

黄河流域上游城市群三生空间时空 演化特征及其变化稳定性分析

黄鑫¹, 李晓丹¹, 芦倩², 黄倩倩¹, 程文仕¹, 许艳¹

(1.甘肃农业大学管理学院,兰州 730070;2.甘肃农业大学资源与环境学院,兰州 730070)

摘要: 识别三生空间迁移演化规律并掌握其引发的空间性状改变情况,对优化国土空间布局、提高利用水平影响深远。以黄河流域上游城市群为研究对象,基于转移矩阵对研究区 2000—2020 年三生空间时空演化规律进行分析,并以此为基础,利用强度分析模型,从三生空间一、二级分类双重视角,就空间演化带来的变化稳定性问题进行讨论。结果表明:(1)20 年间,研究区三生空间转移变化活跃但发生数量和规模均呈缩减态势,空间转移以呼包鄂榆和宁夏沿黄城市群两地为主,呈东多西少分布特征,但以生态为主、生产和生活空间为辅的整体格局未发生改变。(2)20 年间,流域三生空间变化先强后弱,整体不稳定。生产和生活空间稳定活跃增加,减少趋于平缓,生态空间增加趋于平缓,但减少趋向活跃,前二者对生态空间的胁迫趋向常态。同时,流域三生空间内部彼此转移频繁,存在生产—生活及生活—生态 2 种稳定地系统性转变模式。(3)三生空间二级子类此消彼长的改变是生产、生活、生态空间变化的显性原因,而经济发展驱动、城市引力影响以及宏观政策指引则是引发流域三生空间演替变化的内在作用机制。(4)转移矩阵与强度分析模型的联合研究框架,有助于实现区域三生空间变化及其性状改变情况的一体化监测。提高空间利用效率,控制城市规模,坚持耕地保护,推行有效的空间退出机制,发挥宏观政策对空间流转的导引作用,将对研究区国土空间高质量利用产生积极影响。

关键词: 三生空间; 时空演化; 强度; 变化稳定性; 黄河流域上游城市群

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0184-11

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.024

Characteristics of Spatio-temporal Evolution and the Change Stability Analysis of Production-Living-Ecological Space of Urban Agglomeration in the Upper Reaches of the Yellow River Basin

HUANG Xin¹, LI Xiaodan¹, LU Qian², HUANG Qianqian¹, CHENG Wenshi¹, XU Yan¹

(1.College of Management, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070;

2.School of Resources and Environment, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070)

Abstract: Identifying the migration and evolution of Production-Living-Ecological space (PLE space) and understanding the changes of spatial characteristics triggered by it have a profound influence on optimizing the layout of national land space and improving utilization level. Taking the urban agglomeration in the upper reaches of the Yellow River basin as the research object, based on the transfer matrix, the spatio-temporal evolution rule of the PLE space in the study area from 2000 to 2020 was analyzed. On this basis, by means of the strength analysis model, the change stability brought by the spatial evolution was discussed and quantified, from the dual perspective of the primary and secondary classification of the PLE space, respectively. The results revealed that: (1) The spatial change of PLE space in the study area was active during the past 20 years, but with a decreasing tendency in the amount and the scale, which was also concentrated upon the Hubao Eryu urban agglomeration and the Ningxia urban agglomeration along the Yellow city cluster, with the distribution high in the east and low in the west. Nevertheless, the overall pattern was still dominated by the

收稿日期: 2022-12-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(42201431); 甘肃省社科基金项目(2022YB069); 甘肃农业大学校级项目(GSAU-ZL-2015-046); 兰州市科技计划项目(2021-1-143)

第一作者: 黄鑫(1986—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事土地评价研究。E-mail: huangx@gsau.edu.cn

通信作者: 李晓丹(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土地利用管理研究。E-mail: lixd@gsau.edu.cn

ecological space and the production and living space were followed. (2) During the past 20 years, the spatial change trend of PLE space in the basin was first strong and then weak, which was unstable as a whole. The increase of production and living space was active and stable, while the decrease tended to be gentle. The increase of ecological space tended to be gentle, but the decrease tended to be active, and the stress of the first two groups on the ecological space tended to be normal. At the same time, PLE space in the basin was frequently transferred to each other, and there were two stable systematic transformation modes of production-life, life-ecological. (3) The transformation of PLE space within the secondary classification level was the dominant reason for the change of production, living and ecological space, while the development of economic drive, the influence of urban attraction, as well as the guidance of macro policies were the internal mechanisms that caused the alternant change of PLE space in the basin. (4) The joint research framework of transfer matrix and the intensity analysis model would realize the integrated monitoring of change monitoring and the changes of the characteristics of the regional PLE space. The improvement of space utilization efficiency, regulation of urban scale, persistence of cultivated land protection, fulfillment of effective space exit mechanism, and giving play to the guiding role of macro policies on space transform will have positive impacts on the high-quality utilization of PLE space of the study area.

Keywords: Production-Living-Ecological space; spatio-temporal evolution; intensity; change of stability; urban agglomeration in the upper reaches of Yellow River Basin

国土空间是支撑各类社会经济活动的基本载体^[1]。改革开放以来,我国城镇化、工业化进程持续推进,有力保障经济高速发展的同时,也不可避免地激化人地矛盾,引发如土地低效利用、空间结构失衡、生态质量下降等次生问题,严重阻碍国土空间潜能发挥^[2]。面对困局,党的十八大提出以“三生空间”为蓝本的国土空间优化目标,开拓“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”协调发展新格局^[3]。三生空间基于土地利用类型结构、着眼土地利用功能视角提出,其源于土地利用体系,又高于类型分类系统,是对国土资源结构、功能逻辑联系的高度凝练与科学统一,对统筹资源利用、优化资源配置具有重要指导意义^[2]。因此,在土地利用基础上,科学划分三生空间、厘清其发展现状及变化特征,对优化地区国土空间结构,协同社会、经济、生态综合发展,保证空间规划治理体系有效落地具有积极影响。

在发展需求与政策导向交织作用下,学界围绕三生空间展开广泛探讨,涉及三生空间内涵与分类^[4],格局分析、模拟与因素检测^[2,5-6],功能识别、优化与联系^[7-8],空间冲突、重构与权衡^[9-10],三生转型及其生态效应^[11]等诸方面。总体来看,当前成果丰硕,为优化空间开发、调和空间竞争提供广泛支撑,但也存有不足:(1)过度关注三生空间数量上的增减变化和类型间的迁移流向,缺乏对其变化性状的有效认知、监测与诊断,特定时序内地区三生空间演化带来何种空间状态改变,是平缓、活跃或稳定的,空间转入转出等迁移过程引发何种空间趋势变化,是趋强、趋弱或平稳的等。此次研究将该类性状统称为“三生空间变化稳定性”,并将之定义为规定研

究期内,受自然、社会经济等驱动,各类空间不断发生迁移、改变与演化所导致的三生空间状态的改变情况,是趋于由某类空间向另外一类转变或继续维持前一状态不变的一种变化性状的综合描述,若其在不断变化中更趋于不变,则称其具有变化的稳定性。空间变化的稳定与否是空间演化的作用结果,对其探讨可弥补此研究方向关注的不足,在演化“前导过程”动态监测基础上,进一步从其引发的“后继效应”视角,实现变化发生强度、趋势及空间迁移稳定状态的实时监测,为管理者提供更具指向性的决策依据,如发现建设用地存在高强度转移,则予以干预和调控以遏制该趋势,使之趋于平稳防止过快城镇化。为此引入强度分析模型,从要素整体、要素内部、要素之间3个自上而下的不同层面,通过测算要素迁移变化发生的强弱,反馈对象的变化稳定性状态。(2)目前三生空间研究尺度多样,涵盖国家级^[12]、行政区^[6,13]等多类范围。但整体看,流域尺度研究偏少,特别是对“流域城市群”这一复合目标鲜有关关注。此类空间对象,既具备流域所辖范围独特的自然条件属性,又具有城市与城市群独立且兼容并蓄的发展特征,对其三生空间时空演化规律及其带来的变化稳定性进行探讨,有助于全方位了解空间变化发生时的数量、方向、格局及发生后的强度、趋势与稳定性状,可为制定区域空间管理策略、开发个性与共性并存的研究范式提供参考案例。

黄河流域是中国九大流域片区之一,也是区域重要的生态屏障与经济文化发展中心,自然本底独特、生态环境脆弱^[5]。作为黄河水源涵养地和黄土高原水土流失重点保护区的上游地区,同时兼具生态韧性差、经济

发展过速等问题。改革开放特别是西部大开发以来,上游城市发展迅速,城市间社会经济往来日趋频繁,互动与联系逐渐增多,城市集群效应显著^[14]。区域三生空间的转移、开发与改造进入活跃期,空间利用、冲突与矛盾呈现高发态。虽然当前正有序开展国土空间规划,但对区域空间利用强度及其性状变化认知的不足,仍影响流域空间利用效能的高效发挥,而各自为政的利用格局也不利于流域城市群三生空间的协同发展,为地区生态保护与高质量发展带来挑战。科学分析流域城市群空间变化特征,将对转变空间利用方式、提高利用水平起到启示和推动作用。

综上,选定黄河流域上游城市群为研究对象,在划定三生空间分类标准基础上,借助转移矩阵、强度分析模型,对研究区 2000—2020 年三生空间格局的时空演化规律及其变化稳定性特征进行探讨,本次研究重点聚焦于:(1)引入变化强度与变化稳定性理念至三生空间领域;(2)构建时空演化与变化稳定性协同分析框架,形成以流域城市群为对象,以三生空间时空演化与变化稳定性水平监测为核心的研究范式;(3)分析并讨论空间变化发生的原因及其内在作用机制,以期为区域国土空间高质量利用提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域地处 95°50′00″—119°06′00″E, 32°06′00″—41°48′00″N, 横跨中国东、中、西部广大地区,总面积约 79.5 万 km²^[5]。根据河道流经区自然和水文情况不同,又细分上、中、下 3 个流域子区^[15]。其中

上游覆盖青海、甘肃、宁夏等省区,下辖兰西、呼包鄂榆和宁夏沿黄 3 大城市群,国土面积、人口和经济占比总量分别为 14.82%, 6.53%, 9.62%^[16]。改革开放特别是西部大开发来,上游城市群社会经济发展迅速,工业化与城镇化持续推进,交通、水利等基础设施逐步完备。地区快速发展的同时,也较大幅度改变原有国土空间的利用结构、格局与强度(图 1)。

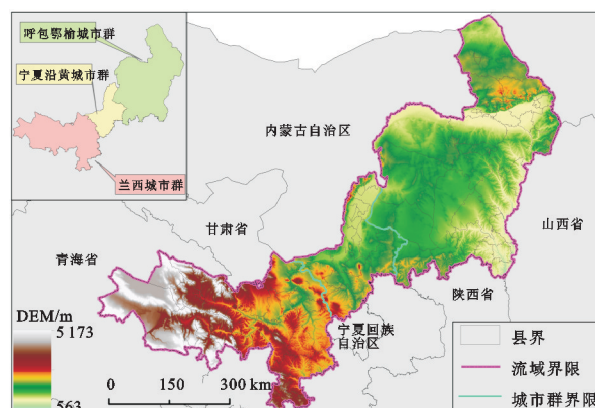


图 1 研究区域

1.2 数据来源与空间分类

研究数据为 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期土地利用/覆被遥感监测数据,源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),分辨率 1 km×1 km。数据集包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类,并依据土地自然资源属性细分为 25 个子类。依据三生空间内涵及其功能理论^[2,17],结合空间分类研究成果^[6,18],将其划分为生产、生活和生态 3 个一级大类和 7 个二级子类(表 1)。

表 1 黄河流域上游城市群三生空间分类系统

一级空间	二级空间	具体子类
生产空间	农业生产空间	水田、旱地
	工矿生产空间	工矿交通等建设用地
生活空间	城镇生活空间	城镇用地
	农村生活空间	农村居民点用地
	绿色生态空间	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地、高、中、低覆盖度草地
生态空间	蓝色生态空间	河渠、湖泊、水库和坑塘、冰川和永久积雪地、滩地
	灰色生态空间	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地

2 研究方法

2.1 转移矩阵

转移矩阵能将任意 2 期空间变化转移面积按矩阵方式排列,描述特定时段三生空间利用结构及类型功能的转移特征^[18]。

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: A 为面积; i, j 分别为研究期初与期末不同三生类型; n 为空间类型数量。

2.2 强度分析模型

强度分析模型最早由美国克拉克大学 Aldwaik 团队提出,用以在系统论框架内,通过间隔、类别及转换 3 个递推层次,逐级测算地类转换强度大小,揭示连续时间间隔内对象变化过程的稳定性情况^[19-22],模型结构^[23-25]分为 3 个层次。

2.2.1 间隔层次 反映不同时间间隔内三生空间变化强度的改变状况,将之与整体平均变化强度相比

较,以反馈在整个研究时序内三生空间变化的稳定性。假定 S_t 和 U 分别为各研究期和整体空间变化强度,若 $S_t=U$ 表示空间变化强度均匀无变,在研究时序内维持稳定;若 $S_t>$ 或 $<U$ 表示该时期空间变化强度呈增或减态,变化具有非平稳性。

$$S_t = \frac{\{ \sum_{j=1}^J [(\sum_{i=1}^I C_{tij}) - C_{tij}] \} / [\sum_{j=1}^J (\sum_{i=1}^I C_{tij})]}{Y_{t+1} - Y_t} \times 100\% \quad (2)$$

$$U = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \{ \sum_{j=1}^J [(\sum_{i=1}^I C_{tij}) - C_{tij}] \} / [\sum_{j=1}^J (\sum_{i=1}^I C_{tij})]}{Y_T - Y_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: S_t 为不同研究时限内三生空间变化强度; U 为整体研究时限内空间平均变化强度; C_{tij} 为某一时限内由期初 Y_t 时刻三生类型 i 转为期末 Y_{t+1} 时刻 j 的数量; J 为三生类型数量; T 为时间间隔数量。

2.2.2 类别层次 反映不同三生空间类型在不同时限内增加或减少的强度,将之与对等时限空间变化强度(S_t)相比较,反映不同三生类型增加或减少的活跃度。假定 G_{ij} 和 L_{ii} 分别为某一时限不同三生类型增加和减少强度,若 $G_{ij}=L_{ii}=S_t$,表明三生空间在该时限同比例转入并转出,各类型增减强度一致且与该时限三生空间变化强度一致,说明时限内该空间类型变化绝对稳定。若某一三生类型总转入强度 $>$ 同期变化强度 S_t ,说明类型增长活跃,反之为平缓;若总转出强度 $>S_t$,则说明类型减少活跃,反之为平缓;若某一三生类型在连续时限的增长或减少均表现活跃或平缓,则表明该类型在整个观测期具有稳定性。

$$G_{ij} = \frac{[(\sum_{i=1}^I C_{tij}) - C_{tij}] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{i=1}^I C_{tij}} \times 100\% \quad (4)$$

$$L_{ii} = \frac{[(\sum_{j=1}^J C_{tij}) - C_{iii}] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: G_{ij} 为某一时限内三生类型 j 的转入强度; L_{ii} 为类型 i 的转出强度; C_{iii} 为某一时限内期初类型 i 转为期末类型 i 的面积,即不变面积; C_{tij} 为期末类型 j 转为期末类型 j 的面积;其余参数同前。

2.2.3 转换层次 反映某一时限三生空间彼此间相互转移变化的强度,即由某一三生类型转变为其他类型的强度,分转入、转出 2 个层面。三生类型 n 转入视角[公式(6)、公式(7)]:假设某一时限期末三生类型 n 从期初 i 转入强度为 R_{tin} ,同一时限内期初各三生类型转为类型 n 的平均强度为 W_m 。若 $R_{tin}=W_m$,说明类型 n 从期初不同三生类型 i 转入的过程随机均匀;若 $R_{tin}>W_m$,说明三生类型 n 倾向从 i 获取转入面积,

反之为避免;若 n 在连续时限均表现倾向或避免,则说明其从类型 i 获取转入的过程具有时间上的稳定性;类型 m 转出视角[公式(8)、公式(9)]:亦存在对等关系。若 m 在连续时限内也表现一致的倾向或避免,则表明其向 j 转出过程同样具有稳定性。

$$R_{tin} = \frac{C_{tin} / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (6)$$

$$W_m = \frac{[(\sum_{i=1}^I C_{tin}) - C_{tmm}] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J [(\sum_{i=1}^I C_{tij}) - C_{tmj}]} \times 100\% \quad (7)$$

式中: R_{tin} 为某一时限内期初三生类型 i 到期末 n 的转入强度($i \neq n$); W_m 为同一时限内期初各三生类型转入为 n 的平均强度,其他同前。

$$Q_{tmj} = \frac{C_{tmj} / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{i=1}^I C_{tij}} \times 100\% \quad (8)$$

$$V_{tm} = \frac{[(\sum_{j=1}^J C_{tmj}) - C_{tmm}] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{i=1}^I [(\sum_{j=1}^J C_{tij}) - C_{tim}]} \times 100\% \quad (9)$$

式中: Q_{tmj} 为某一时限内期初三生类型 m 到期末 j 的转出强度($j \neq m$); V_{tm} 为同一时限内期初三生类型 m 转出为期末各类型的平均强度,其他同前。

由于转变强度识别繁冗复杂,杨建新等^[22]提出“交叉列联表”予以改进。根据研究时限与三生类型,构建 $n \times 2$ 网格矩阵,表示 n 个研究时限转入、转出 2 个方向下的三生转换模式(图 2): a 表示时间间隔 1 内三生类型 j 从 i 转入的倾向性, b 表示同时限内三生类型 i 转出为 j 的倾向性,真赋红假赋绿; c 、 d 与 a 、 b 同源,代表不同研究时限。若横向上 a 、 b 或 c 、 d 同色,说明该研究时限三生类型 i 向 j 具有倾向或避免态的系统性:即期初空间 i 倾向/避免转出为期末空间 j 且期末空间 j 也同样倾向/避免从期初空间 i 转入,称具有倾向/避免态的系统性^[22]。若纵向上 a 、 c 或 b 、 d 同色,表明研究时限内三生 i 向 j 的转换具有稳定性。四格同色则表示:三生 i 向 j 的转变是具有稳定特征的系统性变化,即 i 倾向/避免于向 j 转出, j 倾向/避免于从 i 转入,二者同时还在时间上保持转换的稳定性。

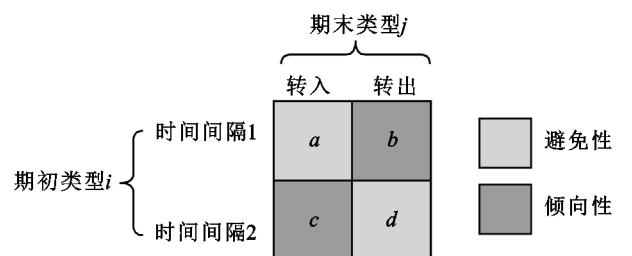


图 2 三生空间转移模式的交叉列联

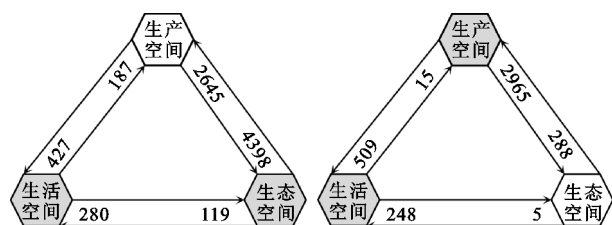
3 结果与分析

3.1 三生空间时空演化特征

3.1.1 时间特征 2000—2020 年,城市群三生空间此消彼长,变化特征不一。生产先减后增、生活持续增加、生态由增转减(图 3)。前 10 年,生产空间下降剧烈,总量由 71 719 km²减少至 69 726 km²,这一趋势与生产空间大幅转出至生态空间有关,累计转出 4 398 km²,这也与 1999 年起实施的退耕还林(草)工程高度吻合。后 10 年,生产空间转出减少但转入增长,因此出现反弹增加的变化趋势。2000—2020 年,生活空间平稳增加,总量由 5 192 km²增长至 6 330 km²。其间,生活空间转出发生量最小,转入面积较高,因此总量持续攀升。相较而言,生态空间变化波动性较大。前期增加得益于生产空间强力注入,后期减少是由于随着西部大开发推进和经济发展,流域开发对生产、生活空间需求增加,向生态空间扩张增强,加之两类空间向生态空间转入支援锐减,收支失衡导致生态空间快速下降。

3.1.2 空间特征 2000—2020 年城市群三生空间分布格局总体平稳,以生态为主,平均总占比 76.79%,生产和生活空间紧随其后(图 4)。生产空间分布广泛,呼包鄂

榆城市群集中在包头、呼和浩特和榆林等东部地区;宁夏沿黄城市群密集分布在宁夏平原,包括石嘴山、银川及中宁中部和通宁西北;兰西城市群东侧以兰州为中心,西侧以西宁、乐都城市带为轴线呈散射状,藏区分布较少。生活空间多以各级城市为圆心向外辐射,局地团簇化特征明显。生态空间横跨东西,区域连片性显著,并在鄂尔多斯高原、海东高原等地集聚。子类空间中,农业生产和绿色生态分布最广。灰色生态集聚在鄂尔多斯市杭锦旗北部、乌审旗和鄂托克旗南部,中卫市沙坡头北部及共和、海晏和贵南等地。除刘家峡、龙羊峡、青海湖等大型水源地,蓝色生态主要沿黄河干流分布。工矿生产和城镇生活空间多以城市为中心聚集,农村生活空间破碎而离散。



注:白色代表空间减少,灰色反之;箭头表示空间转移方向,数值为变化面积(km²)。

图 3 2000—2020 年三生空间转移网络

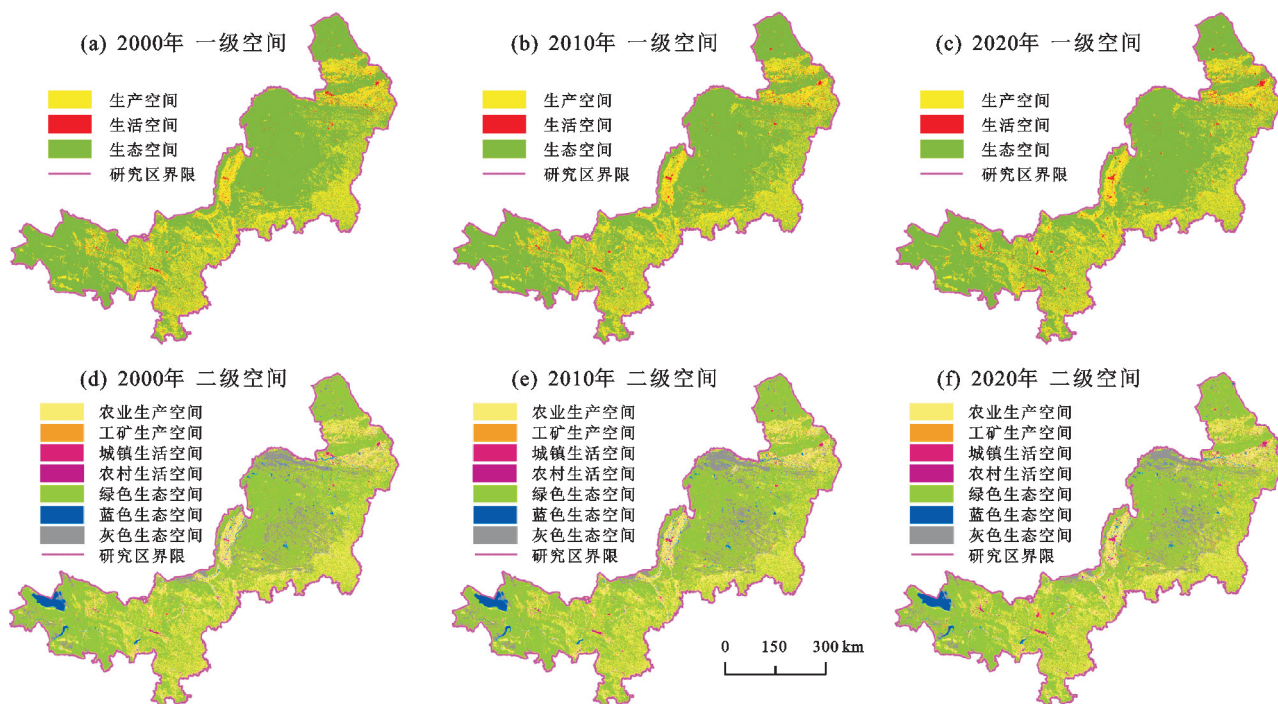


图 4 2000—2020 年黄河流域上游城市群不同分类粒度的三生空间分布

相比较而言,空间转移多发于流域中东地区,以呼包鄂榆和宁夏沿黄城市群为主。2000—2010 年,两地转移变化达 5 457,1 816 km²,占总转移量 67.91%和 22.60%。前者集中于包头、呼和浩特和榆林等东线地区,后者均衡分布在吴忠市盐池、红寺堡区、银川灵武和石嘴山。兰西城市群转移平缓,分布破碎离散,只占总变化量的 9.49%。各类变化中,生产—生态彼

此间的转移最剧烈,占总转移面积的 87.43%。2010—2020 年,空间转移仍集中于呼包鄂榆和宁夏沿黄城市群,但数量和范围都有显著缩减。前者多发于呼和浩特、鄂尔多斯和榆林,但较此前有南偏趋势;后者广泛分布在宁夏平原,集中在吴忠市红寺堡区以北。兰西城市群在兰州北部也出现明显转移团簇,主要是因为自 2010 年起,兰州新区作为第 5 个国家级新区在此

地开拔设立。各类变化中,生态向生产空间转移更为明显,占总转移面积的 73.57%(图 5)。

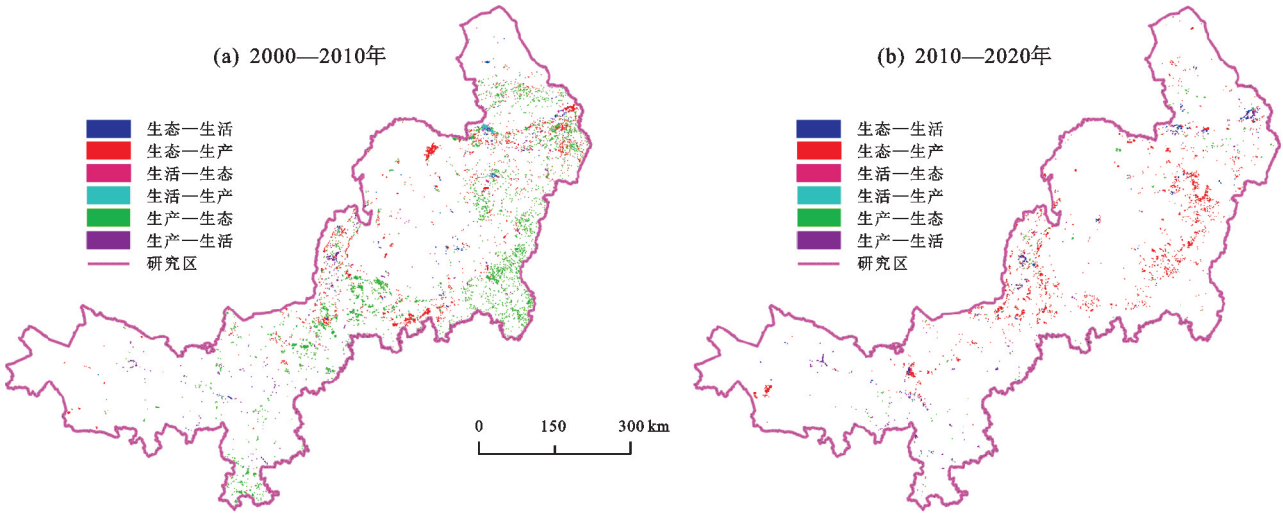


图 5 2000—2020 年黄河流域上游城市群三生空间格局转变特征

3.2 变化稳定性分析

3.2.1 间隔层次强度 2000—2020 年流域三生空间间隔层次变化强度分别为 0.243 和 0.122,相较于平均变化强度 0.183,呈先高后低变动特征,说明 20 年间,流域三生空间变化状态前后不一致,整体呈现出非平稳性(图 6a)。二级分类视角下间隔层次结果与一级结果一致(图 6b),变化强度同样先高后低于平均变化强度,说明不存在尺度因素导致的变异性问

题。图 6 左侧部分也表明,前期发生的空间变化面积比例远超后期,变化总量缩减,变化发生放缓。三重结果均证实,流域三生空间在 20 年的持续变化中并不稳定,整体呈前期较强、后期趋弱的变化特征。2000—2010 年是退耕还林(草)自启动到实施再到深化的重要时期,受政策导向约束与引导,此阶段发生的定向空间转移较剧烈,这也是导致空间变化不稳的主要原因。

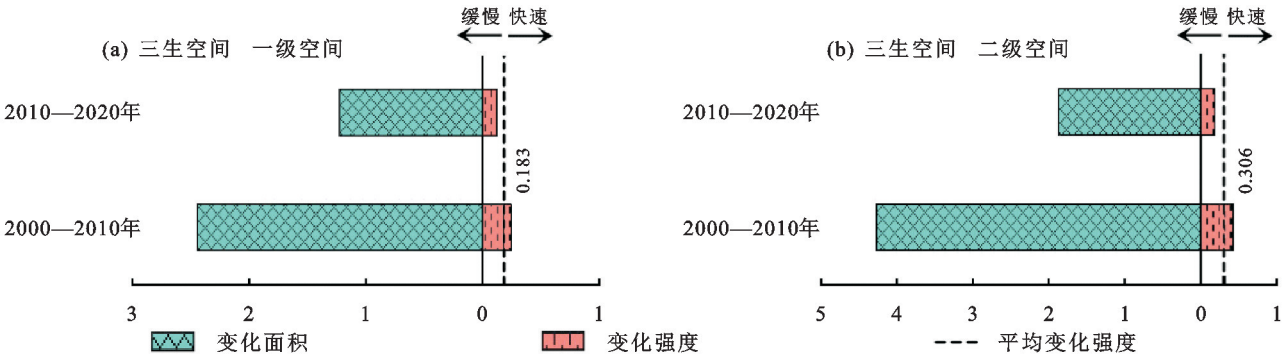


图 6 间隔层次三生空间不同分类粒度的面积及强度变化

3.2.2 类别层次强度 基于类别层次,进一步反馈不同空间类型增加或减少的变化情况(图 7)。20 年间,生产、生活空间总转入强度分别为 0.406,0.414 和 1.264,1.196,二者均高于同期平均变化强度 0.243 和 0.122,说明 20 年来,生产和生活空间的增加一直都较活跃并维持稳定。但同期,两类空间的转出则并不平稳。前 10 年生产、生活空间减少强度均高于同期平均变化强度,二者下降较活跃。后 10 年,二者转出强度均低于平均变化强度,空间减少趋缓。生产、生活空间转出强度前期活跃、后期迟滞,2 类空间减少在 20 年间并不稳定。生态空间强度变化与前二者相悖。20 年间,生态空间总转入强度为 0.177 和 0.012,均低于同期平均变化强度,表明其增长平缓而稳定,且后期缓和趋势显著高于前期。与转入相对,

20 年间生态空间总转出强度前低后高于平均变化强度,前 10 年减少缓和、后 10 年趋向活跃,空间转出前弱后强,变化也不稳定。值得注意的是,2000—2010 年生态空间转入量较大,达 452 km²/a(图 7a),但其强度变化并不活跃,远低于平均变化强度 0.243,这与生态空间基数庞大、转入量相对有限有关。这一现象也说明,空间转移数量与强度变化并不完全对等需要鉴别,强度分析是必要的。

从二级分类结果解析空间变化稳定性差异产生的原因(图 8)。对生产空间,20 年间农业生产空间转入强度为 0.372 和 0.105,均低于同期平均变化强度 0.427 和 0.185,空间虽稳定增加但表现平缓。相比下,工矿生产转入强度达 4.261 和 7.676,远超平均变化强度,是生产空间稳定增长的主因。20 年来农业和工矿生产转出呈

现一致的前期活跃、后期趋缓特性,这种前强后弱的变化状态使得生产空间转出最终不平稳。

对生活空间,20年间城镇和农村生活空间转入强度均高于同期平均变化强度,呈活跃增加的稳定态

势。2类空间共同加持下,生活空间平稳增长。同期,城镇和农村生活转出均呈前期活跃、后期趋缓的变化特征,使得生活空间转出最终也呈前强后弱的非平稳性。

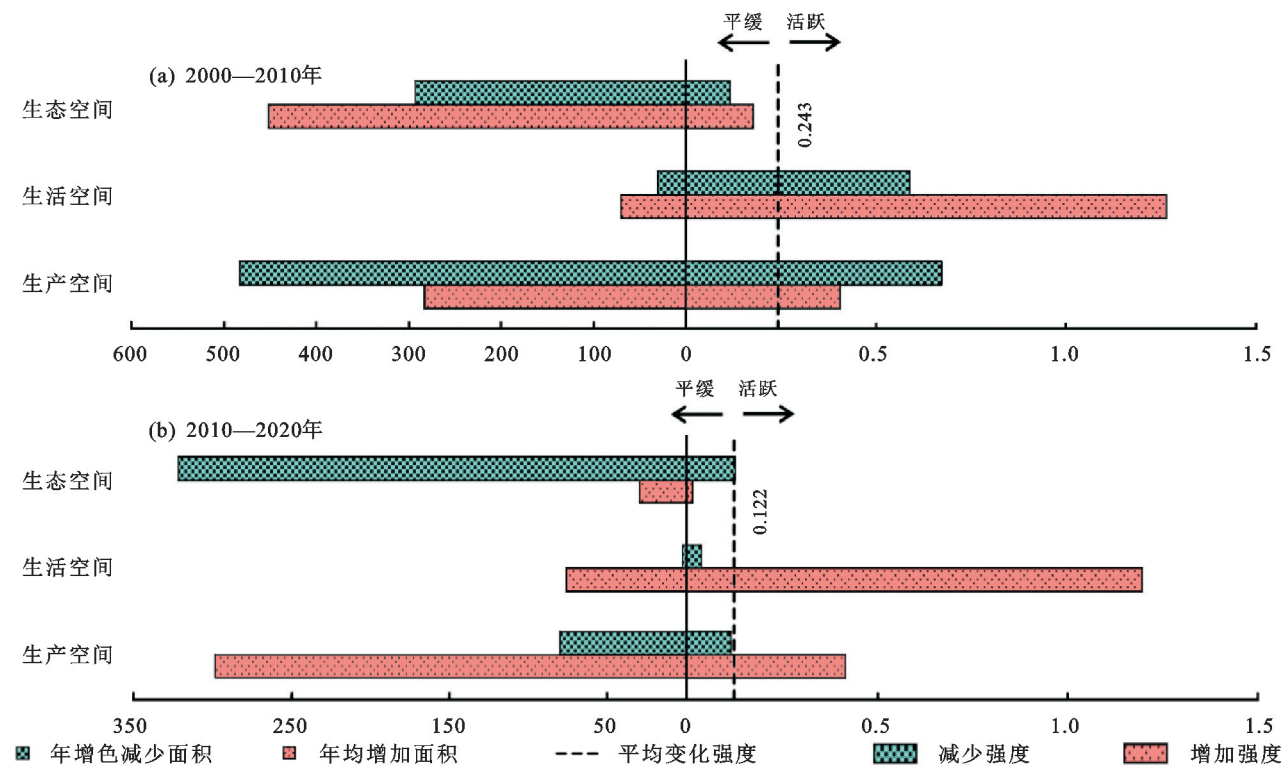


图 7 类别层次三生空间一级分类下的面积及强度变化

对生态空间,20年间绿色、蓝色生态空间转入都较稳定,前者平缓后者活跃,灰色空间转入先活跃后趋缓。三者协同使得生态空间转入呈平缓不活跃的

稳定特征。同期,绿色空间转出平缓,但蓝色、灰色空间转出趋于活跃,最终导致生态空间减少前弱后强不稳定。

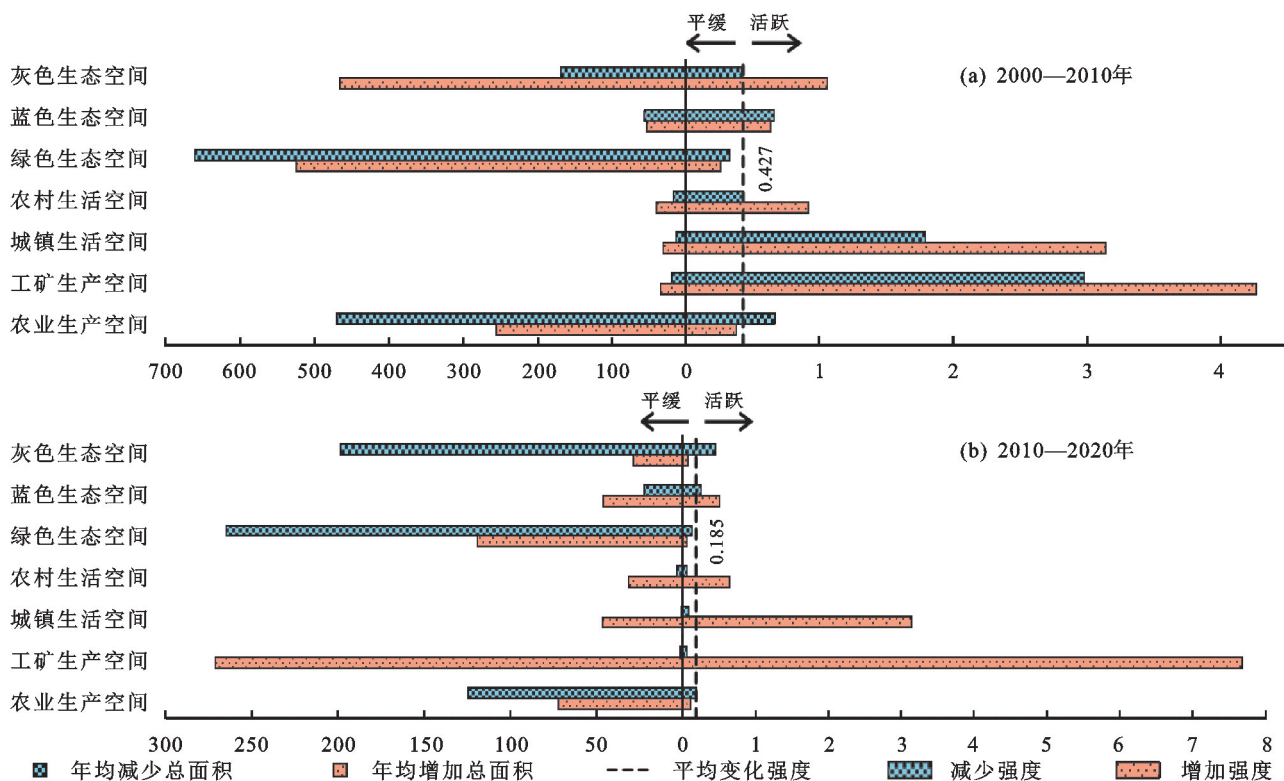


图 8 类别层次三生空间二级分类下的面积及强度变化

3.2.3 转换层次强度 基于转换层次原理,构建交叉列联表,进一步反馈空间彼此的转移变化特征(图 9、图 10)。

	生产空间		生活空间		生态空间	
生产空间						
生活空间						
生态空间						

图 9 转换层次三生空间一级分类的交叉列联

	农业生产	工矿生产	城镇生活	农村生活	绿色生态	蓝色生态	灰色生态
农业生产							
工矿生产							
城镇生活							
农村生活							
绿色生态							
蓝色生态							
灰色生态							

图 10 转换层次三生空间二级分类的交叉列联

由图 9 可知,20 年间 3 类空间内部转移频繁、模式多样,其中:生产—生活空间呈稳定的倾向性系统转换模式,即生活倾向由生产转入,生产也倾向转出为生活,二者在 20 年间保持转换的稳定性;类似地,生活—生态空间呈稳定地避免性系统转换模式。此外,生产避免转出为生态、生态倾向从生产转入、生活倾向转出为生产、生活避免从生态转入这 4 类转换也具有时间上的稳定性。整体来看,20 年间生态更倾向从生产空间转入,但生产和生活空间都避免转出为生态空间。

由图 10 可知,二级子类空间彼此的转移变化更显详尽,其中,农业生产—城镇生活、农业生产—农村生活等空间存在稳定的倾向性系统转换关系;农业生

产—灰色生态、工矿生产—农村生活等空间存在稳定的避免性系统转换关系。整体来看,农业生产与城镇生活、农村生活及工矿生产与城镇生活间倾向性的转移关系,是导致生产—生活空间出现稳定的倾向性系统转换关系的主要推力;城镇生活、农村生活与 3 色生态空间彼此相互避免的转移关系,则共同导致生活—生态空间出现稳定的避免性系统转换模式。

4 讨论

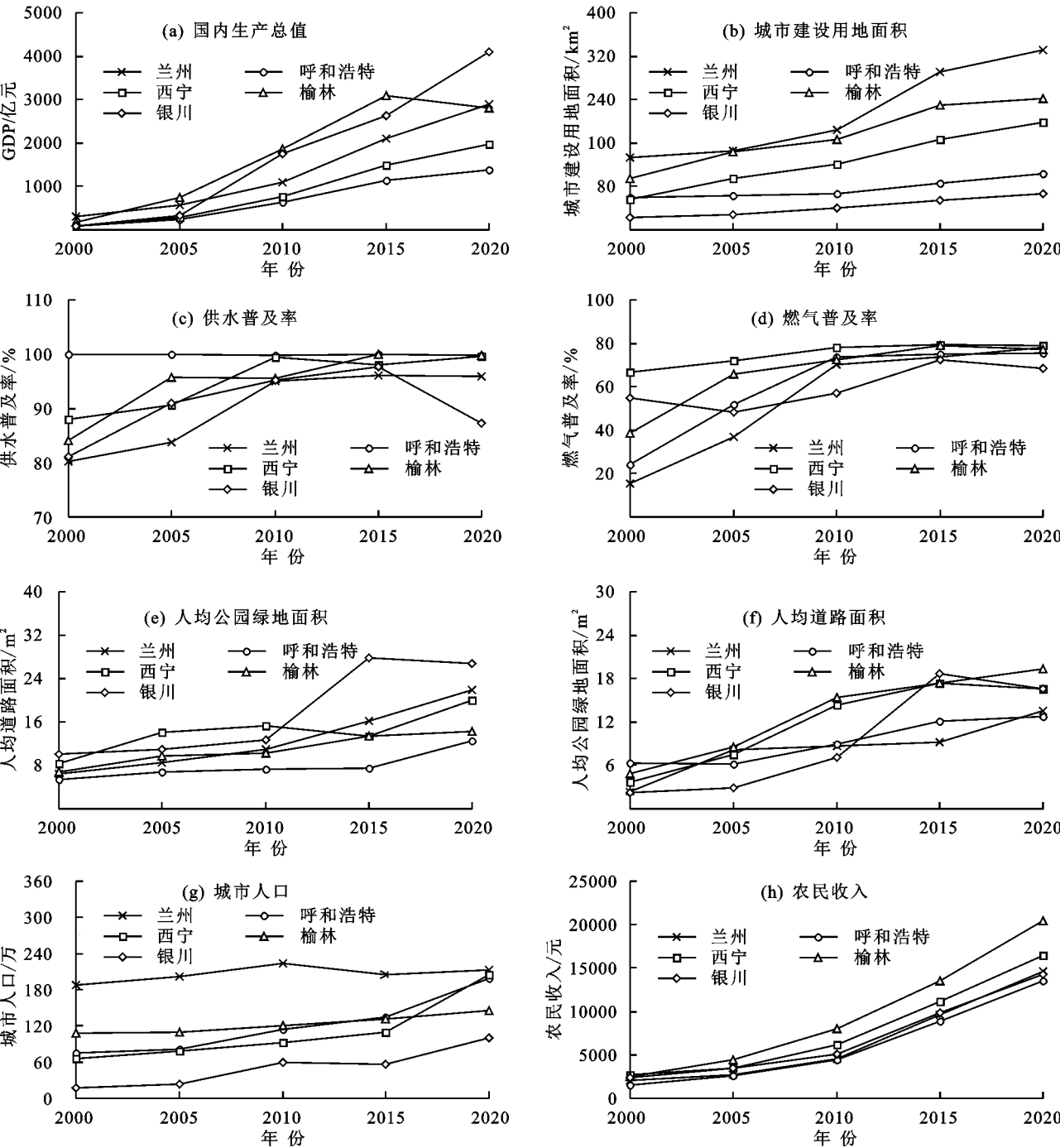
4.1 流域三生空间的实质变化与内在影响机制

2000—2020 年,黄河流域上游城市群三生空间持续变化。数量上,生态转出水平最高,生产转出与生态转入变动性最强,生活转入最为平稳。强度上,生活和生产保持高强度增加、低强度减少,生态增加强度锐减但其减少强度则超过平均强度临界值。变化状态上,流域空间转换稳定与不稳定并存,生产和生活保持稳定倾向性关系的同时,二者减少呈现一致的前强后弱不稳定性;生活和生态彼此稳定排斥的同时,生态减少前弱后强不稳定趋势明显。虽然三生空间在不同监测视角上的表象性变化繁复,但其变化特征的指向性整体趋于一致,多种状态变化均表明:

生产和生态空间的彼此转换在流域空间转换关系中占主导地位,但转换优势已由生产转出为生态导向为生态转出为生产,而流域生活空间的持续扩张也在稳步胁迫生态空间。流域空间利用的不协调性依旧存在。

前述分析已证实,二级空间此消彼长的迁移变化是生产、生活和生态一级空间演化发生的显性归因,但其对空间变化内在机制究竟如何仍缺乏解释力。三生空间变化是社会经济等诸要素综合作用的结果,纵观流域 20 年发展特征发现,经济的跃迁提升、城市化进程的迅速推进及宏观政策的强势注入对区域空间变化具有绝对影响力,具体而言:

(1)经济跃迁。2000—2020 年,流域经济增速明显,取得量级突破。以流域 4 大省会城市及榆林市为例,20 年来 5 大中心城市生产总值整体呈线性增长态势,年均 GDP 增量约为 120 亿元/a,与 5 大城市 2000 年平均 GDP 总量相当(图 11a)。经济的急速发展,有效提振流域开发力度、加速建设用地扩张(图 11b)。以工矿生产空间为代表(表 2、表 3),20 年间其面积总量由 675 km² 增长到 3 533 km²,平均转入变化强度约超整体平均变化强度 25 倍。可见经济发展大幅提升国土空间的开发力度,其对流域空间流转与稳定性状态也同样产生强力扰动。



注:数据源于中国城市、中国城市建设等统计年鉴^[26-27],缺失数据进行处理补齐,2000年部分指标统计口径不一,用后续临近年份进行替代。

图 11 流域中心城市 2000—2020 年社会经济发展指标

表 2 2000—2010 年黄河流域上游城市群三生空间转移矩阵 单位:km²

2000 年	2010 年								
	农业生产	工矿生产	城镇生活	农村生活	绿色生态	蓝色生态	灰色生态	小计	转出总量
农业生产	66339	62	181	238	3504	191	529	71044	4705
工矿生产	19	474	8	0	134	2	38	675	201
城镇生活	127	1	699	1	20	0	3	851	152
农村生活	55	4	31	4155	77	3	16	4341	186
绿色生态	1984	199	92	157	197650	265	3913	204260	6610
蓝色生态	179	16	3	3	206	8127	165	8699	572
灰色生态	197	70	5	20	1315	86	39456	41149	1693
小计	68900	826	1019	4 574	202906	8674	44120	331019	14119
转入总量	2561	352	320	419	5256	547	4664	14119	

表 3 2010—2020 年黄河流域上游城市群三生空间转移矩阵

单位:km²

2010 年	2020 年								
	农业生产	工矿生产	城镇生活	农村生活	绿色生态	蓝色生态	灰色生态	小计	转出总量
农业生产	67655	451	311	197	118	133	35	68900	1245
工矿生产	2	821	1	0	2	0	0	826	5
城镇生活	3	3	1010	3	0	0	0	1 019	9
农村生活	3	6	15	4545	2	3	0	4 574	29
绿色生态	400	1688	111	84	200259	136	228	202906	2647
蓝色生态	48	48	9	4	89	8454	22	8674	220
灰色生态	265	516	15	25	978	184	42137	44120	1983
小计	68376	3533	1472	4858	201448	8910	42422	331019	6138
转入总量	721	2712	462	313	1189	456	285	6138	

(2)城市引力。经济发展加持下,流域城市规模快速扩张,设施供应水平、交通便捷性、人居环境显著改善,城市对外吸引力提升,人口流入增加,城镇化水平大幅提高。以兰州市为例,2000—2020 年,以供水和燃气普及率为代表的城市设施供应水平约由期初的 80%和 35%提升至期末的 96%和 98%,人均道路及公园绿地面积也都有大幅改善,其他城市类同(图 11c~图 11f)。中心城市人口平稳增加(图 11g),积累数量庞大的住房空间需求,同样刺激住宅类建设用地的快速扩张,20 年间城镇生活空间由期初的 851 km²稳定增长到期末的 1 472 km²(表 2、表 3)。城市引力增加的同时,也降低农业生产收益对青壮年农村劳动力的吸引力。大批农民进城务工,一方面,诱发耕地撂荒与空心村等社会问题,劳动力的缺乏限制农业生产空间的利用活力,影响农业生产空间稳定发展,这也成为流域农业生产空间增加趋缓的动因之一;另一方面,弃农从工带来可观的收入增益,较大幅度提升农村居民购买力。5 大中心城市农民平均收入约由期初的 2 300 元提升至期末的 16 000 元,收入增加为农民购置、修缮或自主新建住房积蓄资本,在城市拥有房产同时保留或新建农村住房成为新选择(图 11h),在此背景下,农村生活空间由 2000 年的 4 341 km²增长到 2020 年的 4 858 km²(表 2、表 3)。上述改变,为流域城镇和农村生活空间的持续稳定增加奠定基础。另外,由于同为建设用地型空间,使生产和生活彼此间较易相互转换,因此出现生产—生活倾向性转换的作用关系。同时,又由于建筑特殊的用材与结构特征以及故土情怀和“家根”理念的文化遗产,又使得生产、生活空间,尤其是生活空间较难恢复为原始空间状态,这也导致生活空间避免转回生态空间。

(3)政策导引。黄河流域上游城市群自然条件脆弱,既承载水源涵养的重要功能,也面临水土流失、地表植被退化等生态问题,还需兼顾社会经济发展的强

烈诉求。这使流域人地矛盾、空间冲突等十分激烈。在此背景下,国家启动退耕还林(草)生态工程,将大批易造成水土流失和沙化的农业生产空间逐步有序恢复为林草植被等生态空间。工程于 1999 年试点启动 2002 年全面推行。2000—2010 年,由农业生产转出至绿色生态的面积高达 3 504 km²,占总转出的 74.47%,占绿色生态总转入的 66.67%(表 2、表 3)。由此可见,退耕还林(草)对生产和生态空间的迁移变化产生明显导向性影响,它也解释了前期“生产转生态”这种转移优势出现的原因,同时也说明相较于生活空间,为何生态空间更倾向从生产空间获得增益。与退耕还林(草)生态工程相对,国家于 1999 年 9 月十五届四中全会通过《中共中央关于国有企业改革和发展若干重大问题的决定》,提出西部大开发战略。该战略的逐步实施,为流域城市群经济发展打开通道,成为流域经济快速跃迁的重要基石。而发展需要空间予以支撑,相较代价高昂的改造与重建,广博的生态空间开发更易成为优先选择。因此,生态转出为生产并为生活空间提供支撑,又逐步成为 2010 年之后新的转移优势。

4.2 流域三生空间变化启示

3 种因素的循环嵌套与权衡推动流域三生空间演化改变。但黄河流域上游范围宽广,所辖城市众多、类型不同、发展基础不一,区域社会经济发展水平差异较大,空间变化强度与稳定性状态不尽相同,空间发展策略需因地制宜。如呼包鄂榆和宁夏沿黄城市群三生空间变化相较兰西城市群更为活跃,承受空间变化成本更高,对区域生态环境影响与改变也更强。因此这两地需加强区域空间变化性状监测,及时开展生态修复,提高空间利用效率。但整体来看,流域空间变化又兼具诸多共性,如流域工矿生产、城镇生活等空间增长极富活性,扩张倾向明显。面对此困局,可适当限制城市发展规模、适度调整产业结构、挖掘空间集约节约利用

潜力,引导工业化和城镇化进程向平稳有序方向过渡,同时打破城市界限,强化跨城市生态治理合作,提高交错区山水林田湖草共理力度,同守生态红线。群策群力互助互鉴,有助于尽快脱困。

此外,流域农业生产空间发展受限,影响区域粮食安全。需重视地区耕地保有问题,严格执行耕地保护制度,合理选址有效开展占补平衡,严守耕地红线。变化稳定性结果也显示,农村生活空间 20 年来持续增加却鲜有减少,需构建以“宅基地退出”为核心的“三生空间退出机制”,实现各类空间特别是生产、生活空间“进退无碍”,调控建设、农村宅基地等对流域有限空间的占有,打破其避免向生态空间转出和回归的壁垒。抓住黄河流域生态保护和高质量发展战略机遇期,重视政策引导功效,提高空间转移效益,探寻生态保育空间临界值,实现其与生产、生活发展空间的稳定共存与协调高质量利用。

5 结论

(1)2000—2020 年,黄河流域上游城市群三生空间转移变化活跃,但以生态为主、生产和生活为辅的空间分布格局整体维稳。空间转移主要发生在呼包鄂榆和宁夏沿黄城市群,呈东密西疏分布特征,转移方向前期以向生态空间转入为主,后期以生态转出反哺生活、特别是生产空间为主,但空间变化数量和转移规模均呈明显缩减态势。

(2)20 年间,流域城市群三生空间变化趋势前强后弱,变化不稳定。其中,生产、生活空间增加稳定,减少趋于缓和,生态空间增加趋向平缓并保持稳定,但减少则由弱转强趋于活跃。空间内部彼此间的相互转移也较频繁,存在生产—生活空间彼此可互为转换、生活—生态空间相互排斥 2 种稳定的系统性变化模式。综合来看,流域生产和生活空间扩张对生态空间胁迫正持续增长,生态空间转出也正成为流域空间转移的优势形态,流域空间协调利用仍面临考验。

(3)流域三生空间的变化与其子类空间变化密切相关,如工矿生产空间的强力增加是生产空间活跃稳定的基础。而不论何种类别的空间迁移变化,都是经济发展驱动、城市引力作用与宏观政策引导综合协作的结果。

(4)将变化强度与变化稳定性引入三生空间体系,梳理空间迁移变化与空间变化稳定性的作用关系,联合转移矩阵与强度分析模型,实现对三生空间演化“先导过程”及其引发的空间性状改变“后继效应”的一体化监测,形成涵盖三生空间变化数量、方向、格局、强度、趋势与稳定状态的系统化分析框架,有助于为研究空间发展耦合系统提供帮助。

研究也存有不足。首先,所选数据时空分辨率较低,对结果精准性的影响客观存在,高分辨率下空间变化是否存在变异性尚未可知,需在后期进行比对讨论。其次,强度分析模型虽能较好解析三生空间变化稳定性,但模型本身较为繁琐,限制方法推广与应用,如何改进有待研究。最后,稳定性分析层面,研究是将黄河流域上游城市群视为整体予以展开,对各城市群内部空间稳定性如何、是否存在分异未做深究,需待日后补充,以形成更为完善的研究结论。

参考文献:

- [1] 夏敏,冯新惠,夏俊林,等.综合土地多功能与适宜性的南京市溧水区“三生”空间划定[J].农业工程学报,2021,37(16):242-250.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 江曼琦,刘勇.“三生”空间内涵与空间范围的辨析[J].城市发展研究,2020,27(4):43-48.
- [5] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J].农业机械学报,2021,52(4):159-170.
- [6] 焦庚英,杨效忠,黄志强,等.县域“三生空间”格局与功能演变特征及可能影响因素分析:以江西婺源县为例[J].自然资源学报,2021,36(5):1252-1267.
- [7] 隋虹均,宋戈,张红梅.松嫩平原北部粮食主产区克山县三生空间识别[J].农业工程学报,2020,36(19):264-271.
- [8] 张雄,王芳,张俊峰,等.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.
- [9] 于正松,程叶青,李小建,等.工业镇“生产—生活—生态”空间演化过程、动因与重构:以河南省曲沟镇为例[J].地理科学,2020,40(4):646-656.
- [10] 李欣,方斌,殷如梦,等.江苏省县域“三生”功能时空变化及协同/权衡关系[J].自然资源学报,2019,34(11):2363-2377.
- [11] 盖兆雪,陈旭菲,杜国明,等.松花江流域哈尔滨段三生空间演变的生态环境效应及驱动因素分析[J].水土保持学报,2022,36(1):116-123.
- [12] 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.
- [13] 崔家兴,顾江,孙建伟,等.湖北省三生空间格局演化特征分析[J].中国土地科学,2018,32(8):67-73.
- [14] 陈小宁,白永平,宋龙军,等.黄河流域中上游四大城市群经济联系和网络结构比较分析[J].地域研究与开发,2021,40(4):18-23.

- [15] Barman D. A study of landuse/landcover pattern in inducing landslide hazards in parts of almora and nainital districts of uttarakhand[J]. International Journal of Innovative Research and Development, 2014, 3(10): 146-162.
- [16] 王绍求, 李梦照. 地质灾害综合治理与土地综合利用探讨: 以连南大掌村代间组、表达组滑坡为例[J]. 冶金管理, 2021(13): 82-83.
- [17] Kroh P. Analysis of land use in landslide affected areas along the Lososina Dolna Commune, the Outer Carpathians, Poland [J]. Geomatics Natural Hazards and Risk, 2017, 8(2): 863-875.
- [18] 魏万鸿, 叶伟林, 宿星, 等. 高速远程滑坡体的超稳性及滑坡土地的开发利用[J]. 中国水土保持, 2017(10): 58-61, 72.
- [19] 钟秀梅, 李伟利, 袁中夏, 等. 地震作用下天水市区滑坡危险区划研究[J]. 国际地震动态, 2019(8): 118-119.
- [20] 宿星, 魏万鸿, 郭万钦, 等. 基于 SRTMDem 的地形起伏度对天水市黄土滑坡的影响分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 616-622.
- [21] 宿星, 孟兴民, 王思源, 等. 陇中黄土高原典型地区滑坡特征参数统计及发育演化机制研究: 以天水市为例[J]. 第四纪研究, 2017, 37(2): 319-330.
- [22] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, et al. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [23] 肖东洋, 牛海鹏, 闫弘轩, 等. 1990—2018 年黄河流域(河南段)土地利用格局时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 271-281, 326.
- [24] 王宁, 杨光, 韩雪莹, 等. 内蒙古 1990—2018 年土地利用变化及生态系统服务价值[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 244-250.
- [25] 张云亮, 曾建军, 胡想全, 等. 基于土地转移矩阵的疏勒河中游土地利用变化研究[J]. 人民长江, 2017, 48(21): 34-39.
- [26] 吴玮江, 宿星, 刘伟, 等. 黄土—泥岩接触面滑坡的特征与成因[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1167-1175.
- [27] Su X, Meng X M, Ye W L, et al. Multiple statistical models based analysis of causative factors and loess landslides in tianshui city, China [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (ICEPP 2017), 2018, 120(1): e012013.
- [28] Li S D, Liu M C. The development process, current situation and prospects of the conversion of farmland to forests and grasses project in China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(1): 120-128.
- [29] 刘春芳, 李鹏杰, 刘立程, 等. 西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 254-263.
- (上接第 194 页)
- [15] 张玉臻, 陈阳, 王洁, 等. 黄河流域“三生”功能协调性测度及其差异性优化调控[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 251-261.
- [16] 李林山, 赵宏波, 郭付友, 等. 黄河流域城市群产业高质量发展时空格局演变研究[J]. 地理科学, 2021, 41(10): 1751-1762.
- [17] 李欣, 殷如梦, 方斌, 等. 基于“三生”功能的江苏省国土空间特征及分区调控[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1833-1846.
- [18] 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.
- [19] 孙云华, 郭涛, 崔希民. 昆明市土地利用变化的强度分析与稳定性研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 245-254.
- [20] Aldwaik S Z, Pontius R G. Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 106(1): 103-114.
- [21] 牛乐乐, 张必成, 贾天忠, 等. 青海省海西州土地利用变化强度分析与稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 152-159.
- [22] 杨建新, 龚健, 高静, 等. 国家中心城市土地利用变化稳定性和系统性特征: 以武汉市为例[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 701-716.
- [23] Huang J L, Pontius R G, Li Q S, et al. Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China [J]. Applied Geography, 2012, 34(3): 371-384.
- [24] Mallinis G, Koutsias N, Arianoutsou M. Monitoring land use/land cover transformations from 1945 to 2007 in two peri-urban mountainous areas of Athens metropolitan area, Greece [J]. Science of the Total Environment, 2014, 490(4): 262-278.
- [25] 田立鑫, 韩美, 王敏, 等. 莱州湾南岸海岸带土地利用时空演变及稳定性研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 259-265.
- [26] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2021.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2021.