

DOI: 10.20103/j.stxb.202210032804

刘小波, 王玉宽, 刘勤, 李政旸. 基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, 2023, 43(22): 9416-9429.

Liu X B, Wang Y K, Liu Q, Li Z Y. Tradeoffs-synergies analysis of ecosystem services along urbanization gradient in Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9416-9429.

基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同

刘小波^{1,2}, 王玉宽^{2,*}, 刘勤², 李政旸^{2,3}

1 内江师范学院地理与资源科学学院, 内江 641100

2 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所山区发展研究中心, 成都 610041

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:通过构建生态系统服务量化模型与权衡协同模型,刻画中国西南地区关键生态系统服务的时空演变过程,并结合空间静态和时间动态尺度定量测度生态系统服务之间的相互关系,进一步探究西南地区不同城市化梯度下生态系统服务之间权衡协同作用的异质特征,揭示城市化梯度下生态系统服务权衡的形成机制。研究结果表明:①近 20 年西南地区耕地和草地面积显著减少,建设用地和水域面积分别增长了 141.19% 和 34.6%,其中贵州省城市扩展特征突出,四川省耕地减少最为明显。研究区生境质量指数和产水量呈下降趋势,土壤保持、粮食生产和碳储存三种生态系统服务有所增加;②动态视角下研究区 61% 的面积土壤保持服务和产水量服务存在权衡关系,碳储存和另外四种生态系统服务之间有着大面积(>70%)的不显著关系;③静态视角下,不同的城市化梯度区生态系统服务呈现显著的异质特征。非城市化地区与整个研究区情况类似,但土壤保持和碳储存之间的相关性逐渐减弱。城市化快速地区生态系统服务之间的权衡协同关系最为显著,特别是碳储存和生境质量的相关性最高($R^2=0.541$),以往城市化地区生态系统服务的相互作用强度弱于其他两类区域,但两两生态系统服务之间均呈现正相关;④城市建设用地的快速扩张导致生态系统服务下降,尤其是对生境质量具有显著的负面效应,城市化快速地区生态服务之间的相互作用表现得更为剧烈。林地面积大幅增加使得土壤保持服务有所增加,在山区表现尤为明显,而城市化能够引起碳储存和生境质量强烈的协同下降。

关键词:土地利用;生态系统服务;城市化梯度;权衡;西南地区

Tradeoffs-synergies analysis of ecosystem services along urbanization gradient in Southwest China

LIU Xiaobo^{1,2}, WANG Yukuan^{2,*}, LIU Qin², LI Zhengyang^{2,3}

1 College of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China

2 Research Center of Mountain Development, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: By constructing quantitative model and tradeoff/synergic model of ecosystem services, the spatio-temporal evolution process of key ecosystem services in Southwest China was investigated. Based on the spatial static and temporal dynamic scale, the relationship between ecosystem services was quantitatively measured to further explore heterogeneous characteristics of tradeoff/synergic effects between ecosystem services in southwest region and reveal the formation mechanism of ecosystem services tradeoffs under different urbanization gradient. The results showed that (1) in the past

基金项目:中国科学院战略先导专项 A 类(XDA23090501); 国家社会科学基金项目(20XZS020); 四川省社会科学重点研究基地四川县域经济发展研究中心课题(xy2022023)

收稿日期:2022-10-03; **采用日期:**2023-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn

20 years, the area of cultivated land and grassland in Southwest China decreased significantly, while the area of construction land and water increased by 141.19% and 34.6%, respectively. The urban expansion characteristics of Guizhou Province were prominent, and the reduction of cultivated land in Sichuan Province was the most obvious. Habitat quality index and water yield in the study area showed a decreasing trend, while three ecosystem services, including soil conservation, food production and carbon storage increased to some extent; (2) from the dynamic perspective, there was a significant tradeoff relationship between soil conservation and water yield, and a largely insignificant relationship between carbon storage and the other four ecosystem services, the area of soil conservation and water yield service tradeoff (61%) was larger than that of synergistic relationship (27%), and there was insignificant relationship between carbon storage and other four ecosystem services in a large area ($> 70\%$); (3) from the static perspective, ecosystem services in different urbanization gradient areas showed significant heterogeneity. The non-urbanized area was similar to the study area as a whole, but the correlation between soil conservation and carbon storage gradually weakened. The tradeoff/synergic relationship between ecosystem services in rapid urbanization areas was the most significant. In particular, the correlation between carbon storage and habitat quality was the highest ($R^2 = 0.541$). The interaction intensity between ecosystem services in past urbanization areas was weaker than those in other two areas, but any two ecosystem services all presented the positive correlation, among the 10 ecosystem service pairs, 7 ecosystem service pairs had significant positive correlation; and (4) the rapid expansion of construction land led to the decline of ecosystem services, especially the significantly negative impact on habitat quality. The interaction between ecosystem services in rapid urbanization areas was the most vigorous. The large increase in forest area led to an increase in soil conservation, especially in mountainous areas. Meanwhile, urbanization could cause a strongly synergistic decline in carbon storage and habitat quality. Although ecological protection and management projects can improve regional comprehensive ecosystem services, they will bring certain negative effects to territorial ecological restoration projects aimed at specifically increasing certain ecosystem services.

Key Words: land use; ecosystem service; urbanization gradient; tradeoff; Southwest China

生态系统服务决定于生态系统的组成结构,科学认知生态系统服务之间的相互关系,是推进生态系统服务持续管理的基本前提。生态系统服务之间的关系主要表现为生态系统服务的权衡与协同^[1],是在人类活动对生态系统干扰日益剧烈的全球背景下,生态系统结构与功能改变而呈现出的空间异质性特征^[2-3]。揭示区域生态系统服务权衡协同的时空演变过程,能够实时诊断系统结构和功能损益状态,及时调整生态管理政策,对于实现区域可持续发展具有重要的现实意义。

土地利用变化对生态系统结构及服务具有显著影响^[4]。城市化进程作为改变地表覆盖最剧烈的方式,广泛而深刻地影响着生态系统的结构、功能及服务之间的权衡协同格局^[5-6]。21 世纪以来,全球正在经历新一轮的城市化,引发生态系统的强烈变化。不合理的城市化进程会对生态系统服务造成系列负面效应,导致城市供给服务匮乏,生物多样性破坏,粮食生产、土壤保持、碳储存等生态系统功能大量损失^[7]。同时,城市化进程通过改变地面水文过程,造成有机质和养分循环的变化,对气候调节、生境质量等功能产生消极影响^[8-9]。城市化进程中的生态系统服务权衡关系,因其过程复杂性、时空动态性及变化剧烈性而广受关注。学者多选择城市化程度较高的城市群^[10]、中心城市^[11]或快速城市化地区^[12]作为研究区,从城市整体的角度探讨生态系统服务功能、供需平衡及权衡协同关系。研究显示,城市化进程对生态系统服务功能、权衡与协同具有重要影响,并具有较为显著的时空演化特征^[13]。实质上,城市化进程具有明显的时空动态性,城市化地区也并非简单的均质表面,存在由城市到乡村生态过程显著的梯度化特征^[14],且随着城市化指数的改变生态系统服务存在空间异质性^[15]。目前,城市化梯度下的生态系统服务权衡关系仍不清晰,同时现有研究多将均质城市化作为假设前提解析生态系统服务的演变规律,未能真实刻画城市化进程对生态系统服务权衡关系的空间异质性,研究结果难以有效支撑精细化的生态服务管理与国土空间规划。为此,亟需明确城市化进程中

生态系统服务的动态演变过程,尤其是针对生态环境复杂区域,揭示城市化梯度下生态系统服务权衡的空间差异性特征与形成机制,为有效制定生态系统保护策略提供科学依据。

西南地区是长江流域重要的生态安全屏障,生态地位重要。同时,该区域环境复杂,多种地貌形态并存,城市化进程梯度明显、差异显著,形成由城市向农村、由平原向山区的典型过渡区域。为此,本文以中国西南四省作为研究区域,通过构建生态系统服务量化模型与权衡协同模型,刻画中国西南地区关键生态系统服务的时空演变过程,并结合空间静态和时间动态尺度定量测度生态系统服务之间的相互关系,进一步探究西南地区不同城市化梯度下生态系统服务之间相互作用的异质特征,解析城市化梯度差异对生态系统服务权衡的定量作用,以期为新时期生态文明建设提供理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西南地区(97°20'E—110°11'E,21°08'N—34°14'N)包括四川省、贵州省、云南省和重庆市,位于青藏高原东南部,地处我国西南边陲,面积共约 113.87 万 km² (图 1)。主体上属于长江流域,年平均降水量 1109mm,年平均气温 17℃,以亚热带季风气候为主,覆盖热带雨林、亚热带常绿阔叶林、高山草原等多种植被类型。该地区地形条件复杂,兼有高原、丘陵、山地和岩溶等多种地貌形态,包括川西高原、四川盆地、云贵高原等地理单元,孕育了丰富的生物资源,形成了多种气候类型,塑造了多尺度、多层次的过渡空间,呈现出地理结构、功能、过程的多样性与社会经济的梯度特征^[16]。改革开放以来,西南地区城市化发展迅速,近 20 年建设用地共增加 8769km²,增幅为 141.19%。

1.2 数据来源

研究使用的土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心。2000 年和 2018 年的土地利用数据集是通过解译 LandsatTM 图像生成。地形数据来自航天飞机雷达地形任务数据集。2000 年和 2018 年的降水数据来自中国国家气象科学数据中心,从 2400 个气象台站收集整理,考虑地形因素通过插值获得空间数据。本研究使用的净初级生产力(Net primary productivity, NPP)和蒸散量(Evapotranspiration, ET)遥感产品来自美国国家航空航天局。夜间灯光图像数据从美国国家海洋和大气管理局下载。社会和经济数据(如粮食产量)来自中国统计出版社出版的《四川/重庆/云南/贵州统计年鉴》(2000 年和 2018 年)。土壤数据(包括粘粒、粉粒、沙粒和土壤有机质含量)来自世界土壤数据库。具体的数据类型和来源详见表 1。

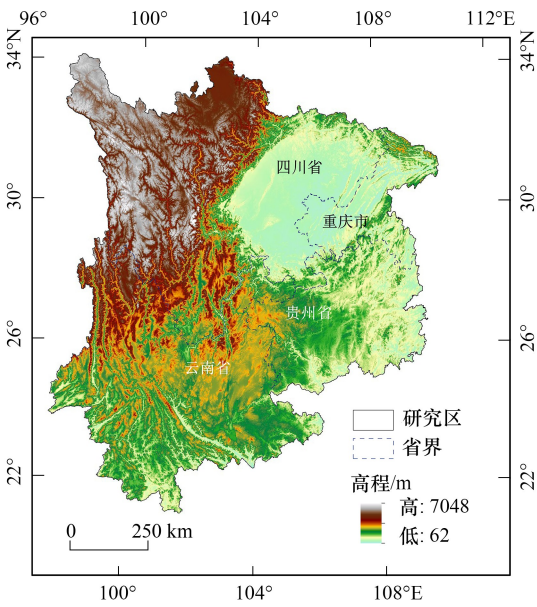


图 1 研究区地理位置和地形条件
Fig.1 Location and topography of the study area

表 1 本研究使用的数据类型和来源

Table 1 The used data and the relative sources for ecosystem services assessment	
数据类型 Data type	数据源 Data source
土地利用 Land use	中国科学院资源环境科学与数据中心 (30m 分辨率, http://www.resdc.cn)
DEM	航天飞机雷达地形任务数据集 (90m 分辨率)
NPP	美国国家航空航天局 (MOD17A3HGF, 500m 分辨率, http://www.earthdata.nasa.gov/eosdis)
夜间灯光 Night light data	美国国家海洋和大气管理局 (500m 分辨率, http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html)
气候数据 Climatic data	国家气象科学数据中心 (降水, http://data.cma.cn/), 美国国家航空航天局 (MOD16A2 ET, 500m 分辨率)
土壤数据 Soil data	世界土壤数据库 (1000m 分辨率, https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases)

DEM:数字高程模型 Digital Elevation Model; NPP:植被净初级生产力 Net primary productivity

2 研究方法

2.1 生态系统服务的量化

因生态系统服务的动态性与复杂性,加之社会团体的认知差异,目前尚未形成统一的分类体系。联合国环境经济统计与生态统计体系(SEEA-EA)为生态系统服务评估提供了基本框架。结合 SEEA-EA^[17]和已有成果^[18-19],选取水土保持、生物多样性保护、产水量、碳储存和食物供应等 5 项生态系统服务功能进行量化研究。

2.1.1 水土保持

土壤保持量是利用 InVEST 模型中的泥沙保持模块确定的,它采用通用土壤流失方程(USLE, universal soil loss equation)在网格单元尺度上测算每个地块泥沙输移以及年均土壤流失(分辨率为 1000m×1000m)。土壤流失量的减少,意味着水土保持的改善,公式如下:

$$USLE_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (1)$$

式中,USLE_x表示实际土壤侵蚀量(t/hm²),R_x, K_x, LS_x, C_x,和 P_x分别表示降雨侵蚀力、土壤可蚀性因子、坡长坡度系数、植被覆盖与田间管理因子和水土保持措施因子。实际土壤侵蚀量考虑了研究区的植被覆盖状况和水土保持条件,潜在土壤侵蚀则未考虑,两者之差表示土壤保持量。根据已有成果^[15],对不同土地利用类型的支持措施和作物管理因素进行了补充完善(表 2)。

表 2 水土保持模块中的生物物理参数

Table 2 Biophysical table in soil conservation module for the study area

一级地类 Level 1 type	二级地类 Level 2 type	覆盖管理系数 USLE_C	水土保持措施因子 USLE_P
耕地 Cropland	水田	0.5	1
	旱地	0.3	0.4
林地 Woodland	有林地	0.05	0.3
	其他林地	0.03	0.2
草地 Grassland	高覆盖度草地	0.07	0.3
	中覆盖度草地	0.06	0.2
	低覆盖度草地	0.05	0.1
水域 Water		0.001	0.001
建设用地 Built-up land		0.001	0.001
未利用地 Unused land		0.1	0.1

USLE_C: Universal soil loss equation_land cover and management factor; USLE_P: Universal soil loss equation_support practice factor

2.1.2 生物多样性保护

生境质量可以用来反映生态系统为其持续生存提供合适条件的能力^[20]。在 InVEST 模型中,生境质量指数作为生物多样性的代表,可以指示生态系统服务的变化。生境质量取决于生境对威胁的敏感性、威胁的相对影响、生境之间的距离以及威胁的来源。生境范围和植被类型最终估计为 1000m×1000m 分辨率。威胁因子 i_{nm} 通过下列式子计算:

$$i_{nm} = 1 - \left(\frac{d_{nm}}{d_{tmax}} \right) \quad \text{if linear} \quad (2)$$

$$i_{nm} = \exp \left(- \left(\frac{2.99}{d_{tmax}} \right) d_{nm} \right) \quad \text{if exponential} \quad (3)$$

式中, i_{nm} 表示网格单元 m 的威胁 t 对网格单元 n 中生境的影响, d_{tmax} 表示与威胁的最大有效距离, d_{nm} 表示网格单元 n 和 m 之间的线性距离。在本研究中,线性衰减用于反映农田的威胁,指数衰减用于反映建设用地和交通的威胁。参考相关文献^[21],确定了每个威胁源对土地利用的敏感性(表 3)。

表 3 计算生物多样性保护的栖息地质量模块中的敏感性参数

Table 3 Sensitivity table in habitat quality module for the study area

Level 1 type	Level 2 type	栖息地适宜性得分 Habitat suitability score	耕地 Cropland	建设用地 Built-up land	道路 Road
耕地 Cropland	水田	0.7	0.3	0.8	0.7
	旱地	0.6	0.3	0.7	0.6
林地 Woodland	有林地	1	0.1	0.6	0.7
	灌木林	0.9	0.1	0.6	0.5
	疏林地	0.8	0.1	0.6	0.5
	其他林地	0.8	0.4	0.6	0.4
草地 Grassland	高覆盖度草地	0.8	0.3	0.5	0.7
	中覆盖度草地	0.7	0.5	0.4	0.6
	低覆盖度草地	0.6	0.4	0.3	0.5
水域 Water	河流	1	0.3	0.6	0.7
	湖泊	1	0.3	0.6	0.7
	其他	0.4	0.1	0.2	0.1
建设用地 Built-up land		0	0	0	0
未利用地 Unused land		0.2	0.1	0.3	0.3

0 最低,1 最高;耕地(建设用地/道路):每种生境类型对威胁的相对敏感性

2.1.3 产水量

产水量被定义为从景观流出的径流^[22]。使用 InVEST 模型中的产水量模块计算土地利用变化对年产水量的影响^[23–24]。根据水量平衡原理,即区域降水量和蒸散量的差值确定每个栅格单元上的年产水量(1000m×1000m 分辨率)。计算原理如下:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \tag{4}$$

式中,年产水量为 Y_x (单位为 m^3/hm^2), AET_x 表示像元 x 的实际年蒸散量, P_x 表示像素 x 的年平均降水量。

2.1.4 碳储存

使用 InVEST 模型量化储存和封存的碳量。基于已有研究结果,考虑每种土地利用类型或者植被类型的单位面积生物量碳储量,建立了地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和枯落物碳库^[25–26](表 4)。整个研究区域的碳储存分辨率为 1000m×1000m(单位: t/hm^2)。

表 4 西南地区不同土地利用类型单位面积碳储量/(t/hm^2)

Table 4 Carbon stocks per unit area of different land use types in the study area

一级地类 Level 1 type	二级地类 Level 2 type	地上生物 碳储量 Aboveground carbon stock	地下生物 碳储量 Aboveground carbon stock	土壤碳储量 Soil organic carbon stock	枯落物 碳储量 Dead organic carbon stock	总碳储量 Total carbon density
耕地 Cropland	水田	26	40	78	8	152
	旱地	26	36	70	8	140
林地 Woodland	有林地	200	52	145	19	416
	灌木林	172	34	80	12	298
	疏林地	106	15	43	9	173
草地 Grassland	高覆盖度草地	40	45	73	6	164
	中覆盖度草地	18	28	58	4	108
	低覆盖度草地	6	18	36	2	58
水域 Water	—	3	2	8	0	13
建设用地 Built-up land	—	2	1	6	0	9
未利用地 Unused land	—	4	3	10	0	17

2.1.5 食物供应

粮食生产是生态系统中一项重要的供给服务,是最基本和最直接的服务。本研究根据 InVEST 模型中计

算作物产量的原理,结合 NPP 和统计年鉴数据计算研究区内作物产量。作物生产能力以单位面积作物产量为特征。由于作物产量与植被 NPP 之间存在显著的线性关系^[27]。因此可利用高分辨率的 NPP 数据反映研究区域的粮食产量分布,并实现粮食供应结果的空间化(单位:t)。

$$G_i = \frac{G_n}{NPP_n} \times NPP_i \quad (5)$$

式中, G_i 表示网格单元 i 的粮食产量, G_n 表示行政单元 n 的粮食产量, NPP_n 表示行政单元 n 的植被净初级生产力, NPP_i 表示网格单元 i 的植被净初级生产力。

2.2 生态系统服务的权衡与协同模型

生态系统服务之间存在权衡和协同关系。协同是两个生态系统服务具有相同的变化趋势,即共同减少或者增加,而权衡意味着两种生态系统服务变化不一致,一种服务增加会导致另一种减少^[28]。动态时间尺度上,基于数据线性拟合的方法,使用生态系统服务的权衡协同度来评估生态系统服务的动态相互作用^[29],以反映生态系统服务之间相互作用的方向和程度。公式如下:

$$TD_{ij} = \frac{ES_{ia} - ES_{ib}}{ES_{ja} - ES_{jb}} \quad (6)$$

式中, TD_{ij} 表示在动态变化尺度上生态系统服务 i 和 j 的权衡程度, ES_{ia} 表示 a 年的生态系统服务 i 的值; ES_{ib} 表示 b 年的生态系统服务 i 的值。 ES_{ia} 和 ES_{ib} 与上述相同。当 TD_{ij} 为负值时,表明生态系统服务 i 和 j 处于权衡关系。当其为正值时,表明两者之间存在协同关系。当结果为 0,或者无意义时,将其判断为不显著关系。此外,静态空间视角下,在西南地区随机选择 4 万个采样点,对 2018 年 5 种生态系统服务进行采样。并用 R 语言斯贝尔曼相关系数软件包进行相关分析,以检测生态系统服务之间的关系。

2.3 城市化梯度的划分

为反映城市化的不同阶段,本文以城市化梯度对其加以表征,并利用夜间灯光影像数据对其进行划分^[30],夜间灯光指数越高,城市化程度越高。分别计算 2000 年(DN_{2000})和 2018 年(DN_{2018})夜间灯光指数,通过该指数将研究区域划分为三个梯度的城市化区域:以往城市化地区、城市化快速地区和非城市化地区,具体标准如下:

以往城市化地区:	$DN_{2000} \geq 40 ; DN_{2018} \geq 40$
城市化快速地区:	$DN_{2000} < 40 ; DN_{2018} \geq 40$
非城市化地区:	$DN_{2000} < 40 ; DN_{2018} < 40$

3 结果与分析

3.1 西南地区土地利用演变格局

空间格局上,西南地区林地分布面积最广,占比超过 45%,其次是草地和耕地,二者面积相当。耕地主要分布于研究区东北部的盆地之中,草地大多分布在研究区西北部。相比之下,建设用地、水域和未利用地所占比例较小,三者总面积占比不到 4%(图 2)。地类变化方面,2000 年至 2018 年建设用地和水域面积明显增加,而耕地和草地面积减少。建设用地面积从 2000 年的 6211km²增加到 2018 年的 14980km²,增加了 8769km²,增幅为 141.19%。其中,贵州省增幅最为明显(267.4%),而四川省增长面积最大(3166km²)。耕地和草地分别减少了 2.3%(6407km²)和 3.9%(12033km²)。林地面积共增加 7218km²,其中贵州省是唯一林地面积减少的省份,林地面积减少 344km²。林地和建设用地的增加,主要源于耕地和草地面积的减少。同时,四川省耕地面积减少最为剧烈,共减少 3162km²,占总耕地减少面积的 49.3%。2000—2018 年,草地减少面积最多的也为四川省,共减少 2.62%(4574km²),减少比例最高的是重庆市,减少了 34.7%(4073km²)。水域面积增长了 34.6%,达到 10688km²(表 5)。

表 5 西南地区各土地利用类型分布/km²

Table 5 Quantity of land use types in southwest provinces

年份 Year	省份 Province	土地利用类型 Land use type					
		耕地 Cropland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Built-up land	未利用地 Unused land
2000	贵州	49363	93520	32076	439	598	41
	四川	121392	165651	174861	3732	2944	17532
	云南	68674	218580	88713	2825	2050	2094
	重庆	38623	30467	11727	942	619	17
	合计 Total	278052	508218	307377	7938	6211	19684
2018	贵州	48075	93176	31524	1027	2197	35
	四川	118230	169013	170287	4709	6110	17656
	云南	67699	219544	85879	3733	4514	1550
	重庆	37641	33703	7654	1219	2159	10
	合计 Total	271645	515436	295344	10688	14980	19251

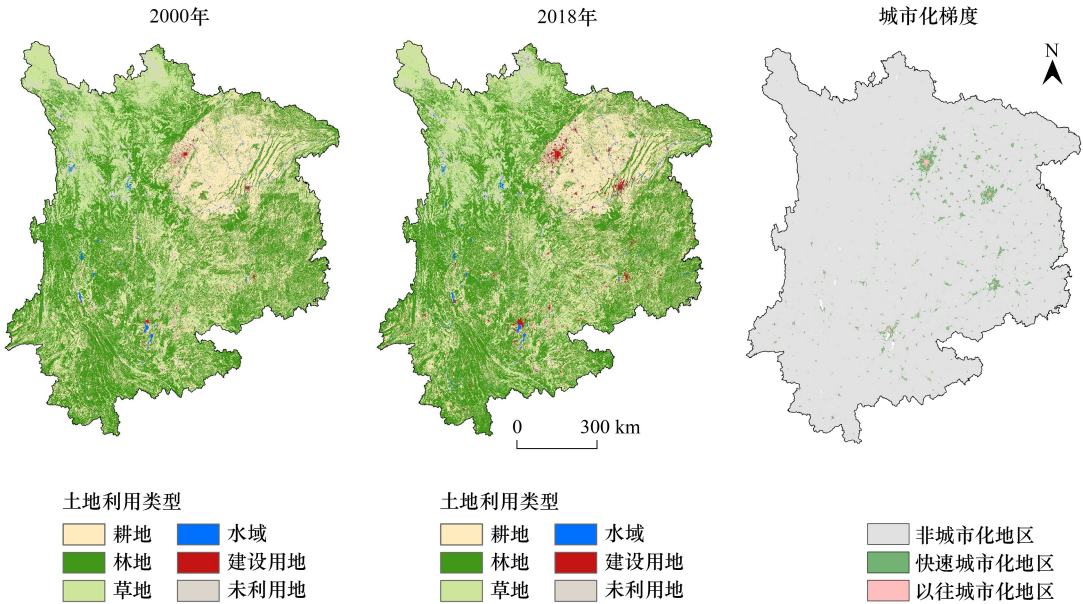


图 2 西南地区土地利用空间格局
Fig.2 Spatial pattern of land use in Southwest China

3.2 西南地区生态系统服务演变格局

在空间格局上,生境质量、土壤保持和碳储存服务的高值主要分布在山区,同时山区的生境完整性和生态廊道连通性高于城市区域。城市和耕地集中分布区,例如四川盆地内部,在碳储存、土壤保持和生境质量方面表现较差。粮食生产服务的高值分布在四川盆地内部和大城市周边,云南和贵州有零星分布,而西北部(川西高原)分布较少。产水量服务的高值区分布在盆地内部和研究区南部,生境质量、碳储存和粮食生产服务的减少主要分布在城市区域,尤其是在大城市周边区域(图 3)。与 2000 年相比,土壤保持、粮食生产和碳储存三种生态系统服务有所增加,分别增加了 0.9%、7.9%和 0.4%,生境质量指数和产水量分别下降了 2.4%和 0.5%。土壤保持服务在研究区北部有所下降,中部有所升高,其中四川省比其他区域增加更为明显($21.6\times 10^9\text{t}$),增幅为 7.5%。粮食生产服务主要在四川省和云南省有所增加。碳储存服务仅贵州省减少了 $0.82\times 10^9\text{t}$ (2.3%)。2018 年生境质量相较 2000 年四个省(市)均呈减少态势,减少比例最高的是贵州省(3.5%)。2018 年产水量总和为 $1.1\times 10^{12}\text{m}^3$,四川省和云南省分别增加 $58.1\times 10^9\text{m}^3$ 和 $115.45\times 10^9\text{m}^3$,贵州省和重庆市分别减

少了 5.5% ($107.1 \times 10^9 \text{ m}^3$) 和 6.9% ($67 \times 10^9 \text{ m}^3$)。

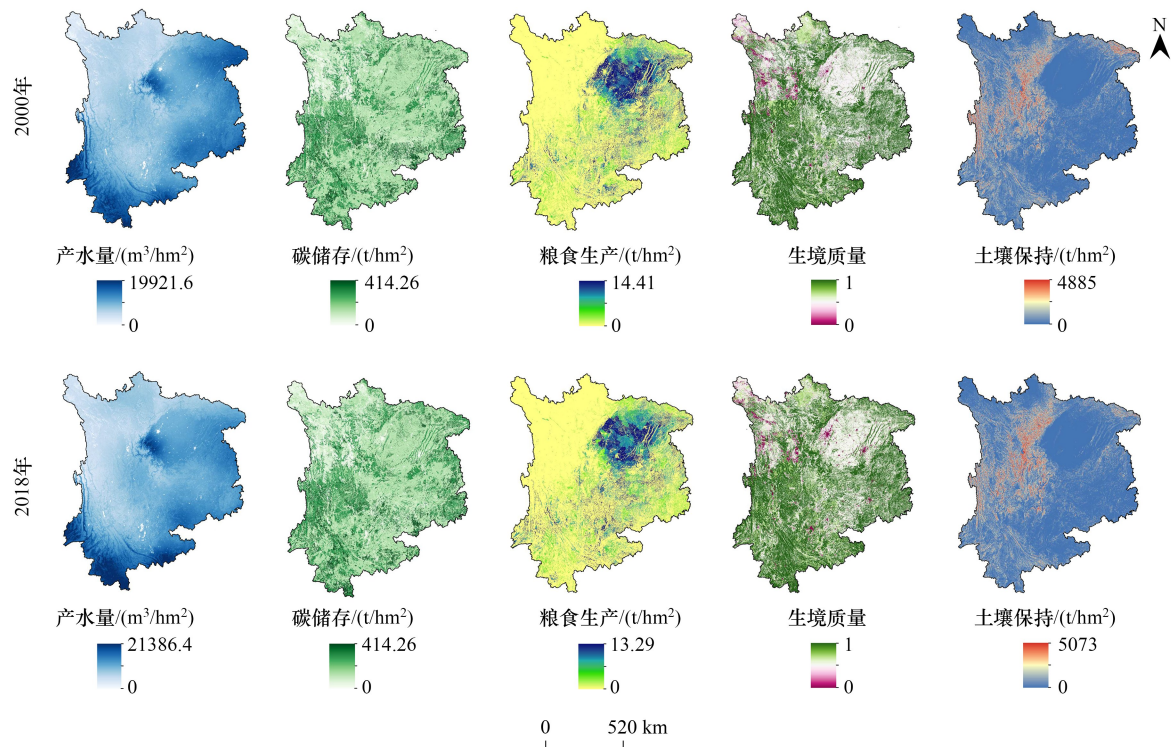


图3 西南地区多种生态系统服务的空间格局和变化

Fig.3 Spatial patterns and changes of ecosystem services in Southwest China

3.3 城市化梯度下生态系统服务的权衡协同关系

研究区 2000 年至 2018 年各生态系统服务动态变化下的权衡协同关系中,土壤保持和产水量之间存在明显的权衡关系,权衡作用在整个研究区域内均有分布,且面积占比大(图 4)。碳储存和另外四种生态系统服务之间有着大面积的不显著关系。生境质量和产水量以及生境质量和土壤保持的权衡和协同作用面积均较大。此外,有四对生态系统服务不显著关系的面积占比在研究区的西北部大于东南部。具体而言,仅有土壤保持和产水量服务权衡关系所占面积(61%)大于协同关系的面积(27%),其他生态系统服务之间权衡关系的所占面积和协同关系的面积相差不大。不显著关系占比最大的是碳储存和粮食生产,高达 95%。有六对生态系统服务之间的不显著关系所占面积超过 70%。就不同城市化梯度区而言,生态系统服务间的权衡关系表现出明显的差异性(图 5)。在非城市化地区,多数生态系统服务对表现出面积占比较高的不显著关系,尤其以碳储存-粮食生产最为突出,而权衡关系面积占比最为突出的是土壤保持-产水量;在城市化快速地区,生态系统服务之间的权衡协同关系更为突出,10 对生态系统服务对中,有 6 对权衡协同所占面积超过 50%;在该区域,所有生态系统服务对的权衡和协同关系所占面积都比较高,不显著关系的面积均未超过 70%。其中两两生态系统服务之间不显著关系所占面积最小的是生境质量与产水量服务,仅 7%,权衡关系所占面积为 37%,协同关系面积占 56%。在以往城市化地区,生态系统服务之间出现了更高的不显著关系占比。碳储存和产水量服务(91%)、碳储存和粮食生产服务(97%)以及产水量和粮食生产服务(82%)间的不显著关系所占面积都高于 80%。

图 6 显示了 2018 年(静态视角下)两两生态系统服务之间的相关性。在整个研究区域内生境质量和碳储存之间存在较强的正相关关系(协同关系),相关系数为 0.421,通过 99%的置信度检验($P < 0.01$)。除此之外,还有四对生态系统服务之间存在正相关关系,而土壤保持和产水量以及土壤保持和粮食生产间存在负相关关系。就不同城市化梯度区而言,非城市化地区和整个研究区情况类似,多数生态系统服务之间存在正相

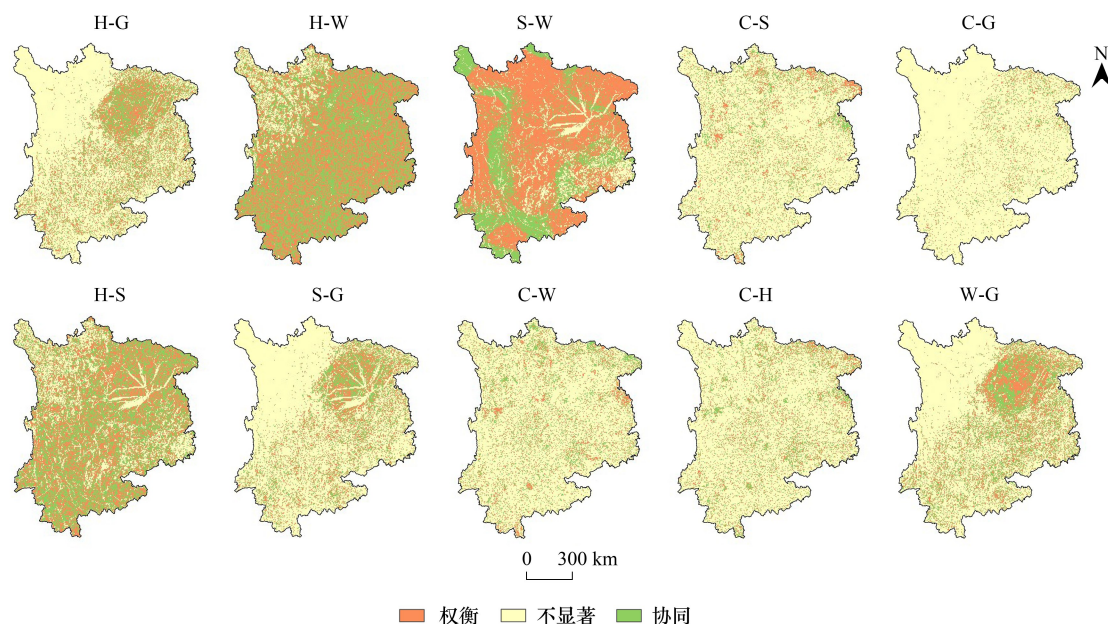


图4 西南地区生态系统服务对之间权衡协同的空间格局

Fig.4 Spatial pattern of trade-offs and synergies among ecosystem service pairs in Southwest China

C:碳储存;H:生境质量;S:土壤保持;G:粮食生产;W:产水量

关关系,仅土壤保持和碳储存之间的相关性不显著;在城市化快速地区,生态系统服务间的相互作用更强,尤其是碳储存和生境质量($R^2=0.541, P<0.01$);以往城市化地区,10对生态系统服务对中,7对生态系统服务均具有显著的正相关关系。与产水量相关的生态系统服务之间具有较强相关性,例如产水量和碳储存($R^2=0.366$),产水量和生境质量($R^2=0.282$),产水量和粮食生产($R^2=0.303$)。但总的来说该区域生态系统服务的相互作用强度较弱。

4 讨论

4.1 生态系统服务变化的影响因素

西南地区作为西部大开发战略的重点发展区域之一,21世纪以来经济发展迅速,城市化进程迅猛,土地利用变化强烈。同时生态保护和区域环境治理也逐步受到重视。天然林资源保护工程和退耕还林工程等政策的实施,使得耕地面积缩减,林地面积增加,而快速的城镇化和人口增长导致建设用地扩张,耕地、林地和草地减少^[31]。研究基于InVEST模型,测算了五种关键的生态系统服务,该模型不仅考虑土地利用变化等人类活动因子,而且涉及蒸散发、降雨侵蚀等气候因子^[32-33]。受人类活动和气候变化共同影响,特别是在剧烈的土地利用变化情景下,生态系统结构和功能、生态系统服务空间格局发生了显著改变。近几十年来气候变化不大,因此城市化驱动的土地利用变化是生态系统服务动态时空变化的主要贡献者。本研究与中国其他地区的研究结果类似,在城市化驱动的土地利用变化中,粮食生产,碳储量,土壤保持3种生态系统服务增加,只有生境质量随着人类活动的加剧而下降,产水量因为气候变化呈下降趋势^[8]。

在西南地区,建设用地的快速扩张导致生态系统服务下降,尤其是对生境质量有显著的影响。城市化是对生物多样性最严重的威胁之一^[34],因为人类活动会导致景观大面积碎片化。同时,中山和高山区生境质量明显优于其他地区,这是由于这些区域自然生境比例较高,草地、森林和湿地所占面积更大。此外,城市化会直接引起生态系统服务的提供者数量减少,从而导致生境质量服务减少。成渝地区的相关研究也表明城市化的增强导致核心城市地区的生态系统服务降低范围明显扩大,并由双核聚集转变为网络化分布^[35]。产水量更多受到气候变化的影响,在全球变暖的背景下,副热带降雨量有减少趋势,尽管中国总体雨量有所增加,但

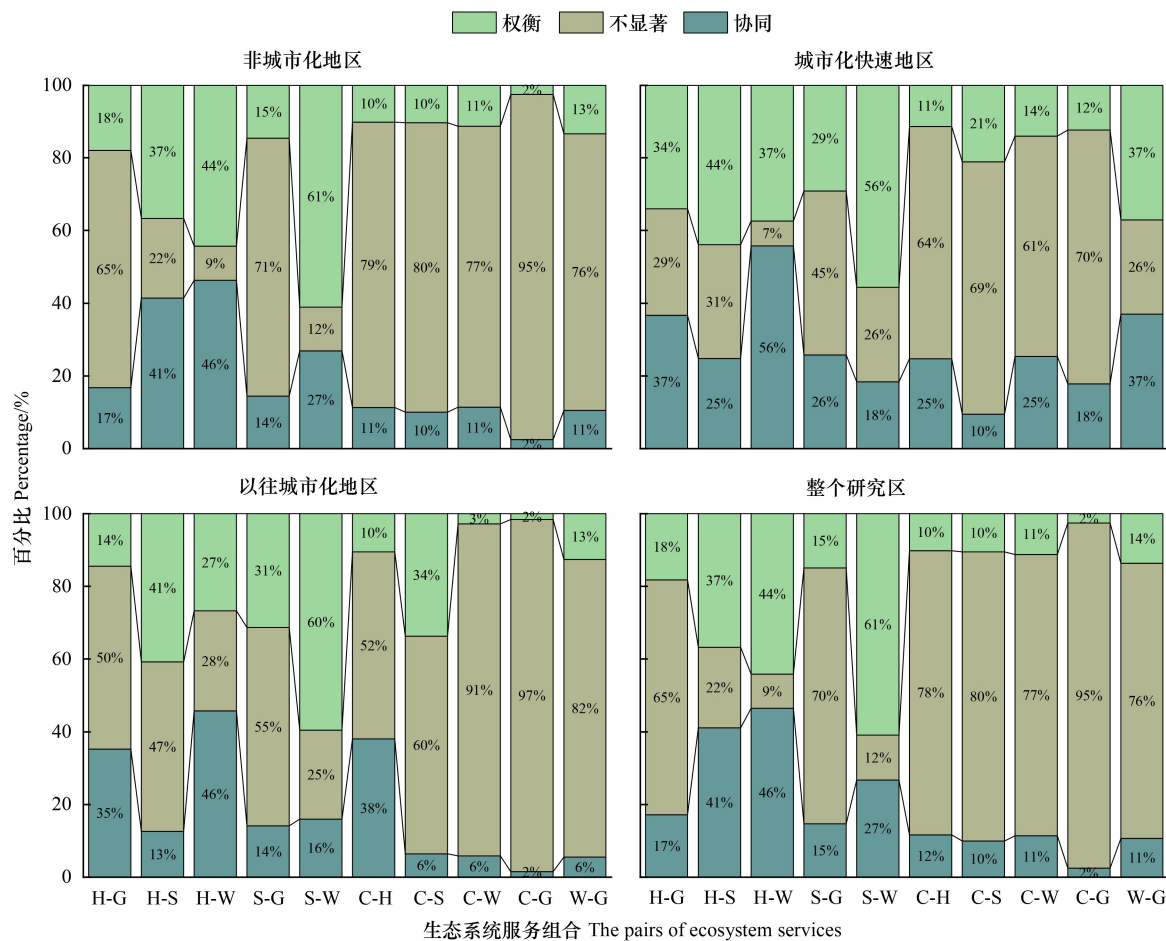


图5 生态系统服务对之间的关系面积所占的百分比

Fig.5 The percentage of relationship area between ecosystem service pairs

西南地区近六十年来降雨量却有所减少^[36],使得产水量下降。碳储存、土壤保持和生境质量有类似的空间分布格局,因为植被覆盖越高的地方,上述服务功能值越高,相反,城市化程度越高的地方,服务值就越低。在建设用地大面积扩增的同时,林地面积也大幅增加,进而有助于减少土壤流失,增加碳汇,这一现象在山区表现更加明显,平原地区的土地利用格局变化对其影响较小,因此土壤保持有所增加。碳储存方面,得益于《天然林资源保护工程》和《退耕还林条例》的颁布和实施^[37],山区生态系统得到极大的修复,这对碳储存的影响远大于耕地和建设用地的变化。在粮食生产方面,粮食生产高值主要分布在四川盆地,尤其是成都平原。四川省一直是全国的粮食主产区,且是西部地区唯一的粮食主产区。在全国实施退耕还林政策以来,耕地面积持续减少,粮食产量也有下降趋势,但随着 18×666.7 亿 m² 耕地红线的划定,严格控制了城市建设对于耕地的侵占,耕地面积有所增加,加之农业技术的不断改进,相比于 2000 年,研究区粮食生产服务增加。

4.2 生态系统服务的相互作用机制

西南地区多样的地形地貌特征,创造了独特的生态系统服务权衡协同格局。本文对西南地区生态系统服务间的相互关系进行了研究。结果表明,时间上两种生态系统服务变化而对应的权衡关系的面积占比略小于协同关系的面积占比,空间上不同区域两种生态系统服务间的关系以协同为主。

耕地、林地与建设用地的巨大变化,会引起生境质量和碳储存服务下降^[38]。在各个城市化梯度上,生境质量和碳储存之间存在协同作用的面积均大于权衡作用,权衡作用的面积均占总面积的 10% 左右。但随着城市化程度的增加,碳储存和生境质量的协同作用面积逐渐增加。城市化快速地区协同作用面积为 25%,以

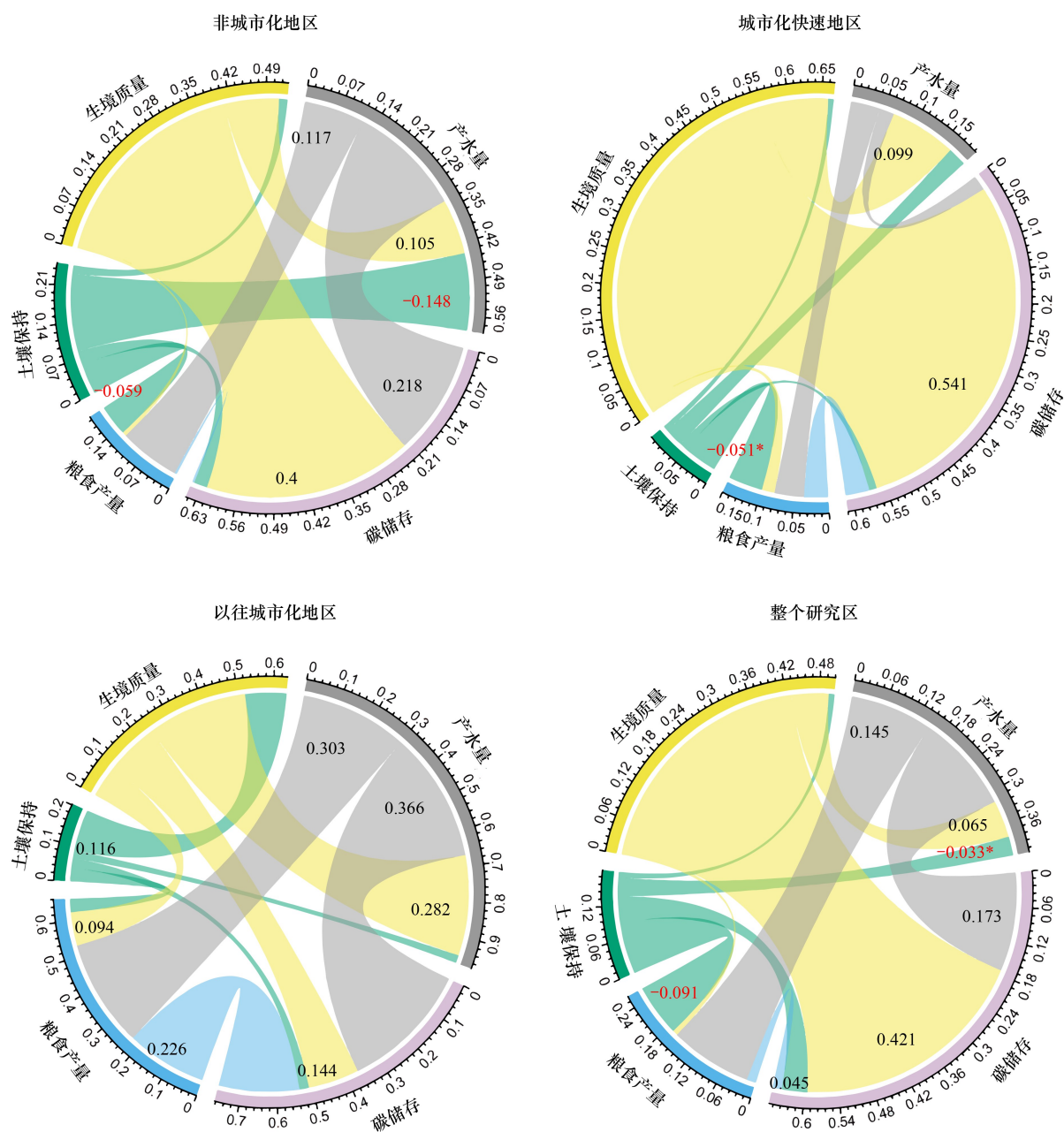


图6 生态系统服务之间的相关性

Fig.6 Correlation between ecosystem services

两两生态系统服务条带内部值是其相关系数; *表示在 0.05 的水平上显著, 其他是 0.01 水平上显著, 未标注数字的为不显著

往城市化地区协同作用面积占比达到 38%。这表明城市化引起碳储存和生境质量强烈地协同下降。以往城市化地区,几乎所有的生态系统服务之间都是协同关系,这是因为所有的生态系统服务均在减少所致。在以往城市化地区更易出现较少或轻微的显著相关性,主要是因为中心城市在过去 20 年中土地利用变化远不及城市化快速地区剧烈。同时,以往城市化地区之间的土地覆盖和地理环境差异也较小。在城市化快速地区,10 对生态系统服务中,有 8 对都具有更强的权衡和协同关系,生态系统服务之间的相互作用比其他区域更强烈。这可能是因为生态系统在过渡带具有边缘效应,生态系统服务受到更剧烈的影响,同时生态系统服务之间的相互作用通常最强。城市化快速地区的生态系统服务相互作用更强,另一部分原因是在城市发展中过于追求高效率,而导致绿色基础设施建设跟不上城市扩张的步伐,反而在以往城市化地区,情况正好相反,因为

城市居民日益增长的精神需求,更加关注环境和美学^[39]。也有研究指出在城市化快速地区,城市扩张主导的土地利用变化过程主要来自耕地,由于这种土地利用转变比农村地区更简单,所有服务之间的相互作用关系在城市化快速地区变得更加明显^[8]。产水量的变化主要是因为产水量受到降水的影响,对土地覆盖的依赖性较小。已有研究发现,与人口相对较多、面积较小的地区相比,人口较多,人口密度较低的非城市化区域通常会提供更多样的生态系统服务^[40]。在该地区,土壤保持与产水量,土壤保持和粮食生产呈现出权衡关系。这是因为退耕还林减少了粮食生产,而造林有助于保持水土,同时植被的修复会增加固碳量,减少水的供给,从而减少产水量。

2000 年以来,为解决区域面临的石漠化和水土流失等生态环境问题,中国在多地颁布了环境保护政策,开展了生态修复工程。这些生态修复工程成为区域控制水土流失,保持土壤、增加植被碳汇的重要方式^[41]。然而在强有力的人为干预下,生态系统服务间的权衡协同关系发生了明显的变化。类似区域的研究表明生态保护和治理工程虽然可以提升区域综合生态系统服务,但同时以特意增加某种生态系统服务为目标的国土空间生态修复工程会带来一定的负面影响^[42]。事实上,生态系统服务间交互作用受多种因素的制约,过程是复杂多变的。所有的影响因素在生态系统中均不是独自发挥作用。它们共同存在并相互作用,影响生态系统服务关系的空间分布格局。

5 结论

采用 InVEST 模型对中国西南地区五种生态系统服务功能进行了量化,通过划分城市化梯度,构建生态系统服务权衡模型,研究生态系统服务之间相互作用的格局和机理。主要研究结果如下:

(1) 近 20 年来西南地区土地利用与生态系统服务发生了显著变化,主要表现为建设用地、水域面积明显增加与耕地、草地面积减少。空间分布上,贵州省经历了最剧烈的城市扩张,四川省是建设用地面积增加最多省份,同时也是耕地面积减少最为剧烈的省份。生态系统服务方面,西南地区生态系统服务演变差异明显,生境质量和产水量服务呈减少态势,土壤保持、粮食生产和碳储存三种生态系统服务值有所增加。生境质量指数、土壤保持和碳储存的高值主要分布在林地集中的山区,粮食生产服务的高值分布在四川盆地内部,大城市周边。产水量服务的高值区分布在盆地内部和研究区南部。

(2) 土壤保持和产水量服务在西南地区多数区域存在明显的权衡关系,且权衡作用的区域在整个研究区域内均有分布。碳储存和另外四种生态系统服务(粮食生产、产水量、土壤保持和生境质量)之间有着大面积的不显著关系。

(3) 在不同的城市化梯度区,生态系统服务间的权衡关系表现出明显的差异性,具体表现为非城市化地区生态系统服务之间的变化呈现大面积的不显著关系;城市化快速地区生态系统服务之间的权衡协同关系更为显著,所有生态系统服务对的权衡和协同关系所占面积均较高,同时生态系统服务间的相互作用更强;以往城市化地区,生态系统服务之间出现了更高的不显著关系面积占比。

(4) 建设用地的快速扩张导致生态系统服务下降,尤其是对生境质量有显著的影响,城市化快速地区服务之间的相互作用关系更为剧烈。林地面积的大幅增加,有助于减少土壤流失,增加碳汇,这一现象在山区表现更加明显。各城市化梯度区,生境质量和碳储存之间存在协同作用的面积均大于权衡作用,反映城市化能够引起碳储存和生境质量强烈的协同下降。

本研究探讨了生态系统服务和权衡在城市化过程中表现出的阶段性与差异性,并以像元尺度在空间分布上表征生态系统服务间的相互作用关系。在未来的生态系统服务权衡研究中,需要进一步获取更高分辨率的遥感或者统计数据,以适应各种尺度的研究工作。同时,剖析生态系统服务演变机理,对生态系统服务权衡与协同演变的滞后与阈值效应展开进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 牛丽楠,邵全琴,宁佳,黄海波. 西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同. 地理学报, 2022, 77(1): 182-195.

- [2] Zheng H, Wang L, Wu T. Coordinating ecosystem service trade-offs to achieve win-win outcomes: a review of the approaches. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 82: 103-112.
- [3] Sylla M, Hagemann N, Szwedrański S. Mapping trade-offs and synergies among peri-urban ecosystem services to address spatial policy. *Environmental Science & Policy*, 2020, 112: 79-90.
- [4] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. *地理研究*, 2021, 40(3): 821-838.
- [5] 邵雅静, 杨悦, 员学锋. 黄河流域城镇化与生态系统服务的时空互动关系. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 86-93, 99.
- [6] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 邬建国. 中国快速城市化干燥地区的生态系统服务权衡关系多尺度分析——以呼包鄂榆地区为例. *生态学报*, 2016, 36(15): 4881-4891.
- [7] Tu S, Long H, Zhang Y, Ge D, Qu Y. Rural restructuring at village level under rapid urbanization in metropolitan suburbs of China and its implications for innovations in land use policy. *Habitat International*, 2018, 77: 143-152.
- [8] Lyu R, Zhang J, Xu M, Li J. Impacts of urbanization on ecosystem services and their temporal relations: a case study in Northern Ningxia, China. *Land Use Policy*, 2018, 77: 163-173.
- [9] Zhu Z P, Fu W C, Liu Q Y. Correlation between urbanization and ecosystem services in Xiamen, China. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(1): 101-121.
- [10] Wang J, Zhou W, Pickett S T A, Yu W, Li W. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 824-833.
- [11] 梁晨, 曾坚, 沈中健, 王倩雯. 快速城市化生态系统服务格局分析与空间管控——以厦门市为例. *生态学报*, 2021, 41(11): 4379-4392.
- [12] 吴蒙, 周冯琦, 程进. 基于生态系统服务的快速城市化地区空间冲突测度及时空演变特征. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(5): 12-20.
- [13] 聂名萱, 黄思华, 濮励杰, 朱明, 郗璐. 快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析——以苏锡常地区为例. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1088-1099.
- [14] Radford K G, James P. Changes in the value of ecosystem services along a rural-urban gradient: a case study of Greater Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 109(1): 117-127.
- [15] Herrero-Jáuregui C, Arnaiz-Schmitz C, Herrera L, Smart S M, Montes C, Pineda F D, Schmitz M F. Aligning landscape structure with ecosystem services along an urban-rural gradient. Trade-offs and transitions towards cultural services. *Landscape Ecology*, 2019, 34(7): 1525-1545.
- [16] 林子雁, 肖焱, 饶恩明, 史雪威, 张平. 中国西南地区不同类型生态系统服务的关系. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 978-986.
- [17] United Nations, European Commission, Food and Agriculture Organization, International Monetary Fund, Organisation for Economic Cooperation and Development, The World Bank. System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework, 2012[2023-01-08]. <https://unstats.un.org/UNSDWebsite/Publications/>.
- [18] Sun X, Crittenden J C, Li F, Lu Z, Dou X. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 974-987.
- [19] Zhang H, Deng W, Zhang S, Peng L, Liu Y. Impacts of urbanization on ecosystem services in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration: changes and trade-offs. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108920.
- [20] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
- [21] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, Nalley L L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [22] Cheng L, Jie Z. Investigating the spatiotemporally varying correlation between urban spatial patterns and ecosystem services: a case study of Nansihu Lake basin, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(8): 346-366.
- [23] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 徐彩仙, 李焱. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1278-1288.
- [24] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.
- [25] Gonzalez P, Battles J J, Collins B M, Robards T, Saah D S. Aboveground live carbon stock changes of California wildland ecosystems, 2001-2010. *Forest Ecology and Management*, 2015, 348: 68-77.
- [26] 王晓平, 冯庆, 宋金昭. 成渝城市群碳排放空间关联结构演化及影响因素. *中国环境科学*, 2020, 40(9): 4123-4134.
- [27] Kuri F, Murwira A, Murwira K S, Masocha M. Predicting maize yield in Zimbabwe using dry dekads derived from remotely sensed Vegetation Condition Index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 39-46.
- [28] Marsboom C, Vrebos D, Staes J, Meire P. Using dimension reduction PCA to identify ecosystem service bundles. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 209-260.
- [29] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系. *生态学报*, 2018, 38(13): 4609-4624.

- [30] Li B, Chen D, Wu S, Zhou S, Wang T, Chen H. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: case study of Nanjing City, China. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 416-427.
- [31] 张钰莹, 孙美莹, 杨荣金, 张乐. 西南地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 207-214.
- [32] Sun X, Li F. Spatiotemporal assessment and trade-offs of multiple ecosystem services based on land use changes in Zengcheng, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1569-1581.
- [33] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 段艺芳. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例. *生态学报*, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [34] Seto K C, Güneralp B, Hutya L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [35] 武燕, 吴映梅, 高彬斌, 李琛, 郑可君, 李婵. 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系. *水土保持研究*, 2023, 30(01): 173-182.
- [36] 熊俊楠, 李进, 程维明, 周成虎, 郭良, 张晓蕾, 王楠, 李伟. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素. *地理学报*, 2019, 74(7): 1374-1391.
- [37] 刘晓娜, 刘春兰, 陈龙, 裴厦, 乔青. 北京湾过渡带生态系统服务梯度效应分析及生态分区. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 276-285.
- [38] Liu S, Yin Y, Liu X, Cheng F, Yang J, Li J, Dong S, Zhu A. Ecosystem Services and landscape change associated with plantation expansion in a tropical rainforest region of Southwest China. *Ecological Modelling*, 2017, 353: 129-138.
- [39] Yu X. Is environment 'a city thing' in China? Rural-urban differences in environmental attitudes. *Journal of Environmental Psychology*, 2014, 38: 39-48.
- [40] Zhang Z, Gao J, Fan X, Lan Y, Zhao M. Response of ecosystem services to socioeconomic development in the Yangtze River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 481-493.
- [41] Wang M M, Chen H S, Zhang W, Wang K L. Soil organic carbon stock and its changes in a typical Karst area from 1983 to 2015. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(1): 42-51.
- [42] 林子雁, 肖燧, 史雪威, 饶恩明, 张平, 王莉雁. 西南地区生态重要性格局研究. *生态学报*, 2018, 38(24): 8667-8675.