

DOI: 10.5846/stxb202006121526

石宇, 韩蕊, 郭烁. 基于地形梯度的南方丘陵山地生态系统服务价值对城市化的空间响应——以粤北地区为例. 生态学报, 2021, 41(18): 7238-7248.

Shi Y, Han R, Guo L. Ecosystem service value and its spatial response to urbanization based on terrain gradient in southern hilly and mountainous region—A case study in northern Guangdong, China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7238-7248.

基于地形梯度的南方丘陵山地生态系统服务价值对城市化的空间响应

——以粤北地区为例

石 宇, 韩 蕊, 郭 烁*

中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

摘要: 南方丘陵山地带是我国华南和西南地区重要的生态安全屏障带, 具有重大的生态保护意义, 而在当今快速城市化的进程中, 保障该地区的生态资源与生态稳定对于我国实现可持续发展具有十分重要的战略意义。以丘陵山地带的典型区域粤北为例, 依据地形位指数将研究区划分为 5 个地形梯度, 并基于 1990—2015 年 6 期的土地利用遥感数据和社会经济的统计数据, 利用地理信息技术和空间统计的方法, 评估了粤北地区不同时期随地形梯度变化的各区域生态系统服务价值 (Ecosystem service value, ESV) 与城市化水平 (Urbanization level, UL), 之后探究了生态系统服务价值与城市化的空间相关性。研究表明: (1) 1990—2015 年期间, 粤北地区城市化水平上升, 且地形位指数为 0.003—0.368 的梯度 1 区域城市化水平最高。(2) 研究期间粤北地区的生态系统服务价值呈轻微下降趋势, 随着时间推移, ESV 在低坡度、低海拔的地形梯度 1 区域下降率最高, 而各个年份的 ESV 均随着地形梯度的升高而增加。(3) 研究区自 2000 年后的土地利用类型转移的活跃程度加剧, 其中主要是地形梯度 1 区域及周围的耕地、林地与建筑用地间发生转移。(4) 空间相关性分析表明, 粤北地区生态系统服务价值与城市化水平具有较强的负相关关系, 且在研究期间负相关性明显增强; 同时两者具有较显著的空间聚集效应, 其中低 ESV-高 UL 型集中分布于地形梯度 1 的韶关市与清远市区以及南雄市, 高 ESV-低 UL 型则分布在梯度相对较高、人口相对分散的少数民族自治县。研究探讨了粤北地区生态系统服务与城市化的时空关系并了解了各区域的发展模式, 有助于进一步认识生态系统对于社会经济发展的支持作用, 保持生态保护建设与经济发展的协调与平衡, 从而保障和维护南方丘陵山地带的生态价值。

关键词: 生态系统服务价值; 地形梯度; 南方丘陵山地带; 城市化

Ecosystem service value and its spatial response to urbanization based on terrain gradient in southern hilly and mountainous region—A case study in northern Guangdong, China

SHI Yu, HAN Rui, GUO Luo*

College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

Abstract: The southern hilly and mountainous region is an important ecological barrier in south and southwest China, which is of great significance for ecological protection. With the rapid development of urbanization, it is of great strategic significance to ensure the ecological resources and ecological stability in this region for the sustainable development of China. In this study, the north region of Guangdong was taken as the study area and divided into 5 terrain gradients according to the terrain index. Then we used data of land use and social economy from 1990 to 2015 and evaluated

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0505601)

收稿日期: 2020-06-12; 网络出版日期: 2021-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoluo@ muc.edu.cn

urbanization level and ecosystem service value (ESV) in the study area on the basis of the terrain gradient by using spatial statistical methods. In addition, we analyzed the spatial correlation between the ESV and urbanization level (*UL*) on the terrain gradient. The results showed that (1) during 1990—2015, the urbanization level in the study area showed an uptrend, and the level of urbanization was the highest in the gradient 1 region with the terrain index between 0.003 and 0.368. (2) During the study period, the ecosystem service value the study area showed a slight downward trend. As time went on, the decline rate of ESV was the highest in the terrain gradient 1 region. The ESV increased with the increase of the terrain gradient in each year. (3) After 2000, there was the highest active transfer of land use types in gradient 1 and its surrounding regions, among which the transfer was mainly between farmland, forestland and build-up land. (4) The spatial correlation analysis showed that there was a significantly negative correlation between urbanization level and ecosystem service value in the study area, and the negative correlation was significantly increased during the study period. At the same time, they had a significant spatial aggregation effect, in which the low ESV-high *UL* type was concentrated in Shaoguan urban districts, Qingyuan urban districts and Nanxiong City of terrain gradient 1, and the high ESV-low *UL* type was mainly distributed in the minority autonomous regions with a relatively dispersed population and higher terrain gradient. This research discussed the spatio-temporal relationship between ecosystem services and urbanization innorthern Guangdong and understood the development patterns of each region, which is helpful to further understand the supporting role of ecosystem in social and economic development. The purpose is to maintain the coordination and balance between ecological protection construction and urban development, so as to safeguard and maintain the ecological value of southern hilly and mountainous region.

Key Words: ecosystem service value; terrain gradient; the southern hilly and mountainous region; urbanization

南方丘陵山地带作为《全国主体功能区区域》和“十二五”规划确定“两屏三带”为主体的生态安全战略格局的重要组成部分,其主要功能是为我国华南和西南地区提供生态安全屏障,这对于局部甚至全球区域的气候调节、植被修复、土壤保持及水源涵养均起到了至关重要的作用^[1-2]。生态系统服务是指各种类型的生态系统对人类福祉和效益的直接或间接贡献,为人类提供了一系列的生态产品与生态功能,而人类生存发展条件的好坏取决于生态系统服务的变化^[3-4]。然而,随着当前社会经济的不断发展,城市化进程逐渐加快,城市扩张直接改变了土地利用模式,进而导致诸多生态系统的结构发生改变^[5-6],而人类对于自然生态系统提供的各种服务功能的依赖性逐渐增强^[7-8],因此,了解和评估城市化背景下的南方丘陵山地带生态系统服务价值并进一步分析其与城市化的时空关系是有效保护和提升该地区生态系统服务功能价值的前提。

量化评估生态系统服务价值有多种方法,采用经济学的方法将其量化能够较直观的反映变化规律, Costanza 等^[9]发表了全球生态系统服务与自然资本价值核算的相关研究内容,推动了生态系统服务价值量化评估进展;谢高地等^[10]根据中国的实际情况制定了中国生态系统服务价值当量因子表,为中国生态系统服务价值评估相关研究提供了参考。关于生态系统服务量化评估的研究从注重社会环境条件改变对生态系统服务产生的影响^[11-12]发展到运用模型并基于不同的尺度评估其服务功能价值,例如,在全球尺度^[9,13]、区域尺度^[4,10]、小流域尺度^[14-15]等尺度下进行空间变化分析。目前,城市化与生态系统服务价值关系的研究越来越受到重视,多数研究是将城市发展作为区域生态系统服务发生变动的驱动因素^[16],并运用不同的统计模型探讨城市化因子对生态系统服务的影响^[17-19],另外城市化对各种生态系统服务间权衡协同关系的变化所产生的影响^[20]以及这两个变量间的交互耦合作用^[21-22]也受到广泛关注,这其中涉及到的生态系统包括城市^[23]、土壤^[24]、水体^[25]、农林^[26]以及文化生态系统^[27]等,然而以往研究的地区多集聚在我国中东部城市群或经济相对发达的平原区域,针对内陆局部山地区域的生态系统服务与城市化关系的研究还较少,并且以往的研究尺度相对较大,评估多基于行政单元的统计数据,从而弱化了指标在区域内部空间上变化特征的探讨^[28-30]以及指标间的空间差异分析^[31],因此本研究采用空间格网进行定量化评估,突出研究指标的空间异质性特征,便于进行空间关系的探讨。

南方丘陵山地带位于长江流域与珠江流域的分水岭及源头区,贯穿广东、广西、江西及湖南等省市^[1],粤北区域属于南方丘陵山地地带的典型区域。地形复杂、资源丰富,生态系统服务价值受地形的影响较大。因此,本文以粤北为研究地区,将该区域划分为5个地形梯度,基于2km×2km的空间网格评估不同地形梯度上及不同年份的生态系统服务价值与城市化水平的时空关系。本研究对于促进粤北地区生态系统保护与经济建设的协调合理发展具有重要意义,也为保障南方丘陵山地地带的可持续发展提供理论依据。

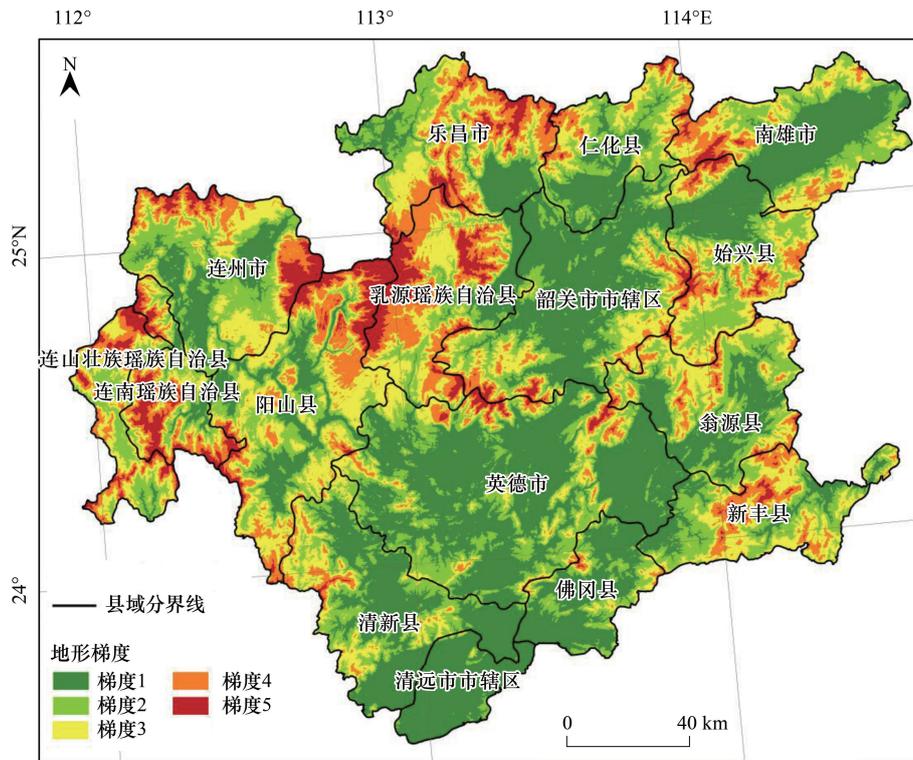


图1 粤北行政区划及地形梯度划分

Fig.1 The administrative regions and terrain gradients of northern Guangdong

梯度 1:0.003—0.368, 梯度 2:0.368—0.639, 梯度 3:0.639—0.890, 梯度 4:0.890—1.154, 梯度 5:1.154—1.826

1 研究区概况

粤北地区位于广东省北部,地理位置在 111°55′—114°81′E, 23°27′—25°57′N 之间,包括韶关与清远 2 个地级市,其中包括 2 个市辖区、4 个县级市、7 个县以及 3 个少数民族自治县。全区总面积为 37031 km²,占整个广东省面积的 20.61%,粤北整体地势呈现北部高南部低,地势地貌复杂,最高海拔为 1900m,最低为 5m,坡度范围在 0—62°之间,地形位指数在 0.003—1.826 之间(图 1)。该区域是典型的山地丘陵地带,具有丰富的林业资源,其森林覆盖面积达到了整个粤北地区的 70%以上,同时该地区也具有丰富的生物资源,使得粤北地区逐渐形成了许多以森林为主体的动植物共生竞长的生态系统,因此该区域也成为我国南方珍稀动植物的物种基因库。粤北全年四季如春,气候温和,雨量充沛,年平均气温在 19—23℃之间,年平均降水量在 2145—2648 mm 之间。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究利用 1990、1995、2000、2005、2010 年及 2015 年 6 期的 Landsat TM/ETM 遥感影像,结合研究区域

1:25 万地形图、土壤和植被专题图进行分析。根据土地利用覆盖变化(LUCC)分类体系与粤北土地利用现状,结合 ENVI 软件通过对遥感影像图进行拼接、校正、裁剪与融合等相关处理,将研究区的土地利用类型划分成耕地、林地、草地、水域、建筑用地及未利用地 6 类一级类型及 13 类二级用地类型,对每期数据进行精度检验,精度均达到 85% 以上,满足研究对土地利用分类数据的精度要求。粤北相关社会经济数据均来源于广东省统计年鉴等。为便于研究生态系统服务价值与城市化数据的空间分布特征,采用 2km×2km 网格进行空间采样,利用 Python 编程语言对 6 期数据共计 5.889 万个网格样方内的数值进行计算。

2.2 地形梯度分级

地形位指数是综合海拔与坡度因子的地形因子,其优势是可以全面综合地反映某一点的地形状况^[30]。本研究通过公式计算出粤北地区每个空间网格单元的地形位指数,并基于 ArcGIS 10.4 中的自然断点工具将地形位指数计算结果划分成 5 个地形梯度等级(图 1):0.003—0.368、0.368—0.639、0.639—0.890、0.890—1.154、1.154—1.826。后将地形梯度与 ESV 及 UL 的评估结果在 GIS 中进行空间叠置,便于分析在地形梯度因子的影响下 ESV 与 UL 的动态规律及两者的关系变化。

地形位指数计算公式:

$$T = \ln \left[\left(\frac{E}{E_0} + 1 \right) \times \left(\frac{S}{S_0} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中, T 表示地形位指数, E 与 S 分别代表某点的海拔(m)与坡度($^{\circ}$), E_0 与 S_0 分别代表整个研究区的平均海拔(m)与平均坡度($^{\circ}$)。

2.3 土地利用变化图谱研究

图谱分析可以对不同时期的土地利用单元进行地图代数叠加实现图谱的融合^[32-33],计算公式为:

$$L = 10 \times A + B \quad (2)$$

式中, L 代表在研究阶段内新的土地利用图谱单元属性图; A 代表前一时期的土地利用图谱单元属性值; B 代表后一时期的土地利用图谱单元属性值。

本研究将图谱的变化特征分为 5 种变化模式:前期变化型(土地利用只在 1990—2000 年发生变化)、中期变化型(土地利用只在 2000—2010 年发生变化)、后期变化型(土地利用只在 2010—2015 年发生变化)、反复变化型(1990 与 2015 年土地类型一致且 2010 与 2015 年的土地类型一致;1990 与 2010 年土地类型一致且 2000 与 2015 年土地类型一致)、连续变化型(1990、2000、2010 及 2015 年中至少出现 3 种不同土地类型),计算公式为:

$$L = 1000 \times A' + 100 \times B' + 10 \times C' + D' \quad (3)$$

式中, L 代表在研究阶段新的土地利用图谱单元属性图; A' 、 B' 、 C' 、 D' 分别代表 1990 年、2000 年、2010 年、2015 年粤北土地利用图谱单元属性值^[34]。

2.4 城市化水平量化评估

本文借鉴已有的相关研究,从人口城市化水平、经济城市化水平以及土地城市化水平三个层次衡量粤北地区的综合城市化水平^[28],分别使用人口密度(Population Density, PD)、国内生产总值密度(Gross Domestic Product Density, $GDPD$)及建筑用地面积占比(Urban Land Proportion, ULP)三个指标来量化,并依据自然断点法将评估结果分为 5 个等级,即低水平、较低水平、中等水平、较高水平及高水平,具体公式如下:

$$UL = \frac{1}{3} \times (PD' + GDPD' + ULP') \quad (4)$$

式中, UL 是指城市化水平指数; PD' 为标准化后的人口密度; $GDPD'$ 为标准化后的 GDP 密度; ULP' 为标准化后的建筑用地面积占比。

2.5 生态系统服务价值评估

本研究采用价值当量法^[10],以粤北地区 2010 年单位面积粮食产量为基准,计算出粤北地区的生态系统

服务当量修正系数为 0.987。利用修正后的价值当量因子(表 1)计算每个空间网格的生态系统服务价值,并使用自然断点法划分为 5 个等级:低值、较低值、中等值、较高值、高值。

生态系统服务价值评估公式:

$$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \times V C_i \quad (5)$$

式中,ESV 表示所研究生态系统总服务价值; A_i 表示第 i 种土地利用类型面积(hm^2); $V C_i$ 表示第 i 种土地利用类型生态系统服务价值系数。

表 1 粤北地区不同陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表/(元/ hm^2)

Table 1 Ecosystem service value per unit area of different terrestrial ecosystem types in northern Guangdong

生态系统服务类型 Ecosystem service type	森林 Forestland	草地 Grassland	农田 Farmland	裸地 Bare land	水域 Water body
气体调节 Gas regulation	3056.739	698.697	436.649	0.000	785.997
气候调节 Climate regulation	2358.042	786.047	777.263	0.000	7667.954
水源涵养 Water conservation	2794.691	698.697	523.998	26.156	15667.835
土壤形成与保护 Soil formation and conservation	3406.038	1703.069	1275.105	17.470	751.058
废物处理 Waste processing	1144.130	1144.130	1432.334	8.686	15877.474
生物多样性保护 Biodiversity protection	2847.100	951.962	620.033	296.890	2179.049
食物生产 Food production	87.350	262.049	873.396	8.686	174.699
原材料 Raw material	2270.692	43.625	87.350	0.000	34.890
娱乐文化 Entertainment culture	1117.876	34.940	8.686	8.686	4318.668

2.6 空间相关性研究

本文使用空间分析软件 Geo Da 中的双变量 Moran's I 指数来探索粤北地区生态系统服务价值(ESV)与城市化水平(UL)的空间相关性。使用全局双变量研究整体研究区生态系统服务价值与城市化水平之间的空间关系,而使用局部双变量研究整个地区内部不同空间单元的生态系统服务价值与城市化的空间关系^[35-36]。针对粤北地区生态系统服务价值与城市化水平的空间关系,绘制了空间聚集图,其聚集类型包括:不显著、高-高、高-低、低-低及低-高 5 种类型。

3 结果与分析

3.1 基于地形梯度的土地利用变化图谱分析

1990—2015 年粤北地区土地利用变化图谱见图 2:(1)研究时段内各个土地利用类型均发生转移,其中耕地与林地图谱单元转出率最高且在地形梯度 1 上最活跃,其转移的图谱单元数量分别占发生转移的图谱单元总数的 41.3%与 35.4%,其次是草地转出率为 20.4%且在地形梯度 2、3 上较活跃,而水域与建筑用地同样在梯度 1 上最活跃,但总转出率仅为 2.9%。(2)研究时段,建筑用地的转入率高达 45.1%,是占比最高的土地利用转入类型,主要集中在地形梯度 1 的区域,其次为林地,转入率为 28.3%且集中于梯度 1、2 区域,草地主要由较高梯度的林地转移而来,其转入率为 17.5%,而水域与耕地总转入率仅为 9.1%且活跃于地形梯度 1 区域。(3)从图谱的 5 种转移模式来看,其图谱单元数量占比由高到低依次为:中期变化(41.2%)、后期变化(33.2%)、前期变化(22.8%)、反复变化(2.1%)、连续变化(0.7%)。中后期的土地利用转移较为频繁,对比其转移情况发现中后期主要的转移类型为耕地和林地转移为建筑用地,其次是部分耕地转移为林地,而这两种转移类型主要分布于 1、2 地形梯度区域;在前期主要是 1、2 梯度上的部分林地与水域被开发为耕地与草地;反复变化类型主要是 2、3 梯度上的耕、林、草之间重复转换,且最终转移为林地或草地;连续变化型由于面积占比太小,其变化具有偶然性。

3.2 基于地形梯度的城市化时空动态分析

1990—2015 年粤北地区的城市化指数依次为 0.018、0.018、0.019、0.038、0.037、0.043,可以看出城市化水

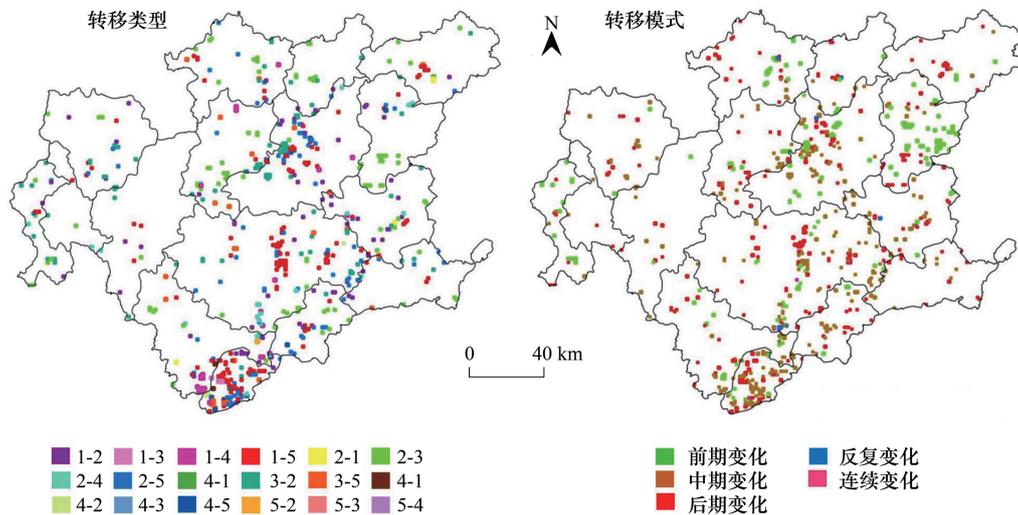


图 2 1990—2015 年粤北地区土地利用转移类型图谱与转移模式图谱

Fig.2 Type Tupu and Pattern Tupu of land use change during 1990—2015 in northern Guangdong

转移类型图中“1”、“2”、“3”、“4”、“5”分别代表“耕地”、“林地”、“草地”、“水域”、“建筑用地”,“1-2”代表 1990—2015 年期间,耕地转移为林地(同样的方法表示其余的土地利用转移类型)

平整体呈上升的状态。5 个地形梯度上的城市化水平见图 3,1990—2015 年期间尽管城市化程度不断加剧,但粤北地区处于低城市化水平的区域面积占比较大,且随地形梯度的升高,低城市化水平区域面积随之增加;而较高及高城市化水平区域主要聚集于城市密集分布的地形梯度 1 上,从 1990 年至 2015 年,地形梯度 1 区域上的较高及高城市化水平区域面积占整体较高及高城市化水平区域面积比例分别为 0.707、0.698、0.717、0.771、0.754、0.712,可看出该区域面积在 2000 年后显著增加,可见地形梯度 1 区域的城市化程度最高,表明该区域适合人类开发与居住,地形梯度对城市化的空间分布具有显著的影响。

3.3 基于地形梯度的生态系统服务价值时空动态分析

1990—2015 年粤北地区生态系统服务价值呈轻微减少的趋势。各地形梯度上的生态系统服务价值随时间变化均呈现缓慢下降的趋势,在研究时段内随着地形梯度的逐渐上升,对应各梯度上的生态系统服务价值随时间变化的下降率逐渐减小。这主要是由于低梯度区域海拔低、坡度小,城市、工业区与人口集中分布,城市的快速发展以及较频繁的人类活动使得该区域自然资源的开发与利用程度较高,进而导致该区域的生态系统服务价值下降率最高;而随着地形梯度的上升,由于气候、坡度等环境条件的限制导致城市化程度降低,使得原自然生态环境得以保留,对于局部外来干扰具有较大的抵抗力与恢复力,因此各梯度上的生态系统服务价值下降率也随之减少。

1990—2015 年粤北地区生态系统服务价值空间分布情况见图 4。在研究期间,粤北地区大面积区域的生态系统服务处于较高值与中等值,其网格数量分别占总体网格数量的 45%与 35%左右,将这些区域与地形梯度叠加发现其主要处于地形梯度 3、4 区域,由于这里的地形与气候等环境条件可能限制了人类活动,使得该区域丰富的自然资源与生态环境得以保护与维持,因此粤北整体的生态系统服务处于良好的水平;然而,低值区域与较低值区域集中于地形梯度 1、2 地区,其网格数量在研究期间逐渐增多并且在 2010 年后增长率显著上升,这说明低梯度区域的城市化进程加快,可能导致了较大的生态系统服务价值损失,因此该区域的生态系统服务处于较低水平;高值区域的面积占比最小,而这类区域除了分布在梯度最高的区域外,还分布在低梯度区域林地与水域集中的地区。

3.4 基于地形梯度的城市化与生态系统服务价值空间相关性分析

粤北地区生态系统服务价值与城市化水平全局空间相关性结果见图 5,可以看出 ESV 与 UL 呈现较显著

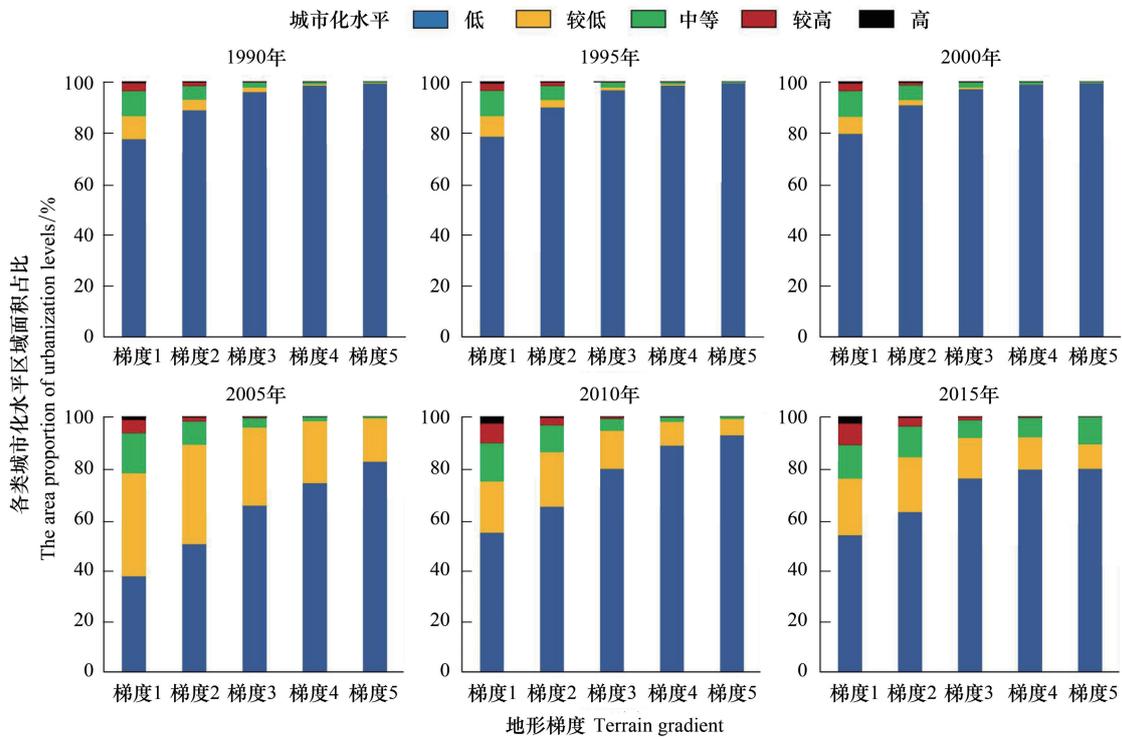


图3 1990—2015年粤北地区城市化水平在不同地形梯度上的分布情况

Fig.3 Distribution of urbanization level on different terrain gradients in northern Guangdong from 1990 to 2015

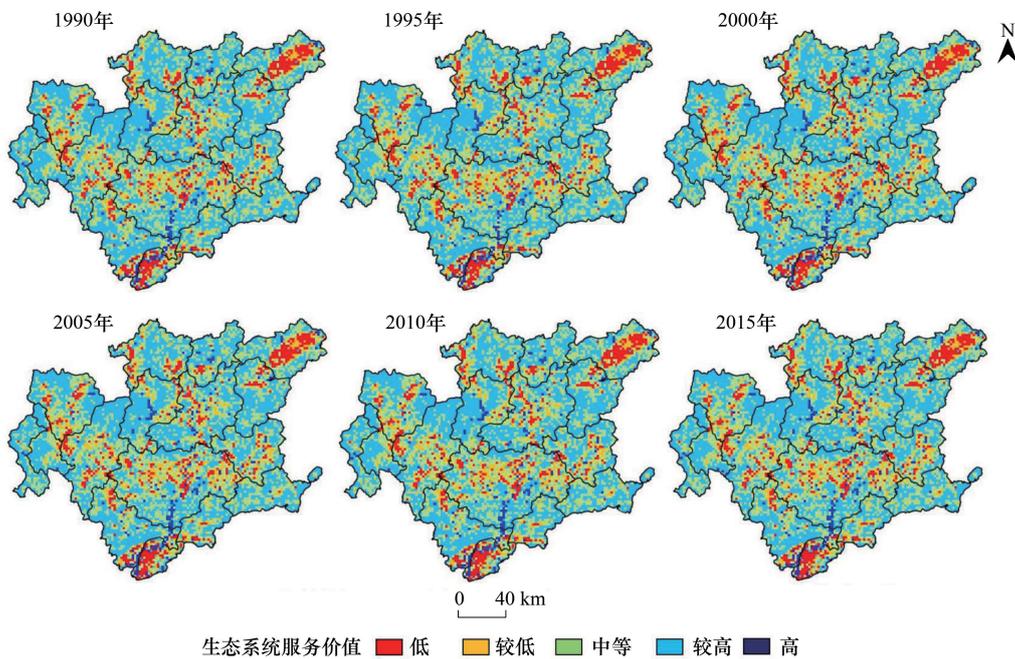


图4 1990—2015年粤北地区各级水平生态系统服务价值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecosystem service value (ESV) in northern Guangdong from 1990 to 2015

的负相关关系,且两者的空间负相关效应趋于增强。数据的显著性检验结果见表2,由此可知ESV与UL在空间上的聚集效应也在增强。

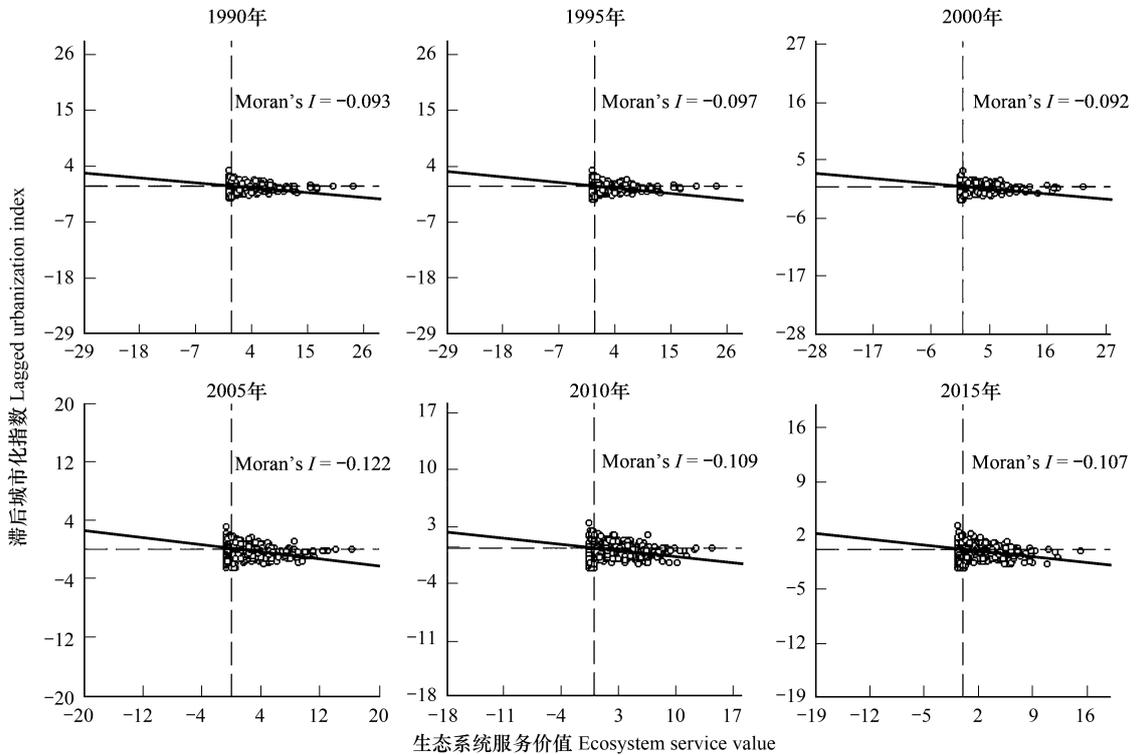


图 5 1990—2015 年粤北地区生态系统服务价值与城市化的 Moran's I 指数

Fig.5 Moran's I index of urbanization and ecosystem service value in northern Guangdong from 1990 to 2015

表 2 1990—2015 年粤北地区生态系统服务价值与城市化的 Moran's I 指数及显著性检验结果

Table 2 Moran's I index of ecosystem service value and urbanization level and the significant level in northern Guangdong from 1990 to 2015

指标 Index	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
<i>I</i>	-0.093	-0.097	-0.092	-0.122	-0.109	-0.107
<i>P</i>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
<i>Z</i>	-24.523	-25.521	-24.474	-32.295	-28.327	-28.433

I 值指 Moran's I 指数; *P* 值为概率, 反映某件事发生的可能性, $P < 0.001$ 表示具有极显著的统计学差异; *Z* 值表示标准差倍数, 反映数据的集聚或离散程度, 其绝对值越大表明双变量的集聚性越强

粤北地区生态系统服务价值与城市化水平的局部空间关系见图 6, 本研究将其与粤北行政区划图进行空间叠加, 可知低-高型主要聚集在南部的清远市市辖区、中北部的韶关市市辖区及东北部的南雄市, 且这三个行政单元基本都位于地形梯度 1 区域, 其中两个市辖区是整个粤北城市与人口的核心聚集区域, 地势较低, 具有较高的城市化水平, 因此该区域提供较低的生态系统服务价值; 而南雄市农业经济与旅游业发达, 综合开发程度较高, 导致该区域生态系统服务价值较低。高-低型的分布面积较广, 其主要聚集区为粤北北部的三个少数民族自治县及东部的始兴县, 该地区整体海拔较高, 森林资源丰富, 是少数民族村落聚集地, 城镇化率较低, 因此提供有较高的生态系统服务价值。另外, 高-高型与低-低型的分布面积较少, 高-高型聚集于粤北南部的清新县, 该区域首先具有丰富的森林资源与水力资源, 因而提供较高的生态服务价值; 低-低型在研究区呈零散分布, 该区域多为农田与建筑用地, 资源类型单一, 生态系统服务价值较低。

4 讨论与结论

4.1 讨论

粤北地区属于丘陵山地带的典型区, 地形复杂, 因此本研究采用综合地形位指数反映每个空间网格评价

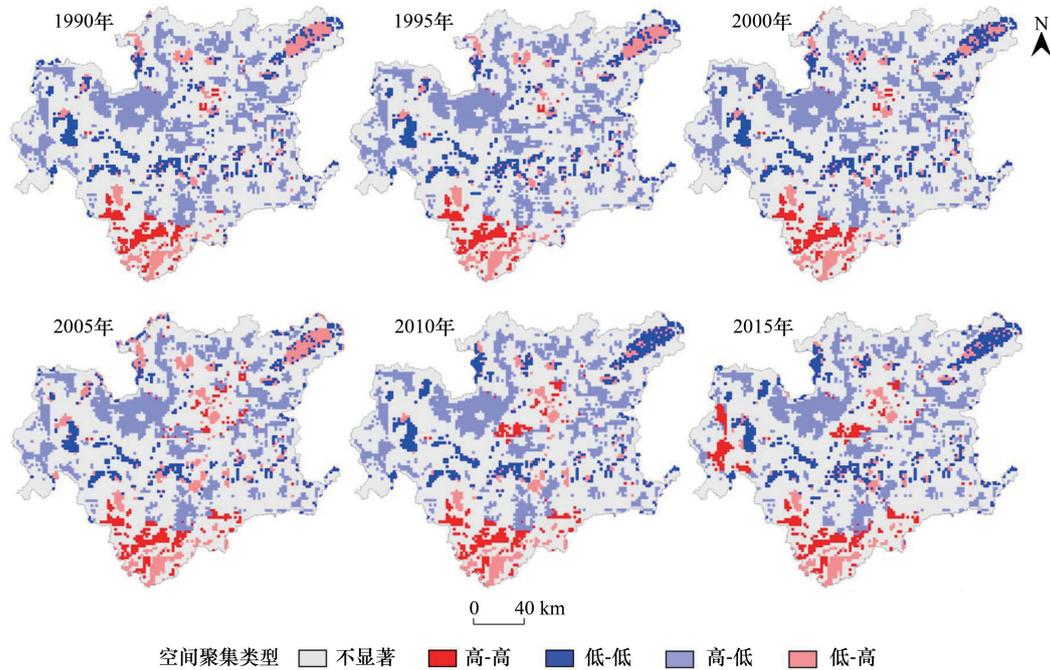


图 6 1990—2015 年粤北地区生态系统服务价值与城市化水平的空间聚集效应

Fig.6 Spatial aggregation of ecosystem service value and urbanization level in northern Guangdong from 1990 to 2015

单元的地形特征,并基于空间单元网格评估了粤北地区的生态系统服务价值与城市化水平,并对两者进行空间关系及聚类效应的研究。研究表明,低梯度上的耕地主要是在前期(1990—2000年)进行扩张,而到中后期(2000—2015年),低梯度1,2区域上的大面积耕地与林地则转化为建筑用地;在中后期阶段也有部分耕地转化为林地或草地。另外在研究期间,粤北城市化水平随地形梯度的升高而降低,且评估结果显示2000年之后的城市化水平显著上升,这与图谱的研究结果相符,而生态系统服务价值则是随梯度的升高而增加,且粤北地区的生态系统服务价值整体处于较好水平。另外粤北的生态系统服务与城市化具有较强的负相关关系,且在局部区域产生了显著的空间聚集效应。

粤北地区生态系统服务价值在空间上呈现出显著的分异规律,其主要原因如下:自然环境条件的限制效应^[37]与城市化带来的胁迫效应^[38]。从自然环境条件方面来说,由于粤北具有大面积的丘陵山地,复杂的地形条件使得城市化与生态系统服务价值呈现显著的分异特征,这主要是由于地形位指数高的区域海拔高,坡度大,再加上不适宜的气候条件等多种环境因素限制了人类的各项生产活动与开发建设^[37],因此较高地形梯度上的自然生态系统受到了低程度的干扰与破坏,这可能是山地的ESV一般要高于平原地区的原因^[39-40]。从城市化方面来说,粤北的自然资源丰富,导致人类对各种自然资源进行开发和利用,并破坏局部自然环境进行城市建设与耕地扩张,在此过程中也造成了一系列的环境污染问题,比如水污染与大气污染等,因此城市快速扩张与发展对自然生态环境产生了明显的胁迫效应^[38],这类现象多聚集于地形梯度1,2区域,而人口越密集,胁迫效应越显著,如清远市辖区与韶关市辖区等。在研究期间,粤北经济也在快速发展,然而粤北整体的ESV变化较稳定,只有轻微下降,这说明研究区原生生态环境本底条件较好,城市化产生的胁迫作用只是对局部地区的ESV产生了显著的负面效应,并没有对整个研究区的ESV产生太大的影响。

基于研究结论,对于粤北地区的环境管理工作提出如下建议:(1)针对低梯度人口集中的区域(低ESV-高UL型与低ESV-低UL型),建议稳定城市化建设发展的速度,控制建筑用地面积的增长,并且在城市建设的同时注重生态环境的保护,加强绿色基础设施建设与生态恢复建设,从而利于ESV水平的提升。(2)针对高梯度区域(高ESV-低UL型),由于该区域受到的干扰程度低,生态环境保持良好的状态,因此造成的破坏

容易得到恢复,所以这部分区域应该着重进行保护,尤其是林地与草地自然生态系统,避免未来的过度开发与利用。(3)清新县(高 ESV-高 UL 型)的经济发展模式可以为粤北地区未来的建设发展提供方向,充分利用好粤北地区自然地理环境优势发展生态旅游等绿色经济产业,将自然因素与社会经济因素协调合理化,将绿色产业打造成该地区的优势产业。

本研究旨在探讨 ESV 与城市化的空间格局关系,因此通过空间网格进行指标的量化评估,但评估时的单位网格面积与土地利用数据的精度有密切关系,本文 1km²的土地分类栅格数据在目前的研究中已经相对粗略,因此在未来的工作中要做到更细致的评估则需要提高基础数据的分辨精度^[41]。另外,本文只是探讨了粤北 ESV 变化与城市化的关系,在广阔的空间中 ESV 的变化不仅只受到城市化影响,而且城市化也只是属于人类对自然干扰的一种方式,除此之外也不可避免众多自然因子的参与,因此 ESV 的时空变化机制及其驱动因素仍需要进行更多的研究来完善。本研究可为粤北地区相关环境决策部门和工作人员提供理论依据与相关参考。

4.2 结论

本文以粤北地区为例,从地形梯度的角度出发,首先利用图谱将 1990—2015 年粤北地区的土地利用转移动态可视化,并基于空间分析评价了整个研究区的城市化水平及生态系统服务价值的时空变化特征,并对两者的时空关系进行了研究,明确了发生聚类效应的分布区,为当地相关决策制定提供了较准确的指导。根据研究结果得出如下结论:

(1)粤北地区土地利用转移动态在地形梯度 1 最为活跃,而在研究期间主要的土地利用转移类型是耕地、林地转为建筑用地,且中后期建筑用地的转入率明显上升。

(2)粤北地区在研究期间城市化水平升高,且城市化进程在 2000 年之后显著加快,地形梯度 1 的城市化程度最高,而随着地形梯度上升,城市化水平逐渐下降。

(3)粤北地区整体的 ESV 在研究期间略微下降,呈现出较稳定的发展态势,而 ESV 在各地形梯度上随时间变化同样呈现出下降的态势,且在地形梯度 1 区域下降率最高。ESV 的空间分布因地形因素呈现出显著的分异特征,较高 ESV 分布于高梯度、林地草地等自然植被分布的山地区域,而低 ESV 主要分布于低梯度、耕地与建筑用地等类型分布的平原区域。

(4)空间相关性研究结果表明生态系统服务价值与城市化呈现较强的负相关性,且在研究期间负相关性明显增强,同时两者存在非常显著的空间聚集效应,其中低-高型集中分布于粤北两个市辖区,高-低型集中分布于人口相对较少,城市化水平较低的少数民族自治县。叠加地形梯度与土地利用类型分布图可知低-高型分布在耕地与建筑用地聚集的地形梯度 1、2 区域,该地区综合开发程度较高,已严重影响到自然生态环境;高-低型地区海拔较高,林地资源丰富,人口相对分散,应当继续保护,禁止不合理的开发工程,结合当地实际情况进行科学规划,实现经济建设与自然环境平衡发展。

参考文献 (References):

- [1] 欧阳贝思,张明阳,王克林,邹冬生,张海波. 2000—2010 年南方丘陵山地带土地覆被及景观格局变化特征. 农业现代化研究, 2013, 34(4):467-471.
- [2] 张海波,张明阳,王克林,秦建新,符静. 南方丘陵山地带水源涵养功能变化特征. 农业现代化研究, 2014, 35(3):345-348.
- [3] Buckley R. The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations. *Austral Ecology*, 2011, 36(6):e34-e35.
- [4] 南箴,杨子寒,毕旭,付奇,李波. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例. *中国环境科学*, 2018, 38(9):3531-3541.
- [5] Long H L, Liu Y Q, Hou X G, Li T T, Li Y R. Effects of land use transitions due to rapid urbanization on ecosystem services: implications for urban planning in the new developing area of China. *Habitat International*, 2014, 44:536-544.
- [6] Li Y Y, Li Y, Zhou Y, Shi Y L, Zhu X D. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment. *Journal of Environmental Management*, 2012, 98:127-133.
- [7] Yuan Y J, Chen D X, Wu S H, Mo L J, Tong G J, Yan D H. Urban sprawl decreases the value of ecosystem services and intensifies the supply scarcity of ecosystem services in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 697:134170.
- [8] Qiu B K, Li H L, Zhou M, Zhang L. Vulnerability of ecosystem services provisioning to urbanization: a case of China. *Ecological Indicators*, 2015,

- 57:505-513.
- [9] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(15):253-260.
- [10] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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. *自然资源学报*, 2015, 30(8):1243-1254.
- [11] Hein L, van Koppen K, de Groot R S, van Ierland E C. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 2006, 57(2):209-228.
- [12] Porras I. Costa Rica pioneers ecosystem services. *Nature*, 2012, 487(7407):302.
- [13] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26:152-158.
- [14] 高伟, 杜展鹏, 严长安, 陈岩. 污染湖泊生态系统服务净价值评估——以滇池为例. *生态学报*, 2019, 39(5):1748-1757.
- [15] 王晓莉, 戴尔阜, 朱建佳. 赣江流域森林生态系统服务空间格局及其影响因素(英文). *资源与生态学报*, 2016, 7(6):439-452.
- [16] Baró F, Gómez-Baggethun E, Haase D. Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, 2017, 24:147-159.
- [17] Cai W B, Gibbs D, Zhang L, Ferrier G, Cai Y L. Identifying hotspots and management of critical ecosystem services in rapidly urbanizing Yangtze River Delta Region, China. *Journal of Environmental Management*, 2017, 191:258-267.
- [18] Wu K Y, Ye X Y, Qi Z F, Zhang H. Impacts of land use/land cover change and socioeconomic development on regional ecosystem services: the case of fast-growing Hangzhou metropolitan area, China. *Cities*, 2013, 31:276-284.
- [19] Zank B, Bagstad K J, Voigt B, Villa F. Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: a case study in the Puget Sound, Washington, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 149:31-42.
- [20] 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.
- [21] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608:706-714.
- [22] Su S L, Li D L, Hu Y N, Xiao R, Zhang Y. Spatially non-stationary response of ecosystem service value changes to urbanization in Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2014, 45:332-339.
- [23] Das M, Das A. Dynamics of Urbanization and its impact on Urban Ecosystem Services (UESs): a study of a medium size town of West Bengal, Eastern India. *Journal of Urban Management*, 2019, 8(3):420-434.
- [24] 吴绍华, 虞燕娜, 朱江, 李保杰, 周生路. 土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应. *土壤学报*, 2015, 52(5):970-978.
- [25] Hoyer R, Chang H. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization. *Applied Geography*, 2014, 53:402-416.
- [26] 叶延琼, 章家恩, 陈丽丽, 秦钟. 城市化背景下广佛都市圈农林生态系统服务价值. *应用生态学报*, 2016, 27(5):1619-1627.
- [27] Jalignot R, Kemajou A, Chenal J. Cultural ecosystem services provision in response to urbanization in Cameroon. *Land Use Policy*, 2018, 79:641-649.
- [28] Zhang Y, Liu Y F, Zhang Y, Liu L, Zhang G X, Chen Y Y. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: a case study in Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638:780-790.
- [29] 王晓峰, 薛亚永, 张园. 基于地形梯度的陕西省生态系统服务价值评估. *冰川冻土*, 2016, 38(5):1432-1439.
- [30] 徐煨银, 孙思琦, 薛达元, 郭砾. 基于地形梯度的赣南地区生态系统服务价值对人为干扰的空间响应. *生态学报*, 2019, 39(1):97-107.
- [31] 陈万旭, 刘志玲, 李江风, 冉端, 曾杰. 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. *生态学报*, 2020, 40(15):5137-5150.
- [32] 杨爱民, 朱磊, 陈署晔, 靳含, 夏鑫鑫. 1975—2015年玛纳斯河流域土地利用变化的地学信息图谱分析. *应用生态学报*, 2019, 30(11):3863-3874.
- [33] 吕晓, 史洋洋, 黄贤金, 孙晓芳, 苗志伟. 江苏省土地利用变化的图谱特征. *应用生态学报*, 2016, 27(4):1077-1084.
- [34] Lu X, Shi Y Y, Chen C L, Yu M. Monitoring cropland transition and its impact on ecosystem services value in developed regions of China: a case study of Jiangsu Province. *Land Use Policy*, 2017, 69:25-40.
- [35] He J H, Pan Z Z, Liu D F, Guo X N. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 673:553-564.
- [36] Yuan Y J, Wu S H, Yu Y N, Tong G J, Mo L J, Yan D H, Li F F. Spatiotemporal interaction between ecosystem services and urbanization: case study of Nanjing City, China. *Ecological Indicators*, 2018, 95:917-929.
- [37] 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. *生态学报*, 2015, 35(7):2244-2254.
- [38] 杜霞, 孟彦如, 方创琳, 李聪. 山东半岛城市群城镇化与生态环境耦合协调发展的时空格局. *生态学报*, 2020, 40(16):5546-5559.
- [39] 石焱, 袁大鹏, 赵雪杉, 封乾, 牛志君, 王树涛. 基于地形梯度的冀西北间山盆地生态系统服务价值评估——以河北省怀来县为例. *水土保持研究*, 2018, 25(3):184-190.
- [40] 张学斌, 罗君, 石培基, 周亮. 格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征. *应用生态学报*, 2020, 31(2):543-553.
- [41] Bryan B A, Ye Y Q, Zhang J E, Connor J D. Land-use change impacts on ecosystem services value: incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics. *Ecosystem Services*, 2018, 32:144-157.