李德阳，郑风田. 如何依托“两山”理论实现乡村振兴？基于滕头村的发展经验分析[J]. 农村经济，2021(5)：73-81
Han X D，Li D Y，Zheng F T. How to realize rural vitalization based on the “two mountains” theory[J]. *Rural Economy*，2021(5)：73-81 (in Chinese)

[5] 宋荣，胡业翠，胡菲，徐可. 国土空间规划视角下城市高质量发展路径分析：以我国“两横三纵”城市化地区为例[J]. 中国土地科学，2023，37(10)：20-30
Song R，Hu Y C，Hu F，Xu K. Analysis of urban high-quality development path from the perspective of territorial space planning：A case study of China's“two horizontal and three vertical”Urbanized areas[J]. *China Land Science*，2023，37(10)：20-30 (in Chinese)

[6] 王皓天，郑少鑫，王颖超，王林申，蒋伟春. 生产-生活-生态空间格局演化及其分析技术研究进展[J]. 济南大学学报：自然科学版，2022，36(4)：462-469
Wang H T，Zheng S X，Wang Y C，Wang L S，Jiang W C. Research progress on pattern evolution of production-living-ecological spaces and its

analysis techniques[J]. *Journal of University of Jinan: Science and Technology*, 2022, 36(4): 462-469 (in Chinese)

[7] 罗光强, 陈香香. 粮食主产区“三生”功能与粮食生产可持续发展[J]. 农林经济管理学报, 2023, 22(6): 671-681
Luo G Q, Chen X X. “Production-living-ecology” function of main grain producing areas and sustainable development of food production[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2023, 22(6): 671-681 (in Chinese)

[8] 路昌, 徐雪源, 周美璇. 中国三大城市群收缩城市“三生”功能耦合协调度分析[J]. 世界地理研究, 2023, 32(3): 76-88
Lu C, Xu X Y, Zhou M X. Analysis on coupling coordination degree of production-living-ecological functions in shrinking cities of China's three major urban agglomerations[J]. *World Regional Studies*, 2023, 32(3): 76-88 (in Chinese)

[9] 奉婷, 余筱东, 董仁玲, 张凤荣, 李灿. 耦合视角下广西北部湾经济区“三生”功能协调度的时空演变与影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 303-316
Feng T, Yu X D, Dong R L, Zhang F R, Li C. Spatial-temporal evolution and influencing factors of the coordination degree of “production-living-ecological” functions in Guangxi Beibu Gulf Economic Zone from the coupling perspective[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 303-316 (in Chinese)

[10] 武联, 余侃华, 鱼晓惠, 景文丽. 秦巴山区典型乡村“三生空间”振兴路径探究:以商洛市花园村乡村振兴规划为例[J]. 规划师, 2019, 35(21): 45-51
Wu L, Yu K H, Yu X H, Jing W L. Research on the revitalization path of production-living-ecological space of typical villages in Qin-Ba mountainous area: A case study of rural revitalization planning of Huayuan Village in Shangluo City[J]. *Planners*, 2019, 35(21): 45-51 (in Chinese)

[11] 魏璐瑶, 陆玉麒, 马颖忆, 陈娱, 王毅. 江苏省乡村“三生”功能耦合协同测度及格局演化[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(12): 1596-1608
Wei L Y, Lu Y Q, Ma Y Y, Chen Y, Wang Y. The coupling coordination and pattern evolution of “production-living-ecological” functions in rural areas of Jiangsu Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(12): 1596-1608 (in Chinese)

[12] Chen W T, Hu Q Y, Liu F L, Liu Y, Wang S. Evaluating the trade-offs and synergies of ecosystem services in the Jinsha River Basin[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2024, 15(1): 15-32

[13] 荔童, 梁小英, 张杰, 耿雨, 耿甜伟, 石金鑫. 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析:以陕北黄土高原为例[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6758-6771
Li T, Liang X Y, Zhang J, Geng Y, Geng T W, Shi J X. Ecosystem service trade-off and synergy relationship and its driving factor analysis based on Bayesian belief network: A case study of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6758-6771 (in Chinese)

[14] Zhao J, Zhao Y L. Synergy/trade-offs and differential optimization of production, living, and ecological functions in the Yangtze River Economic Belt, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109925

[15] Zhou S Y, Li W, Lu Z, Cheng R H. An ecosystem-based analysis of urban sustainability by integrating ecosystem service bundles and socio-economic-environmental conditions in China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106691

[16] Sun X Y, Shan R F, Liu F. Spatio-temporal quantification of patterns, trade-offs and synergies among multiple hydrological ecosystem services in different topographic basins[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122338

[17] Liu H, Shu C, Zhou T T, Liu P. Trade-off and synergy relationships of ecosystem services and driving force analysis based on land cover change in Altay prefecture[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6): 777-790

[18] 范业婷, 金晓斌, 甘乐, 林金煌, 杨清可, 吕立刚, 李颖. 长三角地区土地利用功能权衡的空间特征及其影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1589-1603
Fan Y T, Jin X B, Gan L, Lin J H, Yang Q K, Lv L G, Li Y. Spatial characteristics and influencing mechanism of trade-offs between multiple land use functions in the Yangtze River Delta region[J]. *Resources Science*, 2022, 44(8): 1589-1603 (in Chinese)

[19] 曾凯豪, 唐健, 杨剩富. 土地利用功能权衡协同关系及其驱动因子研究:以武汉市为例[J]. 中国土地科学, 2024, 38(6): 66-77
Zeng K H, Tang J, Yang S F. Research on trade-offs and synergy relationship of land use functions and the driving factors: A case study in Wuhan[J]. *China Land Science*, 2024, 38(6): 66-77 (in Chinese)

[20] 朱从谋, 苑韶峰. 杭州市土地利用功能时空权衡特征及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 264-273
Zhu C M, Yuan S F. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of trade-offs/synergies in land use functions in Hangzhou City, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(6): 264-273 (in Chinese)

[21] 黄烈佳, 鲁昭, 胡伟艳. 长江经济带城市空间“三生”功能耦合协调时空演化特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(4): 687-698
Huang L J, Lu Z, Hu W Y. Spatio-temporal coupling characteristics and influencing factors of “production-living-ecological” functions of urban space in the Yangtze River economic belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(4): 687-698 (in Chinese)

[22] 程佳琦, 林伊琳, 赵俊三, 覃彬桂. 昆明市“三生空间”功能耦合协调时空特征与影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 299-310, 319
Cheng J Q, Lin Y L, Zhao J S, Qin B G. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of functional coupling and coordination of ‘Production-living-Ecological’ Spaces in Kunming City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 299-310, 319 (in Chinese)

[23] 张小平, 李昊瑞, 王江天, 王良杰. 气候与土地利用变化对不同植被带生态功能耦合协调关系的影响:以青藏高原生态屏障区为例[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 216-224
Zhang X P, Li H R, Wang J T, Wang L J. Impact of climate and land use changes on coupling coordination relationship of ecological functions in different vegetation zones: A case study of Qinghai-Xizang Plateau Ecological Shelter[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2026, 33(1): 216-224 (in Chinese)

[24] 关梅, 张文信, 蒋海明, 路昌, 葛艺冰, 董光龙. 山东省土地利用变化的生态系统服务交叉敏感性评价[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(6): 192-203
Guan M, Zhang W X, Jiang H M, Lu C, Ge Y B, Dong G L. Cross-sensitivity evaluation of ecosystem services based on land use changes in Shandong Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(6): 192-203 (in Chinese)

[25] Huang A, Xu Y Q, Sun P L, Zhou G Y, Liu C, Lu L H, Xiang Y, Wang H. Land use/land cover changes and its impact on ecosystem services in ecologically fragile zone: A case study of Zhangjiakou City, Hebei Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 604-614

[26] 程玉恒, 乔伟峰, 何天祺, 刘倩倩. 南京市高淳区村域尺度土地利用功能变化及生态系统服务价值响应研究[J]. 地理科学, 2024, 44(2): 340-350
Cheng Y H, Qiao W F, He T J/Q), Liu Q Q. Response of ecosystem services value to land use function change at the village scale in Gaochun District, Nanjing[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(2): 340-350 (in Chinese)

[27] 赵丹, 耿乐琪, 刘科伟, 李建伟, 洪伟. 大城市工业用地布局演变中的城市问题研究:以西安市为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(4): 589-600
Zhao D, Geng L Q, Liu K W, Li J W, Hong W. The urban problems in the evolution of industrial land in large cities: A case study of Xi'an City[J]. *Journal of Northwest University* (*Natural Science Edition*), 2024, 54(4): 589-600 (in Chinese)

[28] Yu L, Xie D L, Xu X. Environmental suitability evaluation for human settlements of rural residential areas in Hengshui, Hebei Province[J]. *Land*, 2022, 11(12): 2112

[29] Huang A, Wang Y, Xiang Y, Xu Y Q, Tian L, Zhou G Y, Zhuang Y, Zhu L. A comprehensive framework for assessing spatial conflicts risk: A case study of production-living-ecological spaces based on social-ecological system framework[J]. *Habitat International*, 2024, 154: 103218

[30] Zhang Q Y, Northridge M E, Jin Z, Metcalf S S. Modeling accessibility of screening and treatment facilities for older adults using transportation networks[J]. *Applied Geography*, 2018, 93: 64-75

[31] Zhan D S, Kwan M P, Zhang W Z, Fan J, Yu J H, Dang Y X. Assessment and determinants of satisfaction with urban livability in China[J]. *Cities*, 2018, 79: 92-101

[32] 罗巧灵, 黄荣鋆, 柳明星, 周俊方. 武汉市城市扩张对植被固碳能力间接影响的城乡差异及驱动机制[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 6980-6993
Luo Q L, Huang R J/Y), Liu M X, Zhou J F. Urban-rural differences and driving mechanisms of the indirect impacts of urban expansion on vegetation carbon sequestration capacity in Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(11): 6980-6993 (in Chinese)

[33] Liu H, Li X M, Guan Y Y, Li S B, Sun H. Comprehensive evaluation and analysis of human settlements' suitability in the Yangtze River Delta based on multi-source data[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(2): 1354

[34] 侯晋星, 潘焕焕, 杜自强, 武志涛, 张红. 山西黄河流域水生态系统服务时空分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(6): 1047-1060
Hou J X, Pan H H, Du Z Q, Wu Z T, Zhang H. Spatiotemporal analysis of water ecosystem services of the Yellow River Basin in Shanxi Province[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(6): 1047-1060 (in Chinese)

[35] 陶勤, 王世航, 王奇, 刘峰, 赵明松, 徐胜祥. 基于InVEST模型的川滇生态屏障区土壤保持功能评价[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1548-1556
Tao Q, Wang S H, Wang Q, Liu F, Zhao M S, Xu S X. Evaluation of soil conservation function in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area based on the InVEST model[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(6): 1548-1556 (in Chinese)

[36] 邵国媚, 乔琴, 张文婷, 高馨婷, 雷硕, 林震宇, 张梅娟, 张泽乾, 韩永伟. 科尔沁草原生态功能区防风固沙功能时空变化及驱动因素分析[J]. 环境科学研究, 2025, 38(1): 139-150
Shao G M, Qiao Q, Zhang W T, Gao X T, Lei S, Lin Z Y, Zhang M J, Zhang Z Q, Han Y W. Spatio-temporal variations and driving factors of sand fixation and windbreaks in the horqin grassland ecological zone[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2025, 38(1): 139-150 (in Chinese)

[37] 黄安, 许月卿, 郝晋珉, 孙丕苓, 刘超, 郑伟然. 土地利用多功能性评价研究进展与展望[J]. 中国土地科学, 2017, 31(4): 88-96, F0003
Huang A, Xu Y Q, Hao J M, Sun P L, Liu C, Zheng W R. Progress review on land use functions evaluation and its prospects[J]. *China Land Science*, 2017, 31(4): 88-96, F0003 (in Chinese)

[38] 熊玲. 中国式现代化进程下城乡融合发展:评价体系与动态测度[J]. 经济问题, 2024(3): 98-105
Xiong L. Urban-rural integration development in the process of Chinese path to modernization: Evaluation system and evolution measurement[J]. *On Economic Problems*, 2024(3): 98-105 (in Chinese)

[39] 尹恣昊. 新型城镇化与农业碳生产率的耦合协调测度[J]. 统计与决策, 2024, 40(21): 69-74
Yin M H. Coupling coordination measure of new urbanization and agricultural carbon productivity[J]. *Statistics and Decision*, 2024, 40(21): 69-74 (in Chinese)

[40] 王娜, 李乐, 勾蒙蒙, 胡建文, 喇蕗梦, 肖文发, 刘常富. 基于GWR模型的秭归县柑橘园土壤有机碳空间异质性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(4): 751-763
Wang N, Li L, Gou M M, Hu J W, La L M, Xiao W F, Liu C F. Spatial heterogeneity analysis of soil organic carbon in Citrus orchards in Zigui County based on GWR model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(4): 751-763 (in Chinese)

[41] 李文龙, 侯鹏珅, 徐芮, 林海英. 资源地区生态经济区划与产业功能布局研究——以内蒙古为例[J]. 生态经济, 2025, 41(4): 38-48
LI W L, HOU P S, XU R, LIN H Y. Ecological economic regionalization and industrial function layout of resource region: A case study of Inner Mongolia[J]. *Ecological Economy*, 2025, 41(4): 38-48 (in Chinese)

[42] 纪璇, 李琳娜, 程明洋. 安徽省县域乡村"三生"功能及耦合协调时空格局分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(10): 150-161
Ji X, Li L N, Cheng M Y. The spatio-temporal pattern of rural "production-living-eco-logical" function and coupling coordination at county level of Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(10): 150-161 (in Chinese)

[43] 黄晶, 薛东前, 董朝阳, 王传胜, 张翀, 马蓓蓓, 宋永永. 干旱绿洲农业区土地利用转型生态环境效应及分异机制:基于三生空间主导功能判别视角[J]. 地理科学进展, 2022, 41(11): 2044-2060
Huang J, Xue D Q, Dong C/Z)Y, Wang C S, Zhang C, Ma B B, Song Y Y. Eco-environmental effects and spatial differentiation mechanism of land use transition in agricultural areas of arid oasis: A perspective based on the dominant function of production-living-ecological spaces[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(11): 2044-2060 (in Chinese)

[44] 尹君锋, 宋长青, 石培基, 高培超, 张学斌, 冯浩源. 耦合视角下甘肃省县域乡村"三生"功能协调度的时空跃迁特征与影响因素[J]. 地理研究, 2024, 43(4): 874-892
Yin J F, Song C Q, Shi P J, Gao P C, Zhang X B, Feng H Y. Spatial and

temporal transition characteristics and influencing factors of “production-living-ecological” functions of rural areas at county level in Gansu Province from the perspective of coupling[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(4): 874-892 (in Chinese)

[45] 张雄, 王芳, 张俊峰, 梁睿, 鞠登平. 长江中游城市群三生功能的空间关联性[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(11): 110-122
Zhang X, Wang F, Zhang J F, Liang R, Ju D P. Spatial correlation of the productive-ecological-living function of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(11): 110-122 (in Chinese)

[46] 王雅婷, 杨清. 黄河上游耕地“三生”空间耦合协调时空演变特征分析[J]. 中国农业科技导报, 2025, 27(11): 205-215
Wang Y T, Yang Q. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of coupling coordination of cultivated land “production-living-ecological” space in upper reaches of Yellow River: A case study of Gansu Province[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025, 27(11): 205-215 (in Chinese)

责任编辑：杨爱东



第一作者简介：王燕，西安建筑科技大学公共管理学院硕士研究生。参与国家自然科学基金项目（42201272）、陕西省哲学社会科学研究专项智库项目（2024ZD467）等 8 项课题。参加 2024 年中国地理学会春季年会暨中国地理编辑出版年会、第八届土地政策 SSCI 期刊联合学术会议、西部城市论坛等学术会议，并作报告。目前已在 *Habitat International*、《自然资源学报》、《地域研究与开发》、《地理科学进展》、*Land* 期刊发表论文 5 篇。



通讯作者简介：黄安，中共党员，西安建筑科技大学公管学院副教授。中国农业大学土地资源管理博士，清华大学城市规划博士后。研究领域为土地利用与空间治理，主要研究方向有国土三生空间优化、土地多功能与可持续利用、资源环境承载力测算与提升以及 3S 技术在城市管理中的应用等。主持和参与国家级、省部级等项目 20 余项。在 *Habitat International*、*Ecological Indicators*、*Land Use Policy*、《农业工程学报》、《资源科学》、《中国土地科学》、《经济地理》等国内外知名期刊上发表学术论文 40 余篇，其中 SCI、SSCI、EI 论文 20 余篇。参编专著 5 部。为 *Land Use Policy*、*Environmental Impact Assessment Review*、*Plant and Soil*、*Ecological Indicators* 等多个国内外期刊审稿人。