

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.016

论文标题： 基于“三生空间”变化的新疆生态环境质量时空演变特征及驱动力分析

作　　者： 布合丽齐·麦麦提尼亚孜，阿里木江·卡斯木，安瓦尔·买买提明，等

收稿日期： 2025-10-11

引文格式： 布合丽齐·麦麦提尼亚孜,阿里木江·卡斯木,安瓦尔·买买提明,等.基于“三生空间”变化的新疆生态环境质量时空演变特征及驱动力分析[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):177-190.

Buheliqi·Maimaitiniyazi, Alimujiang·Kasimu, Anwaer·Maimaitiming, et al. Research on the spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of ecological environment quality in Xinjiang based on the changes in the “production-living-ecological spaces”[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):177-190.

相关论文推荐

Recommended articles

梅山地区传统村落多尺度空间分异及类型识别

Multiscale spatial heterogeneity and type identification of traditional villages in Meishan area

基于“三生空间”的景迈山村落景观营建模式

Landscape construction model of Jingmai mountain village based on “production-living-ecology” space

洞庭湖区旅游产业与生态环境适应性时空演变及影响因素

Spatio-temporal evolution and influencing factors of tourism industry and eco-environmental adaptability in Dongting lake region

国家公园生态环境敏感度及景观分布格局的时空演变特征分析——以神农架国家公园为例

Analysis on the spatial-temporal evolution characteristics of ecological environment sensitivity and landscape distribution pattern of national parks: take Shennongjia national park as an example

长株潭城市群新型城镇化对生态系统服务价值空间分异的影响

The impact of new urbanization of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration on the spatial differentiation of ecosystem service values

2001—2015年伊犁地区植被NDVI变化及其影响因子的相对作用分析

Analysis of the relative role of vegetation cover changes and its influencing factors in Yili area from 2001 to 2015

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.016
http: //qks.csuft.edu.cn

基于“三生空间”变化的新疆生态环境质量时空演变特征及驱动力分析

布合丽齐·麦麦提尼亚孜，阿里木江·卡斯木，安瓦尔·买买提明，布瓦加尔姑·沙依提

（新疆师范大学 a. 地理科学与旅游学院；b. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室；
c. 丝绸之路经济带城市发展研究中心，新疆 乌鲁木齐 830017）

摘　要：【目的】探究“三生空间”（生产空间、生活空间、生态空间）与生境质量的时空演变规律，揭示二者内在关联及生境质量驱动机制，为干旱区国土空间优化布局、生态环境保护与经济发展协同推进提供科学依据。【方法】以新疆为研究区，基于 1990、2000、2010、2020 年 4 期土地利用数据，结合自然因素（高程、坡度、坡向、土壤类型、年平均降水量、年平均气温、年平均蒸散发）与人文因素（GDP）数据，运用土地利用转移矩阵、重心转移模型、标准差椭圆等方法解析“三生空间”时空演变特征；通过 InVEST 模型评估生境质量动态变化，借助生态贡献率量化“三生空间”转型的生态效应，并利用地理探测器识别生境质量的驱动因子及其交互作用。【结果】1）1990—2020 年，新疆“三生空间”以生态空间为主导（占比超 96%），但生态空间面积持续缩减，生产空间与生活空间不断扩张，空间分布呈现“生态空间依山分布、生产生活空间聚于绿洲”的格局。2）生境质量整体偏低，长期呈现“中低质量主导、高质量脆弱”的特征，低质量生境占比超 60%，中质量生境稳步改善，高质量生境集中于天山、阿尔泰山等山区且面积波动下降，生境退化由面状蔓延逐步转向局部点状扩张。3）“三生空间”转型的生态效应阶段性显著，1990—2000 年生境退化面积远大于改善面积，2010—2020 年生境改善面积与退化面积接近平衡，生态保护与经济发展协同性提升。4）生境质量空间分异主要受自然因子驱动，按决定力（q 值）排序为土壤类型＞年平均降水量＞年平均蒸散发＞年平均气温，自然因子间的交互作用呈非线性增强特征，社会经济因子（GDP）影响微弱。【结论】1990—2020 年新疆“三生空间”格局演变显著，生态空间萎缩与生产生活空间扩张对生境质量产生重要影响，生境质量总体偏低且受自然因子主导，未来需通过优化国土空间结构、强化生态保护修复，实现干旱区生态安全与经济可持续发展。

关键词：“三生空间”；生境质量；InVEST 模型；地理探测器；新疆

中图分类号：S718.51　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0177-14

Research on the spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of ecological environment quality in Xinjiang based on the changes in the “production-living-ecological spaces”

Buheliqi·Maimaitiniyazi, Alimujiang·Kasimu, Anwaer·Maimaitiming, Buwajiergu·Shayiti

(a. School of Geographical Science and Tourism; b.Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone; c.Research Center for Urban Development of Silk Road Economic Belt, Xinjiang Normal University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】This study aims to investigate the spatiotemporal evolution patterns of the “production-living-ecological space” and habitat quality, uncover their intrinsic linkages and the underlying mechanisms driving habitat quality changes, and to provide a scientific foundation for optimizing territorial spatial planning and promoting the coordinated development of ecological conservation and economic growth in arid regions.【Method】Taking Xinjiang as the study area, four periods of land use data (1990, 2000, 2010,

收稿日期（Received）：2025-10-11　　**修订日期**（Revised）：2025-12-02
基金项目：国家自然科学基金项目（42361030）。
第一作者：布合丽齐·麦麦提尼亚孜（2175760464@qq.com），硕士研究生。
通信作者：阿里木江·卡斯木（alimkasim@xjnu.edu.cn），教授，博士，硕士研究生导师。
引文格式：布合丽齐·麦麦提尼亚孜 , 阿里木江·卡斯木 , 安瓦尔·买买提明 , 等 . 基于“三生空间”变化的新疆生态环境质量时空演变特征及驱动力分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):177-190.
Buheliqi·Maimaitiniyazi, Alimujiang·Kasimu, Anwaer·Maimaitiming, et al. Research on the spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of ecological environment quality in Xinjiang based on the changes in the “production-living-ecological spaces”[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):177-190.

and 2020), were analyzed integrated with natural factors (elevation, slope, aspect, soil type, annual average precipitation, annual average temperature, and annual average evapotranspiration) and socioeconomic factors (GDP). The spatiotemporal dynamics of the three spaces were examined using a land use transition matrix, land use dynamic degree, gravity center transfer model, and standard deviational ellipse. Habitat quality was assessed using the InVEST model, while the ecological impacts of land use transitions were quantified through an ecological contribution rate analysis. Geoprobe was employed to identify key drivers of habitat quality and their interactive effects. 【Result】1) From 1990 to 2020, ecological space dominated the three spaces in Xinjiang (accounting for over 96%), yet it continuously decreased in extent, whereas production space (particularly agricultural land) and living space expanded steadily. Spatially, ecological space was primarily distributed along mountainous regions, while production and living spaces clustered within oases; 2) Overall habitat quality remained low, characterized by a persistent dominance of medium- and low-quality areas and fragile high-quality patches. Low-quality habitats exceeded 60% of the total area; medium-quality habitats showed gradual improvement; high-quality habitats were concentrated in mountain ranges such as the Tianshan and Altai mountains but exhibited a fluctuating decline in area. Habitat degradation evolved from widespread, diffuse expansion toward localized, point-source deterioration; 3) The ecological consequences of three-space transformation varied significantly across phases: from 1990 to 2000, degradation far outweighed improvement; however, from 2010 to 2020, improvement and degradation reached near equilibrium, indicating enhanced synergy between ecological protection and socioeconomic development; 4) Spatial variations in habitat quality were predominantly governed by natural factors, ranked by explanatory power (q-value) as soil type ＞ annual average precipitation ＞ annual average evapotranspiration ＞ annual average temperature. Interactions among natural factors exhibited nonlinear enhancement, whereas socioeconomic factors (GDP) exerted minimal influence.【Conclusion】Over the past three decades, the configuration of the three spaces in Xinjiang has undergone substantial transformation. The contraction of ecological space and concurrent expansion of production and living spaces have critically impacted habitat quality, which remains generally low and primarily regulated by natural conditions-particularly soil properties and hydrothermal regimes. Future strategies should prioritize the optimization of territorial spatial structures and strengthen ecological restoration efforts to ensure both ecological security and sustainable economic development in arid environments.

Keywords: production-living-ecological space; habitat quality; InVEST model; Geoprobe; Xinjiang

自改革开放以来，我国经济社会发展取得举世瞩目的成就，城镇化与工业化进程不断推进，与此同时也衍生出一系列制约可持续发展的现实问题，社会经济和资源环境的矛盾持续激化，人地关系失调，环境污染、生态服务功能退化等问题日趋严峻[1]。党的十八大报告从国家战略高度提出大力推进生态文明建设，优化国土空间开发格局，促进“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的国土空间开发与保护目标的实现。党的二十大报告进一步提出“严守资源安全底线、优化国土空间格局”的战略部署[2-4]。2023 年全国生态环境保护大会指出，要践行“绿水青山就是金山银山”理念，把生产、生活和生态一起抓[5]。因此，亟须深化典型区域“三生空间”演变与生境质量关系研究，揭示空间转型的生态环境效应，为支撑国土空间优化、实现高质量发展与生态安全协同提升提供科学依据。

“三生空间”研究横跨生态学、地理学、规划学等多个学科。国内外学者对“三生空间”的研究主要涵盖内涵与关系、分类体系、评价与优化、时空演变以及优化策略等多方面[6-8]。方法具体包括动态度模型[9]、转移矩阵[10]、重心迁移模型[11]、标准椭圆差模型、景观格局指数[12]、核密度分析[13]等。近年来，国内外学者从生境质量、生态安全格局、生态系统服务功能、生态承载力与敏感性、生态健康、城市 - 生态韧性等多个视角，开展了大量实证研究。生境质量通常采用实地调查、指标体系评价以及模型评估等方法进行评估。随着地理信息系统和遥感技术的应用，模型评价成为生境质量研究的主流，如 MaxEnt 模型、HIS 模型、SoLVES 模型、InVEST 模型等。其中，InVEST 模型被广泛使用。张学儒等[14]运用 InVEST 模型重建泛长三角地区生境质量空间格局，并对计算得到的生境退化度指数和生境质量指数进行等级划分与统计分析。常玉旸等[15]以京津冀地区为研究区，基于 InVEST 生态评估模型、Fragstats 景观格局指数测算平台，运用网格分析法，揭示了 2000—2018 年京津冀地区生境质量与景观格局演变特征，并且利用空间自相关理论，分析了二者空间关联性及其时序演变特征。周得龙等[16]以科尔沁沙地为研究区，融合 PLUS 模型与 InVEST 模型预测未来生境质量变化。生境质量研究尺度主要包括国家[17]、省[18]、城市群[19]、都市圈[20]、市[21]、流域[22]、自然保护区[23]等多个层级。虽有大量生境质量和“三生空间”相关的研究成果，但仍有两个显著的薄弱环节：在研究视角方面，尽管部分研究开始引入“三生空间”视角探讨生境质量变化，但通常未能深刻阐释这一功能视角相较于单纯地类视角的独特优势，其能更深入揭示“人类活动 - 空间功能 - 生态效应”内在传导机制，特别是在生态本底脆弱的干旱区，同样的地类转换所引发的生态功能退化，在“三生空间”框架下

能被更准确地识别，从而更直接地关联到国土空间功能的失衡；在研究区域方面，现有成果高度集中于我国中东部地区，但对于新疆这类西部干旱区典型地区，“三生空间”的动态交互机理及生态效应研究则相对匮乏。

基于此，本研究以新疆为研究区，聚焦新疆“三山夹两盆”的特殊地理格局，深入揭示“三生空间”独特的时空演变轨迹，突破当前研究认知对干旱区适用性的局限，阐明“三生空间”格局区别于中东部地区的转型路径。在此基础上，系统分析这种空间功能转型对区域生境质量产生的效应，明确其整体趋于改善还是退化的演变态势，以及主导这一效应的空间表征特征。同时，揭示驱动生境质量空间分异的核心机制，辨析空间分异源于人类经济活动的压力，还是以水热、土壤等自然因子非线性交互为主导，旨在深化对干旱区人地系统耦合机理的理解，为新疆及类似地区的国土空间精准管控与生态安全屏障巩固提供坚实的科学依据。

1　研究区概况

新疆地处中国西北边陲，地理坐标为 34°25′ ～ 49°10′ N、73°40′ ～ 96°23′ E，与俄罗斯、哈萨克斯坦等多个国家接壤，总面积约 166.49×10^4 km^2。该地属于典型的温带大陆性气候，降水稀少、蒸发旺盛，昼夜温差和年温差均较大，区域气候差异显著，生态环境极为脆弱。新疆是“一带一路”倡议中丝绸之路经济带核心区，经济社会发展迅速。在独特的自然地理格局下，“三生空间”呈现出复杂的动态演变特征，由此引发的地区环境污染问题较为突出，经济、社会与生态协调发展成为该区域发展中需重点关注的现实议题。

2　材料与方法

2.1　数据来源

本研究使用的 4 期（1990、2000、2010 和 2020 年）土地利用数据（30 m×30 m）、年平均降水量、年平均气温、年平均蒸散发、土壤类型、高程、GDP 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/Default.aspx）。基于高程数据，运用 GIS 计算得到坡度、坡向。基于自然属性的土地利用分类基础，采用“生产 - 生态 - 生活”三生用地三分法，以契合区域发展多维度需求，针对用地功能复合性问题，以行为主体主观用地意图界定主导功能，归并基础用地类型，构建“三生”土地利用主导功能分类方案（表 1）。

表 1　“三生空间”结构与土地利用类型衔接

Table 1　Connection between the structure of production-living-ecological spaces and land use types

一级分类 First level category	二级分类 Second level category	土地分类系统的二级分类 Secondary classification of land classification system
生产空间 Production space	农业生产空间	水田和旱地
	工业生产空间	其他建设用地
生活空间 Living space	城镇生活空间	城镇用地
	农村生活空间	农村居民点
生态空间 Ecological space	林地生态空间	林地、灌木林、疏林地和其他林地
	草地生态空间	高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地
	水域生态空间	河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地和海洋
	其他生态空间	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地和其他未利用地

2.2　研究方法

2.2.1　“三生空间”变化分析

1）“三生空间”转型分析。土地利用转移矩阵可以反映研究区初期与末期转移变化情况，描述其结构特征与各用地类型变化的方向 [24]。“三生空间”结构转型可以通过转移矩阵模型来实现，其表达式为：

$$s_{ij}=\begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{vmatrix}。\tag{1}$$

式中：s 代表面积；n 代表土地利用类型数；i、j 分别代表研究初期和研究末期的土地利用类型。

2）土地利用动态度分析。单一土地利用动态度表示某一区域某一土地利用类型在一定时期内的定量变化率，可反映各土地利用类型的变化情况。综合土地利用动态度可反映土地利用总体的变化态势，计算方法详见文献 [25]。

3）标准差椭圆分析。标准差椭圆常用于度量点数据或斑块重心的空间分布特征。本研究通过将各用地斑块面积赋值到其几何中心点，分析不同用地类型的空间分布方向与重心迁移趋势。标准差椭圆主要由转角、沿主轴（长轴）的标准差和沿辅轴（短轴）的标准差三个基本要素构成，具体定义及计算公式见文献 [26]。

2.2.2　生境质量评价

InVEST 模型自开发以来，在空间规划、生态补偿、风险管理、适应气候变化等环境管理决策领域中得到广泛应用 [27]。InVEST 模型中生境质量模块的基本原理是在生境质量和威胁因子之间建立联系，通过计算得到威胁因子对生境的影响程

度。模型中涉及的主要参数包括威胁源影响范围及其权重、生境适宜度和生境对各威胁源的敏感度，其主要公式为：

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}{}^{z}}{D_{xj}{}^{z}+k^2}\right)\right]。\quad（2）$$

式中：Q_{xj} 为栅格 x 中土地利用类型 j 的总量；H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜性；z 为默认常数；k 为半饱和常数；$D_{xj}{}^{z}$ 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度，其中 D_{xj} 公式为：

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{y_r}\left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^{R}w_r}\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr}。\quad（3）$$

式中：R 为威胁因子个数；y_r 为威胁因子 r 的栅格数量；w_r 为威胁因子 r 的权重；r_y 为栅格单元受到保护的程度；i_{rxy} 为威胁因子 r 对生境的水平胁迫；β_x 为可接近水平；S_{jr} 为土地利用类型 j 对威胁因子 r 的敏感度。

本研究参考朱增云等 [28]、樊影等 [29]、翟玉鑫等 [30] 的相关研究及 InVEST 模型指导手册，结合研究区实际情况设定相关参数（表 2 和表 3）。

表 2　威胁因子的设定
Table 2　Threat factor setting

威胁因子 Threat factor	最大胁迫距离 Maximum distance of influence /km	权重 Weight	空间衰减类型 Decay type
农业生产空间 Agricultural production space	5	0.05	线性衰退
工业生产空间 Industrial production space	11	0.25	指数衰退
城镇生活空间 Urban living space	10	0.32	指数衰退
农村生活空间 Rural living space	7	0.16	指数衰退
其他生态空间 Other ecological spaces	6	0.22	线性衰退

表 3　“三生空间”对各威胁因素的生境适宜性和敏感性
Table 3　Habitat suitability and sensitivity of three-living spaces to various threat factors

“三生空间”类型 Three-living spaces type	生境适宜度 Habitat suitability	“三生空间”类型对威胁因素的敏感性 Sensitivity of three-living spaces types to threat factors				
		农业生产空间 Agricultural production space	工业生产空间 Industrial production space	城镇生活空间 Urban living space	农村生活空间 Rural living space	其他生态空间 Other ecological spaces
农业生产空间 Agricultural production space	0.50	0	0.80	0.80	0.70	0.40
工业生产空间 Industrial production space	0	0	0	0	0	0
城镇生活空间 Urban living space	0	0	0	0	0	0
农村生活空间 Rural living space	0	0	0	0	0	0
林地生态空间 Woodland ecological space	1.00	0.60	0.85	0.85	0.80	0.70
草地生态空间 Grassland ecological space	0.75	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
水域生态空间 Water area ecological space	1.00	0.45	0.50	0.70	0.60	0.60
其他生态空间 Other ecological spaces	0.20	0.20	0.60	0.50	0.30	0

2.2.3　生境贡献率

生境贡献率基于某种土地利用转变引起区域生境质量升高或降低的比率，量化生境质量对土地利用变化的响应 [31]。三生空间转型的生态贡献率由生态贡献率公式转化而来，表达式为：

$$c_{it}=\frac{C_{it}A_{it}/A_{\mathrm{T}}}{\sum_{i=1}^{n}C_{it}A_{it}/A_{\mathrm{T}}}\times 100\%。\quad（4）$$

式中：c_{it} 为 t 时间段内 i 种“三生空间”变化类型生境贡献率；C_{it} 为 t 时间段内 i 种“三生空间”变化类型区块内生境质量变化平均值；A_{it} 为 t 时间段内 i 种变化类型面积；A_{T} 为区域总面积；n 为“三生空间”变化类型数量。

2.2.4　地理探测器

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的空间分析方法，主要优势为可以探测单因子影响和因子交互影响。结合新疆自然、气候、人文等特征，本研究选取高程（X1）、坡度（X2）、坡向（X3）、土壤类型（X4）、年平均气温（X5）、年平均降水量（X6）、年平均蒸散发（X7）、GDP（X8）等指标进行分析，用因子探测器确定单个驱动因子对生境质量空间分异的解释程度，用交互探测器确定任意两个驱动因子间是否存在交互解释能力。计算公式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{l}n_h\sigma_h^2}{n\sigma^2}。\quad（5）$$

式中：q 为驱动因子解释程度；n_h 和 σ_h^2 为第 h 层驱动因子的样本量和方差；n 和 σ^2 为全部样本量和方差。q 的取值范围为 [0,1]，值越大表明解释程度越高。

3 结果与分析

3.1 “三生空间”的演变特征分析

3.1.1 “三生空间”时空分布特征

对新疆1990年、2000年、2010年和2020年4期土地利用数据进行重分类，得到1990—2020年新疆“三生空间”用地面积变化情况。如表4所示，1990—2020年，新疆的“三生空间”以生态空间为主导，占比均超96%。其中生态空间中其他生态空间占比最高，1990年占比为61.08%，2020年占比为60.55%；草地生态空间次之，1990年占比29.83%，2020年占比29.61%。生产空间持续扩张，从1990年的3.50%增长到2020年的5.69%，其中以农业生产空间为主体。生活空间出现小幅增长，从1990年的0.23%增加到2020年的0.40%，呈现城镇、农村扩张的特征。1990—2000年，生态空间总体呈减少趋势，草地生态空间减少了9 513 km^2，林地生态空间减少了219 km^2，但水域生态空间增加了2 292 km^2；生产空间和生活空间均有所增加，农业生产空间增加了2 624 km^2，工业生产空间增加了57 km^2；生活空间中，城镇生活空间增加了127 km^2，农村生活空间增加了86 km^2。2000—2010年，生态空间呈明显下降趋势，林地生态空间减少了9 858 km^2，水域生态空间减少了8 426 km^2；生产空间和生活空间呈上升趋势，农业生产空间增加了10 228 km^2，城镇生活空间增加了706 km^2，增长幅度较为明显。2010—2020年，随着城镇化与工业化的快速推进，生产空间和生活空间继续增加，农业生产空间大幅增加了20 352 km^2，工业生产空间增加了1 561 km^2，城镇生活空间增加了762 km^2；生态空间持续减少，草地生态空间减少了2 969 km^2，林地生态空间减少了719 km^2，水域生态空间减少了7 850 km^2，其他生态空间也减少了7 848 km^2。1990—2020年，新疆“三生空间”呈现生态空间减少、生产和生活空间增加的趋势。林地生态空间持续减少，农业生产空间、工业生产空间、城镇生活空间及农村生活空间均呈增加趋势，其中农业生产空间增速最快，其余依次是工业生产空间、城镇生活空间、农村生活空间。

表4 1990—2020年新疆“三生空间”面积变化统计

Table 4 Area change statistics of the “three-living spaces” in Xinjiang from 1990 to 2020 km^2

年份 Year	生产空间 Production space		生活空间 Living space		生态空间 Ecological space			
	农业生产空间 Agricultural production space	工业生产空间 Industrial production space	城镇生活空间 Urban living space	农村生活空间 Rural living space	林地生态空间 Woodland ecological space	草地生态空间 Grassland ecological space	水域生态空间 Water area ecological space	其他生态空间 Other ecological spaces
1990	56 658	368	903	2 723	38 292	485 957	49 600	995 863
2000	59 281	426	1 030	2 810	38 073	476 444	51 893	1 000 307
2010	69 510	1 348	1 736	2 931	28 215	485 773	43 466	995 807
2020	89 861	2 909	2 497	3 624	27 497	482 804	35 617	987 959
1990—2000	2 624	57	127	86	−219	−9 513	2 292	4 444
2000—2010	10 228	922	706	122	−9 858	9 329	−8 426	−4 500
2010—2020	20 352	1 561	762	693	−719	−2 969	−7 850	−7 848

1990—2020年新疆“三生空间”的空间分布特征（图1）表明：1）生态空间集中于山地、荒漠绿洲过渡带及河流沿线。林地生态空间分布于天山、阿尔泰山、昆仑山。草地生态空间分布于伊犁河谷、巴音布鲁克高山草原、塔城盆地及天山南麓荒漠草原，集中于降水较多的西部山地和河谷。水域生态空间包括塔里木河、伊犁河、额尔齐斯河等流域的湖泊湿地及天山、帕米尔高原冰川覆盖区。其他生态空间分布于塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠及罗布泊等荒漠裸地区域。2）生产空间高度依赖绿洲。农业生产空间分布于天山南麓绿洲带和准噶尔盆地南缘绿洲。工业生产空间围绕资源产地和区域中心城市分布。3）生活空间沿绿洲蔓延。城镇生活空间主要包括天山北坡城市群、南疆环塔里木城镇圈以及边境口岸城市。农村生活空间主要分布于绿洲内部，沿城镇轴线扩张，农村绿洲分散，呈现北密南疏、西强东弱的分布态势。

3.1.2 “三生空间”数量结构转型特征

基于单一与综合土地利用动态度数据，1990—2020年新疆“三生空间”数量变化结果（图2）表明，生产空间中，农业生产空间单一动态度持续上升，1990—2000年为0.46%，2000—2010年为1.73%，2010—2020年为2.93%，但综合动态度逐年递减，

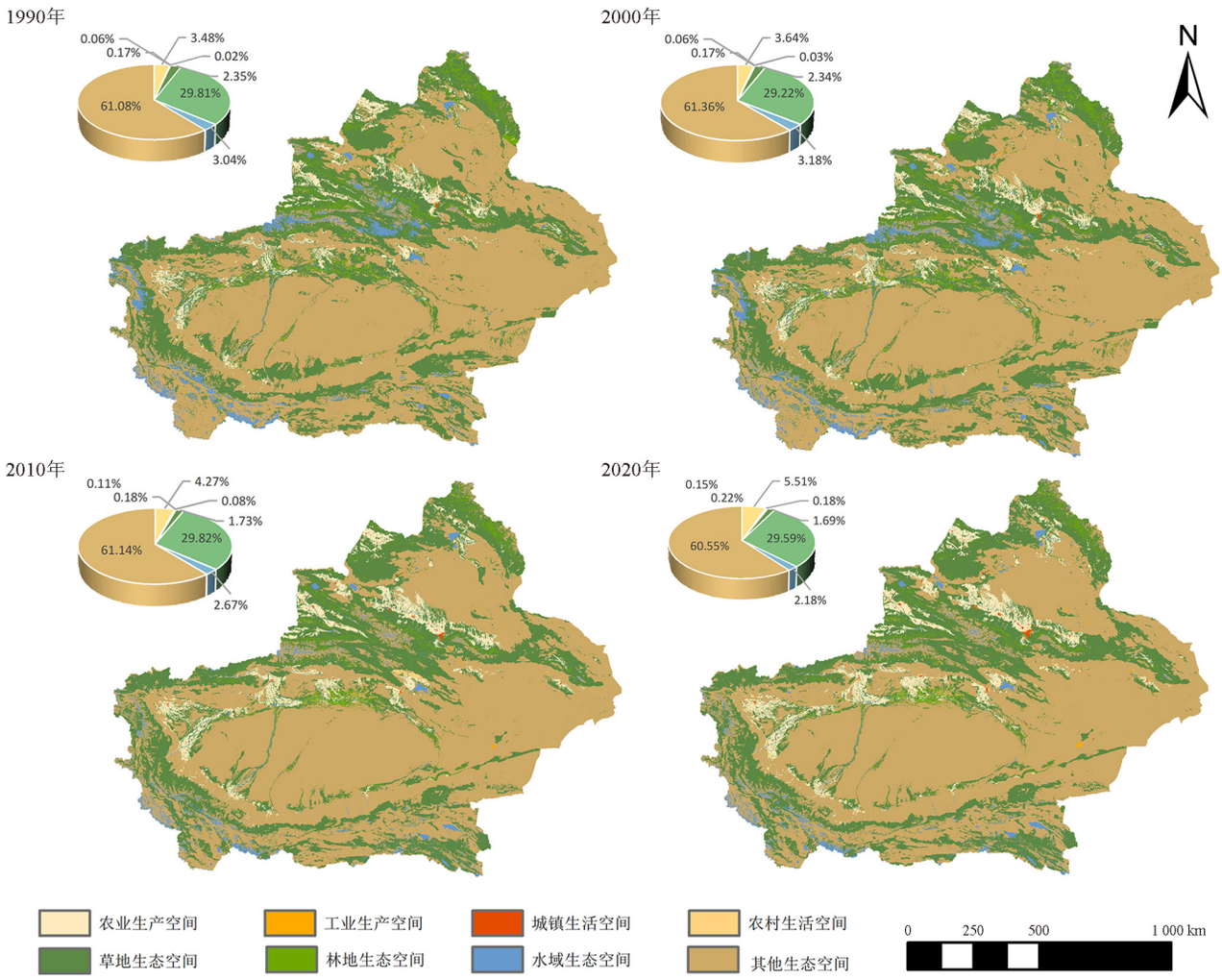


图 1　1990—2020 年新疆“三生空间”的空间分布

Fig. 1　Distribution of “production-living-ecological space” types in Xinjiang from 1990 to 2020

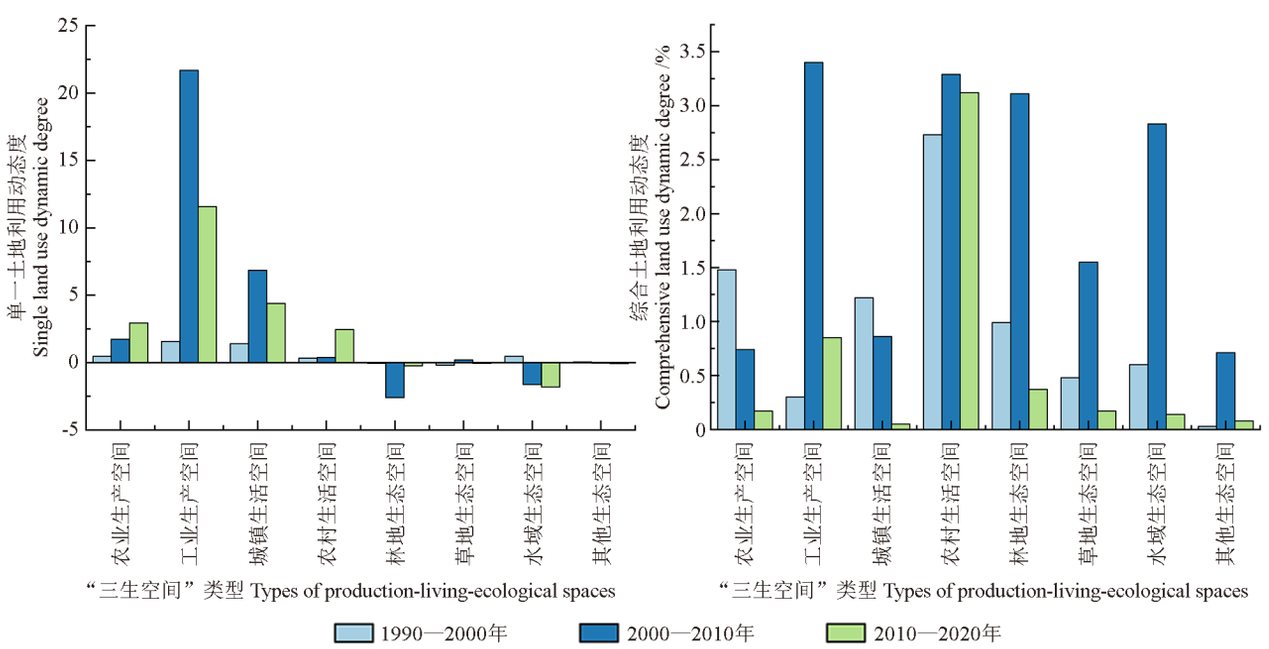


图 2　1990—2020 年新疆单一、综合土地利用动态度

Fig. 2　Single and comprehensive land use dynamics in Xinjiang from 1990 to 2020

从 1.48% 降至 0.74% 再降至 0.17%，反映其规模扩张速率逐步放缓；工业生产空间单一动态度波动显著，1990—2000 年为 1.56%，2000—2010 年为 21.67%，2010—2020 年为 11.58%，综合动态度呈先升后降的趋势，从 0.30% 升至 3.40% 再降至 0.85%，显示工业用地扩张强度后期减弱。生活空间中，城镇生活空间单一动态度呈先升高后降低的趋势，1990—2000 年为 1.40%，2000—2010 年为 6.86%，2010—2020 年为 4.39%；综合动态度从 1.22% 降至 0.86% 再降至 0.05%，表明城镇化推进速度趋于平稳；农村生活空间单一动态度后期明显上升，1990—2000 年为 0.32%，2000—2010 年为 0.37%，2010—2020 年为 2.44%，综合动态度始终保持较高水平，1990—2000 年为 2.73%，2000—2010 年为 3.29%，2010—2020 年为 3.12%，反映农村用地扩张具有较强的持续性。生态空间总体呈收缩态势，林地、草地、水域与其他生态空间的单一动态度在研究期间为负值，尤其是林地生态空间和水域生态空间，二者减少较为明显。

基于 1990—2000、2000—2010、2010—2020 年新疆“三生空间”转移矩阵数据，得到新疆“三生空间”转移特征，结果如图 3 所示。1990—2000 年，草地生态空间、其他生态空间和农业生产空间是主要转出源，草地生态空间大量转出，其中向农业生产空间转入 10 216 km^2，向林地生态空间转入 5 132 km^2，向其他生态空间转入 13 313 km^2；其他生态空间也有较多转出，向农业生产空间转入 2 938 km^2，向草地生态空间转入 22 012 km^2，向水域生态空间转入 3 915 km^2。2000—2010 年，工业生产空间转入规模大幅提升，同时，林地生态空间、水域生态空间转出量增加，林地生态空间向农业生产空间转出 2 745 km^2，向草地生态空间转出 17 748 km^2，水域生态空间向农业生产空间转出 556 km^2。2010—2020 年，城镇生活空间向工业生产空间转出 31.641 3 km^2，工业生产空间向其他生态空间转出 1 032 km^2；农业生产空间转出放缓，从 1990—2000 年大量转出转为 2010—2020 年主要转入，转入量达 78 153 km^2，农村生活空间转出量波动，显示城镇化后期空间优化调整；生态空间中，草地、林地生态空间转出趋势缓和，草地生态空间转出 8 484 km^2，林地生态空间转出 353 km^2，水域生态空间与其他生态空间仍持续转出，转出量为 2 559 km^2。

新疆“三生空间”各类型重心迁移差异显著。由图 4 可知，农业生产空间重心整体向东北移动，1990—2000 年迁移距离达 58 km；工业生产空间重心持续东移，2000—2010 年迁移距离达 97 km，布局东移态势明显；城镇生活空间重心呈“西南—东南—再回移”波动且整体南偏；农村生活空间重心向东北迁移但幅度小，分布相对稳定。生态空间中，林地重心略北移且稳定性高；草地重心 2010 年向东北大幅迁移 90 km；水域重心 2010 年向西南迁移 2 696 km；其他生态空间重心在东北 - 西南间摆动。从椭圆参数看，各空间形状指数普遍上升，水域生态空间形状指数从 0.631 6 提升至 0.803 7，表明空间分布由集中向分散或带状扩展，且水域分布不均匀。工业生产空间、农业生产空间椭圆面积显著增大，反映扩展明显；草地生态空间椭圆面积呈先增后减趋势。生产空间东移集聚，呼应“天山北坡经济带”战略；生活空间南倾，体现城镇推进与农村布局优化；生态空间波动，受气候和人类活动影响显著。

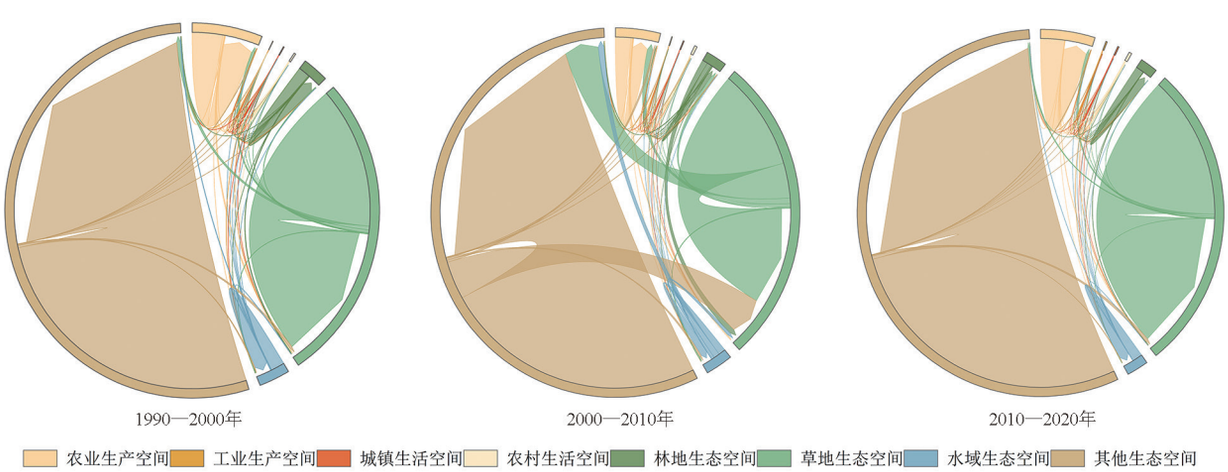


图 3　1990—2020 年土地利用转移变化特征
Fig. 3　Land Use Transition Characteristics in 1990-2020

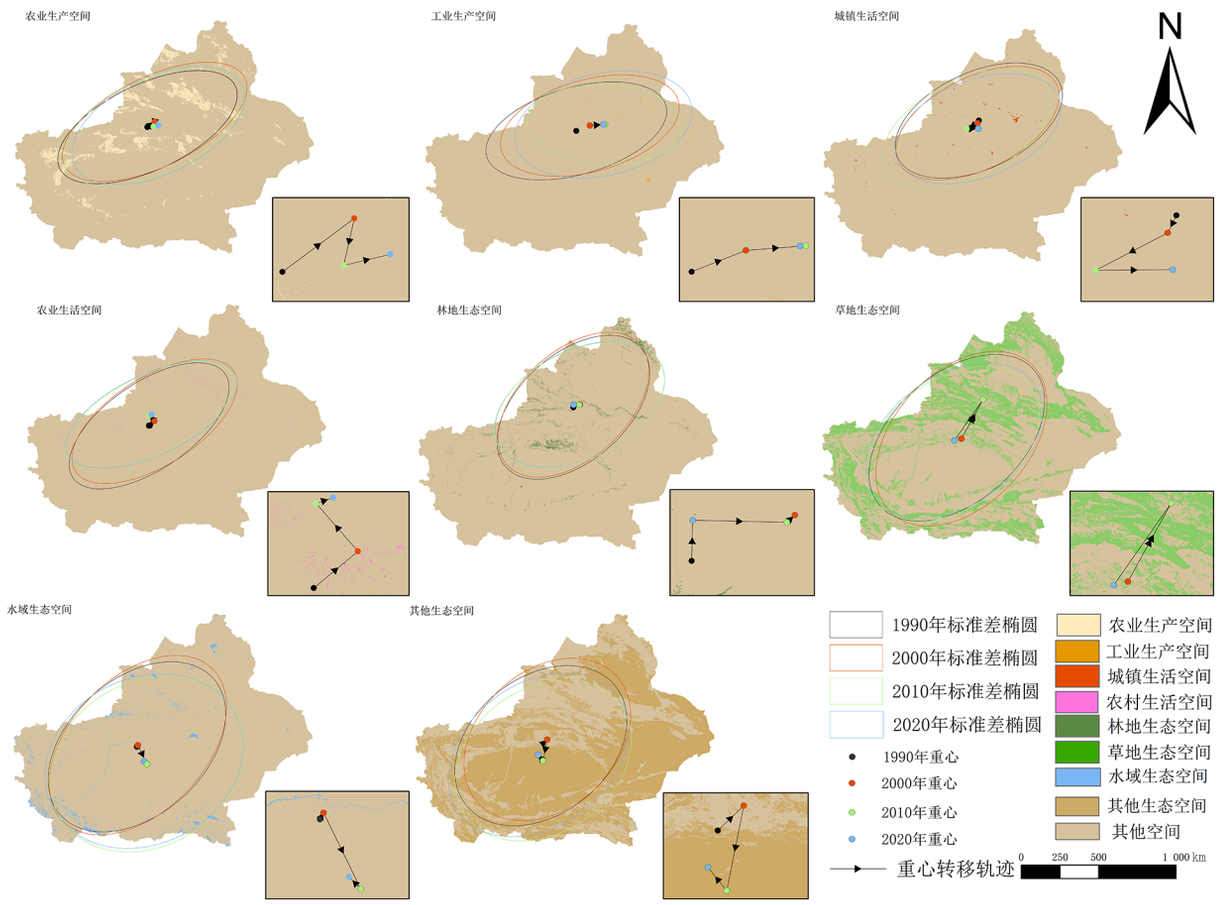


图 4　1990—2020 年新疆生产、生活、生态空间格局变化

Fig. 4　Changes in the spatial pattern of production, living, and ecological spaces in Xinjiang from 1990 to 2020

3.2　生境质量变化分析

3.2.1　生境质量时空变化特征

采用 InVEST 模型的生境适宜性评估模块评估研究区生境质量时空变化。利用自然断点法将生境质量划分为 5 个等级。研究期间，新疆生境质量空间分布格局呈现明显的“山区高、盆地低”特征。由图 5 可知，中高质量生境集中分布于天山、阿尔泰山等山区，低质量生境主要分布在塔里木盆地和准噶尔盆地等荒漠区域。低质量生境面积占比最高，其次为较高等级，高、中等级和较低等级面积占比较小。1990—2020 年，低质量和高质量等级区域面积呈减少趋势，较高质量等级区域面积比较稳定，较低质量和中质量等级区域面积略有增长。

1990、2000、2010、2020 年新疆生境质量均值分别为 0.416 924、0.415 168、0.407 582、0.408 397。1990—2020 年，较低质量等级区域面积不断增加，从 1990 年的 3 993 km^2 增加到 2020 年的 9 030 km^2；中质量等级区域面积占比从 1990 年的 3.47% 增加到 2020 年的 5.51%；高质量等级区域面积有所减少，从 1990 年的 87 762 km^2 减少到 2020 年的 62 036 km^2；新疆低质量等级区域面积占比超 60% 且 30 年间比较稳定，间接表明新疆生态系统比较稳定，不易受外界环境因素的影响。

3.2.2　“三生空间”转型的生态贡献率

基于 1990—2000、2000—2010、2010—2020 年“三生空间”转移生态贡献率数据，新疆“三生空间”变化对生境质量的影响呈现显著阶段性特征。由图 6 可知，1990—2000 年，其他生态空间转为草地生态空间的贡献率为 52%，转为水域生态空间的贡献率为 39%。同期，草地生态空间转为其他生态空间的贡献率为 -50%，林地生态空间转为草地生态空间的贡献率为 -36%。2000—2010 年，其他生态空间转为林地生态空间的贡献率达 85%，转为草地生态空间的贡献率为 81%，林地生态空间转为其他生态空间的贡献率为 -66%，农业生产空间转为城镇生活空间的贡献率为 -13%，农村生活空间转为草地生态空间的贡献率为 -15%。2010—2020 年，其他生态空间转为水域生态空间的贡献率为 92%，转为农业生产空间的贡献率为 58%，草地生态空间转为工业生产空间的贡献率为 -33%，水域生态空间转为其他生态空间的贡献

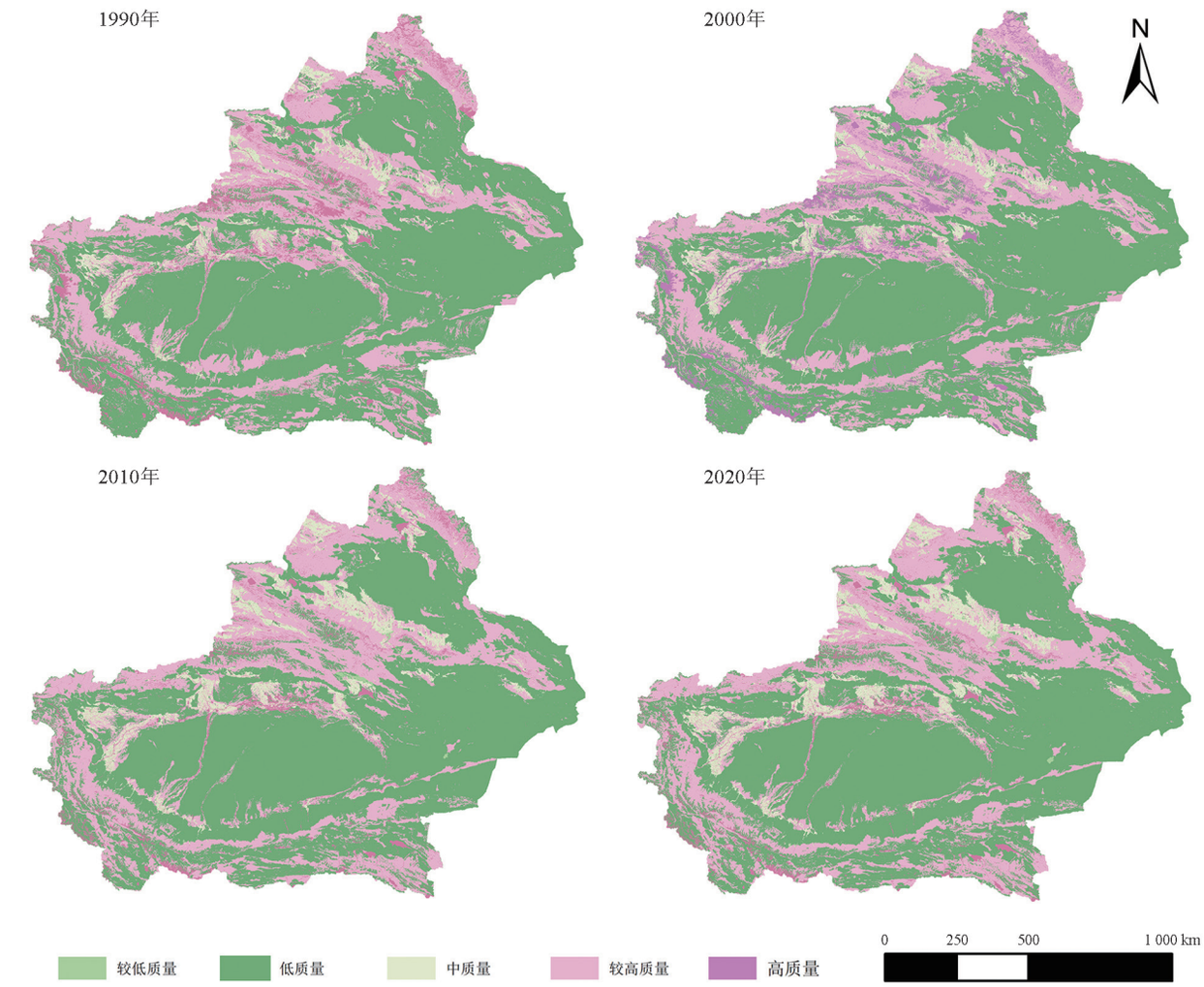


图 5　1990—2020 年新疆生境质量等级的空间变化

Fig. 5　Spatial variation of habitat quality levels in Xinjiang from 1990 to 2020

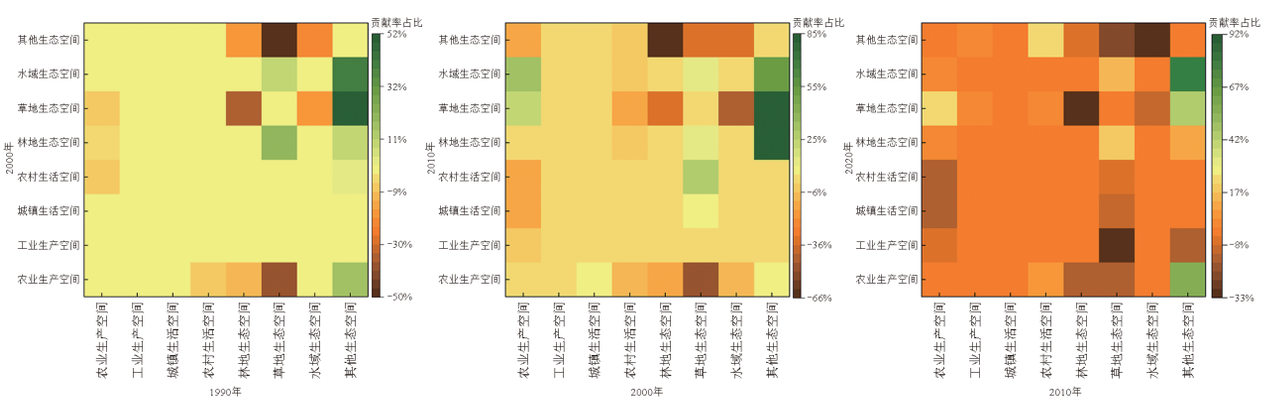


图 6　“三生空间”土地利用变化的生境贡献率

Fig. 6　Habitat contribution rate of land use change in production-living-ecological space

率为 -33%，农村生活空间转为其他生态空间的贡献率为 24%。30 年来，新疆生境改善得益于生态空间的良性转化，如其他生态空间向草地、水域、林地生态空间转化。生境退化源于城镇化、工业化进程中，草地、林地等生态空间向城镇生活、工业生产等非生态空间转变和部分时期草地、水域生态空间及农村生活空间向其他空间不合理转化。

基于生态贡献率的正负属性界定，生态贡献率为正值的“三生空间”转移类型，界定为生态环境改善型；生态贡献率为负值的转移类型，界定为生态环境退化型。以此分类标准为基础，结合新疆 1990—2020 年的“三生空间”转移数据，

可视化该区域近 30 年的生境格局动态演变过程，结果如图 7 所示。1990—2000 年生境退化面积高达 56 685 km^2，生境改善面积为 43 991 km^2。2000—2010 年，生境退化面积为 19 056 km^2，生境改善面积为 16 115 km^2，虽生境仍以退化为主，但改善面积显著增加。2010—2020 年，生境退化面积为 19 777 km^2，生境改善面积为 19 311 km^2。从空间分布来看，生境退化区域广泛分布，主要集中在绿洲边缘、工矿开发区域以及农业扩张地带，这些地区受人类活动的干扰，生态系统遭到破坏；而生境改善区域则零星分布在天山、阿尔泰山等山区以及部分生态保护区及河流沿岸。

3.3　生境质量的驱动因子分析

3.3.1　单因子分析

根据地理探测器因子探测结果（表 5），新疆生态环境质量的主要驱动因子按决定力（q 值）排序依次为：土壤类型、年平均降水量、年平均蒸

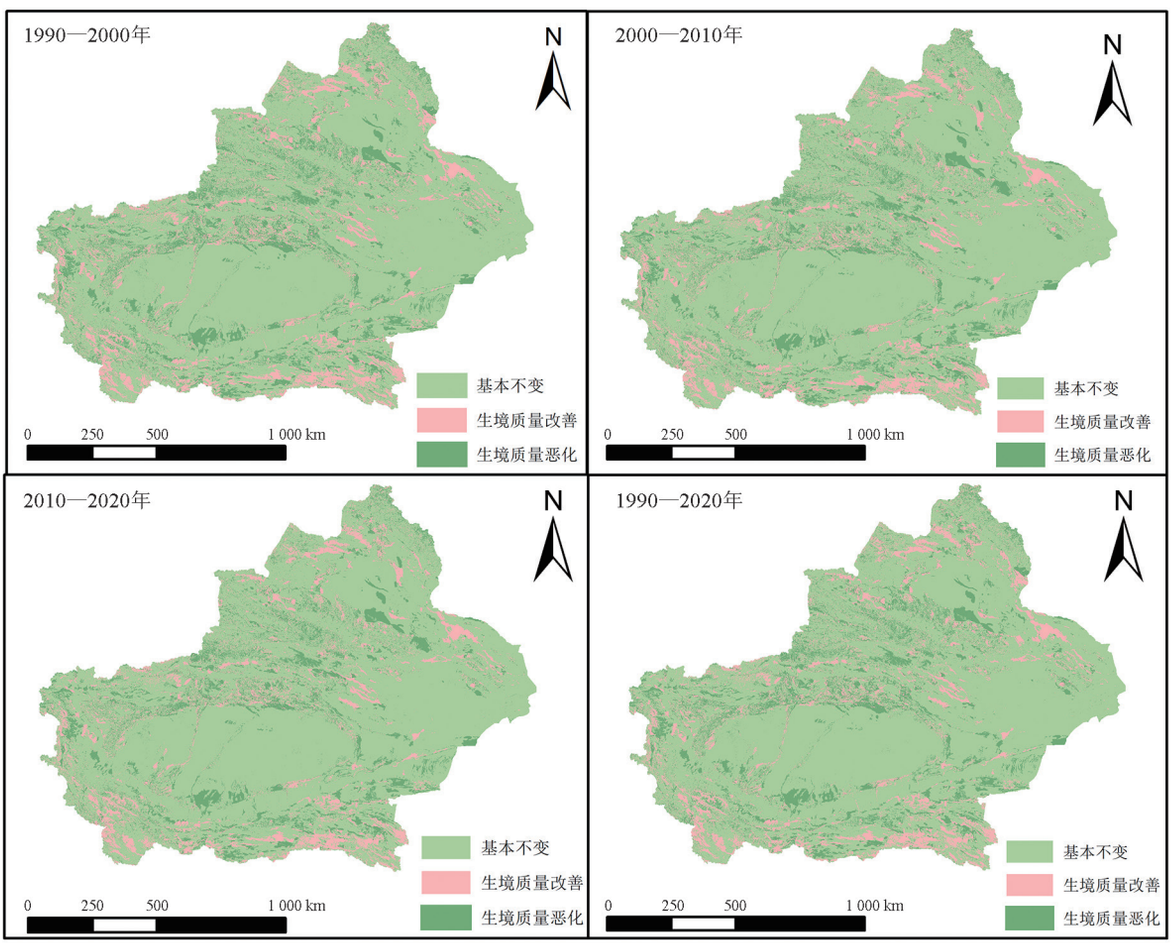


图 7　1990—2020 年新疆生境退化与改善空间格局

Fig. 7　Change patterns of habitat quality in Xinjiang from 1990 to 2020

表 5　生态环境质量单因子探测结果

Table 5　Single-factor detection results for ecological environment quality assessment

因子 Factor	1990 年 Year 1990		2000 年 Year 2000		2010 年 Year 2010		2020 年 Year 2020	
	q 值 q value	排序 Order	q 值 q value	排序 Order	q 值 q value	排序 Order	q 值 q value	排序 Order
高程 X1	0.142 2	5	0.140 7	5	0.141 1	5	0.140 3	5
坡度 X2	0.111 6	6	0.111 4	6	0.121 1	6	0.119 0	6
坡向 X3	0.001 0	7	0.001 0	7	0.000 9	7	0.001 0	7
土壤类型 X4	0.286 4	1	0.271 0	1	0.333 5	1	0.336 5	1
年平均气温 X5	0.183 1	4	0.188 7	4	0.204 7	4	0.204 1	4
年平均降水量 X6	0.184 4	3	0.193 4	3	0.241 1	2	0.238 4	2
年平均蒸散发 X7	0.188 8	2	0.193 4	2	0.231 7	3	0.218 1	3
GDP X8	0.000 5	8	0.000 1	8	0.000 3	8	0.000 3	8

散发、年平均气温。其中，土壤类型 q 值均值为 0.306 9，始终居于首位，表明其是影响生境质量空间分布的主导因子。高程和坡度的 q 值均值分别为 0.141 0、0.115 8，虽相对较低，但数值表现稳定，说明二者对生境质量仍具有一定的影响，且影响程度较为均衡。与之相比，坡向和 GDP 的 q 值极低，说明这两个因子对生境质量的影响极其微弱。上述探测结果表明，该地区生态环境质量更显著地受自然成土环境及水热条件的约束，而社会经济因素影响较弱。这一结果凸显出在生态保护中应重点关注土壤保持与水资源调控，实施针对干旱区生态系统的恢复与适应性管理策略，以提升区域生境质量与生态安全水平。

3.3.2　交互因子分析

基于单因子探测结果，结合新疆 1990—2020 年生态环境质量的交互探测分析（图 8）可知，生境质量空间分异并非受单一因子独立影响，而是受到多因子交互协同增强作用的驱动，且自然因子之间的交互贡献高于单因子独立作用。土壤类型与年平均降水量、土壤类型与年平均蒸散发以及土壤类型与年平均气温始终表现出最强的交互作用，其交互 q 值分别达到了 0.372 0、0.391 8 和 0.378 5，显示出水热条件与土壤属性耦合对生境质量空间格局的核心驱动作用。高程与年平均降水量、坡度与土壤类型等交互也表现出较强协同效应，高程与年平均降水量交互 q 值为 0.309 6，说明地形因子通过调控水热和土壤资源的空间再分配过程间接影响生境质量——不同海拔和坡位导致的水热再分布影响植被类型和覆盖度，而坡度与土壤类型则通过影响土层厚度和侵蚀敏感性间接制约生态系统健康。相比之下，GDP 与各自然因子的交互作用较弱，最高 q 值仅为 0.241 2，

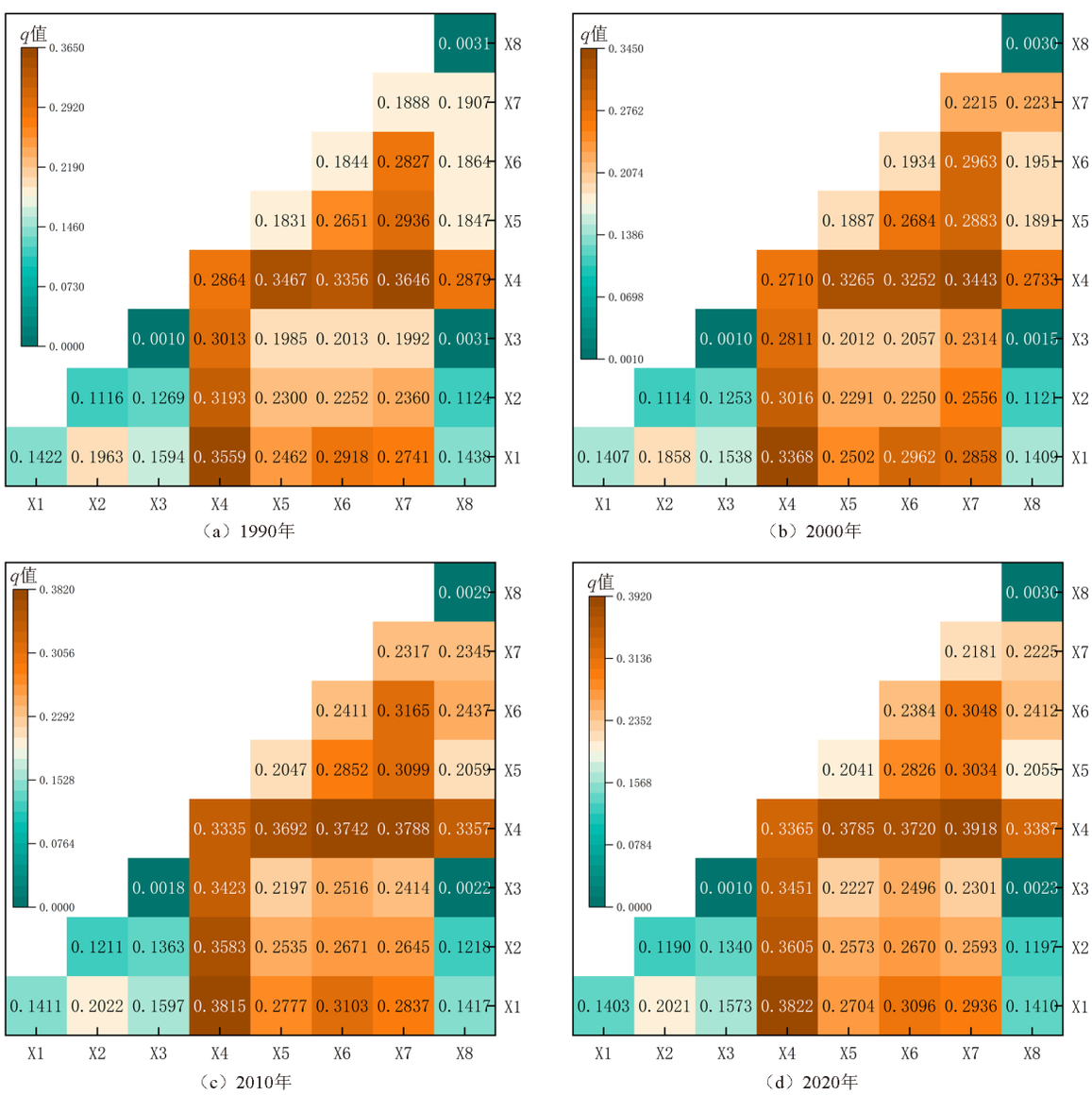


图 8　生态环境质量交互探测分析

Fig. 8　Interactive factor detection analysis of ecological environment quality

表明人类经济活动对生境质量的直接干扰有限，自然因子间的交互效应在更大程度上主导着生境质量的空间变异格局。土壤类型、气候因子与地形因子之间的交互协同效应始终主导着生境质量的空间异质性，其影响机制呈现明显的非线性增强特征，多因子耦合产生的解释力远超单因子独立作用，充分体现了干旱区生态系统对环境因子综合作用的敏感性和依赖性。

4　结论与讨论

4.1　结　论

1）新疆“三生空间”整体呈现“生态空间广布但持续收缩、生产生活空间零散分布而逐步扩展”的趋势。研究期间，林地、草地、水域等生态空间总面积共减少了 2.91×10^4 km^2；生产空间占比稳步扩张至 5.69%，其中农业生产空间增幅达 58.6%，工业生产空间增速呈先快后缓的阶段性特征；生活空间占比扩至 0.40%，扩张态势平稳。

2）生境质量均值长期稳定在 0.40 ～ 0.42，整体处于中等偏低水平，低质量生境占比超 60%，是区域生境质量的主导类型；中质量生境占比逐渐提升，累计升至 5.51%；高质量生境面积持续缩减，最终减至 6.20×10^4 km^2。空间分布上，生境质量呈现“山区高、盆地低”的分布特征，生境退化由面状蔓延转向局部点状扩张，改善区域多集中于生态工程实施区。

3）1990—2000 年新疆生境质量以退化为主，2000—2010 年退化与改善差距缩小，2010—2020 年二者基本持平，生态与经济协同性增强。生态空间的良性转化有助于生境改善，而非生态空间对生态空间的侵占则导致生境退化。

4）生境质量分异主要由自然因子主导，土壤类型、年平均降水量、年平均蒸散发为核心因子，且自然因子的交互效应呈非线性增强，社会经济因子影响微弱。凸显了干旱区生态系统对水热和土壤条件的敏感性。

4.2　讨　论

对新疆“三生空间”与生境质量时空演变进行分析，揭示了干旱区人地关系与生态响应的内在规律。本研究结论与万鼎等 [32] 在洞庭湖生态经济区、杨清可等 [33] 在长江三角洲核心区的研究结论相呼应，发现生态空间被生产与生活空间持续侵占，是导致新疆生境质量总体偏低且难以根本性改善的核心问题，这表明协调经济发展与生态保护的空间矛盾，是我国区域可持续发展面临的共性挑战。但与上述中东部区域研究不同的是，地理探测器的结果表明，新疆生境质量的空间分异主要受土壤类型、年平均降水量与年平均蒸散发等自然因子的绝对主导，社会经济因子的影响较小。值得注意的是，地理探测器得出的结论与生境退化区域主要集中在绿洲边缘、工矿开发区和农业扩张地带的描述看似矛盾，但这并非否定人类活动的重要性，而是揭示了人类活动作用的间接性与复杂性。在生态本底脆弱的新疆，水热条件和土壤属性构成的宏观自然地理格局是影响生境质量的主要因素。人类活动的影响是通过改变局部的地表覆被、土壤结构和水文过程，与气候、土壤等自然因子产生非线性交互效应，引发并加剧生境退化。因此，在干旱区生态系统中，自然因子的交互作用是生境退化的内在驱动机制，而人类活动则是关键的引发与放大因子。

本研究对新疆生境质量的评估也存在一定的局限性。一方面，研究采用的 InVEST 模型评估机制是通过累加各威胁因子的独立影响来计算总胁迫水平，这可能低估了多个威胁因子在空间叠加时产生的协同增强效应，这是该模型未来有待完善的理论环节。另一方面，针对新疆面积巨大、内部自然环境异质性极强的特点，参考指导手册、前人研究成果并根据实际情况，在全疆范围内对威胁因子的敏感性设置了参数，这种均质化的参数方案虽然保证了评估标准的一致性，并适用于大尺度的初步探索，但可能无法精准刻画不同生态区对同类人类活动干扰的响应差异，一定程度上削弱了模型结果在局部区域的精确性。未来的研究可考虑依据新疆内部的气候带、地貌单元或生态功能区进行分区，并结合实地调查数据对不同区域的模型参数进行本地化校准，以期获得更为精细和准确的评估结果，从而为差异化的区域生态保护政策提供更坚实的科学依据。

参考文献：

[1]　董冬 , 罗毅 , 顾康康 .“ 三生空间 ” 视角下长三角城市群土地利用转型生态环境效应时空分异及驱动力 [J]. 长江流域资源与环境 ,2023,32(8):1664-1676.
Dong D, Luo Y, Gu K K. Spatio-temporal differentiation and driving forces of eco-environmental effects of land use transformation in Yangtze River Delta economic zone: a perspective of “production-living-ecological” spaces[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2023,32(8):1664-1676.

[2]　吴绮琦 , 蒙吉军 . 近 40 年来黑河流域三生空间格局演变及其

驱动因素分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版),2023,59(6):970-980.
Wu Q Q, Meng J J. Analysis of the evolution and driving factors of production-living-ecological space pattern in the Heihe river basin from 1980 to 2020, China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2023,59(6):970-980.

[3] 魏超 , 吴洲 , 叶圣 , 等 . 三区视角下长江中游城市群国土空间格局演化及驱动力分析 [J]. 长江流域资源与环境 ,2024,33(7):1489-1503.
Wei C, Wu Z, Ye S, et al. Analysis of evolution and driving forces of land spatial patterns in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration from a three-zone perspective[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2024,33(7):1489-1503.

[4] 马彩虹 , 安斯文 , 文琦 , 等 . 基于土地利用转移流的国土空间格局演变及其驱动机制研究 : 以宁夏原州区为例 [J]. 干旱区地理 ,2022,45(3):925-934.
Ma C H, An S W, Wen Q, et al. Evolution of territorial spatial pattern and its driving mechanism based on land use transfer flow: a case of Yuanzhou district in Ningxia[J]. Arid Land Geography,2022,45(3):925-934.

[5] 张艳 , 江海云 , 杨维新 . 渭河流域 “ 三生 ” 空间格局演变特征及其驱动因素 [J]. 地球科学与环境学报 ,2025,47(4):718-732.
Zhang Y, Jiang H Y, Yang W X. Evolution characteristics and driving factors of production-living- ecological space pattern in Weihe river basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2025,47(4):718-732.

[6] 黄安 , 许月卿 , 卢龙辉 , 等 .“ 生产 - 生活 - 生态 ” 空间识别与优化研究进展 [J]. 地理科学进展 ,2020,39(3):503-518.
Huang A, Xu Y Q, Lu L H, et al. Research progress of the identification and optimization of production-living-ecological spaces[J]. Progress in Geography,2020,39(3):503-518.

[7] 刘继来 , 刘彦随 , 李裕瑞 . 中国 “ 三生空间 ” 分类评价与时空格局分析 [J]. 地理学报 ,2017,72(7):1290-1304.
Liu J L, Liu Y S, Li Y R. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of “production-living-ecological” spaces in China[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(7):1290-1304.

[8] 黄金川 , 林浩曦 , 漆潇潇 . 面向国土空间优化的三生空间研究进展 [J]. 地理科学进展 ,2017,36(3):378-391.
Huang J C, Lin H X, Qi X X. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space[J]. Progress in Geography,2017,36(3):378-391.

[9] 程甜 , 黄熠和 , 胡文敏 , 等 . 基于供需匹配的洞庭湖区生态保护利用空间识别 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(6):157-171.
Cheng T, Huang Y H, Hu W M, et al. Spatial identification of ecological protection and utilization in Dongting lake area based on supply and demand matching[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(6):157-171.

[10] 郭冯利 , 郎紫琦 , 朱梦瑶 , 等 . 江苏省 “ 三生空间 ” 时空演变与多情景模拟 [J]. 地理空间信息 ,2024,22(11):1-5,31.
Guo F L, Lang Z Q, Zhu M Y, et al. Spatio-temporal evolution and multi-scenario simulation of the “production-living-ecological space” in Jiangsu Province[J]. Geospatial Information,2024,22(11):1-5,31.

[11] 杨浩 , 卢新海 . 基于 “ 三生空间 ” 演化模拟的村庄类型识别研究 : 以湖南省常宁市为例 [J]. 中国土地科学 ,2020,34(6):18-27.
Yang H, Lu X H. Study on village type identification based on spatial evolution and simulation of “production-living-ecological space”: a case study of Changning City in Hunan Province[J]. China Land Science,2020,34(6):18-27.

[12] 王志炜 , 魏宇 , 李申 , 等 . 胶东半岛三生空间的时空演变与冲突测度研究 [J]. 环境工程技术学报 ,2023,13(1):386-393.
Wang Z W, Wei Y, Li S, et al. Spatio-temporal evolution and conflict measurement of ecological-production living spaces in Jiaodong Peninsula[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(1):386-393.

[13] 杨丽华 , 王俊业 . 广东省海洋生态效率的时空演化特征及响应策略 [J]. 中南林业科技大学学报 (社会科学版),2023,17(1):1-8.
Yang L H, Wang J Y. Spatiotemporal evolution and response strategy of Guangdong intercity marine ecological efficiency: based on the undesired output SBM model and the gravity model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences),2023,17(1):1-8.

[14] 张学儒 , 周杰 , 李梦梅 . 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析 [J]. 地理学报 ,2020,75(1):160-178.
Zhang X R, Zhou J, Li M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. Acta Geographica Sinica,2020,75(1):160-178.

[15] 常玉旸 , 高阳 , 谢臻 , 等 . 京津冀地区生境质量与景观格局演变及关联性 [J]. 中国环境科学 ,2021,41(2):848-859.
Chang Y Y, Gao Y, Xie Z, et al. Spatiotemporal evolution and spatial correlation of habitat quality and landscape pattern over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science,2021,41(2):848-859.

[16] 周得龙 , 王永芳 , 郭恩亮 , 等 . 科尔沁沙地生境质量演变与预测 [J]. 中国沙漠 ,2025,45(4):211-226.
Zhou D L, Wang Y F, Guo E L, et al. Evolution and prediction of habitat quality in the Horqin sandy land[J]. Journal of Desert Research,2025,45(4):211-226.

[17] 孔冬艳 , 陈会广 , 吴孔森 . 中国 “ 三生空间 ” 演变特征、生态环境效应及其影响因素 [J]. 自然资源学报 ,2021,36(5):1116-1135.
Kong D Y, Chen H G, Wu K S. The evolution of “production-living-ecological” space, eco-environmental effects and its influencing factors in China[J]. Journal of Natural Resources,2021,36(5):1116-1135.

[18] 金欣宇 , 赵先超 . 基于 MOP-PLUS 的湖南省三生空间和生境

质量动态模拟 [J]. 水土保持学报 ,2025,39(5):309-321,334.
Jin X Y, Zhao X C. Dynamic simulation of production-living-ecological space and habitat quality in Hunan Province based on MOP-PLUS[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(5):309-321,334.

[19] 如克亚·热合曼 , 阿里木江·卡斯木 , 哈力木拉提·阿布来提 , 等 . 基于 InVEST 模型的天山北坡城市群生境质量时空演化研究 [J]. 生态与农村环境学报 ,2022,38(9):1112-1121.
Rukeya·Reheman, Kasim·Alim, Halmurat·Ablat, et al. Research on the temporal and spatial evolution of habitat quality in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan mountains based on InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022,38(9):1112-1121.

[20] 唐晓叶 , 宁启蒙 . 长株潭都市圈生态系统服务权衡协同关系及其影响因素研究 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2025,34(2):44-53.
Tang X Y, Ning Q M. Study on the synergy of ecosystem services trade-offs and influencing factors in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan metropolitan area[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science),2025,34(2):44-53.

[21] 高周冰 , 王晓瑞 , 隋雪艳 , 等 . 基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测 [J]. 农业资源与环境学报 ,2022, 39(5):1001-1013.
Gao Z B, Wang X R, Sui X Y, et al. Multi-scenario prediction of habitat quality in Nanjing based on FLUS and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022,39(5):1001-1013.

[22] 张锦鑫 , 付航 , 傅宇钟 , 等 . 基于 InVEST 模型的西柳沟流域生境质量现状 [J]. 水土保持学报 ,2025,39(4):331-341.
Zhang J X, Fu H, Fu Y Z, et al. Current status of habitat quality in Xiliugou basin based on InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2025,39(4):331-341.

[23] 江岭 , 张大鹏 , 黄丹妮 , 等 . 平原农区全域土地综合整治“三生”空间格局优化效果评价 [J]. 测绘通报 ,2023(11):145-151.
Jiang L, Zhang D P, Huang D N, et al. Evaluation of the optimization effect of “ecological-production-living” spatial pattern for comprehensive land management in plain agricultural area[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2023(11):145-151.

[24] 朱会义 , 李秀彬 . 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论 [J]. 地理学报 ,2003,58(5):643-650.
Zhu H Y, Li X B. Discussion on the index method of regional land use change[J]. Acta Geographica Sinica,2003,58(5):643-650.

[25] 李婧 , 马莉 . 盐池县土地利用变化与生态环境的耦合关系 [J]. 中国水土保持科学 ,2020,18(2):19-25.
Li J, Ma L. Coupling relationship between land use changes and its eco-environmental effect in Yanchi County[J]. Science of Soil and Water Conservation,2020,18(2):19-25.

[26] 周浩 , 雷国平 , 杨雪昕 , 等 .RCPs 气候情景下三江平原典型流域耕地动态模拟 [J]. 农业机械学报 ,2017,48(10):121-133.
Zhou H, Lei G P, Yang X X, et al. Simulation of cultivated land under RCPs scenarios in typical basin of Sanjiang plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(10):121-133.

[27] 韩宇 , 毛逸飞 , 杨伶 , 等 . 洞庭湖流域生境质量对 LUCC 的动态响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(6):148-157.
Han Y, Mao Y F, Yang L, et al. Dynamic responses of habitat quality to LUCC in the Dongting lake basin[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(6):148-157.

[28] 朱增云 , 阿里木江·卡斯木 . 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素 [J]. 生态学杂志 ,2020,39(10): 3408-3420.
Zhu Z Y, Alimujiang·Kasimu. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Yili valley based on geographical detector and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Ecology,2020, 39(10):3408-3420.

[29] 樊影 , 王宏卫 , 杨胜天 , 等 . 基于生境质量和生态安全格局的阿勒泰地区生态保护关键区域识别 [J]. 生态学报 ,2021,41(19): 7614-7626.
Fan Y, Wang H W, Yang S T, et al. Identification of ecological protection crucial areas in Altay Prefecture based on habitat quality and ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7614-7626.

[30] 翟玉鑫 , 张飞云 , 马丽娜 . 基于三生空间的博斯腾湖流域生境质量时空演变及预估 [J]. 干旱区地理 ,2023,46(11):1792-1802.
Zhai Y X, Zhang F Y, Ma L N. Evolution and prediction of habitat quality in the Bosten lake basin based on production-living- ecological space[J]. Arid Land Geography,2023,46(11): 1792-1802.

[31] 滕雅丽 , 谢苗苗 , 王回茴 , 等 . 资源型城市土地利用转型及其对生境质量的影响 : 以乌海市为例 [J]. 生态学报 ,2022,42(19): 7941-7951.
Teng Y L, Xie M M, Wang H H, et al. Land use transition in resource-based cities and its impact on habitat quality: a case of Wuhai City[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(19):7941-7951.

[32] 万鼎 , 谭勇 , 王志远 , 等 . 洞庭湖生态经济区三生空间格局演变及其驱动因素 [J]. 科学技术与工程 ,2024,24(22):9558-9568.
Wan D, Tan Y, Wang Z Y, et al. Pattern evolution and driving factors of production-living-ecological space in Dongting lake eco-economic zone[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(22): 9558-9568.

[33] 杨清可 , 段学军 , 王磊 , 等 . 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应 : 以长江三角洲核心区为例 [J]. 地理科学 , 2018,38(1):97-106.
Yang Q K, Duan X J, Wang L, et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects: a case study in the Yangtze River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica,2018,38(1):97-106.

[本文编校：谢荣秀]