

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.043.

李凯, 侯鹰, 付奇, 等. 都市圈“三生空间”协同变化及其对生态系统服务的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 430-439.

LI Kai, HOU Ying, FU Qi, et al. Synergistic Changes of Production-Living-Ecology Spaces and Their Influences on Ecosystem Services in the Metropolitan Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 430-439.

# 都市圈“三生空间”协同变化及其对生态系统服务的影响

李凯<sup>1,2,3</sup>, 侯鹰<sup>1,4</sup>, 付奇<sup>5,6</sup>, 辛儒鸿<sup>7</sup>, 邱明昆<sup>8</sup>, 黄尤优<sup>9,10</sup>, 刘宝印<sup>11</sup>

(1.中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2.哥本哈根大学地理科学与自然资源管理系, 哥本哈根 1165; 3.四川农业大学, 风景园林学院, 成都 610000;

4.中国科学院大学, 北京 100085; 5.苏州大学政治与公共管理学院, 江苏 苏州 215031;

6.苏州大学中国特色城镇化研究中心, 江苏 苏州 215031; 7.西南大学园艺园林学院, 重庆 400715;

8.华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 9.西南野生动植物资源保护教育部重点实验室, 四川 南充 637009;

10.西华师范大学生命科学学院, 四川 南充 637009; 11.中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100086)

**摘要:** [目的]“三生空间”时空变化及其对生态系统服务影响的研究可以揭示人地关系及其变化规律, 为区域国土空间管控提供理论依据。[方法]本研究以典型都市圈——济南都市圈为例, 分析了 2000—2018 年“三生空间”变化趋势, 刻画了三生空间协同变化类型与特征, 并评价了济南都市圈生态系统服务价值及其变化, 最终揭示了“三生空间”变化对区域生态系统服务的影响。[结果]总体变化特征上, 生活生产空间是唯一面积增长的“三生空间”类型, 且其面积相对变化速度在各类型中最快, 对应动态度为 2.4%; 400 245.31 hm<sup>2</sup> 的生产生态空间转入生活生产空间, 是生活生产空间扩张的主要来源; “三生空间”协同变化可划分为 5 种特征明显、空间上互不重叠的类型, 包括生态—生活协同变化型, 生产—生活协同变化型, 生态变化主导型, 三生稳定型, 生活变化主导型; 在各协同变化类型中, 生活变化主导型区县的生态系统服务价值下降最为剧烈[−3 015.89 元/(hm<sup>2</sup> · a)]; 在各转换类型中, 生产生态空间向生活生产空间的转换对区域生态系统服务价值的不利影响最明显。[结论]研究提出了“三生空间”协同变化类型的划分方法, 揭示了济南都市圈“三生空间”变化特征及其对生态系统服务的影响, 可为“三生空间”理论研究提供补充, 为国土空间规划中土地用途管制与国土空间分区管理等提供参考。

**关键词:** 都市圈; “三生空间”; 生态系统服务价值; 国土空间管理

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0430-10

## Synergistic Changes of Production-Living-Ecology Spaces and Their Influences on Ecosystem Services in the Metropolitan Area

LI Kai<sup>1,2,3</sup>, Houying<sup>1,4</sup>, Fuqi<sup>5,6</sup>, Xinru Hong<sup>7</sup>, QIU Mingkun<sup>8</sup>, Huang Youyou<sup>9,10</sup>, LIU Baoyin<sup>11</sup>

(1.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2.Department of Geosciences and Natural Resources Management,

University of Copenhagen, Copenhagen 1165, Denmark; 3. Sichuan Agricultural University, Department of

Landscape Architecture, Chengdu 610000; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

5.School of Politics and Public Administration, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215031, China; 6.Research

Center for Urbanization with Chinese Characteristics, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215031, China; 7.The

College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China; 8.School

of Geographical Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 9.Key Laboratory of

Southwest China Wildlife Resources Conservation (Ministry of Education), China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China. 10.College of Life Science, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China;

11.Institute of Science and Technology Strategy Advisory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China)

收稿日期: 2022-04-08

修回日期: 2022-04-20

资助项目: 国家重点研发计划(2019YFB2102902); 国家自然科学基金项目(41601556); 中科院生态中心城市与区域生态国家重点实验室开放基金(SKLURE2021-2-2)

第一作者: 李凯(1992—), 男, 山东日照人, 博士, 副教授, 从事景观规划与生态系统服务研究。E-mail: likai4699@foxmail.com

通信作者: 侯鹰(1987—), 男, 四川内江人, 博士, 副研究员, 研究方向为生态系统服务与生态风险。E-mail: yinghou@rcees.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

**Abstract:** [Objective] Research of spatiotemporal changes of the production-living-ecology spaces (PLES) can reveal the human-land relationship and its changing rules, and can further provide theoretical evidence for regional territorial space control. [Methods] Using a typical metropolitan area (the Jinan Metropolitan Area) as the case study area, we investigated the spatiotemporal changes of the PLES from 2000 to 2018 and identified the types and characteristics of the synergetic PLES changes, and then we further evaluated ecosystem service values and their changes of the Jinan Metropolitan Area. Finally, we revealed the influences of the PLES changes on regional ecosystem services. [Results] In terms of the overall PLES change characteristics, the living-production space was the only type with an increase in the area. Among different PLES types, the living-production space had the rapidest changing speed reflected by the dynamic degree of 2.4%. The production-ecology space with the area of 400 245.31 hm<sup>2</sup> transferred into the living-production space, acting as the main source of the living-production space expansion. The synergistic PLES changes were further divided into five types with significant characteristics and no spatial overlaps, including the ecological-living synergistic change type, the production-living synergistic change type, the ecological change dominance type, production-living-ecological stability type, and living change dominance type. Among different synergistic PLES change types, the districts/counties with the living change dominance type exhibited the most significant decrease in ecosystem service values [-3 015.89 yuan/(hm<sup>2</sup> · a)]. Among different transfer types of the PLES, the transfer from the production-ecology space to the living-production space had the most negative impacts on ecosystem service values. In this study, we proposed the classification methodology of PLES synergetic changes. [Conclusion] Our study revealed the characteristics of PLES changes and the influences of PLES changes on ecosystem service values in the Jinan Metropolitan Area, which can supplement theoretical research on the PLES. The results of this study can support land use control and zoning management in territorial spaces planning.

**Keywords:** metropolitan area; production-living-ecology spaces; ecosystem service values; territory space management

高速城镇化不仅产生了各项社会经济效益,也深刻地改变了地表系统的组成、格局与过程<sup>[1]</sup>。国土空间作为承载人类社会可持续发展的实质载体,不仅具有物质属性,还具有满足人类各类需求的功能属性<sup>[2]</sup>。2013年中央明确提出合理布局生产空间、生活空间与生态空间(“三生空间”)是实现新型城镇化的重要前提。过往由不同部门出台的各类规划往往侧重于“三生空间”某一类空间,造成了各行其是、彼此冲突的局面<sup>[3]</sup>。“三生空间”以土地多功能性为基础,明确各国土空间类型的功能属性,为构建“多规合一”的国土空间规划体系提供了落脚点<sup>[4]</sup>。目前,“三生空间”研究已成为城乡人居环境、土地利用变化及其生态效应等领域的热点问题<sup>[5]</sup>。

学者就“三生空间”概念界定与识别进行了深入探讨<sup>[2,6]</sup>,目前在概念上已基本达成共识,强调基于人类社会需求的角度对特定国土空间类型的主观利用意图<sup>[7]</sup>。其中,生态空间是以提供生态系统调节服务及维持生态安全为主导功能的国土空间<sup>[2]</sup>;生产空间则是承载各类生产活动的物质载体,追求用地

集约与生产高效,旨在提供有形的农业、工业产品以及无形的服务业产品<sup>[2,8]</sup>;生活空间的服务对象为人,主要发挥人居承载与保障功能,具体涉及居住、消费、交往、休闲、提供与使用公共服务等各类日常活动<sup>[5,8]</sup>。可以看出,“三生空间”的实质是基于生态—生产—生活功能对国土空间的类型划分<sup>[9]</sup>。然而,土地多功能性决定国土空间具有多种功能,许多国土空间呈现出在主导功能外还具有次要功能的状态<sup>[5,6,10]</sup>。据此,相关学者提出,应采用以复合功能为特征的形式对“三生空间”进行识别<sup>[2]</sup>。在识别途径上,已有学者尝试直接基于功能评价对“三生空间”进行识别<sup>[11]</sup>;如Turner等将丹麦国土空间识别为9类具有不同多功能性的空间类型<sup>[12]</sup>;Liu等则在地级市尺度上,依据土地多功能性特征识别出8类主要的“三生空间”类型<sup>[13]</sup>。但该评价手段一般需要大量基础数据<sup>[14]</sup>,在数据匮乏的区域适用性较差。相对而言,将土地利用/覆盖类型与“三生空间”类型进行对接仍是主流识别方法,该方法具有可操作性强、便于将研究结果与现行规划衔接等优势<sup>[15]</sup>。

“三生空间”时空变化是“三生空间”研究领域的重要内容,可以将复杂、动态的人地关系以空间类型转换的形式进行表达。国外相关研究主要聚焦于特定空间类型,如生态功能主导的绿色空间<sup>[16]</sup>、生产功能主导的耕地<sup>[17]</sup>以及生活功能与生产功能交织的建设用地<sup>[18]</sup>。而国内研究更为关注各“三生空间”类型彼此间的相互变化,研究成果已涉及村镇、地市、省乃至全国等不同尺度<sup>[8,9,19,20]</sup>,对支撑人居环境质量改善、控制城市扩张与制定区域战略规划等决策的研究已取得一系列成果<sup>[5]</sup>。但已有研究仍存在不足<sup>[8]</sup>,其中包括:(1)研究尺度上,都市圈作为重要的地理单元,将在未来城市发展中发挥越来越重要的作用<sup>[21]</sup>,但都市圈尺度的“三生空间”研究仍未引起足够重视<sup>[22]</sup>;(2)研究内容与方法上,尽管“三生空间”间彼此转换可以有效表示“三生空间”变化特征<sup>[9]</sup>,但现有研究大多采用对“三生空间”间各项转换进行逐一分析的方式<sup>[7]</sup>,未能充分关注多种转换同时发生的变化过程<sup>[15]</sup>。已有学者发现,某些区域各“三生空间”转换以相对固定的强度同步进行,在“三生空间”变化特征上呈现出协同性,进而形成了特定的“三生空间”协同变化类型<sup>[8,9,23]</sup>。然而,目前对“三生空间”协同变化类型的划分主要基于对显著变化特征的定性分析,具有一定的主观性<sup>[19]</sup>,在精确刻画“三生空间”协同变化特征、定量划分“三生空间”变化类型上仍欠缺普遍适用的方法。

另外,相较于其他国土功能,国土空间生态功能具有一定的无形性与滞后性,尤其部分功能如土壤形成不能直接惠及人类社会,导致生态空间的保护易让步于经济社会活动<sup>[24,25]</sup>。因此,评估“三生空间”变化对生态系统服务的影响,对防止潜在的生态系统及其功能退化、支撑国土空间管理决策具有重要意义<sup>[22,26]</sup>。近年来相关研究日趋增多,许多学者在区域全局尺度上揭示各“三生空间”转换与生态系统服务价值变化的对应关系<sup>[5]</sup>。据此,相关学者提出,可以通过管制特定的“三生空间”转换来减缓生态系统服务退化趋势<sup>[27,28]</sup>。然而,即使是在同一都市圈内,特定“三生空间”转换的强度也存在明显的空间分异,进而导致该转换对生态系统服务的影响同样具有空间异质性<sup>[8]</sup>。这就表明,针对于都市圈内部,各“三生空间”转换对生态系统服务的影响类型、强度及其空间分异仍需进一步明晰,以确定不同区域的重点管控转换类型。

据统计,我国绝大部分的都市圈仍处于发展期与培育期<sup>[29]</sup>,如何优化“三生空间”格局、维持生态系统服务已经成为都市圈可持续发展及其规划管理中需要解决

的关键问题<sup>[5]</sup>。《2018年中国都市圈发展报告》明确将济南都市圈列为发展潜力良好、正在逐步发展的发​​展型都市圈<sup>[29]</sup>。然而,与其他发展中的都市圈类似<sup>[22,26]</sup>,随城镇化不断推进,济南都市圈内不同“三生功能”对土地资源的需求日趋强烈,在国土空间上表现出彼此竞争、博弈的态势<sup>[30]</sup>,促使土地用途持续发生转换。尤其在部分区县,剧烈的“三生空间”转换引发了生境质量下降、水土流失等诸多生态环境问题<sup>[31]</sup>,其背后实质是“三生空间”转换缺乏有效的管控。采用济南都市圈作为案例研究,其结果对国内其他都市圈规划也具有启示与借鉴价值。因此,本研究以济南都市圈为例,探究都市圈“三生空间”协同变化类型与特征,阐明其对区域生态系统服务的影响。本研究提出“三生空间”协同变化类型划分方法,为“三生空间”理论研究提供补充,为都市圈国土空间分区规划和管理提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

济南都市圈位于山东省中西部,面积为5.3万 $\text{km}^2$ ,截止到2018年,整个济南都市圈GDP已超过2.15万亿,人口密度约为613人/ $\text{km}^2$ ,是典型的人口密集型城市聚集区,具备发展都市圈的良好社会、经济基础<sup>[29]</sup>。济南都市圈以省会济南市为中心,共包括6个地级市与1个县级市,城镇等级清晰,具有典型的以中心城市为核心辐射周边区域的都市圈空间结构<sup>[31]</sup>。生产功能上,济南都市圈第二、三产业较为发达。同时,济南都市圈东部属鲁西北平原地区,土地平坦肥沃,提供了大量的优质农业产品,是山东省重要粮食供应区。生活功能上,济南都市圈位于暖温带季风气候,年均降雨为700 mm,年平均温度为11~14 $^{\circ}\text{C}$ ,气候宜人。当地文化底蕴深厚,基础设施完善,济南、莱芜、淄博等先后被评选为全国文明城市,都市圈整体人居环境质量良好。生态功能上,济南都市圈东南部具有显著的丘陵山地地貌特征,被泰山山脉与鲁山山脉所覆盖,其森林覆盖率显著高于山东省平均水平,在为动植物提供栖息地的同时,发挥了多项如自然游憩、水土保持等生态功能。济南都市圈在“三生功能”上都具有其独特的优势,而“三生功能”的维持乃至提升直接依托于“三生空间”的合理布局与调控,明晰“三生空间”时空变化特征是“三生空间”相关规划与决策的必要前提(图1)。

### 1.2 数据来源

本研究使用数据主要包括2000年与2018年山



东省土地利用/覆盖数据(30 m 分辨率),2017 年 10 m 分辨率山东省土地覆盖数据、行政边界图、自然环境因素数据、经济社会数据等。其中 2000 年与 2018 年土地利用/覆盖数据来源于中国科学院资源环境数据中心,是刻画本研究中三生空间转换与变化的基础数据,根据本次研究需求归为 9 类土地利用/覆盖类型(表 1)。2017 年土地覆盖数据来源于清华大学 FROM—GLC10 数据集,作为 30 m 土地利用/覆盖数据的补充,具体用途详见 1.4 部分;自然环境因素数据中,全国降水量与净初级生产力数据(2000—2018 年)分辨率为 1 km,分别来自于国家地球系统科学数据中心与美国地质勘查局 MOD17A3-NPP 数据集;全国土壤保持量(2000 年、2010 年)分辨率为 1 km,来源于中国科学院生态环境研究中心。行政边界为矢量数据,最小行政单元为区县,来源于国家地球系统科学数据共享服务平台。经济社会数据来源于历年山东省及各地市统计年鉴。

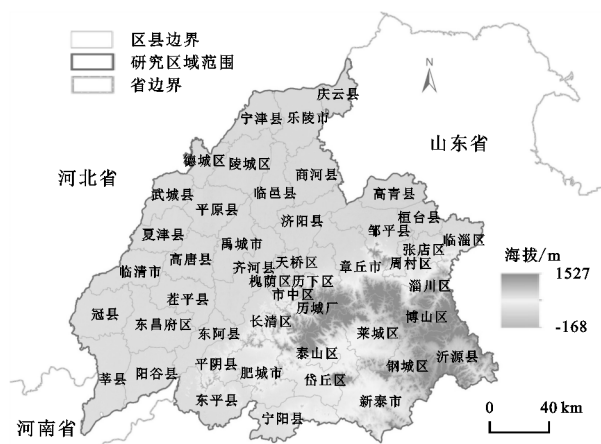


图 1 济南都市圈的区位、行政边界及高程

表 1 济南都市圈“三生空间”类型对应的土地利用/覆盖类型

| “三生空间”类型 | 土地利用/覆盖类型 | 土地利用/覆盖类型含义                     | 典型功能                                     |
|----------|-----------|---------------------------------|--|
| 生态空间     | 疏林地       | 郁闭度小于 20%的天然与人工疏林               | 生态功能(强度低):栖息地提供、气候调节、土壤保持、水源涵养           |
|          | 自然水域      | 河湖、滩涂等天然形成的水体                   | 生态功能:气候调节、栖息地提供、水文调节、废物处理                |
|          | 未利用地      | 目前未被利用的土地,包括沙地、裸地、岩石质地等         | 生态功能(强度低):栖息地提供、景观多样性                    |
| 生态生产空间   | 人工水域      | 水库坑塘等人工挖掘修建的水体                  | 生态功能:气候调节、水文调节;生产功能:水产养殖                 |
|          | 草地        | 覆盖度在 5%以上的各类草地,主要为牧草地与部分其他草地类型  | 生态功能:气候调节、土壤保持、水源涵养;生产功能:牧草供给            |
|          | 高覆盖度林地    | 郁闭度大于 20%的天然林与人工林、郁闭度大于 40%的灌木林 | 生态功能:栖息地提供、气候调节、土壤保持、水源涵养、户外游憩;生产功能:木材供给 |
| 生产生态空间   | 耕地        | 种植农作物的土地,包括水田与旱地                | 生产功能:粮食供给;生态功能:气候调节                      |
|          | 其他林地      | 园地、苗圃、未成林造林地、迹地                 | 生产功能:水果供给、苗木供给;生态功能:土壤保持、水源涵养            |
| 生活生产空间   | 建设用地      | 各类建设用地                          | 生活功能:人居承载、公共服务供给;生产功能:服务业和工业生产           |

1.3 “三生空间”变化分析方法

1.3.1 “三生空间”识别 “三生空间”的提出是土地多功能性理论的进一步延伸与具体化,其识别本质是对空间中生产—生活—生态功能的判别<sup>[15]</sup>。根据土地利用与覆盖方式,不同类别空间提供的“三生”功能呈现出显著差异<sup>[9]</sup>。基于土地利用/覆盖数据,本研究依据现有研究成果<sup>[2,6]</sup>,对不同土地利用/覆盖类型的主导功能与次要功能进行判别,最终结合当地实际情况识别出 4 类“三生空间”:生态空间(单一生态功能)、生态生产空间(生态功能为主,生产功能次要)、生产生态空间(生产功能为主,生态功能次要)以及生活生产空间(生活功能与生产功能并重)。其中,本研究使用的土地利用/覆盖数据没有区分高覆盖度林地中的天然林与人工林。2017 年山东森林资源调查数据显示,山东省内 96% 以上的森林资源为人工林,并且利用方式上经济林、用材林占主导地位<sup>[32]</sup>,表明大部分林地除生态功能外,同时提供一定的生产功能。据此,在参照相关研究中的“三生空间”划分方法后<sup>[2,6]</sup>,本研究将研究区内的高覆盖度林地统一归为生态生产空间。而低覆盖度林地在其现有生长阶段难以满足用材等生产用途,仅提供一定的生态功能<sup>[9]</sup>,故将其归为生态空间。此外,未利用地仅能提供程度较低的生态功能,也归为生态空间。而在其他林地中,园地与苗圃“三生功能”特征相近,以生产功能主导并兼具一定的生态功能,且为其他林地中的主要组成,据此将其他林地划归为生产生态空间。而建设用地中生活与生产功能交织融合,因此将其归为生活生产空间。各类空间与不同土地利用类型对应关系见表 1,表中所列各空间类型的典型功能来源于已有研究<sup>[2,8,33-34]</sup>。

1.3.2 总体变化特征分析 基于“三生空间”与土地利用/覆盖类型间的对应关系,首先将 2000 年与 2018 年土地利用数据转化为两期的“三生空间”类型数据。为描述济南都市圈“三生空间”总体变化特征,基于 ArcGIS 中的栅格计算器工具计算两期各类型“三生空间”的面积及 2 个年份间的变化量,进一步采用单一动态度描述各类型“三生空间”的相对变化速度,最后引入转移矩阵详细刻画“三生空间”类型转换的方向<sup>[35]</sup>。单一动态度计算方法如下:

$$K_i = \frac{S_{it_2} - S_{it_1}}{S_{it_1}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} 100\%$$

式中: $K_i$  为  $t_1$  到  $t_2$  时段内  $I$  类型“三生空间”动态度; $S_{it_1}$ ,  $S_{it_2}$  分别表示  $t_1$ ,  $t_2$  时间  $t$  类“三生空间”类型面积。

1.3.3 协同变化分析 空间类型转换指从一类空间到另一类空间的转移,而“三生空间”变化是各类型“三生空间”相互转换的综合结果<sup>[15]</sup>。因此,“三生空间”变化可以通过分解为各“三生空间”转换进行特征刻画<sup>[9]</sup>。在同一变化类型中,各项“三生空间”转换的强度相对固定<sup>[23]</sup>,参照相关研究<sup>[12]</sup>,将“三生空间”协同变化定义为“一组在同一时空尺度下,按照固定强度进行的“三生空间”转换”。其中,转换强度用转换面积量进行表示<sup>[36]</sup>。“三生空间”转换的类型可以代表“三生空间”的特定变化方向,而对应转换强度可以作为该方向上的具体特征<sup>[35]</sup>。通过比较某一转换类型的面积量,研究者可以掌握特定变化方向上的变化特征及其时空分异。在本研究中,“三生空间”类型间转换共计 15 种,将 15 种“三生空间”转换按照面积从大到小进行排序,发现前 9 种转换累计占有转换总面积的 96.1%,能反映研究区域内在 2000—2018 年的主要“三生空间”转换特征。后 6 类转换强度极小(面积均未超过转换总面积的 1%),表明这些转换在济南都市圈中不属于“三生空间”变化主要特征,在参考相关研究处理方法后<sup>[37]</sup>,最终确定将前 9 种主要转换类型作为“三生空间”变化特征进行后续分析,包括:生态空间向生产生态空间转换、生态空间向生活生产空间转换、生态生产空间向生产生态空间转换、生态生产空间向生活生产空间转换、生产生态空间向生态空间转换、生产生态空间向生态生产空间转换、生产生态空间内部转换、生产生态空间向生活生产空间转换、生活生产空间向生产生态空间转换。基于这 9 项主要变化特征,本研究采用 K-means 定量聚类方法进行“三生空间”协同变化类型划分。具体操作上,首先选取各区县作为基本单元,将 46 个区县数据作为样本,对每个样本中各“三生空间”转换的面积量(如生态空间转换为生活生产空间)进行极值标准化处理消除量纲<sup>[12]</sup>,并将其作为聚类指标,最终将

数据导入到 SPSS Statistics 25 进行聚类分析。最终,识别出若干个彼此并列的协同变化类型,每组变化类型包括若干区县,在空间上互不重叠。根据聚类原理,在总体变化特征上,属于同一协同变化类型的区县表现为彼此相似,与其他类型包括的区县表现为彼此相异,从而使各协同变化类型具有独立性<sup>[12]</sup>与差异性<sup>[12]</sup>。

#### 1.4 生态系统服务价值评价

本研究采用生态系统服务价值变化来反映“三生空间”变化对生态系统服务的影响,具体价值评价方法上选取谢高地等人提出的生态系统服务价值当量法<sup>[38]</sup>。本研究中,首先利用济南都市圈当地粮食市场价值计算出 1 个服务当量的经济价值为 3 428.10 元。然后,利用降水量、净初级生产力(NPP)与土壤保持量 3 项生物物理指标,在区域尺度上对济南都市圈不同生态系统类型的价值当量进行修正,具体计算方法详见中国陆地生态系统服务价值动态方法<sup>[39]</sup>。3 项指标均采用多年均值处理,结合数据可获取性,其中降水量与 NPP 均采用 2000—2018 年多年平均值,土壤保持量数据采用 2000 年与 2010 年的均值。

其中本研究中的高覆盖度林地、草地、耕地、未利用地、自然水域分别与中国生态系统服务价值当量表中的森林、草地、农田、荒漠、河流湖泊等生态系统一一对应<sup>[38,39]</sup>。低覆盖度林地与园地的当量通过计算两种地类的平均单位面积 NPP,利用所得数值与高覆盖度林地 NPP 数值的相对比例对高覆盖度林地的服务当量进行等比例折算获得。人工水域的服务当量则基于自然水域的服务当量,按照现有研究中人工水域与自然水域生态系统服务强度的相对比例进行折算<sup>[9,34]</sup>。建设用地中人工不透地表的生态系统服务价值当量为 0。但由于本研究中的土地利用/覆盖分类数据为 30 m 精度,许多零散分布于建成区内部的绿色空间也会被识别为建设用地,因此将本研究中 2018 年 30 m 精度土地利用/覆盖分类数据与 2017 年 10 m 精度的土地利用分类数据在 ArcGIS 进行叠加,利用栅格计算器统计 30 m 精度的土地利用/覆盖数据的建设用地中林地、草地、不透水地表所占的比例,再使用这 3 种地类的服务当量计算面积加权平均值,得到区域内建设用地的服务当量,最终确定不同土地利用/覆盖类型相应当量(表 2)。为突出“三生空间”类型变化对生态系统服务价值的影响,不同时期各土地利用/覆盖类型采用相同的价值当量。

## 2 结果与分析

### 2.1 “三生空间”总体变化特征

济南都市圈的“三生空间”各类型中,生产生态空间

的面积在 2000 年、2018 年均为最大,占主导地位,其次为生活生产空间与生态生产空间,2000 年时这两类空间面积相近,2018 年生活生产空间明显高于生态生产空间,而生态空间面积在 2 个年份均为最小(表 3)。2000—2018 年,各“三生空间”类型面积发生不同程度的变化。其中生

活生产空间是唯一面积增长的空间类型,其动态度绝对值也在 4 种类型中最大,表明其面积相对变化速度最快。而在面积减少的空间类型中,面积变化速度最快的为生态空间,其变化速度为生态生产空间和生产生态空间的 2~3 倍。

表 2 济南都市圈各土地利用/覆盖类型的生态服务价值当量

|       |       |      |       |       |        |      |       |      |
|-------|-------|------|-------|-------|--------|------|-------|------|
| 疏林地   | 自然水域  | 未利用地 | 人工水域  | 草地    | 高覆盖度林地 | 耕地   | 园地    | 建设用地 |
| 26.92 | 51.03 | 1.70 | 31.05 | 14.81 | 38.93  | 7.88 | 31.42 | 0.84 |

表 3 济南都市圈 2000—2018 年各类型“三生空间”的面积、面积变化及动态度

| “三生空间”<br>类型 | 面积<br>(2000 年)/hm <sup>2</sup> | 面积(2018 年) /<br>hm <sup>2</sup> | 面积变化/<br>hm <sup>2</sup> | 动态度/<br>% |
|--------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------|
| 生态空间         | 297255.65                      | 265280.74                       | -31974.91                | -0.9      |
| 生态生产空间       | 688517.81                      | 642142.62                       | -46375.23                | -0.4      |
| 生产生态空间       | 3561531.63                     | 3354263.64                      | -207268.00               | -0.3      |
| 生活生产空间       | 759092.20                      | 1044894.68                      | 285802.45                | 2.4       |

济南都市圈 2000—2018 年“三生空间”类型内部转换最为剧烈的为生产生态空间,主要发生在都市圈的东部(表 4)。“三生空间”类型间相互转换最为明显的是生活生产空间与生产生态空间,其中生产生态空间到生活生产空间的转换占主导地位,也是整个区域内最为显著的转换(400 245.31 hm<sup>2</sup>),该转换在空间上呈现出聚集分布,且主要发生在生活生产空间的边缘区域,反映出生活生产空间以侵蚀周边生产生态空间为代价进行扩张,与城市发展中普遍存在的“摊大饼”发展模式相吻合。同时,生活生产空间至生产生态空间的转换面积排在第 2 位(149 869.70 hm<sup>2</sup>),广泛分布于研究区域内,潜在原因可能为由于山东省合村并居、耕地复垦等相关政策的调控。其他较为显著的转换包括生态生产空间到生产生态空间、生产生态空间到生态生产空间以及生态生产空间到生活生产空间的转换,分别为 59 066.61 hm<sup>2</sup>,36 833.46 hm<sup>2</sup>以及 29 365.88 hm<sup>2</sup>(表 4)。

表 4 济南都市圈 2000—2018 年“三生空间”转移矩阵  
hm<sup>2</sup>

| “三生空间”<br>(2000 年) | “三生空间”(2018 年) |            |            |            |
|--------------------|----------------|------------|------------|------------|
|                    | 生态空间           | 生态生产<br>空间 | 生产生态<br>空间 | 生活生产<br>空间 |
| 生态空间               | 2005.51        | 8913.59    | 41931.68   | 10750.42   |
| 生态生产空间             | 7535.76        | 7847.07    | 59066.61   | 29365.88   |
| 生产生态空间             | 21079.84       | 36833.46   | 10716.15   | 400245.31  |
| 生活生产空间             | 1003.43        | 3835.50    | 149869.70  | —          |

注:2000—2018 年,未发生转换的土地利用/覆盖类型的面积不计入该“三生空间”转移矩阵。

2.2 “三生空间”协同变化类型

本研究采用贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)结合专家意见的方式确定聚类数量<sup>[40]</sup>。

BIC 值越小,表明聚类效果越好。我们建立了 BIC 值与聚类数量间的对应曲线关系,发现聚类数量为 3~5 类时,BIC 值较低(352~360),位于曲线的谷底,表明该数量区间的聚类质量较好。结合专家意见,在保证聚类质量的前提下,相较于 3,4 类,5 类可以为后续分析提供更多的“三生空间”变化信息,因此确定聚类数量为 5 类。最终共得到济南都市圈 5 种“三生空间”协同变化类型,各类型分布呈现出明显的空间聚集(图 2)。为准确描述不同协同变化类型的特征,依据该类型中的“三生空间”转换类型特征,结合区县的经济、社会分析对“三生空间”协同变化类型进行命名。

类型Ⅰ——生态—生活协同变化型:该类型包括沂源县、莱城区、淄川区与博山区 4 个区县,集中分布在济南都市圈的东南区域。该类型中,以生产生态空间向生态生产空间转换为主要特征,这表明该区域内通过退耕还林、农田林网等各项方式调整土地功能,促使部分土地发挥更多的生态功能。此外,生态生产空间向生活生产空间转换也是该区域的主要特征。这是由于人口增长与经济发展,当地对生活生产空间的需求日趋强烈,因此开发了一部分建设适宜性高的生态生产空间以满足人类生活生产需要。

类型Ⅱ——生产—生活协同变化型:该类型主要出现在地形平坦的济南都市圈北部,共包括 5 个区县。该类型中,大量的生态空间转换为生产生态空间与生活生产空间,被转换的生态空间主要为疏林地与未利用地。当地政府根据发展需求,对该类空间进行不同用途的开发,或通过土地整理等方式将其转换为耕地、果园等生产生态空间,或根据城市发展需求将其转换为生活生产空间。该类型整体表现出向具有生产、生活功能的空间类型发生转换的趋势。同时该区域内生活生产空间向生产生态空间的转换是 5 种类型中最为显著的,原因可能为区域耕地占补平衡的宏观调控。

类型Ⅲ——生态变化主导型:该变化类型包括 4 个区县,既包括天桥区这类城区,也包括东平县这类县级行政单元。该类型主要分布在济南都市圈中部及南部,涵盖区域面积为 5 种类型中最小。在该变化类型中,生产生态空间向生态空间转换占主导地位,该类转换也是

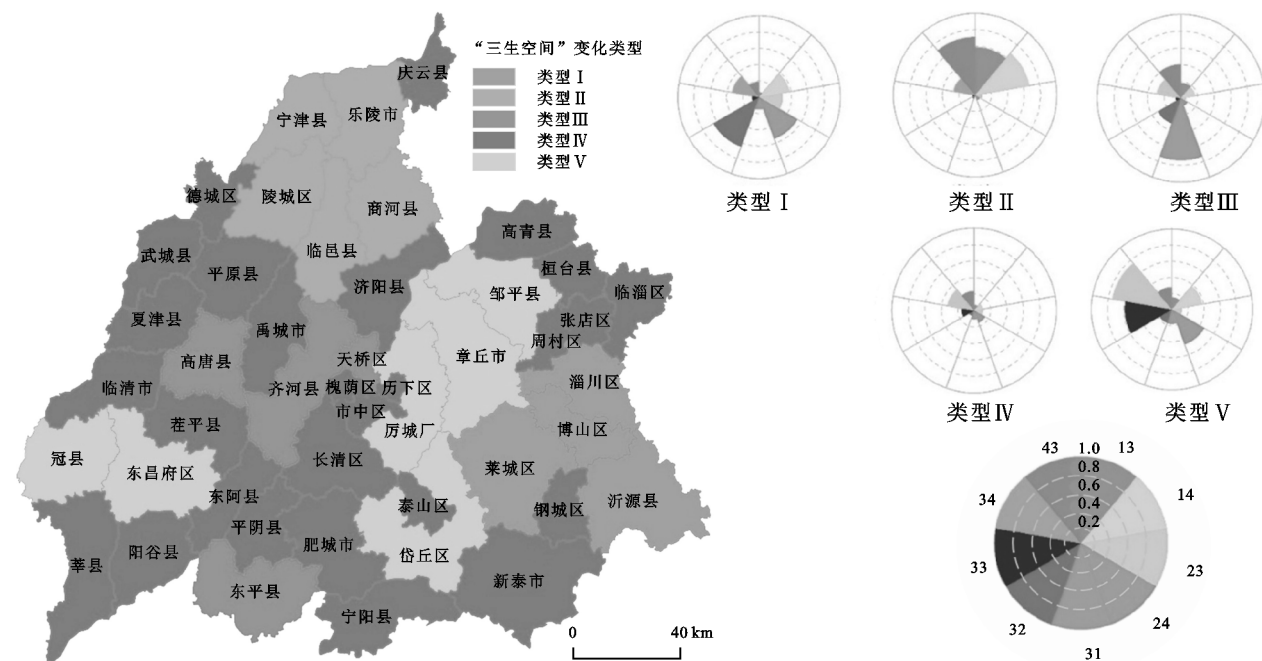


5种变化类型中最为显著的,直接原因是该类区域内通过退耕还林方式增加了大量的生态空间,而其他“三生空间”转换则很微弱,整体趋于稳定。

**类型Ⅳ——三生稳定型:**该变化类型包括27个区县,广泛分布于不同地级市,且涵盖区域面积在5种变化类型最大,表明该变化类型在济南都市圈具有普遍性。2000—2018年,该变化类型中各类“三生空间”转换都很微弱,各类“三生空间”转换强度在5种变化类型都为最小,体现出该类型区域中“三生空间”具有较高的稳定性。一方面,对于位于中心城区的区级行政单元(如历下区、德城区等),较早起步的城镇化发展促使其空间结构在2000年时已趋于稳定,同时该类区域的城市扩张与土地用途变更受到城市总体规划的严格管控;另一方面,其他县级行政单元如

平阴县、东阿县则为传统的粮食供应区,生产生态空间占主导地位,严格的耕地红线政策导致其基本不能向其他空间类型转换。此外,其他“三生空间”类型本身面积占比较小,因此彼此间转换量较小。

**类型Ⅴ——生活变化主导型:**该变化类型包括6个区县,分布于济南都市圈的中东部与西南部,涉及济南、聊城地级市与邹平县级市。其中生产生态空间向生活生产空间转换为变化主要特征,表明城市发展促使“三生空间”转型以满足不断增加的生活生产需求。同时,该变化类型中还存在中等程度的生态空间、生态生产空间向生活生产空间的转换,这也进一步佐证了上述判断。另外该类型中还存在显著的生产生态空间内部转换,说明了当地农业结构与布局持续发生调整。



注:各花瓣图中,每片花瓣对应1项“三生空间”转换花瓣上数字1,2,3,4分别代表生态空间,生态生产空间,生产生态空间,生活生产空间,长度代表标准化后的转换强度。

图2 济南都市圈协同变化类型空间分布及其变化特征

### 2.3 “三生空间”变化对生态系统服务的影响

在各“三生空间”协同变化类型中,类型Ⅰ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ所属区县呈现出生态系统服务价值显著下降的特征,其中生活变化主导型(类型Ⅴ)是生态系统服务价值下降幅度最大的变化类型[ $-3\ 015.89$  元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )]。而在各变化类型区县中,唯一生态系统服务价值表现为提升的是生活—生产协同变化型类型Ⅱ[ $275.52$  元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )],尽管该类区域内生态空间转换为生活生产空间较为显著,但被转换的生态空间主要为价值当量低的未利用地,且当地政府同时通过土地整理等措施补充了大量生产生态空间,促使土地可以提供更多的以供服务为主导的生态系统服务,因此整体上生态系统服务价值呈现

出上升趋势。与之对比的是变化类型Ⅲ所属区县,该类区域在“三生空间”变化特征上表现为生态主导型,但其生态系统服务价值整体上却呈现出下降趋势[ $-466.24$  元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )],在各变化类型中下降幅度最小)。这主要是因为虽然当地政府积极采取退耕还林等措施增加生态空间,但生态恢复措施对生态环境质量提升存在一定的滞后性<sup>[47]</sup>,譬如增加的生态空间可能仍处于次生演替的初级阶段,对生态系统服务的提升程度有限,无法完全抵消其他转换对生态系统服务造成的不利影响(表5)。

另外,同一类型的转换对各变化类型区县的生态系统服务影响也有明显差别。本研究中,生产生态空间向生活生产空间转换对各变化类型的生态系统

服务价值产生的不利影响最大,且是各类型区县生态系统服务下降的主要原因。尤其是对变化类型Ⅴ所属区县造成了一2 513.50 元/(hm<sup>2</sup>·a)的生态系统服务价值变化,而对其他变化类型区县的生态系统服务价值的不利影响则较为相近,从-1 152.04 到-1 569.27 元/(hm<sup>2</sup>·a)不等。而生产生态空间向

生态生产空间的转换则显著提升了生态系统服务价值,该转换促使变化类型Ⅰ、Ⅲ所属区县分别提升了1 992.74 与1 158.42 元/(hm<sup>2</sup>·a)的生态系统服务价值。另外生产生态空间向生态空间、生产生态空间向生态空间转换也对所有变化类型中区县的生态系统服务价值起到了提升作用。

表 5 济南都市圈“三生空间”转换对不同协同变化类型区县的生态系统服务价值影响 元/(hm<sup>2</sup>·a)

| 转换类型            | 不同协同变化类型 |          |          |          |          |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                 | 类型Ⅰ      | 类型Ⅱ      | 类型Ⅲ      | 类型Ⅳ      | 类型Ⅴ      |
| 生态空间向生产生态空间转换   | -264.92  | 394.15   | -864.06  | -249.64  | -257.82  |
| 生态空间向生活生产空间转换   | -281.61  | -55.18   | -169.65  | -90.06   | -183.50  |
| 生态生产空间向生产生态空间转换 | -851.28  | -372.64  | -361.76  | -531.23  | -422.76  |
| 生态生产空间向生活生产空间转换 | -771.09  | -115.92  | -199.45  | -381.60  | -614.93  |
| 生产生态空间向生态空间转换   | 208.24   | 56.15    | 509.83   | 321.94   | 407.36   |
| 生产生态空间向生态生产空间转换 | 1992.74  | 162.17   | 1158.42  | 319.18   | 384.76   |
| 生产生态空间内部转换      | -59.51   | -23.67   | -46.21   | -160.45  | -221.16  |
| 生产生态空间向生活生产空间转换 | -1240.91 | -1152.04 | -1355.71 | -1569.27 | -2513.50 |
| 生活生产空间向生产生态空间转换 | 327.39   | 1382.50  | 862.35   | 625.88   | 405.66   |
| 综合转换            | -940.95  | 275.52   | -466.24  | -1715.25 | -3015.89 |

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 “三生空间”变化及其对生态系统服务的影响

2000—2018 年,济南都市圈中生活生产空间是面积持续增长且变化最为显著的空间类型,这一结果与学者对长江三角洲核心区<sup>[7]</sup>、合肥都市圈<sup>[22]</sup>、湖北省等<sup>[9]</sup>不同区域的研究结论相符,即生活生产空间呈现出快速扩张的趋势。在该类空间的动态度上,济南都市圈(2.4%)略高于湖北省(1.9%),但低于长江三角洲核心区(4.3%)。动态度的差异一方面可以解释为各研究中选择的研究时段并未完全重叠,如针对长江三角洲核心区的研究时段为1990—2010 年;另一方面是因为不同区域对“三生功能”偏好与土地管理政策存在差异。另外,济南都市圈中,三生空间类型间转换最为突出的是生产生态空间到生活生产空间的转换,这一结果符合当前学界对我国建设用地扩张是耕地流失的主要原因的推断<sup>[41]</sup>,且与针对研究区域内济南市<sup>[42]</sup>与德州市<sup>[43]</sup>的过往研究结果一致。

济南都市圈内,生产生态空间向生活生产空间的转换是区域生态系统服务价值下降的主要原因。这一结果与青岛都市圈<sup>[44]</sup>结果相吻合,但与长株潭城市群<sup>[26]</sup>、长江中游地区等<sup>[45]</sup>地的相应结果有所区别。以长江中游地区为例,该类转换对生态系统服务价值的不利影响居于第二位,第一位为林地向生产生态空间的转换<sup>[45]</sup>。这可能是因为济南都市圈林地比

例(2015 年约 5.0%)本就远低于长江中游地区(2015 年约 58.0%),且省内服务业、制造业等可以吸纳大量的劳动力,当地农民毁林拓荒的主观意愿并不如长江中游地区强烈。需要注意的是,研究时期内,除部分区县(变化类型Ⅱ覆盖区域),济南都市圈大部分区县都呈现出生态系统服务价值下降的趋势,这一结果与长株潭城市群<sup>[26]</sup>、长江三角洲地区<sup>[27]</sup>、陕西省<sup>[46]</sup>的研究结果相吻合,表明区域生态系统服务价值下降并非偶然现象,是实现区域可持续性必须应对的挑战。

3.1.2 “三生空间”协同变化对国土空间管控的启示

尽管近年来学界在“三生空间”变化研究上取得了较多成果<sup>[2,15,34]</sup>,但已有研究大多重点关注各类“三生空间”总体变化特征<sup>[9]</sup>,却未能有效揭示变化特征间的协同性与主次地位及其空间分异。而本研究结果表明,在同一协同变化类型的各区县中,“三生空间”转换间具有一致的主次关系,使得该变化类型区域整体上呈现出同步性与协同性。据此可以辨别该区域内的主要、次要变化特征,从而支持从多种而非单一“三生空间”转换的视角进行国土空间管控。例如,针对变化类型Ⅰ(生活—生态协同变化型),生产生态空间向生态生产空间的转换为各变化类型中最显著的,管理者应该重点针对该转换制定管理策略,例如生态补偿等配套政策,从而保证当地农户经济收益。同时,生态生产空间向生活生产空间转换的强度较大,也应作为该区域的管理重点,该转换对生态系统服务的供给产生了较大的不利影响,未来在国土空



间管理中,可考虑对该类转换进行适当限制。此外,同一变化类型的区县在空间上呈现出一定的聚集分布特征,这也为国土空间分区管理提供了启示。以本研究中的变化类型V(生活变化主导型)为例,其覆盖区域内生产生态空间向生活生产空间的转换占主导地位,导致了生态系统服务价值剧烈下降。因此,针对生活变化主导型的区县,在未来国土空间管理中应重点关注生产生态空间向生活生产空间的转换,协调相关利益者的不同发展诉求。一方面,同类型各区县可考虑采用统一的土地用途管制手段,在土地利用年度计划、农地转用制度、生态补偿标准的制定等方面协调同步;另一方面,同类型相邻区县可探索跨越彼此行政边界的城市发展边界、基本农田红线的划定,以都市圈分区取代单个区县进行空间管控。

**3.1.3 研究不足与未来方向** “三生空间”研究对基础空间数据分辨率的要求较高,尽管采用遥感解译方式得到土地利用/覆盖数据已经成为相关研究中基础空间数据的主要来源<sup>[15]</sup>,但仍有可能与实际现状存在一定偏差。在后续研究中如能采用实地土地调查数据,可进一步提高“三生空间”类型识别的精度,从而为实际规划与决策提供更为可靠的依据。另外,本研究主要关注“三生空间”类型变化对生态系统服务的影响,因此不同年份采用了相同的价值当量对生态系统服务价值进行了核算,这可能导致结果具有一定的偏差,后续可考虑采用更为精确的方法对价值当量进行修正。最后,参考现有研究,本研究共识别4类“三生空间”,这种识别方法的本质是根据土地利用/覆盖类型来判断空间内的“三生功能”类型及其主导性,但这类识别方法未能考虑“三生功能”的强度。如未利用地只能发挥生态功能,因此将其划为生态空间,而尽管园地被划为以生产功能为主导的生产生态空间,但其生态功能仍可能高于未利用地后续研究中,应重点探索如何结合“三生功能”主导性与强度对“三生空间”进行更为精准的类型识别。

## 3.2 结论

“三生空间”已成为优化国土空间格局与协调国土功能的重要视角<sup>[5]</sup>,在此背景下,本研究以济南都市圈为例,对都市圈尺度的“三生空间”协同变化展开研究,揭示了各协同变化类型、特征及其对生态系统服务的影响。研究结论包括:(1) 济南都市圈“三生空间”整体变化趋势上,生活生产空间是唯一面积增加的空间类型,累计增加 285 802.45 hm<sup>2</sup>。生态空间是面积下降最快的空间类型,其面积共减少 207 268.00 hm<sup>2</sup>。(2) 基于协同变化特征,“三生空间”变化被划分为空间上互不重叠的5个类型:生态—生活协同变化型,生

产—生活协同变化型,生态变化主导型,三生稳定型,生活变化主导型。(3) 不同“三生空间”转换与协同变化类型对生态系统服务的影响具有明显差异,其中生活变化主导型对生态系统服务价值的不利影响最为显著,价值变化量达到-3 015.89 元/(hm<sup>2</sup>·a)。另外,同一转换类型对不同变化类型所含区县的生态系统服务也有不同程度的影响。研究为精细化识别“三生空间”变化特征和划分“三生空间”协同变化类型提供了方法,可为都市圈国土空间分区规划与管理提供参考。

## 参考文献:

- [1] 彭建,吕丹娜,董建权,等.过程耦合与空间集成:国土空间生态修复的景观生态学认知[J].自然资源学报,2020,35(1):3-13.
- [2] 张红旗,许尔琪,朱会义.中国“三生用地”分类及其空间格局[J].资源科学,2015,37(7):1332-1338.
- [3] 刘耀林,张扬,张琰,等.特大城市“三线冲突”空间格局及影响因素[J].地理科学进展,2018,37(12):1672-1681.
- [4] 扈万泰,王力国,舒沐晖.城乡规划编制中的“三生空间”划定思考[J].城市规划,2016,40(5):21-26.
- [5] 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.
- [6] 廖李红,戴文远,陈娟,等.平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J].资源科学,2017,39(10):1823-1833.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Pérez S M, Petit S, Jones L, et al. Land use functions: A multifunctionality approach to assess the impact of land use changes on land use sustainability [M]. Berlin: Springer, 2008:375-404.
- [11] 曹根榕,顾朝林,张乔扬.基于 POI 数据的中心城区“三生空间”识别及格局分析:以上海市中心城区为例[J].城市规划学刊,2019(2):44-53.
- [12] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape [J]. Landscape and Urban Planning, 2014,125:89-104.
- [13] Liu Y, Fu B, Zhao W, et al. A solution to the conflicts of multiple planning boundaries: Landscape functional zoning in a resource-based city in China [J]. Habitat International, 2018,77:43-55.
- [14] Hou Y, Li B, Muller F, et al. Ecosystem services of human-dominated watersheds and land use influences: a case study from the Dianchi Lake watershed in China [J]. Environment Monitoring and Assessment, 2016, 188:652-671.

- [15] 戴文远,江方奇,黄万里,等.基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究:以福州新区为例[J].自然资源学报,2018,33(12):2098-2109.
- [16] Wickham J D, Riitters K H, Wade T G, et al. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 94:186-195.
- [17] Vinogradovs I, Nikodemus O, Elferts D, et al. Assessment of site-specific drivers of farmland abandonment in mosaic-type landscapes: A case study in Vidzeme, Latvia [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 253:113-121.
- [18] Uhl J H, Leyk S. Towards a novel backdating strategy for creating built-up land time series data using contemporary spatial constraints[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 238:111-127.
- [19] 张蕾,刘格格,魏俊青,等.“三生用地”转型的生态系统服务价值效应:以营口市为例[J].生态学报,2019,38(3):838-846.
- [20] Duan Y, Wang H, Huang A, et al. Identification and spatial-temporal evolution of rural “production-living-ecological” space from the perspective of villagers’ behavior: A case study of Ertai Town, Zhangjiakou City [J]. *Land Use Policy*, 2020, 106(10):45-57.
- [21] Fang C, Yu D. Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162:126-136.
- [22] 白如山,刘恺恺.合肥都市圈“三生空间”演化格局及生态效应测度[J].中国名城,2019(3):16-23.
- [23] Madrigal M S, Miralles J L. Land-change dynamics and ecosystem service trends across the central high-Andean Puna[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9:88-96.
- [24] 包姐,李杰,刘锋,等.1995—2015年缅甸土地利用/土地覆盖变化对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2021,41(17):1-10.
- [25] Costanza R, d’Arge R, De G R, et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387:253-260.
- [26] 欧阳晓,贺清云,朱翔.多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以长株潭城市群为例[J].经济地理,2020,40(1):93-102.
- [27] 刘桂林,张落成,张倩.长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2014,34(12):3311-3319.
- [28] Yang Y, Bao W, Li Y, et al. Land use transition and its eco-environmental effects in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration: A production-living-ecological perspective[J]. *Land*, 2020, 285(9):1-24.
- [29] 卢庆强,王强,袁昕,等.中国都市圈发展报告 2018[M].北京:清华大学出版社,2019:80-101.
- [30] 李福柱,付洪凯.山东 17 地市城市土地利用效率研究—基于 DEA 模型、超效率模型和 Malmquist 指数的分析[J].西华大学学报:哲学社会科学版,2016,35(4):55-61.
- [31] 游其军,赵玉祥.济南都市圈生态地质环境质量评价[J].山东国土资源,2009,25(10):41-44.
- [32] 胡建全,张金良.山东省森林资源变化特点分析[J].山东林业科技,2018,48(3):19-24.
- [33] De Groot R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75:175-186.
- [34] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J].地理学报,2016,71(1):49-65.
- [35] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J].地理学报,2014,69(1):54-63.
- [36] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等.黄河河口镇—潼关区间 1998—2010 年土地利用变化特征[J].地理学报,2014,69(1):42-53.
- [37] 刘金雅,汪东川,孙然好,等.基于变化轨迹分析方法的生态用地流失空间关联研究[J].地理研究,2020,39(1):103-114.
- [38] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [39] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [40] Zhao Q, Xu M, Fränti P. Knee point detection on bayesian information criterion[C]. *Proceedings of the 2008 20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, New York, 2008:101-115.
- [41] Liang, C, Jiang P H, et al. Farmland protection policies and rapid urbanization in China: A case study for Changzhou City[J]. *Land Use Policy*, 2015, 48:552-566.
- [42] 刘金勇,孔繁花,尹海伟,等.济南市土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1231-1236.
- [43] 魏慧,赵文武,张骁,等.基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价:以山东省德州市为例[J].生态学报,2017,37(11):3830-3839.
- [44] 秦晓川,付碧宏.青岛都市圈生态系统服务—经济发展时空协调性分析及优化利用[J].生态学报,2020,40(22):8251-8264.
- [45] 陈万旭,李江风,朱丽君.长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J].自然资源学报,2019,34(2):325-337.
- [46] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].自然资源学报,2020,35(7):1714-1727.