

西藏自治区城镇化与生态系统服务 协调发展研究

田一聪¹, 田明¹, 李鹏^{1*}, 吴致蕾²

(1. 北京师范大学社会发展与公共政策学院, 北京 100875; 2. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016)

摘要:城镇化与生态系统服务的关系是可持续发展领域的重要议题。随着人类在高原等特殊地理条件下改造自然的能力不断加强,人类活动与生态环境的交互作用关系逐渐从被动适应转变为主动协调。以城镇化为代表的经济社会发展和以生态资产价值量衡量的生态系统服务,如何在高原地区协调互促,愈加成为实现区域可持续发展目标的关键核心。论文以西藏自治区为研究区,基于2000—2020年城镇化与生态系统服务的综合水平测度,采用双变量空间自相关、耦合协调度模型、核密度估计等方法,探讨城镇化与生态系统服务的多尺度空间关联特征,判断两者的耦合协调类型及时空演变模式。结果表明:① 2000—2020年间西藏全域城镇化呈现局部集聚的空间分布特征,年际变化的总体趋势为缓慢上升;而生态系统服务的空间分布更加分散,区际差异较大,但总体水平保持稳定。② 城镇化与生态系统服务具有显著的空间负相关关系,城镇化综合指数高的地区,其周边地区的生态系统服务水平相对偏低。③ 以2010年为拐点,西藏城镇化与生态系统服务的交互关系具有先扩张再收缩的变化特征。目前协调发展类型和基本协调类型占据主导地位,但同时也出现失调衰退的情况。④ 耦合协调关系演变在空间上体现为,以拉萨及其周边地区的单中心主导逐步转向包含其他地市区县的多中心分布模式,这在一定程度上得益于拉萨市耦合协调发展过程的空间溢出效应。论文从空间视角完善了高原城镇化与生态系统服务的耦合协调研究,可为合理引导人地关系协调健康发展提供决策依据。

关键词:城镇化;生态系统服务;耦合协调;空间关联;西藏

自21世纪初“人类世”概念被提出以来^[1-2],人类活动对全球生态环境的影响愈加显著。人类不断以空前规模改造和重塑自然环境,同时也经受环境与生态系统对人类活动的反馈与响应。人与自然的交互作用关系逐渐从被动适应转变为主动协调,研究重点也从探讨“人地关系”向“人地协同”转变,“地理协同”理论因此成为可持续性研究领域的重要议题^[3]。作为“地球第三极”“亚洲水塔”和中国重要的生态安全屏障,青藏高原以其独特的自然环境和地理条件,成为可持续发展领域的核心研究

区域^[4]。一方面,青藏高原地区具有丰富的自然资源,其生态系统服务价值具备其他地区难以企及的发展潜力;另一方面,高原地区脆弱的生态环境和自然本底,使其难以承受高强度和大规模的人类活动与开发,因此探讨高原地区人地协同具有愈加重要的研究价值和现实意义^[5]。土地利用变化是人地关系研究中的关键环节,既体现了人类活动对生态环境的影响,同时也呈现了环境与生态系统的发展演化。人口的乡城流动和城镇化过程,在土地利用层面就表现为城镇用地扩展的过程^[6];而不同土地

收稿日期:2023-01-11;修订日期:2023-04-26。

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0406);国家自然科学基金项目(42371197)。[Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No. 2019QZKK0406; National Natural Science Foundation of China, No. 42371197.]

第一作者简介:田一聪(1994—),男,吉林吉林人,博士生,主要研究方向为人口与城镇化、区域可持续发展。

E-mail: 202131240006@mail.bnu.edu.cn

***通信作者简介:**李鹏(1984—),男,河北巨鹿人,博士生,主要研究方向为公共管理。E-mail: lipengkaoyan@126.com

引用格式:田一聪,田明,李鹏,等. 西藏自治区城镇化与生态系统服务协调发展研究[J]. 地理科学进展, 2023, 42(10): 1947-1960. [Tian Yicong, Tian Ming, Li Peng, et al. Coordinated development of urbanization and ecosystem services in Tibet Autonomous Region. Progress in Geography, 2023, 42(10): 1947-1960.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.10.007

利用类型所承载的生态资产价值,同时也构成了生态系统服务价值评估的重要标准^[7]。因此,本文从协同发展视角出发,旨在研究高原地区城镇化与生态系统服务之间的空间关联和交互效应关系。

有关城镇化与生态系统服务及两者的交互关系,国内外学者开展了大量的相关研究,主要体现在3个方面。一是城镇用地扩展及城镇化空间格局。作为土地利用变化的重要体现^[8],城镇用地扩展体现了土地及空间层面的城镇化发展演变。相关研究分别针对青藏高原^[6,9]、西藏自治区^[10]、京津冀^[11]以及长三角^[12]等地区,开展城镇用地扩展格局的时空分析,定量测量城镇化发展水平。二是生态系统服务的权衡、交互与综合评估。生态系统不仅可以为人类生存直接提供各种原料或产品,而且具有调节气候、保持水土、防风固沙、保护生物多样性等功能,因此对人类生存和生活有贡献的所有生态系统产品和服务统称为生态系统服务^[13]。相关研究一方面围绕生态系统服务的模型框架、评估方法与分析工具展开探讨^[14-16],另一方面结合实际研究区进行生态系统服务的时空分析与评价,例如分析钱塘江流域^[17]、广州主城区^[18]、重庆主城区^[19]等地生态系统服务价值的时空模式与驱动因子,以及对不同模拟情景下的生态系统服务价值进行估算^[20]等。三是对城镇化与生态系统服务及其相关系统交互作用关系的研究。首先,从土地利用变化的角度来看,区域尺度是多数研究的重点。例如,探究河西地区^[21]、淮河流域^[22]、黄河流域^[23]以及海南岛东北部^[24]等局地地区土地利用变化对生态系统服务的影响,还有研究针对青藏高原地区,提出将生态系统服务损失纳入土地利用变化的生态风险评估^[25]。其次,从城镇化与生态系统的直接作用来看,协调演化与空间耦合关系成为相关研究的重点。例如以京津冀^[26]、黄河中游^[27-29]、长江中游^[30-31]、长三角^[32]、珠三角^[33]等重点地区为研究区,探讨两者耦合关系变化的方向、程度与时空分布特征。此外,还有研究围绕城镇化与生态环境的作用机理,提出具有启发性的概念与分析框架。包括城镇化与生态环境的“耦合魔方”^[34],城镇化与生态环境耦合的图谱分析^[35]与动态模拟方法^[36],以及生态系统服务与人类福祉的耦合关系^[37]等。

以上述研究为代表,国内外学者围绕城镇化与生态系统服务及其交互关系取得了丰富的研究成果,但仍存在时空尺度单一,对耦合协调的空间分

异探讨不足等问题,并且缺乏对高原地区城镇化与生态系统服务协调发展的优化策略研究。因此,本文围绕城镇化与生态系统服务协调发展问题,以西藏自治区为研究区域,探讨以城镇化为代表的人类活动和以生态资产价值衡量的生态系统服务如何实现在高原地区的协调健康发展。本文基于对2000—2020年城镇化和生态系统服务两个核心子系统的综合水平测度,分析其多尺度空间关联特征,判断两者的耦合协调程度和类型及其在空间维度上的差异,最后结合城镇扩展格局和生态安全格局,提出进一步促进城镇化与生态系统服务的优化方案,以期合理引导人地关系协调健康发展提供决策依据。

1 研究框架、数据和方法

1.1 研究框架

本文构建的城镇化与生态系统服务协调发展分析框架如图1所示。基于栅格的多尺度空间分析,分别从城镇、县域、地市、流域以及西藏自治区层面开展研究。围绕城镇化子系统与生态系统服务子系统,构建相应的综合水平测度。结合以往研究进展,按照人口城镇化、经济城镇化、土地城镇化3个维度构建城镇化综合水平测度。根据相关学者

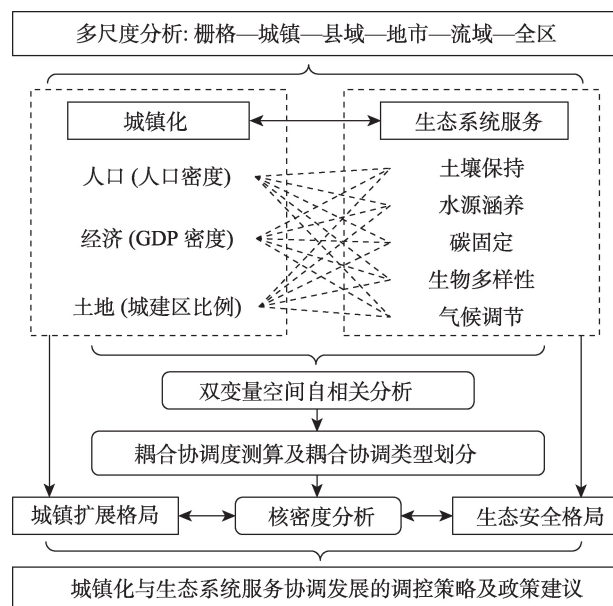


图1 城镇化与生态系统服务协调发展分析框架

Fig.1 Analytical framework for coordinated development of urbanization and ecosystem services

对青藏高原生态资产价值量即生态系统服务价值量的评估结果^[38],从土壤保持、水源涵养、固碳、生物多样性、气候调节5个维度构建生态系统服务综合水平测度。在城镇化与生态系统服务价值的探索性空间分析方面,采用双变量空间自相关模型分析两者的空间关联效应。然后采用耦合协调度模型,分析城镇化与生态系统服务的耦合协调程度及其类型划分,并作多区域的空间异质性比较。由于城镇化与生态系统服务均与土地利用变化有关,因此针对城镇扩展的热点地区与生态系统服务降低的冷点或预警地区进行核密度分析,结合城镇扩展格局与生态安全格局的空间分布特征,最终提出城镇化与生态系统服务协调发展的调控策略及政策建议。

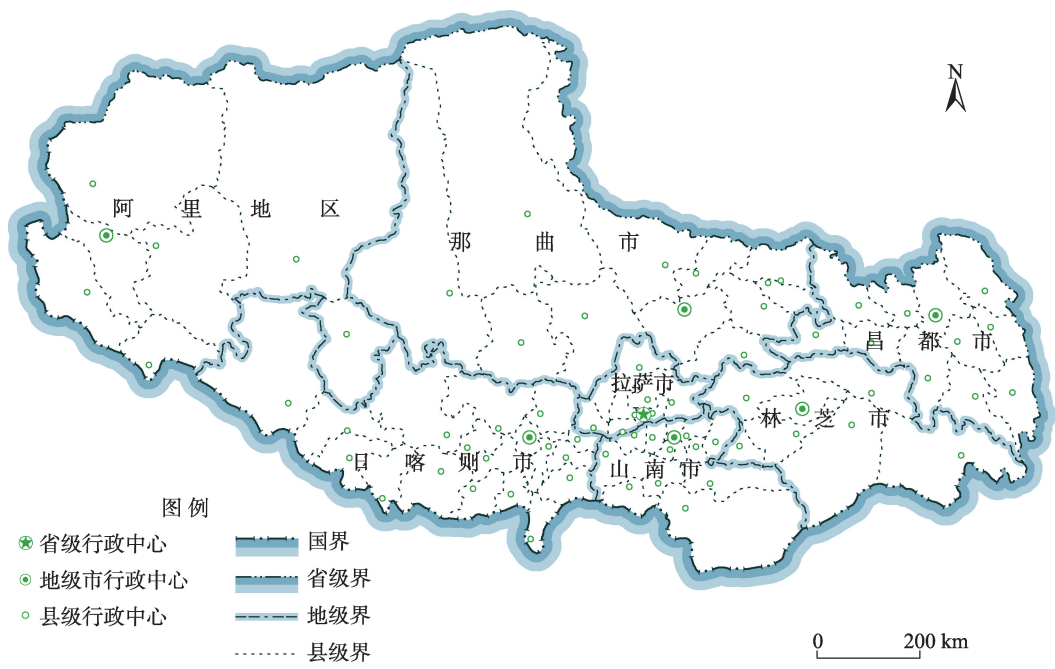
1.2 研究区概况

西藏自治区(图2)位于青藏高原西南部,全区面积120.28万km²,约占全国总面积的1/8。全区辖6个地级市、1个地区,平均海拔4000 m以上。根据温度带、干湿程度、植被类型及生态地貌类型,可将全区划分为羌塘高原湖盆高寒草原区、藏南高山谷地灌丛草原区、那曲高原山地高寒灌丛草甸区、藏东高山深谷针叶林区、东喜马拉雅南翼山地季雨林与常绿阔叶林区以及阿里山地荒漠区等6种生态地

理区域^[39]。区内河流及湖泊数量众多,水资源丰富,是众多江河的发源地。土地资源丰富,天然草地面积位居全国首位,是中国主要的牧区之一,耕地则集中分布在藏南河谷及河谷盆地,此外还有大量的未利用土地。根据第七次全国人口普查数据,2020年西藏自治区常住人口为364.81万人,其中城镇人口130.34万人,城镇化率约为35.7%。受自然地理条件影响,西藏全域大部分地区人口稀少,不适宜人类居住地区较多,人口主要集中在“一江两河”谷地与主要交通线路沿线。在特殊的自然条件下,探索实现生态环境保护与经济社会发展相协调,对于促进高原社会可持续发展具有极其重要的现实意义。

1.3 数据来源及处理

本文主要涉及城镇化相关数据和生态系统服务价值量数据集,时间范围为2000—2020年,以其中每5年为关键时点进行分析比较。针对城镇化水平的测量一般具有多维度特征,以往研究普遍从人口分布、产业结构、居民收入、城镇用地等方面界定和解释城镇化发展水平。为便于栅格尺度的数据分析,本文采用人口密度、GDP密度和城镇区比例数据分别表征人口维度、经济维度和土地维度的城镇化水平,并通过标准化处理后进行等权重计算,



注:本图基于西藏自治区地理信息公共服务平台网站下载的审图号藏S(2022)004号的标准地图绘制,底图边界无修改,下同。

图2 研究区示意图
Fig.2 The study area

最终得到城镇化综合水平测度。

人口密度数据来自欧盟联合研究中心主持研发的GHS-POP人口栅格数据集^[40],选择空间分辨率为1 km。相比于人口栅格领域的其他国际产品,GHS-POP数据集精度较高,并且其人口估算范围主要集中在建设用地范围内,更适宜本文对城镇化的研究需要。GDP密度数据来自Chen等^[41]研制的全球1 km分辨率的国内生产总值栅格数据产品。该产品基于校正的夜间灯光数据及其年际变化,对各地区实际GDP年均增长率进行修正,以2019年全球GDP栅格数据为基准,反算出1992—2019年的GDP栅格数据。由于缺少2020年结果,以2019年数据代替。城建区比例数据来自Kuang等^[42]研制的2000—2018年全国城市不透水面数据,数据的原始空间分辨率为30 m。本文计算每1 km栅格内的不透水面面积比例,以此作为城建区比例即土地城镇化水平,因缺少2020年数据,以2018年数据代替。

生态系统服务价值量来自刘焱序^[38]计算的青藏高原生态资产价值量(2000—2020年)数据集。该数据集根据2000—2015年中国科学院土地利用数据及其2020年模拟预测数据,对包括土壤保持、水源涵养、固碳、生物多样性、气候调节等在内的生态系统服务价值量进行评估。基于单位面积的价值当量因子法,结合中国土地利用类型和植被分布,该产品实现了青藏高原生态系统服务价值的时空动态核算,突出了青藏高原地区的空间异质性,与相关研究数据相比,该数据集在时间长度和空间分辨率以及数据精度上均有显著优势^[13],因此,本文用以分析西藏地区城镇化与生态系统服务的协调发展问题。与城镇化子系统的处理方式类似,通过标准化处理后进行等权重计算,最终得到生态系统服务价值量的综合水平测度。

其他辅助数据。西藏地区的标准地图数据来自西藏自治区地理信息公共服务平台发布的自治区标准地图(政区简图版)。文中还采用张国庆^[43]研制的青藏高原流域边界数据集,提取其中西藏自治区部分,包括雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、金沙江流域,以及印度河上游、恒河(及支流)上游、高原内流区等7大流域范围。

1.4 研究方法

采用双变量空间自相关模型分析城镇化与生态系统服务之间的空间关联;根据耦合协调度模型,得到城镇化与生态系统服务的耦合协调度评价

结果,并探讨其不同空间尺度上的分异特征;最后采用核密度分析方法探究城镇扩展格局与生态安全格局交互作用下的政策启示。

1) 双变量空间自相关(bivariate spatial correlation, BSC)模型。正如单变量空间自相关模型是对某空间单元变量及其空间滞后与邻近单元变量之间的相关性分析,双变量空间自相关模型将其拓展为双变量的情形,即某空间单元变量及其空间滞后与邻近单元的另一变量之间的相关性分析^[44]。双变量空间自相关模型同样由全局Moran's I 指数和局部Moran's I 指数组成,其公式分别为:

$$I_B = \frac{\sum_i (\sum_j w_{ij} e_j \times u_i)}{\sum_i u_i^2} \quad (1)$$

$$I_i^B = c \times u_i \sum_j w_{ij} e_j \quad (2)$$

式中: I_B 与 I_i^B 分别为双变量全局Moran's I 和局部Moran's I 指数; w_{ij} 为空间权重; u_i 为第 i 个单元的城镇化综合水平; e_j 为与 i 邻近的第 j 个单元的生态系统服务价值综合水平; $\sum_j w_{ij} e_j$ 为与 i 邻近的所有空间单元的生态系统服务价值综合水平的平均值, c 是恒定比例因子。

2) 耦合协调度(coupling and coordination degree, CCD)模型。耦合协调是来源于物理学的概念,旨在表征不同系统在内外力作用下产生的相互作用和影响,以往研究普遍用其分析两个综合变量如城镇化与生态环境等的交互作用关系,并对其耦合协调类型进行评价^[4,26,33]。本文引入耦合度模型,其公式为:

$$C = \frac{2\sqrt{U \times E}}{U + E} \quad (3)$$

进而构建城镇化与生态系统服务的耦合协调度模型,用以判别城镇化与生态系统服务的协调程度和类型:

$$T = \alpha U + \beta E \quad (4)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (5)$$

式中: C 是耦合度, D 是耦合协调度, T 是综合协调指数; U 和 E 分别表示城镇化与生态系统服务的综合评价指数, α 和 β 则表示2个综合指数的相对重要性, $\alpha + \beta = 1$ 。由于 α 和 β 的相对大小不会影响模型中耦合协调度的总体趋势,本文将其设定为 $\alpha = \beta = 0.5$ 。同时借鉴物理学有关协调类型的划分标准,将城镇化与生态系统服务的耦合情况划分为

3个大类、4个亚类、12种基本类型,如表1所示。

3) 核密度估计(kernel density estimation, KDE)及其空间分析。作为一种非参数估计方法,核密度估计广泛应用于定量空间分析。通过将空间样本点转化为栅格化密度表面,核密度估计能够在密度表面制图和“冷热点”探测方面发挥显著作用^[12,45]。本文采用核密度估计方法识别城镇拓展或增长的热点地区以及生态系统服务降低的冷点地区,从而在耦合协调结果的基础上,研判城镇扩展格局与生态安全格局的空间关联。核密度估计的公式如下:

$$f(x_0)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^nK\left(\frac{x_0-x_i}{h}\right)$$
 (6)

式中: $f(x_0)$ 为某空间点 x_0 的非参数核估计, h 是平滑参数即带宽, $K\left(\frac{x_0-x_i}{h}\right)$ 为核函数, n 为样本点数量。

2 结果分析

2.1 城镇化与生态系统服务的时空格局

根据城镇化与生态系统服务的多维测度,图3展示了两个综合指数的时空格局演变。2000年西藏全域城镇化综合水平总体较低,城镇化地区主要集中在“一江两河”流域以及各地市政府所在地附近。从年际变化来看,2005—2015年“一江两河”流域城镇化增势显著,区域城镇化水平普遍提升,尤其在拉萨河与雅鲁藏布江交汇地区呈现集中

连片的增长趋势。相较于城镇化综合指数的集聚态势,生态系统服务水平在空间模式上更为分散。从西藏全域来看,生态系统服务水平具有东南高、西北低的空间分布特征;在局部地区受土地覆被和土地利用方式影响较为显著;而在“一江两河”流域附近呈现高值和低值交错分布的空间特征,其分布格局随时间变化并不明显。

城镇化与生态系统服务的区际差异同时体现在地市和流域层面。表2列出了城镇化与生态系统服务综合指数的分区均值统计结果。从各地市来看,其城镇化综合水平普遍呈上升趋势,拉萨市城镇化综合指数最高,其次为山南市和林芝市,那曲市和阿里地区的城镇化综合水平总体较低。在生态系统服务方面,林芝市和山南市的综合指数最高,其次为昌都市和拉萨市,阿里地区的综合指数最低。根据不同流域的结果判断,雅鲁藏布江流域的城镇化综合水平最高,高原内流区则具有相对最低的城镇化和生态系统服务水平。城镇化综合水平较高的地区还包括澜沧江、怒江和金沙江流域,同时金沙江和澜沧江流域的生态系统服务水平处于领先地位。研究结果表明,城镇化与生态系统服务在较多地区呈现负相关特征,城镇化水平越高,其生态系统服务更趋于减少或增势减缓。

2.2 城镇化与生态系统服务的空间关联

采用双变量空间自相关分析方法,得到城镇化与生态系统服务在全局和局部地区的空间关联特征,如图4所示。双变量空间自相关主要关注城镇

表1 城镇化与生态系统服务耦合协调类型划分
Tab.1 Classification of coupling and coordination types of urbanization and ecosystem services

大类	耦合协调度	亚类	U 与 E 对比关系	基本类型	编码
协调类	$0.5 < D \leq 0.8$	协调发展类(I)	$E - U > 0.1$	协调发展类—城镇化滞后型	I-1
			$ E - U \leq 0.1$	协调发展类—同步型	I-2
			$U - E > 0.1$	协调发展类—生态系统服务滞后型	I-3
过渡类	$0.4 < D \leq 0.5$	基本协调类(II)	$E - U > 0.1$	基本协调类—城镇化滞后型	II-1
			$ E - U \leq 0.1$	基本协调类—同步型	II-2
			$U - E > 0.1$	基本协调类—生态系统服务滞后型	II-3
	$0.3 < D \leq 0.4$	濒临失调类(III)	$E - U > 0.1$	濒临失调类—城镇化滞后型	III-1
			$ E - U \leq 0.1$	濒临失调类—共损型	III-2
			$U - E > 0.1$	濒临失调类—生态系统服务滞后型	III-3
失调类	$0 < D \leq 0.3$	失调衰退类(IV)	$E - U > 0.1$	失调衰退类—城镇化滞后型	IV-1
			$ E - U \leq 0.1$	失调衰退类—共损型	IV-2
			$U - E > 0.1$	失调衰退类—生态系统服务滞后型	IV-3

注:理论上耦合协调度的范围为0~1,但本文及相关研究^[4]均表明,西藏自治区耦合协调度始终低于0.8。

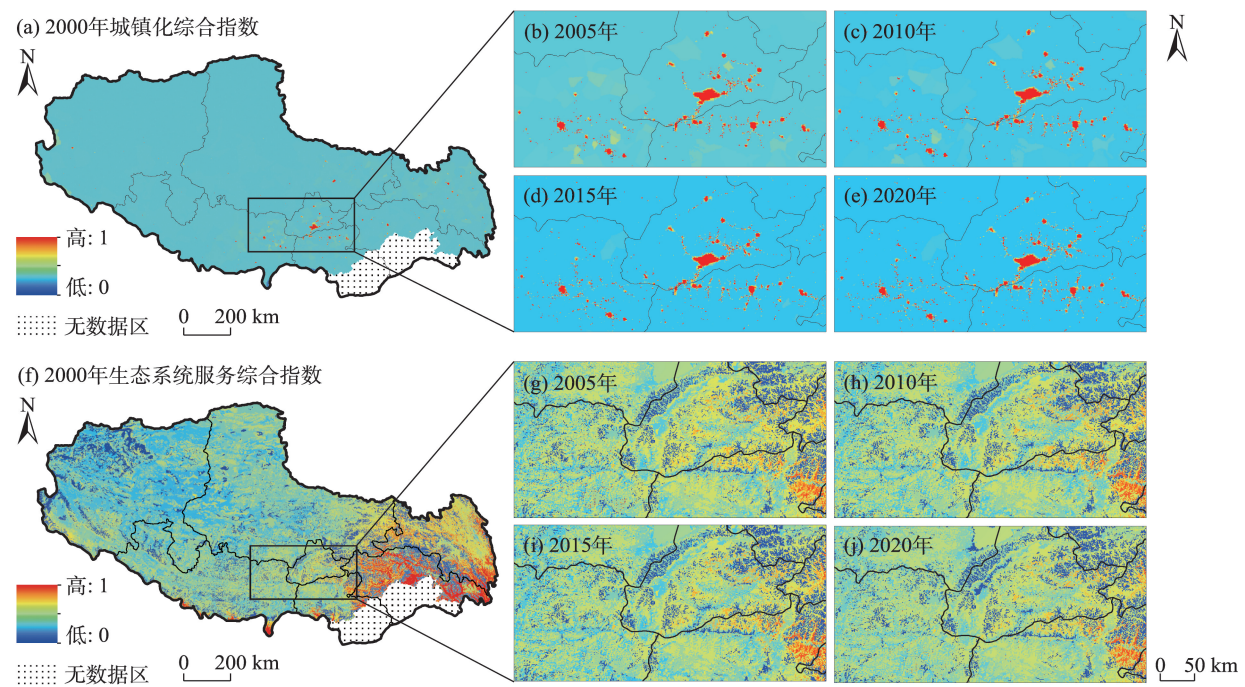


图3 城镇化与生态系统服务综合指数的时空演变

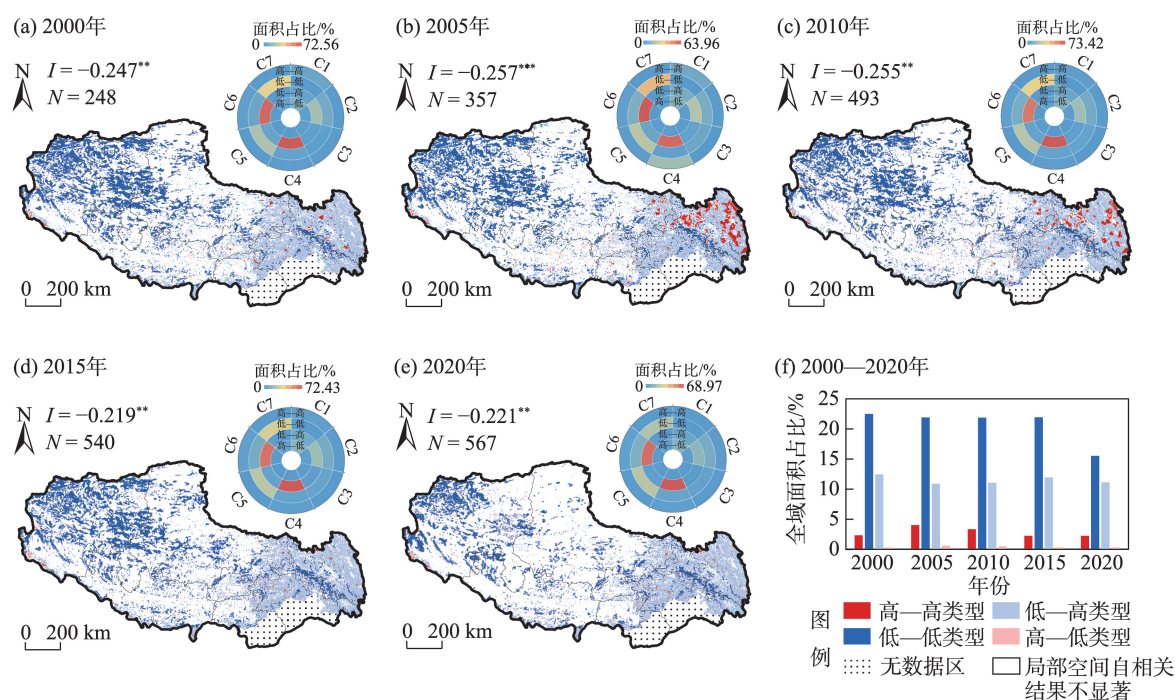
Fig.3 Spatiotemporal evolution of urbanization and ecosystem services comprehensive indices

表2 城镇化与生态系统服务综合指数的分区均值统计

区域		城镇化综合指数					生态系统服务综合指数				
		2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
地市	拉萨市	0.00329	0.00365	0.00410	0.00440	0.00442	0.25732	0.25223	0.24462	0.24025	0.23804
	山南市	0.00187	0.00191	0.00192	0.00198	0.00208	0.31792	0.30652	0.30586	0.30264	0.29939
	日喀则市	0.00153	0.00155	0.00159	0.00159	0.00158	0.23030	0.22313	0.22658	0.22187	0.22020
	昌都市	0.00154	0.00156	0.00157	0.00159	0.00159	0.31658	0.30790	0.30809	0.29825	0.29368
	那曲市	0.00146	0.00144	0.00145	0.00145	0.00145	0.22583	0.22641	0.22057	0.21535	0.22104
	阿里地区	0.00144	0.00141	0.00140	0.00141	0.00140	0.18508	0.18232	0.18272	0.18069	0.18103
	林芝市	0.00165	0.00163	0.00161	0.00163	0.00168	0.36870	0.34718	0.35379	0.34696	0.34314
流域	雅鲁藏布江	0.00176	0.00181	0.00187	0.00191	0.00194	0.28940	0.27727	0.27901	0.27406	0.27203
	高原内流区	0.00143	0.00140	0.00139	0.00139	0.00138	0.20117	0.20149	0.19876	0.19500	0.19859
	怒江	0.00154	0.00156	0.00163	0.00164	0.00164	0.28399	0.27387	0.27162	0.26127	0.26232
	澜沧江	0.00160	0.00163	0.00165	0.00167	0.00167	0.32858	0.32430	0.32252	0.31429	0.30614
	金沙江	0.00154	0.00157	0.00159	0.00161	0.00162	0.36251	0.36318	0.35934	0.35433	0.34598
	印度河上游	0.00145	0.00144	0.00144	0.00145	0.00145	0.19205	0.18515	0.18731	0.18665	0.18374
	恒河上游	0.00149	0.00147	0.00150	0.00151	0.00152	0.23583	0.22534	0.23203	0.22689	0.22585

注:各地市/流域的综合指数平均值基于1 km×1 km分辨率的栅格统计。

化与生态系统服务在邻近空间上的作用关系。采用双变量全局Moran's *I* 指数衡量双变量全局空间自相关关系。考虑到西藏全域的城镇化低值区分布广泛,因此以城镇化综合指数高于0.1的地区参与全局Moran's *I* 指数计算。结果表明,城镇化与生态系统服务总体呈现显著的负向空间关联,这种关联效应在2000—2010年有所加剧,2010—2020年略有缓解。利用双变量局部Moran's *I* 指数测算双



注:图a~e中, I 表示全局Moran's I 指数,**表示模拟得出的伪 P 值小于0.01, N 表示参与计算的1 km分辨率网格数量;西藏自治区全图展示了局部空间自相关的4种类型分布结果,右上方热力图表示西藏各地市政府所在区县在4种类型上的面积占比,C1~C7分别为拉萨市城关区、山南市乃东区、日喀则市桑珠孜区、昌都市卡若区、那曲市色尼区、林芝市巴宜区、阿里地区噶尔县,下同。

图4 城镇化与生态系统服务双变量空间自相关格局

Fig.4 Bivariate spatial autocorrelation pattern of urbanization and ecosystem services

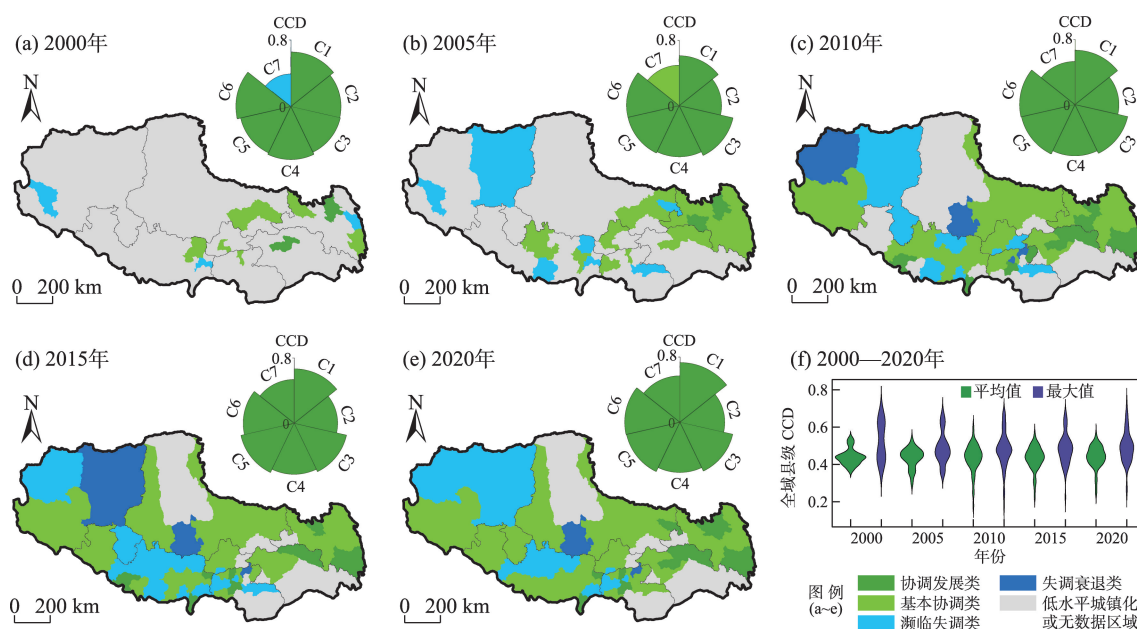
变量局部空间自相关关系,其结果体现为城镇化与生态系统在邻近地区所具有的4类特征:即高一高集聚、低—低集聚、低—高集聚和高—低集聚。结果表明,在城镇化与生态系统服务的局部空间自相关方面,拉萨市以高一高、高一低集聚为主要类型,卡若区和巴宜区的低—高集聚类型分布较多,噶尔县则以低—低类型集聚为主。图4f给出了除不显著类型外,西藏全域在4种空间自相关类型上的面积占比情况。其中低—低集聚类型处于绝对主导地位,其次为低—高类型,高一高类型和高—低类型占比较小。

2.3 城镇化与生态系统服务的耦合协调关系演变

基于耦合协调类型划分标准,城镇化与生态系统服务的耦合协调演变结果如图5所示。因低水平城镇化区域较多,这里采用区县一级空间单元,通过分区统计耦合协调度的平均值,计算得到西藏全域的城镇化与生态系统服务耦合协调类型分布结果。2000—2005年少数地区具有基本协调的城镇化与生态系统服务耦合关系,这些地区主要位于拉萨市附近及317国道沿线。自2010年起,协调发展

类型逐渐增多,集中分布在林芝市和昌都市等地,同时开始出现失调衰退类型,主要分布在西藏中部和西北部地区。若以同样的耦合协调类型划分标准判断,除噶尔县以外,其余6个地市政府所在区县均处于协调发展类型,噶尔县也于2010年左右具备城镇化与生态系统服务协调发展的变化趋势。根据图5f所示,2000—2005年西藏全域县级耦合协调度的平均值相对集中,2005年平均值略有扩散,至2010年耦合协调度的平均值变化明显,分布范围显著增大,出现大范围的城镇化与生态系统服务失调地区。以2010年为拐点,耦合协调度的最大值逐渐回升,平均值的下限也呈现增长态势。可见,2000—2020年间西藏城镇化与生态系统服务的交互波动具有先扩大再收缩的总体特征。

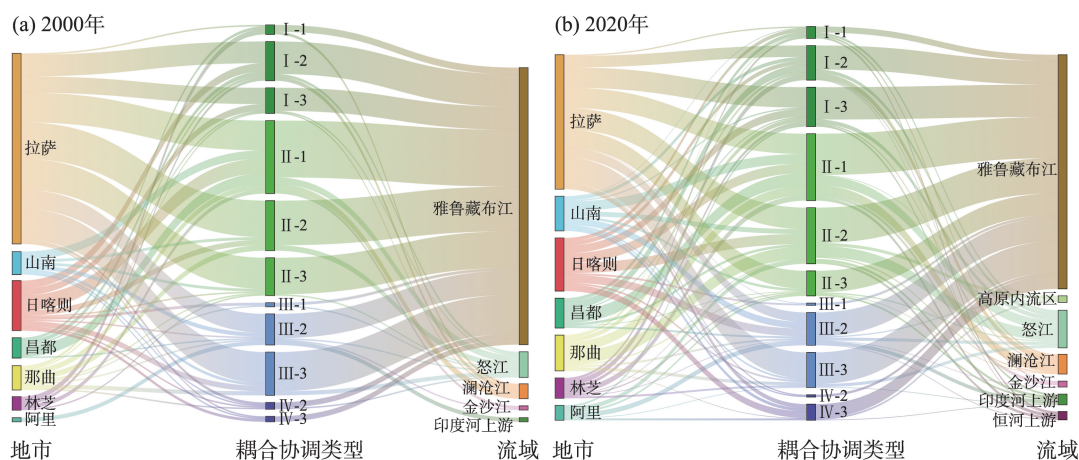
在耦合协调度测算及耦合协调类型划分的基础上,本文总结了西藏各地市及流域的城镇化与生态系统服务耦合协调格局演变情况,见图6。2000—2020年间,各地市及流域内耦合协调类型的变化极为明显,同时地市及流域间也具有极其显著的比例差异。如2000年拉萨市的综合城镇化水平



注:图a~e中,西藏自治区全图展示了县域耦合协调类型的分布结果,右上方玫瑰图表示西藏各地市所在区县的耦合协调度(CCD)及其所属类型。图f为西藏全域县级CCD的分布结果,其中以小提琴图的横向宽度表示相应CCD水平的区县数量。

图5 城镇化与生态系统服务的耦合协调类型演变

Fig.5 Evolution of coupling and coordination types of urbanization and ecosystem services



注:图中条带宽度表示各耦合协调类型的相对比重,不具有绝对含义。2000年高原内流区和恒河上游地区城镇化综合指数均在0.1以下,故此未列入计算。

图6 西藏各地市及流域的城镇化与生态系统服务耦合协调类型演变

Fig.6 Evolution of coupling and coordination patterns of urbanization and ecosystem services in cities and basins in Tibet

高居西藏近半数之多,但至2020年占比降至1/3左右,山南、那曲、林芝等地的城镇化水平均有显著增长。从流域类型来看,雅鲁藏布江流域的城镇化地域占比有所下降,恒河上游等沿边地区以及怒江流域均有明显增长。根据耦合协调类型区际分布判断,协调发展类型和基本协调类型地区,从拉萨及其周边的单中心分布转变为包括拉萨、日喀则、山

南以及林芝等地在内的多中心分布模式,这从某种程度上也体现出“一江两河”多中心空间分布模式的形成、演化和发展过程。

城镇化与生态系统服务的耦合协调分析为各地区调整并引导城镇化和生态治理政策提供了参考。以西藏自治区首府拉萨市为例,本文分析了拉萨市城镇扩展格局和生态安全格局的空间关联信

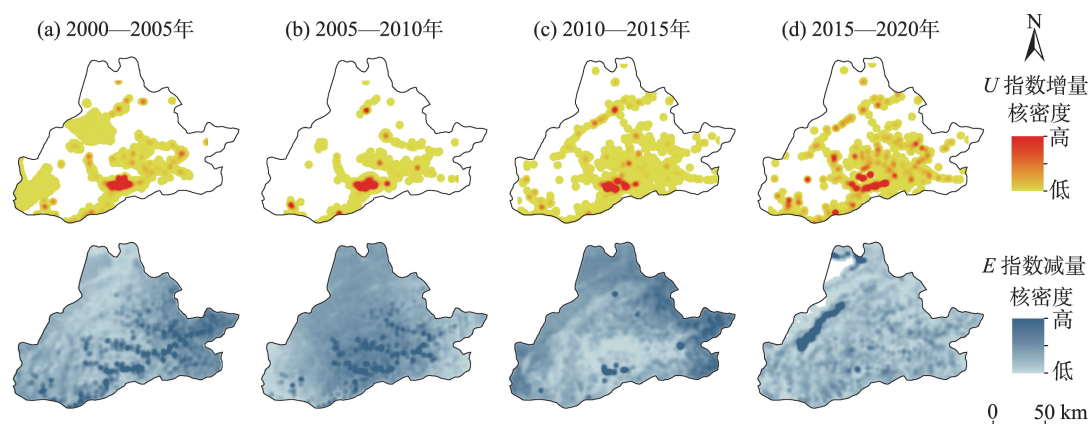


图7 拉萨市城镇扩展格局与生态安全格局演变

Fig.7 Evolution of urban expansion pattern and ecological security pattern in Lhasa

息,如图7所示。通过提取城镇化综合指数(U)的增量部分、生态系统服务综合指数(E)的减量部分,分别表征城镇化扩展增长的“热点地区”、生态系统服务降低或可能存在生态安全问题的“冷点地区”,并对其进行核密度分析。结果表明,2000—2015年间,拉萨市市区周边地区是城镇化扩展的热点地带,而相应年份该地区生态系统服务则有明显的降低趋势,其降低范围不止于拉萨市区周边,甚至延伸到邻近县域;2015—2020年,拉萨市市区生态系统服务大范围降低的态势有所缓解,与之相对的是邻近县域城镇化扩展趋势进一步增强。这表明在城镇化与生态系统服务协调发展问题上,空间溢出效应等空间交互关系具有更为重要的政策参考意义,从空间交互维度探讨政策措施可能带来的影响应当成为促进城镇化与生态系统服务协调发展的重要方向。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文围绕城镇化与生态系统服务协调发展问题,分别测度城镇化与生态系统服务综合指数,采用双变量空间自相关模型分析两者的空间交互关联,构建耦合协调度模型及耦合协调类型划分标准,探究城镇化与生态系统服务的耦合协调关系演变,最后以拉萨市为例探讨了城镇扩展格局与生态安全格局的冷热点空间分布规律。研究表明:

(1) 2000—2020年,西藏全域城镇化呈现局部地区集聚的空间分布特征,而生态系统服务具有更

加分散的空间特征,年际变化的总体趋势为城镇化综合水平缓步提升,生态系统服务基本保持稳定,城镇化与生态系统服务在不同地市和流域之间存在显著差异。

(2) 城镇化与生态系统服务在全局层面存在显著的空间负相关关系,即城镇化综合指数高的地区,其周边地区通常具有较低的生态系统服务水平,反之亦然。从局部分布规律来看,受城镇化综合水平普遍偏低影响,低—低类型集聚是主要的分布类型,在西藏东南部等地存在少数高—高集聚和低—高集聚特征,地市政府所在区县附近也有部分高—高集聚类型分布。

(3) 城镇化与生态系统服务的耦合协调经历了显著的演变过程。以2010年为拐点,2010年前,以少数地区的基本协调类型和多数地区的低水平城镇化并存局面为主;2010年后,基本协调和协调发展类型占据主导地位,但同时也出现失调衰退的区域。总体上,2000—2020年间,西藏城镇化与生态系统服务的交互波动具有先扩张再收缩的变化特征。

(4) 区际城镇化与生态系统服务的耦合协调关系演变,从拉萨及其周边地区的单中心主导逐步转向包括拉萨、日喀则、山南等地在内的多中心空间分布模式;拉萨市的城镇扩展格局与生态安全格局存在显著的空间关联和溢出效应,这为探讨局部地区协调发展对全局可能产生的影响提供了空间维度的思考。

3.2 讨论

本文旨在从空间维度剖析城镇化与生态系统

服务在高原自然和社会环境下的格局演变特征。围绕城镇化和生态系统服务的空间交互机制和协调发展问题,未来可从诸多方面予以探索和改进:一是丰富和拓展数据指标。文中采用人口、经济和土地等3个维度构建城镇化综合指数,并从土壤保持、水源涵养、固碳、生物多样性和气候调节等5个维度构建生态系统服务价值量的综合指数。随着社会经济数据的栅格化技术不断进步,以及多源数据对生态环境指标的补充,城镇化和生态系统服务能够得到更加准确的数据测量和集成。二是多角度探讨空间交互作用关系。文中采用双变量空间自相关模型分析城镇化和生态系统服务的空间关联,但正如Anselin等^[44]指出的,应谨慎解释双变量空间自相关模型的结果,因其忽视了同一空间位置的两个变量之间的空间关联。而Lee^[46]设计了一种包含空间平滑标量(spatial smoothing scalar, SSS)的 L 统计量,融合了Pearson's r 指数与Moran's I 指数,使其能够同时考虑直接相关与空间邻近相关2种关联特征。未来应结合现有空间分析工具,探索实现空间相关性的综合分析与应用。三是从模型层面推动区域尺度的城镇化与生态系统服务耦合协调研究。Li等^[47]在探讨人与自然耦合系统(CHANS)时认为,随着“人类世”的到来,人地耦合系统研究不断深入,虽然面临数据时空尺度不匹配、人类过程量化困难以及缺乏区域尺度模型等问题,但大数据与云计算以及新的建模技术均为相关领域研究提供了新的机遇。特别是在城镇化与生态系统服务协调发展方面,以高原等特殊自然环境区域为研究区,采用综合视角和系统思维探讨空间交互集成的耦合协调关系应当成为未来研究的主要方向。

结合研究结论和上述分析,本文提出引导城镇化与生态系统服务协调发展的调控策略及政策建议如下:①从西藏全域层面引导城镇化与生态系统服务协调发展,提高两者协调发展类型比重,减少失调衰退类型比重。在青藏高原特殊自然环境下,城镇化扩展增长的可利用土地相对有限,只有不断提升城镇化质量,实现以人为核心、人与自然和谐共生的城镇化发展模式才有助于实现高原社会的持续健康发展。②针对不同地市及其所在流域的实际情况,分类施策促进城镇化与生态系统服务协调发展。“一江两河”地区集中了西藏大部分的城镇人口和经济活动,为提升该地区可持续发展水平,

应着力构建以拉萨市为核心,包含周边主要地市和县城的多维城镇体系,避免过度依赖拉萨市的单核中心给生态系统带来巨大压力。本文及相关研究^[12,19]结果均表明,构建多中心立体化城镇体系,能够显著提升地区应对生态安全风险的能力,降低高度城镇化地区生态系统服务失调衰退的可能性。③在城镇边缘特别是城乡结合部地带,避免城建区盲目扩张损害生态环境质量。受高原地形和河流分布影响,西藏城镇聚落多集中分布在河谷地带,人地耦合系统关联十分密切,城镇扩展格局与生态安全格局叠加作用明显。为促进城镇化与生态系统服务协调发展,应建立城镇化扩展增长的预警机制,以生态系统安全底线作为城镇化增量扩展的上限,探索出人与生态协调共进的可持续发展模式。

参考文献(References)

- [1] 齐晔, 蔡琴. 可持续发展理论三项进展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 110-116. [Qi Ye, Cai Qin. A decade of advances in sustainability theory. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(4): 110-116.]
- [2] 刘学, 张志强, 郑军卫, 等. 关于人类世问题研究的讨论 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 640-649. [Liu Xue, Zhang Zhiqiang, Zheng Junwei, et al. Discussion on the anthropocene research. Advances in Earth Science, 2014, 29(5): 640-649.]
- [3] 史培军, 宋长青, 程昌秀. 地理协同论: 从理解“人—地关系”到设计“人—地协同” [J]. 地理学报, 2019, 74(1): 3-15. [Shi Peijun, Song Changqing, Cheng Changxiu. Geographical synergetics: From understanding human-environment relationship to designing human-environment synergy. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(1): 3-15.]
- [4] 冯雨雪, 李广东. 青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析 [J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1386-1405. [Feng Yuxue, Li Guangdong. Interaction between urbanization and eco-environment in Tibetan Plateau. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1386-1405.]
- [5] Tremblay J C, Ainslie P N. Global and country-level estimates of human population at high altitude [J]. PNAS, 2021, 118(18): e2102463118. doi: 10.1073/pnas.2102463118.
- [6] 任君, 张福存, 王琬琪, 等. 青藏高原少数民族聚居地区城镇用地扩展时空演变分析: 以青海省海东市为例 [J]. 测绘通报, 2021(1): 71-77. [Ren Jun, Zhang Fucun, Wang Wanqi, et al. Study on spatial-temporal evaluation characteristics of urban land expansion for minority nationality

- regions in Qinghai-Tibet Plateau: Taking Haidong City in Qinghai Province as an example. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(1): 71-77.]
- [7] 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. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [8] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析 [J]. *地理学报*, 2009, 64(12): 1411-1420. [Liu Jiyan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1411-1420.]
- [9] Wang Y H, Liu Z F, He C Y, et al. Quantifying urbanization levels on the Tibetan Plateau with high-resolution nighttime light data [J]. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(3): 233-244.
- [10] 陈伊多, 杨庆媛. 西藏自治区土地利用/覆被变化时空演变特征及驱动因素 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 173-180. [Chen Yiduo, Yang Qingyuan. Temporal and spatial characteristics and driving factors of land use/cover change in Tibet Autonomous Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 173-180.]
- [11] 王海军, 张彬, 刘耀林, 等. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析 [J]. *地理学报*, 2018, 73(6): 1076-1092. [Wang Haijun, Zhang Bin, Liu Yaolin, et al. Multi-dimensional analysis of urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1076-1092.]
- [12] 吴小影, 杨山, 尹上岗, 等. 快速城镇化背景下长三角城镇建设用地群态化特征及演变模式 [J]. *地理研究*, 2021, 40(7): 1917-1934. [Wu Xiaoying, Yang Shan, Yin Shanggang, et al. The characteristics and evolution modes of urban construction land agglomeration in the Yangtze River Delta under rapid urbanization. *Geographical Research*, 2021, 40(7): 1917-1934.]
- [13] 程琳琳, 黄婷, 刘焱序. 基于改进价值当量因子的 1992-2015 年青藏高原生态系统服务价值演化分析 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 242-248, 345-346. [Cheng Linlin, Huang Ting, Liu Yanxu. Analysis on evolution of ecosystem service value in Qinghai-Tibet Plateau based on improved value equivalent factors from 1992 to 2015. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 242-248, 345-346.]
- [14] 于德永, 郝蕊芳. 生态系统服务研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2020, 35(8): 804-815. [Yu Deyong, Hao Rui-fang. Research progress and prospect of ecosystem services. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(8): 804-815.]
- [15] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架 [J]. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016. [Dai Erfu, Wang Xiaoli, Zhu Jianjia, et al. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs. *Geographical Research*, 2016, 35(6): 1005-1016.]
- [16] Hamel P, Guerry A D, Polasky S, et al. Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software [J]. *npj Urban Sustainability*, 2021, 1: 25. doi: 10.1038/s42949-021-00027-9.
- [17] 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 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: 106767. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106767.
- [18] He Y, Wang W H, Chen Y D, et al. Assessing spatio-temporal patterns and driving force of ecosystem service value in the main urban area of Guangzhou [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 3027. doi: 10.1038/s41598-021-82497-6.
- [19] 张骞, 高明, 杨乐, 等. 1988—2013 年重庆市主城区九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化 [J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 566-575. [Zhang Qian, Gao Ming, Yang Le, et al. Changes in the spatial structure of ecological land and ecosystem service values in nine key districts of Chongqing City over the past 25 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 566-575.]
- [20] 张莉金, 白羽萍, 胡业翠, 等. 不同 SSP-RCP 情景下中国生态系统服务价值评估 [J]. *生态学报*, 2023, 43(2): 510-521. [Zhang Lijin, Bai Yuping, Hu Yecui, et al. Valuation of ecosystem services in China under different SSP-RCP scenarios. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 510-521.]
- [21] Li Y G, Liu W, Feng Q, et al. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi Regions, Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: 158940. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158940.
- [22] Zhang X Y, Zhou Y Z, Long L L, et al. Simulation of land use trends and assessment of scale effects on ecosystem service values in the Huaihe River Basin, China [J].

- Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30 (20): 58630-58653.
- [23] Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatial-temporal evolution of ESV and its response to land use change in the Yellow River Basin, China [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 13103. doi: 10.1038/s41598-022-17464-w.
- [24] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析 [J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2366-2377. [Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Wu Tingtian, et al. Spatial autocorrelation pattern analysis of land use and the value of ecosystem services in northeast Hainan Island. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (7): 2366-2377.]
- [25] Liang Y, Song W. Integrating potential ecosystem services losses into ecological risk assessment of land use changes: A case study on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 318: 115607. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115607.
- [26] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度 [J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2244-2254. [Wang Shaojian, Fang Chuanglin, Wang Yang. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2244-2254.]
- [27] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 等. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化 [J]. 自然资源学报, 2021, 36 (1): 131-147. [Zhao Xueyan, Du Yuxuan, Li Hua, et al. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 131-147.]
- [28] 刘海龙, 丁娅楠, 王跃飞, 等. 山西省城镇化与生态系统服务时空相关性及其空间效应分析 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 124-134. [Liu Hailong, Ding Yanan, Wang Yuefei, et al. Analysis of temporal-spatial correlation and spatial effect between urbanization and ecosystem services in Shanxi Province. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 124-134.]
- [29] Song S X, He C Y, Liu Z F, et al. Evaluating the influences of urban expansion on multiple ecosystem services in drylands [J]. Landscape Ecology, 2022, 37(11): 2783-2802.
- [30] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市化与生态系统服务的空间交互关系研究: 以长株潭城市群为例 [J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7502-7513. [Ouyang Xiao, Zhu Xiang, He Qingyun. Spatial interaction between urbanisation and ecosystem services: A case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7502-7513.]
- [31] 陈万旭, 刘志玲, 李江风, 等. 长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究 [J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5137-5150. [Chen Wanxu, Liu Zhiling, Li Jiangfeng, et al. Mapping the spatial relationship between ecosystem services and urbanization in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomerations. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5137-5150.]
- [32] 杨宜男, 李敬, 王立, 等. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1555-1571. [Yang Yinan, Li Jing, Wang Li, et al. Impact of urbanization on supply and demand of typical ecosystem services in Yangtze River Delta. Journal of Natural Resources, 2022, 37(6): 1555-1571.]
- [33] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究 [J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991. [Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973-991.]
- [34] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架 [J]. 地理学报, 2019, 74(8): 1489-1507. [Liu Haimeng, Fang Chuanglin, Li Yonghong. The coupled human and natural cube: A conceptual framework for analyzing urbanization and eco-environment interactions. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(8): 1489-1507.]
- [35] 陈晓红, 周宏浩. 城市化与生态环境关系研究热点与前沿的图谱分析 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(9): 1171-1185. [Chen Xiaohong, Zhou Honghao. Research hotspots and prospects of urbanization and ecological environment relationship based on visual knowledge mapping. Progress in Geography, 2018, 37(9): 1171-1185.]
- [36] 崔学刚, 方创琳, 刘海猛, 等. 城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展 [J]. 地理学报, 2019, 74 (6): 1079-1096. [Cui Xuegang, Fang Chuanglin, Liu Haimeng, et al. Dynamic simulation of urbanization and eco-environment coupling: A review on theory, methods and applications. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(6): 1079-1096.]
- [37] 邱坚坚, 刘毅华, 陈澄静, 等. 生态系统服务与人类福祉耦合的空间格局及其驱动方式: 以广州市为例 [J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 760-778. [Qiu Jianjian, Liu Yi-

- hua, Chen Chengjing, et al. Spatial structure and driving pathways of the coupling between ecosystem services and human well- beings: A case study of Guangzhou. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(3): 760-778.]
- [38] 刘焱序. 青藏高原生态资产价值量(2000—2020) [DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2021-12-02 [2022-08-21]. <https://cstr.cn/18406.11.HumanNat.tpd.c.271892>. [Liu Y X. Ecological asset value of Qinghai Tibet Plateau (2000–2020). National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2021-12-02 [2022-08-21]. <https://cstr.cn/18406.11.HumanNat.tpd.c.271892>.]
- [39] 郑度, 杨勤业, 吴绍洪, 等. 中国生态地理区域系统研究 [M]. 北京: 商务印书馆, 2008: 270-295. [Zheng Du, Yang Qinye, Wu Shaohong, et al. Eco-geographical region system of China. Beijing, China: Commercial Press, 2008: 270-295.]
- [40] Schiavina M, Freire S, MacManus K. GHS- POP R2022A- GHS population grid multitemporal (1975–2030) [DB/OL]. European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2022 [2023-01-05]. <http://data.europa.eu/89h/d6d86a90-4351-4508-99c1-cb074b022c4a>.
- [41] Chen J D, Gao M. Global 1 km \times 1 km gridded revised real gross domestic product and electricity consumption during 1992–2019 based on calibrated nighttime light data [DB/OL]. Figshare, 2021-11-13 [2022-08-21]. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.17004523.v1>.
- [42] Kuang W H, Zhang S, Li X Y, et al. A 30-meter resolution dataset of impervious surface area and green space fractions of China's cities, 2000–2018 [DB/OL]. Zenodo, 2020-09-17 [2022-08-21]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4034161>.
- [43] 张国庆. 青藏高原流域边界数据集(2016) [DB/OL]. 时空三极环境大数据平台, 2022-04-18 [2022-08-21]. <http://poles.tpd.c.ac.cn/zh-hans/data/dff6b437-90a1-4729-8140-faafc544860f/>. [Zhang G Q. Dataset of river basins map over the TP (2016). A Big Earth Data Platform for Three Poles, 2022-04-18 [2022-08-21]. <http://poles.tpd.c.ac.cn/zh-hans/data/dff6b437-90a1-4729-8140-faafc544860f/>.]
- [44] Anselin L, Syabri I, Smirnov O. Visualizing multivariate spatial correlation with dynamically linked windows [C]// Anselin L, Rey S. New tools for spatial data analysis: Proceedings of the specialist meeting. Santa Barbara, USA: Center for Spatially Integrated Social Science, University of California, 2002.
- [45] Ker A P, Goodwin B K. Nonparametric estimation of crop insurance rates revisited [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2000, 82(2): 463-478.
- [46] Lee S. Developing a bivariate spatial association measure: An integration of Pearson's r and Moran's I [J]. *Journal of Geographical Systems*, 2001, 3: 369-385.
- [47] Li Y, Sang S, Mote S, et al. Challenges and opportunities for modeling coupled human and natural systems [J]. *National Science Review*, 2023, 10(7): nwad054. doi: 10.1093/nsr/nwad054.

Coordinated development of urbanization and ecosystem services in Tibet Autonomous Region

TIAN Yicong¹, TIAN Ming¹, LI Peng^{1*}, WU Zhilei²

(1. School of Social Development and Public Policy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810016, China)

Abstract: The relationship between urbanization and ecosystem services is an important issue in the field of sustainable development. The relationship between human activities and the ecological environment has increasingly shifted from passive adaptation to active coordination as human potential to transform nature under unique geographical conditions such as on plateaus has been strengthened. Promoting the coordination of economic and social development (represented by urbanization) and ecosystem services (assessed by the value of ecological assets) in plateau areas is increasingly becoming critical for achieving the objective of sustainable regional development. Taking Tibet Autonomous Region as the research area, this study measured the comprehensive level of urbanization and ecosystem services from 2000 to 2020. The research methods included bivariate spatial autocorrelation, a coupling and coordination degree model, and kernel density estimation. The purpose of this study was to explore the multi-scale spatial correlation characteristics of urbanization and ecosystem services, and to identify the coupling and coordination types and spatiotemporal evolution modes of these two systems. The results are as follows: 1) Urbanization in Tibet between 2000 and 2020 displayed the spatial distribution characteristics of local agglomeration, and the overall trend of interannual change was a steady increase. The spatial distribution of ecosystem services, on the other hand, was more dispersed with significant regional disparities, but the overall level remained consistent. 2) There was a significant negative spatial correlation between urbanization and ecosystem services. The level of ecosystem services in the surrounding areas of places with high comprehensive urbanization index values was comparatively low. 3) The connection between urbanization and ecosystem services in Tibet first grew and then weakened, with 2010 as the transition point. Currently, coordinated development is the predominant form, but there are some areas that are at risk of deterioration in coordination. 4) The spatial transformation from single-center dominance in Lhasa and its surrounding areas to a multi-center distribution mode including other cities, districts, and counties, was reflected in the evolution of coupling and coordination relationships and benefited to some extent from the spatial spillover effect of the coupling and coordination development process in Lhasa. This work completes the study on the spatial coupling and coordination of urbanization and ecosystem services on the plateau and provides a decision-making basis for guiding the coordinated and healthy growth of human-environment relationships.

Keywords: urbanization; ecosystem services; coupling and coordination; spatial correlation; Tibet