

DOI: 10.20103/j.stxb.202311232560

常耀文, 吴迪, 李欢, 刘霞, 王蕴鹏, 郭家瑜. 基于自组织映射神经网络的淮河流域生态系统服务簇时空变化特征. 生态学报, 2024, 44(11): 4544-4557.

Chang Y W, Wu D, Li H, Liu X, Wang Y P, Guo J Y. Spatio-temporal variations of ecosystem service bundles in Huaihe River Basin based on SOFM. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4544-4557.

基于自组织映射神经网络的淮河流域生态系统服务簇时空变化特征

常耀文¹, 吴 迪², 李 欢², 刘 霞^{1,*}, 王蕴鹏¹, 郭家瑜¹

¹ 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037

² 淮河水利委员会淮河流域水土保持监测中心站, 蚌埠 233001

摘要: 生态系统服务簇的识别是区域生态系统服务管理与优化的关键。量化了 2000、2010、2020 年淮河流域产水量(WY), 水源涵养(WC), 土壤保持(SC), 生境质量(HQ), 水质净化(WP), 净初级生产力(NPP)和碳储量(CS)7种生态系统服务。并基于自组织映射神经网络(SOFM)识别了生态系统服务簇, 探讨了生态系统服务簇的时空变化特征。结果表明: (1) 2000—2020年, WP, NPP与WC呈上升趋势, WC的增幅最大; CS与HQ呈下降趋势。淮河流域各生态系统服务具有时空异质性, 生态系统服务高值区多位于西南部山区与东北部丘陵山地地区。(2) 识别了5个生态系统服务簇: 核心生态服务簇, WP服务簇, WY服务簇, NPP服务簇与生态过渡服务簇。核心生态服务簇与生态过渡服务簇的面积总体增加, 流域西南部山区与东北部丘陵山地地区生态系统服务提升, 2000—2020年, WY服务簇与NPP服务簇间的转移面积较大, WY服务簇面积减少达60.09%, NPP服务簇面积显著增加, 2020年占整个流域面积的57.02%。研究结果不仅有助于清晰认识淮河流域生态系统服务簇的空间分布格局及动态变化, 也为探索淮河流域可持续的生态系统管理与规划决策奠定了基础。

关键词: 生态系统服务; 自组织映射神经网络(SOFM); 生态系统服务簇; 淮河流域; InVEST模型

Spatio-temporal variations of ecosystem service bundles in Huaihe River Basin based on SOFM

CHANG Yaowen¹, WU Di², LI Huan², LIU Xia^{1,*}, WANG Yunpeng¹, GUO Jiayu¹

¹ Jiangsu Provincial Key Lab of Soil Erosion and Ecological Restoration, Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Forestry College of Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

² Huaihe River Basin Water and Soil Conservation Monitoring Center Station, Bengbu 233001, China

Abstract: The identification of ecosystem service bundles is the key to the management and optimization of regional ecosystem services. This study quantified seven ecosystem services including water yield (WY), water conservation (WC), soil conservation (SC), habitat quality (HQ), water purification (WP), net primary productivity (NPP) and carbon storage (CS) in the Huaihe River Basin in 2000, 2010 and 2020. Based on Self-Organizing Feature Map, ecosystem service bundles are identified, and the spatio-temporal variations of ecosystem service bundles are discussed. The results show that: The land use type is primary cultivated land, accounting for 67.83% of the basin area in 2020, followed by build-up land area. From 2000 to 2020, the area of cultivated land, forest land and grassland all show a decreasing trend. The primary pattern of land use change is that the expansion of build-up land leads to the reduction of cultivated land area. From 2000 to 2020, WP, NPP and WC show an upward trend, and WC has the largest increase. CS and HQ showed a decreasing trend.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071840); 国家重点研发计划子课题(2018YFC0507005)

收稿日期: 2023-11-23; **采用日期:** 2024-05-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxia@njfu.edu.cn

The ecosystem services are spatiotemporal heterogeneity, and the high-value ecosystem services are mostly located in the mountainous areas of the southwest and the hilly areas of the northeast. The high value area of WY is widely distributed and affected by the spatial distribution pattern of rainfall. The high value area of NPP is mainly distributed in the southern mountainous area and the eastern coastal area, while the low value area is mainly distributed in the northwestern part of the basin and the northern hilly plain area of the southern mountainous area. The high value of SC is divided in the southern mountainous area and the northern hilly plain area of the southern mountainous area. Five ecosystem service bundles were identified: Key ecological bundle, WP bundle, WY bundle, NPP bundle and Ecological transition bundle. The area of Key ecological bundle and Ecological transition bundle has increased, and the ecosystem services in the mountainous areas in the southwest and hilly areas in the northeast have improved. From 2000 to 2020, the transfer area between WY bundle and NPP bundle is large, the area of WY bundle has decreased by 60.09%, and the area of NPP bundle has increased significantly. In 2020, it will account for 57.02% of the entire basin area. The results of this study not only help to clearly understand the spatial distribution pattern and dynamic change of ecosystem service bundles in the Huaihe River Basin, but also lay a foundation for exploring sustainable ecosystem management and planning decisions in the Huaihe River Basin.

Key Words: ecosystem service; self-organizing feature map (SOFM); ecosystem service bundle; Huaihe River Basin; InVEST model

生态系统服务是指生态系统及其过程直接或间接地给人类带来的福祉^[1],其中包括供给、支持、调节和文化服务,对人类社会保障与可持续发展至关重要^[2]。复杂的自然过程与人类活动导致生态系统服务间存在着复杂的相互关系,包括权衡与协同关系,这使各生态系统服务在同一空间或时间上重复地出现集合,这种集合即为生态系统服务簇^[3],簇的形成能够体现多个生态系统服务间的权衡与协同关系。近年来,全球一半以上的生态系统服务都出现不同程度的退化,生态系统服务簇与人类福祉受到影响^[4]。同时,快速城镇化带来的人地矛盾加剧了生态系统的压力,改变了各生态系统服务间的关系,打破了原有的生态系统服务与人类间的供需关系,阻碍生态系统效益的最大化与可持续性。识别生态系统服务簇是提升并实现生态效益最大化的关键研究,已成为区域生态系统管理的有效途径与重要环节。

近年来,关于生态系统服务簇的研究已经成为生态学领域的研究热点。自 2007 年生态系统服务簇的概念首次被提出以来^[5]。研究者们分别从不同的角度探讨了生态系统服务簇,相关研究主要涉及国家^[6],流域^[7],地理单元^[8]与行政单元^[9]等不同空间尺度。已有的研究表明,在各生态系统服务权衡与协同关系的作用下,生态系统服务簇在特定的时空中表现出明显的异质性特征^[10],通常表现为多个服务并存的多服务簇或某一服务突出的单一服务簇。Kong 等^[8]识别了长江流域县级尺度上的生态系统服务簇,研究表明在多服务簇类型中,供应服务与所有调节服务之间呈现权衡,同时所有调节服务间呈协同作用。有研究通过识别不同类型生态系统服务簇并分析簇内的多生态系统服务耦合关系,针对不同簇内存在的生态环境问题提出有效的提升与防护措施^[11]。有研究基于生态系统服务簇特征对区域进行生态功能分区,针对不同分区提出生态系统管理措施实现生态系统差异化管理^[12]。生态系统服务簇是生态系统自然要素与社会经济要素综合作用的结果,多数研究表明土地利用与气候变化为生态系统服务簇变化的主导影响因子^[13-14]。土地利用类型转变会直接改变生态系统服务,从而影响生态系统服务簇的空间格局,例如退耕还林(草)工程导致大面积的耕地转变为林草地增强了土壤保持和碳固存能力,但产水量有所降低^[15]。识别生态系统服务簇通常使用 K-M^[16],主成分分析^[17],层次分析法^[18]与自组织映射神经网络,其中,自组织映射神经网络是一种能够自行学习竞争和组织的无监督型人工神经网络,具有鲁棒性强、对异常值不敏感与空间精度高等优点^[19-20],可快速高效地实现生态系统服务簇的聚类与可视化,有利于生态系统服务合理规划、有效管理与科学决策,以实现生态系统的可持续利用与管理。

淮河流域是中国重要经济发展区域与人口聚集地区,流域生态系统服务的动态变化与人类福祉密切相关^[21]。然而,随着人口增长与城镇化的快速发展,部分生态系统服务,生态系统与人类的供需关系日益紧张,

湿地与林地等关键土地利用面积减少,引起了产水固碳,水源涵养与水土保持等生态系统服务出现不同程度退化。在淮河流域城镇化发展与生态建设需求的双重压力下,迫切需要量化评估淮河流域的生态系统服务,科学地识别流域的生态系统服务簇时空格局。同时淮河流域是中国重要的气候过渡地区,有学者已经对淮河流域生态系统服务进行了探索,但主要侧重于生态系统服务间的权衡与协同关系上,对流域生态系统服务簇的时空分布格局仍不明确。因此,本研究定量评估了 2000、2010、2020 年淮河流域多个生态系统服务;并基于 SOFM 识别了生态系统服务簇及其时空动态变化格局,以期为淮河流域地区生态系统服务功能优化及可持续管理提供依据。

1 研究区概况

淮河流域位于中国东部,地跨湖北、安徽、河南、江苏与山东五省 235 个县(市、区)($111^{\circ}55'$ — $121^{\circ}20'E$, $30^{\circ}55'$ — $36^{\circ}20'N$),流域面积约为 27.05 万 km^2 。淮河流域气候属暖温带与亚热带季风气候,气温与降水存在明显的年际变化与区域差异。多年平均气温为 13.2 — $15.7^{\circ}C$,降水量年际变化大,多年平均降水量约 920mm,年内分布极不均匀,雨季主要集中于 6—8 月,空间上呈由东南向西北递减趋势。地貌类型主要以平原为主,主要分布于中部与东部,东北部为鲁中南断块山地,西部至南部依次为伏牛山区、桐柏山区和大别山区;东部平原分布有洪泽湖、南四湖与高邮湖等湖泊(图 1)。淮河流域是城镇化最快的区域之一,城镇化率达 54.2%。人类活动频繁,流域生态系统服务与人类福祉密切相关。

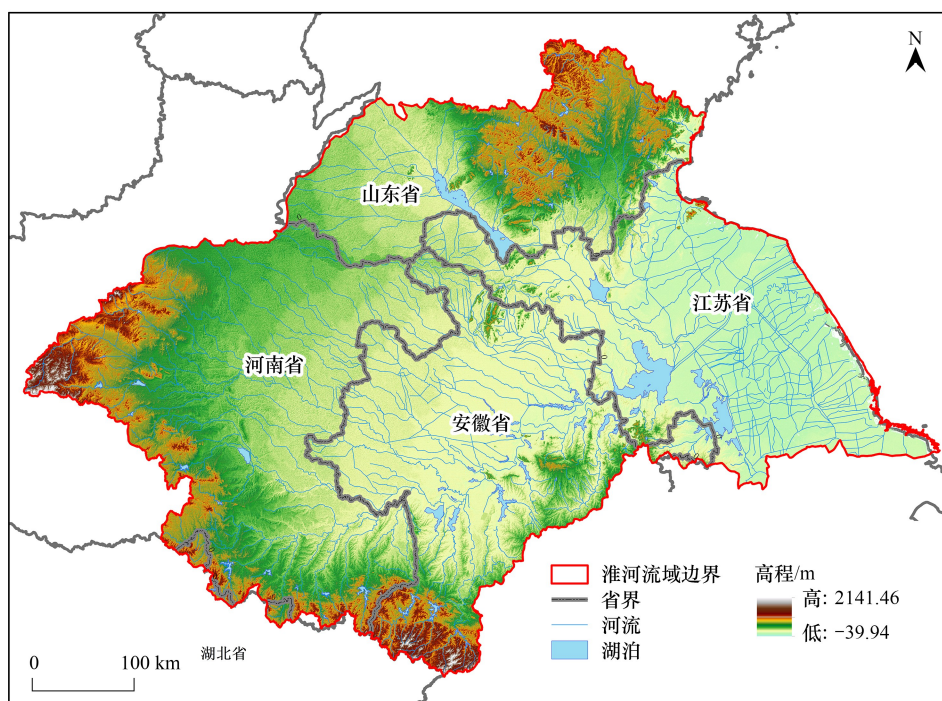


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

2 材料与方法

2.1 数据源

本研究根据《全国生态功能区划》、《全国水土保持规划》中确定的淮河流域生态系统服务功能定位:保证供水与水源安全,预防并减轻水土流失,减排固碳与提供生境,并结合研究区土地利用与地形地貌等特征确定了研究区具有代表性的 7 个生态系统服务,包括供给服务中的产水量(WY),支持服务中的水源涵养(WC),水土保持(SC),生境质量(HQ),调节服务中的水质净化(WP),净初级生产力(NPP)和碳储量(CS)。估算生

态系统服务所需的原始数据及来源如表 1 所示。不同空间分辨率的栅格数据重采样至 100 m×100 m,地理坐标系采用 China_Geodetic_Coordinate_System_2000,投影坐标系为 Albers。

表 1 模型数据来源及其他信息

Table 1 Model data sources and other information

数据 Data	对应的生态系统服务 Corresponding ecosystem services	数据源 Data source	空间分辨率 Spatial resolution	数据格式 Data format
土地利用 Land use	产水量 碳储量 土壤保持 水质净化 生境质量 水源涵养	中国科学院资源环境科学数据 中心 (https://www.resdc.cn/Default.aspx)	30m×30m	栅格
降雨 Rainfall	产水量 水质净化 水源涵养	全球气候数据库 (http://www.worldclim.org/)	4.5km×4.5km	栅格
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	产水量 水源涵养	全球干旱指数和潜在蒸散发数 据库 (https://cgiarcsi.community/data/global-aridity-and-pet-database/)	500m×500m	栅格
土壤数据 Soil data	产水量 土壤保持 水源涵养	世界土壤数据库 (http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/)	1km×1km	栅格
路网数据 Road network data	生境质量	中国科学院资源环境科学数据 中心 (https://www.resdc.cn/Default.aspx)	—	矢量
高程 Elevation	水源涵养 土壤保持 水质净化	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)	30m×30m	栅格
植被覆盖度 Fractional vegetation coverage	土壤保持	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/home)	250m×250m	栅格
降雨侵蚀力数据 Rainfall erosivity data	土壤保持	地球系统科学数据集 (http://clicia.bnu.edu.cn/)	1km×1km	栅格
净初级生产力 Net primary productivity	净初级生产力	NASA MODIS 数据平台 (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)	500m×500m	栅格

2.2 生态系统服务的量化

2.2.1 产水量

产水量是流域最基本的生态系统服务,本研究基于 InVEST 模型的 Annual Water Yield 模块计算得到产水量。Annual Water Yield 模块基于水量平衡原理,利用 Budyko 曲线来计算产水量,公式如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right) \times P_x \quad (1)$$

式中, Y_{xj} 为栅格 x 中土地利用 j 的年产水量(mm), AET_{xj} 表示栅格 x 中土地利用 j 的年实际蒸散量(mm), P_x 为栅格 x 的年降水量(mm)。

2.2.2 水源涵养

水源涵养根据产水量结果基于 ArcGIS 10.4 平台进一步结合地形、土壤与水文等因素计算得到:

$$WR = \min\left(\frac{249}{V}, 1\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y \quad (2)$$

式中, WR 为研究区的水源涵养量 (mm), V 为流速系数, 结合研究区附近文献对不同土地利用类型进行赋值^[22]; TI 为地形指数; K_s 为土壤饱和导水率 (cm/d), Y 为产水量 (mm)。

2.2.3 碳储量

陆地生态系统通过吸收 CO_2 来调节全球的气候, 将吸收的碳存储在生物、死亡有机质和土壤中。本研究使用 InVEST 的 Carbon Storage and Sequestration 模块估算碳储量, 该模块基于研究区土地利用类型以及地上生物量碳库 C_{above} 、地下生物量碳库 C_{below} 、土壤有机碳库 C_{soil} 和死亡有机质碳库 C_{dead} 中的碳储量来估算目前储存在景观中的碳量 C_{total} ^[23]。本研究参考淮河流域内省级^[24]与主要区域的研究成果^[25-28]对各土地利用的碳库赋值, 公式如下:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (3)$$

2.2.4 土壤保持

本研究利用 RUSLE 估算土壤保持量, 土壤保持量即潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值, 潜在土壤侵蚀是指在没有任何植被覆盖和任何水土保持措施的情况下的土壤侵蚀量。实际土壤侵蚀量是指在植被覆盖的影响下, 并考虑实际水土保持措施而发生的土壤侵蚀^[29]。公式如下:

$$A_c = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (4)$$

式中, A_c 为土壤保持量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), R 为降雨侵蚀力因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$), K 为土壤可蚀性因子 ($\text{t hm}^2 \text{h hm}^{-2} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$), L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 为覆盖管理因子, P 为水土保持措施因子。

2.2.5 生境质量

生境质量即生态系统为物种和群落提供生存空间的能力, 生境质量可以表示研究区的生物多样性^[30]。本研究使用 InVEST 估算生境质量 (无量纲, 范围为 0—1)。该模块将土地利用类型与威胁源建立联系, 基于土地利用以及生物多样性威胁源数据评估每个栅格的生境质量。

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right] \quad (5)$$

式中, Q_{xj} 表示栅格 x 中土地利用 j 的生境质量; H_j 表示土地利用 j 的生境适宜性; D_{xj} 表示栅格 x 中土地利用 j 的生境退化程度; K 是半饱和常数。其中:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_x} \left(\frac{\omega_x}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jx} \quad (6)$$

式中, r 表示层数; y 是威胁源; Y_x 为威胁源的栅格数; ω_x 是威胁源的权重; r_y 是栅格 y 的威胁因子值; i_{rxy} 是栅格 x 中威胁因子 r_y 对栖息地的威胁水平; β_x 是栅格 x 的可达性; 并且 S_{jx} 是土地利用 j 对威胁因子 r 的灵敏度。

2.2.6 水质净化

本研究利用 InVEST 模型估算水质净化能力, 主要基于各类生态系统营养物质的输出系数及其对营养物质的滞留效率确定生态系统水质净化服务大小, 模型仅考虑了非点源污染。栅格上营养物质的含量越大, 表明该栅格的污染越严重, 其水质净化的能力越弱。为了便于结果分析与对比, 本研究计算每个栅格的倒数表示水质净化能力。计算公式如下:

$$\text{NDR}_i = \text{NDR}_{0,i} \left[1 + \exp \left(\frac{IC_i - IC_0}{k} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\text{NDR}_{0,i} = 1 - \text{eff}'_i \quad (8)$$

$$\text{NDR}_{\text{subs},i} = 1 - \text{eff}_{\text{subs}} (1 - e^{\frac{-5 \times L}{L_{\text{subs}}}}) \quad (9)$$

式中, NDR_i 与 NDR_{subs} 分别表示地表与地下的养分输送比。 IC_0 和 k 为校准参数, IC_i 为地形指数, $\text{NDR}_{0,i}$ 为下游栅格未保留的养分比例。 eff'_i 表示养分的总滞留量, 其上限为沿流道的土地利用类型所能提供的最大滞留量。地下养分输送比 NDR_{subs} 的表达式是一个简单的指数衰减, 与流的距离有关, eff_{subs} 为潜流所能达到的最大

养分保留效率(即土壤中生化降解所产生的保留), L_{subs} 为潜流保留长度,即假定土壤最大容量保留养分的距离, L 为栅格点到溪流的距离。营养输送比的生物物理表参考研究区及其附近研究成果得到^[31—32]。

2.3 生态系统服务簇的识别

自组织映射神经网络(SOFM)是一种具有自适应,自组织和自学习特征的无监督竞争神经网络方法,SOFM是由输入层和输出层组成的拓扑结构,神经网络根据其学习规则对输入模式进行自动分类,通过对输入模式的自组织,学习并且抽取各个输入模式的特征,在输出层将分类结果表示出来。本研究利用SOFM根据各生态系统服务一系列属性的相似性和模式识别生态系统服务簇^[17,33—34]。使用R 4.2.3软件中的“kohonen”包执行SOFM分析。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空变化特征

淮河流域土地利用空间分布如图2所示,土地利用类型主要涉及耕地、林地、草地、水域、建设用地与未利用地,其中耕地的面积最大,2000、2010、2020年耕地面积分别为190974km²、186928km²与183457km²,分别占流域面积70.59%、69.1%与67.83%,主要分布于流域平原与丘陵地区;建设用地面积次之,2000、2010、2020年分别占流域面积13.04%、15.41%与16.31%,呈点状分布于流域平原地区;2000—2020年林地与草地平均面积分别占流域总面积的6.98%与3.48%。林地与草地空间分布相对集中,主要分布于研究区西部伏牛山区、西南部桐柏大别山地区与东北部鲁中南丘陵山区;2000、2010、2020年水域面积分别为13945km²、14928km²与15366km²,平均占流域面积5.45%。

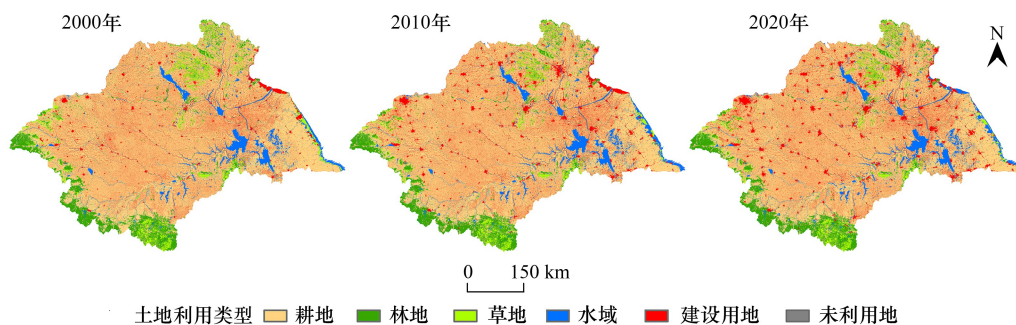


图2 2000、2010、2020年淮河流域土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in Huaihe River Basin in 2000, 2010 and 2020

在时间趋势上,2000—2020年间耕地、林地与草地面积均呈减少趋势,其中耕地面积减少最多,减少了7517km²,减幅为3.94%。草地面积减少了2381km²,减幅最大,为21.61%。与2000年相比,2020年林地面积减少400km²。2000—2020年间水域与建设用地面积呈增加趋势,其中,建设用地面积增加了8832km²。土地利用的变化方式主要表现为建设用地扩张占用耕地,导致耕地面积减少,耕地与林草地间存在相互转换。2000—2010年与2010—2020年,快速城镇化发展导致耕地分别减少9279km²与4136km²,迫使耕地侵占林地与草地等其他地类,侵占区域主要分布于西南部山区与东北部丘陵山地地区。2000—2010年与2010—2020年,林草地转为耕地面积分别为2756km²与318km²(图3)。

3.2 生态系统服务的时空变化特征

由图4可知,2000—2020年淮河流域的生态系统服务具有较强的空间异质性,但空间格局基本保持一致。CS、HQ、WC与WP的均值分别为122.15t/hm²、0.31、15.55mm与22.58kg/hm²,在空间上整体呈西南部与东北部丘陵山区高平原地区低的分布特征。西南部与东北部广泛的林草地提供了较高的碳固持、水质净化与水源涵养功能,生态系统表现出相对较高的栖息地质量。同时,水域及其附近生境质量相对较高,上游水库与

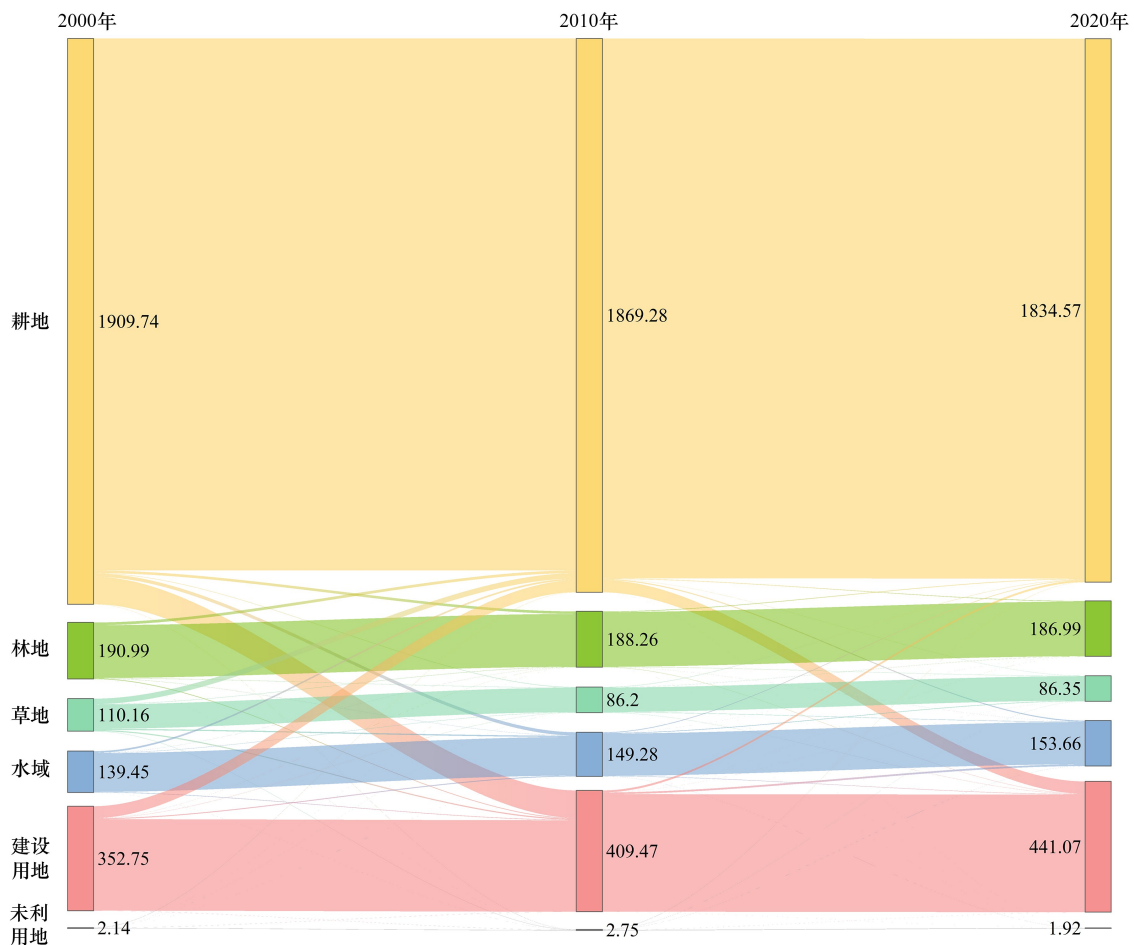


图3 2000、2010、2020年淮河流域土地利用面积变化/km²

Fig.3 Area transformation of land use in Huaihe River Basin in 2000, 2010 and 2020

流域东部的湖泊提供了良好的生态栖息地;WY的高值区分布广泛,受降雨空间分布格局影响,WY呈自东南向西北递减的趋势。NPP的高值区主要分布于南部山区及东部沿海地区,低值区主要分布于流域的西北部与南部山区的北部丘陵平原地区;SC的高值区分布于南部山区及其北部的丘陵平原地区。

由表2可知,WP、NPP、WC与WY呈明显的上升趋势,在2000—2020年期间,WC增加16.13mm,其中南部山区与东北丘陵区水源涵养能力增长幅度显著,西部伏牛山区呈下降趋势。WP与NPP分别增加13.91kg/hm²与70.23gC/m²,其中流域的西部地区与城镇周边上升趋势明显。WY的时空变化分异较大,2000—2020年呈先下降后上升的趋势,其中南部山区上升趋势最显著。在空间分布上,2000年WY的高值区域集中于流域的中部,自西南向东北呈带状分布,2010年WY的高值区域向东南方向移动,高值区主要集中于流域南部与东南部地区,2020年WY的高值区进一步向南移动,高值区域主要分布于流域南部。2000—2020年,CS与HQ总体呈降低趋势,CS减少4.34t/hm²,HQ降低0.02;SC变化较小,2000—2020年基本稳定在127.25t/hm²,变化率仅为1.01%。

3.3 生态系统服务簇的识别及时空分布格局

本研究应用SOFM识别并确定了5类生态系统服务簇,分别为核心生态服务簇,WP服务簇,WY服务簇,NPP服务簇与生态过渡服务簇(图5)。

核心生态服务簇(B1)中的各生态系统服务(产水量、碳储量、生境质量与水质净化功能)均较高(图5),空间分布平均占研究区面积3.83%,主要位于南部大别山森林地区(图6)。WP服务簇(B2)、WY服务簇(B3)与NPP服务簇(B4)均为以单一生态系统服务为主的服务簇,WP服务簇(B2)以水质净化功能为主,主

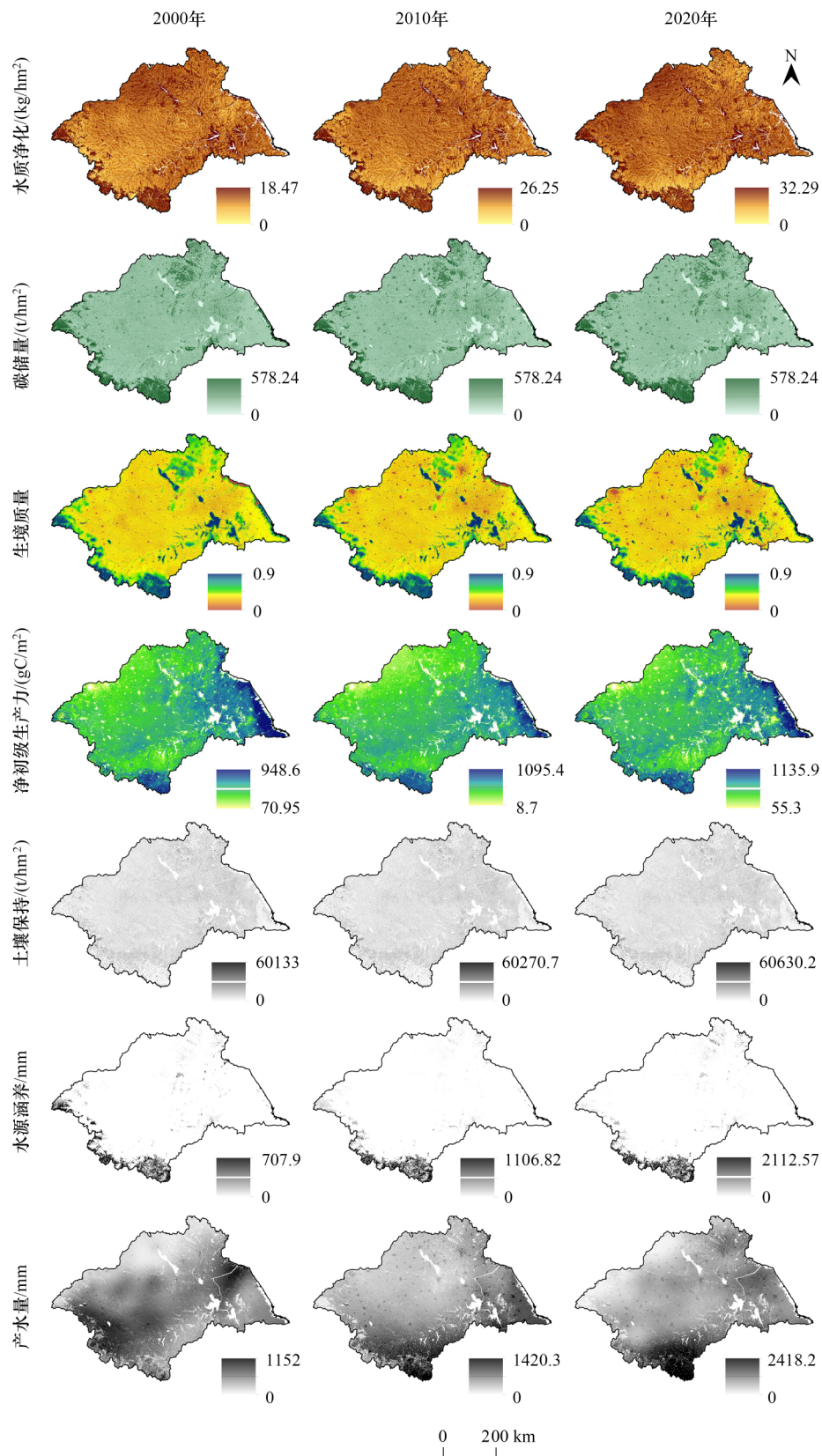


图4 2000、2010与2020年生态系统服务的空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution pattern of ecosystem services in 2000, 2010 and 2020

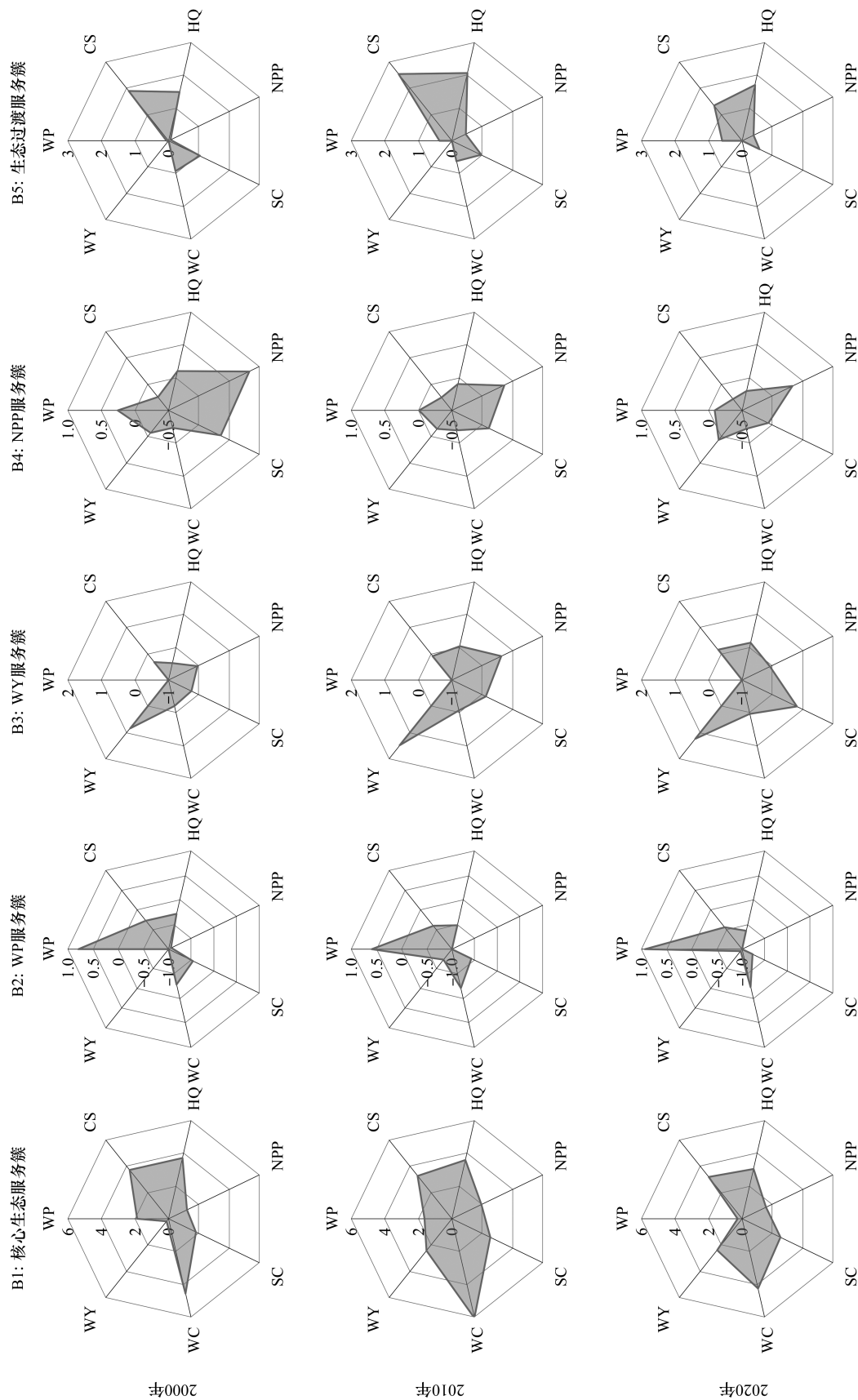


图5 各生态系统服务簇的组成及相对大小

WP: 水质净化 Water purification; CS: 碳储量 Carbon storage; WY: 产水量 Water yield; HQ: 环境质量 Habitat quality; WC: 水土保持 Soil conservation; NPP: 净初级生产力 Net primary productivity; SC: 土壤保持 Soil conservation; WY: 产水量 Water yield; B1: 核心生态服务簇 Key ecological bundle; B2: WP服务簇 Water purification bundle; B3: WY服务簇 Water yield bundle; B4: NPP服务簇 Net primary productivity bundle; B5: 生态过渡服务簇 Ecological transition bundle

表 2 2000—2020 年生态系统服务的动态变化特征

Table 2 Dynamic Changes in Ecosystem Services from 2000 to 2020

生态系统服务 Ecosystem service	2000	2010	2020	2000—2010 变化量 Change from 2000 to 2010	2010—2020 变化量 Change from 2010 to 2020	2000—2020 变化量 Change from 2000 to 2020	2000—2020 变化率 Change rate from 2000 to 2020
水质净化/(kg/hm ²) Water purification	15.33	23.16	29.24	7.83	6.08	13.91	90.74%
碳储量/(t/hm ²) Carbon storage	124.85	121.09	120.51	-3.76	-0.58	-4.34	-3.48%
生境质量 Habitat quality	0.32	0.31	0.30	-0.01	-0.01	-0.02	-6.25%
净初级生产力/(gC/m ²) Net primary productivity	424.92	441.88	495.15	16.96	53.27	70.23	16.53%
土壤保持/(t/hm ²) Soil conservation	128.93	129.75	130.23	0.82	0.48	1.30	1.01%
水源涵养/mm Water conservation	10.45	9.63	26.58	-0.82	16.95	16.13	154.35%
产水量/mm Water yield	427.2	267.85	502.35	-159.35	234.50	75.15	17.59%

要分布于流域的西北地区;WY 服务簇(B3)与 NPP 服务簇(B4)是分别以产水量与净初级生产力为主的服务簇(图 5),B3 与 B4 的空间分布面积与动态变化最大,面积分别占研究区的 24.28%与 46.49%,主要分布于流域的中部平原地区。相比于 B1,生态过渡服务簇(B5)中的生态系统服务供给量相对较小,主要以碳储量与生境质量两大生态系统服务为主(图 5),面积占流域总面积的 7.34%,是 B1 向单一生态服务簇过渡的区域,在空间上零星分布于西南部山区及东北部丘陵山地地区(图 6)。

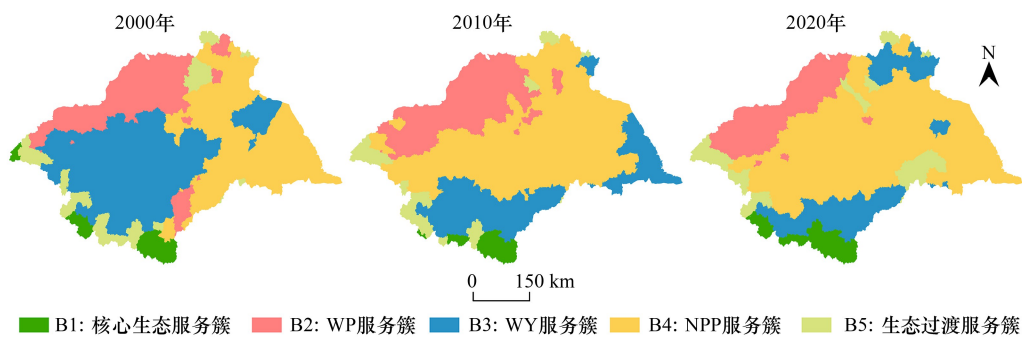


图 6 生态系统服务簇的时空分布格局

Fig.6 Spatial and temporal distribution pattern of ecosystem service bundles

由图 7 可知,2000—2020 年,核心生态服务簇与生态过渡服务簇的面积总体增加,流域西南部山区与东北部丘陵山地地区生态系统服务提升,到 2020 年,大别山区的生态过渡服务簇已全部转变为核心生态服务簇。北部的 B2 面积总体呈减少趋势,在 2010—2020 年间分别转移至 B4。B3 与 B4 间的转移面积较大,在 2000—2020 年间,B3 面积减幅达 60.09%,面积主要转移至 B4。2020 年,西部与东部的 WY 服务簇消失,大面积 B3 转移至 B4。位于大别山区的北部区域生态系统服务簇基本稳定,2000—2020 年的生态系统服务一直以水源供给为主。东北部丘陵山地地区的产水供给服务与其面积在不断提升。在整个流域,NPP 服务簇的面积显著上升,到 2020 年,B4 面积占整个流域面积的 57.02%。

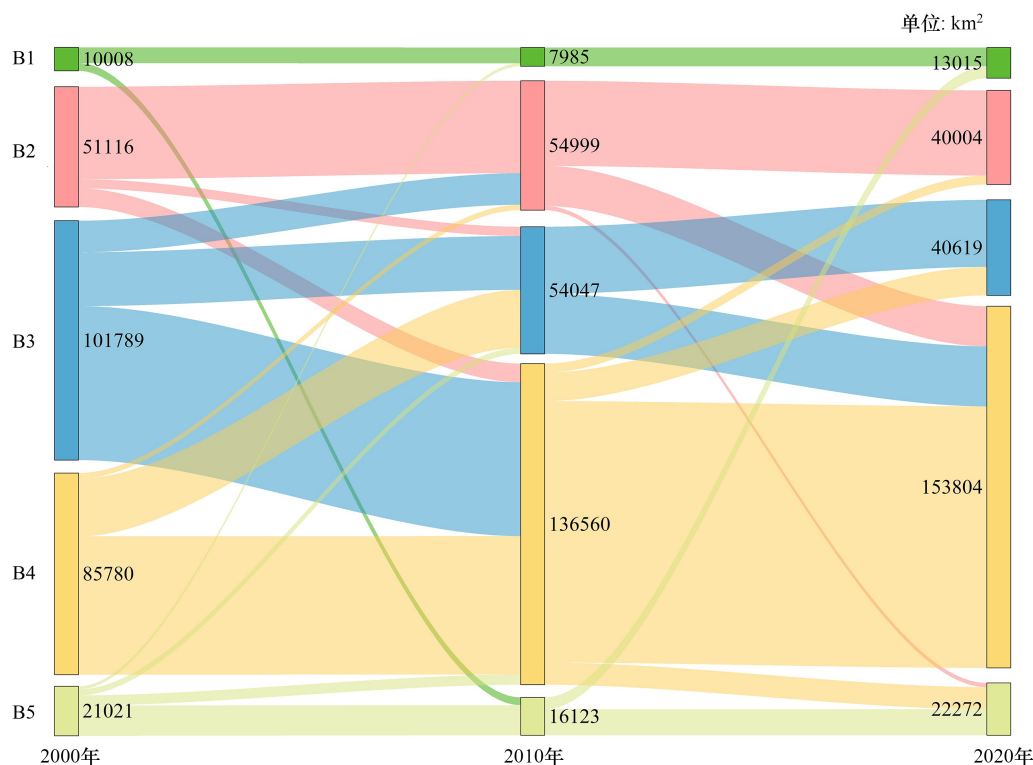


图7 2000—2020年不同生态系统服务簇的面积变化/ km^2

Fig.7 Area transformation among different ecosystem service bundles from 2000 to 2020

4 讨论

4.1 生态系统服务时空变化特征

流域生态系统服务具有较强的空间异质性,这取决于土地利用格局、景观多样性与生态过程的空间分布异质性^[35],同时也是气候变化与人为活动作用的结果^[36–38]。生态系统服务高值区主要分布于流域南部的桐柏大别山区,西部的伏牛山区与东北部鲁中南山区。广泛的森林与灌草地景观分布提供了更高的碳固存能力与生境质量^[39],也是水源涵养,水土保持与水质净化的重要区域^[40–41]。产水量呈由南向北递减的趋势,受降雨与蒸散发等水分循环过程影响,与流域降雨的空间分布一致^[42],高值区分布范围较广,年际变化较大^[43],这与Wang等^[44]的研究结果一致。

2000—2020年淮河流域的产水量、净初级生产力、水源涵养与水质净化能力明显提升,其中,水源涵养与水质净化的增幅最为明显,除土地利用变化的影响,降雨年际变化也是影响水源涵养与水质净化的重要因素。2020年相对较高的降雨导致该地区的产水量偏高,从而进一步导致水源涵养在2020年成倍上升。碳储量与生境质量略有下降,这与乔旭宁等^[40]的研究结果一致。南部桐柏山区与大别山区的产水、水源涵养与水质净化功能显著提升。2008年《全国生态功能区划》中将桐柏山区与大别山区确定为全国重要的水源涵养功能区,在一系列水库建设与林业生态工程的作用下,水源涵养能力显著提升,这与本研究的研究结果一致。作为淮河流域干流的河源地,高降雨量与高海拔的山地条件与较小的人类与农业活动强度,该地区森林面积广泛,林下结构与土壤结构发育较好,延长了降雨的地表循环过程,深厚的土层形成水分的“蓄水池”与“净水器”^[45],极大地提升了该地区生态系统的产水、储水与净水能力。然而林地面积的减小导致流域生态系统仍然面临生物栖息地退化与碳固存能力下降的风险。

4.2 生态系统服务簇空间分布及空间管理启示

目前,中国正在调整与建设人与自然和谐共处的国土空间新格局^[46],这需要综合多种因素及其相互作用

进行总体布局。生态系统服务簇表现了各生态系统服务的聚合效应,也反映出了生态系统在耦合过程与格局变化中的多功能性。本研究应用 SOFM 确定了多种生态服务簇,提供了流域尺度上的生态系统服务簇空间分布,有利于施策者统筹并优化整个流域“山水林田湖草沙”的空间布局。核心生态服务簇以水源涵养、生境质量与碳储量为主导,主要分布于大别山区,这与《全国生态功能区划(修编版)》对大别山区的生态功能定位(水源涵养与生物多样性保护重要区)一致。林地是大别山区的主要土地利用(图 2),相比于其他土地利用,林地能够提供更高的水土保持、碳固持与维持生境质量的能力,其所占比重极大地影响核心生态服务簇的形成^[9],使大别山区成为流域的关键地带。管理者应把握生态系统服务间的协同关系,在实施封禁治理基础上促进自然恢复,提高物种多样性;减少低效林,整治坡耕地,逐步提升该区域的森林碳储量与水土保持量。同时权衡调节服务、支持服务与供给服务间的关系,在实现生态系统结构与质量优化的同时最大化地满足日益增长的人类对林产品需求。这需要合理规划林种并管理林地更新周期,科学进行林地更新与林分改造;在生境质量与碳储量为主导的生态过渡服务簇,实施退耕还林,降低景观破碎化,提升土地利用集约化,优化土地利用,从而优化供给服务与其他服务间的权衡与协同关系,提升簇内综合生态系统服务功能。总体而言,在各类型生态系统服务簇内,要在充分理解生态系统服务间权衡与协同关系的基础上实现区域生态系统服务供给与功能的最大化。

水域也是提供生态系统服务的重要土地利用,2000—2020 年,流域东部的南四湖与洪泽湖附近由单一的 NPP 服务簇转变为生态过渡服务簇,成为水质净化能力与生境质量较高的区域。这与张文静等^[47]的研究结果一致。研究区的西北部平原地区城镇分布相对密集,各生态系统服务相对较低,然而城镇建设用地面积占比较高导致该区域对营养物质的截留效率相对较低,较高的径流系数增大了水和营养物质的输移,水质净化能力相对较高,形成以单一水质净化功能为主的 WP 服务簇,但较高的营养物输出量对流域下游水质形成污染风险。WY 服务簇与 NPP 服务簇分布于研究区的中部与东部平原,土地利用以耕地为主,生态系统服务功能较弱且单一。由于粮食产量数据的不完整性导致难以结合粮食产量这一供给服务来综合衡量生态系统服务簇的空间分布,今后需结合粮食产量进一步探索该区域生态系统服务簇的时空变化特征。本研究为分区差异化管理生态系统提供了划分基础与空间管理启示,为提升流域生态系统服务及其可持续性提供参考。

5 结论

本研究量化并分析了淮河流域多个生态系统服务的空间分布,基于 SOFM 方法识别了淮河流域生态系统服务簇,探讨了各生态系统服务簇的时空格局与动态转移,并针对各服务簇提出了相应的管理建议。主要结论如下:

(1) 淮河流域的生态系统服务具有较强的时空异质性。碳储量、生境质量、水质净化与水源涵养呈西南部与东北部山区高与中部平原地区低的空间分布格局,产水量呈自东南向西北递减的空间分布规律。淮河流域的产水量、净初级生产力、水源涵养与水质净化能力明显改善。

(2) 淮河流域划分为核心生态服务簇,生态过渡服务簇,WP 服务簇,WY 服务簇与 NPP 服务簇。核心生态服务簇与生态过渡服务簇主要分布于南部的桐柏大别山区,西部的伏牛山区与东北部鲁中南山区,2000—2020 年面积有所增大。WY 服务簇与 NPP 服务簇空间分布最广,相互间的转移面积最大。林地与水域是提供多种生态系统服务的关键土地利用。研究结果为不同区域的生态系统可持续发展规划与管理提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [2] Hicks C C, Cinner J E, Stoeckl N, McClanahan T R. Linking ecosystem services and human-values theory. *Conservation Biology*, 2015, 29(5): 1471-1480.

- [3] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, Dittrich A, Hermans-Neumann K, Kaim A, Lienhoop N, Locher-Krause K, Priess J, Schröter-Schlaack C, Schwarz N, Seppelt R, Strauch M, Václavík T, Volk M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: main concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [4] Hassan R, Scholes R, Ash N. *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [5] Kareiva P, Watts S, McDonald R, Boucher T. Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science*, 2007, 316 (5833): 1866-1869.
- [6] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352 (6292): 1455-1459.
- [7] Qiu J X, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(29): 12149-12154.
- [8] Kong L Q, Zheng H, Xiao Y, Ouyang Z Y, Li C, Zhang J J, Huang B B. Mapping ecosystem service bundles to detect distinct types of multifunctionality within the diverse landscape of the Yangtze River Basin, China. *Sustainability*, 2018, 10(3): 857.
- [9] Yang Y Y, Zheng H, Kong L Q, Huang B B, Xu W H, Ouyang Z Y. Mapping ecosystem services bundles to detect high- and low-value ecosystem services areas for land use management. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 11-17.
- [10] Dittrich A, Seppelt R, Václavík T, Cord A F. Integrating ecosystem service bundles and socio-environmental conditions – A national scale analysis from Germany. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 273-282.
- [11] 胡宇霞, 龚吉蕊, 朱趁趁, 矢佳昱, 张子荷, 宋靛苑, 张魏圆. 基于生态系统服务簇的内蒙古荒漠草原生态系统服务的空间分布特征. *草业学报*, 2023, 32(4): 1-14.
- [12] 李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 武文欢. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.
- [13] 潘莹, 郑华, 易齐涛, 李若男. 流域生态系统服务簇变化及影响因素——以大清河流域为例. *生态学报*, 2021, 41(13): 5204-5213.
- [14] Liu M Z, Min L L, Zhao J J, Shen Y J, Pei H W, Zhang H J, Li Y L. The impact of land use change on water-related ecosystem services in the Bashang area of Hebei Province, China. *Sustainability*, 2021, 13(2): 716.
- [15] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, Zeng Y, Liu Y, Chang R Y, Sun G, Wu B F. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [16] Yang G F, Ge Y, Xue H, Yang W, Shi Y, Peng C H, Du Y Y, Fan X, Ren Y, Chang J. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban – rural complexes. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 136: 110-121.
- [17] Dou H S, Li X B, Li S K, Dang D L, Li X, Lyu X, Li M Y, Liu S Y. Mapping ecosystem services bundles for analyzing spatial trade-offs in Inner Mongolia, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120444.
- [18] 陈新闯, 李锋, 李小倩, 胡印红, 韩婧, 胡盼盼. 珠三角城市群生态空间分区方法与管控对策. *生态学报*, 2021, 41(13): 5233-5241.
- [19] Mouchet M A, Paracchini M L, Schulp C J E, Stürck J, Verkerk P J, Verburg P H, Lavorel S. Bundles of ecosystem (dis) services and multifunctionality across European landscapes. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 23-28.
- [20] Peng J, Hu X X, Qiu S J, Hu Y N, Meersmans J, Liu Y X. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area. *The Science of the Total Environment*, 2019, 660: 765-775.
- [21] Zhou Y J, Zhang Y Y, Liang T, Wang L Q. Shifting of phytoplankton assemblages in a regulated Chinese River Basin after streamflow and water quality changes. *The Science of the Total Environment*, 2019, 654: 948-959.
- [22] 顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 金志丰, 周寅康. 近 15a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析. *长江流域资源与环境*, 2018, 27 (11): 2453-2462.
- [23] Quintas-Soriano C, García-Llorente M, Norström A, Meacham M, Peterson G, Castro A J. Integrating supply and demand in ecosystem service bundles characterization across Mediterranean transformed landscapes. *Landscape Ecology*, 2019, 34(7): 1619-1633.
- [24] 孙方虎, 方凤满, 洪炜林, 罗浩, 余健, 房莉, 苗雨青. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 151-158.
- [25] 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强. 基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟. *环境科学*, 2024, 45(4): 2332-2341.
- [26] 于芝琳, 赵明松, 高迎凤, 王涛, 赵治东, 王世航. 基于 InVEST-PLUS 模型的淮北市碳储量时空演变及预测. *环境科学*: 1-21. DOI:10.13227/j.hj.kx.202306110
- [27] 孙一帆, 徐梦菲, 汪霞. 基于 InVEST-PLUS 模型的郑州市碳储量时空演变及空间自相关分析. *水土保持通报*, 2023, 43(5): 374-384.
- [28] 智菲, 周振宏, 赵铭, 王诗琪. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的合肥市生态系统碳储量时空演变特征. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 205-215.

- [29] Qin K Y, Li J, Yang X N. Trade-off and synergy among ecosystem services in the Guanzhong-Tianshui economic region of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(11): 14094-14113.
- [30] Hou Y, Lü Y H, Chen W P, Fu B J. Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions: a case study on the central Loess Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1201-1217.
- [31] Cong W C, Sun X Y, Guo H W, Shan R F. Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106089.
- [32] 刘怡娜, 孔令桥, 肖赓, 郑华. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. *生态学报*, 2019, 39(3): 844-852.
- [33] Crespo R, Alvarez C, Hernandez I, García C. A spatially explicit analysis of chronic diseases in small areas: a case study of diabetes in Santiago, Chile. *International Journal of Health Geographics*, 2020, 19(1): 24.
- [34] Lyu R F, Clarke K C, Zhang J M, Feng J L, Jia X H, Li J J. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: a case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. *Applied Geography*, 2019, 108: 64-73.
- [35] Xu J, Wang S, Xiao Y, Xie G D, Wang Y Y, Zhang C S, Li P, Lei G C. Mapping the spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service relationships and bundles in Ningxia, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 294: 126216.
- [36] Gao G Y, Zhang J J, Liu Y, Ning Z, Fu B J, Sivapalan M. Spatio-temporal patterns of the effects of precipitation variability and land use/cover changes on long-term changes in sediment yield in the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(9): 4363-4378.
- [37] 王怀军, 潘莹萍, 陈忠升. 1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征. *地理科学*, 2017, 37(12): 1900-1908.
- [38] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 118-126.
- [39] Xia H, Yuan S F, Prishchepov A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: implications for spatial planning and management. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: 106767.
- [40] 乔旭宁, 杨祯, 杨永菊. 1995—2020 年淮河流域生态系统服务权衡协同关系的尺度效应. *地域研究与开发*, 2023, 42(2): 150-154, 166.
- [41] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 李艳红. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析. *地理学报*, 2020, 75(5): 975-988.
- [42] Jiao Y F, Liu J, Li C Z, Zhang X J, Yu F L, Cui Y J. Spatial and temporal trends of extreme temperature and precipitation in the Daqing River Basin, North China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 147(1): 627-650.
- [43] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Liang Z, Li S C. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [44] Wang H R, Zhang M D, Wang C Y, Wang K Y, Wang C, Li Y, Bai X, Zhou Y K. Spatial and temporal changes of landscape patterns and their effects on ecosystem services in the Huaihe River Basin, China. *Land*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, 11(4): 513.
- [45] 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 梁忠民, 贺瑞敏. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展. *水科学进展*, 2019, 30(1): 112-122.
- [46] 范玉龙, 赵天英, 丁圣彦. 基于“生态系统服务网”理论的国土空间规划研究. *生态学报*, 2023, 43(12): 4868-4875.
- [47] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系. *生态学报*, 2021, 41(20): 8003-8015.