

# 基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能 时空变化特征及影响因素

王秀明, 刘谠承, 龙颖贤, 张音波, 梁炜, 洪曼, 余晓东

(生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655)

**摘要:**基于改进的 InVEST 模型,评估了 1990—2017 年 4 个时期韶关市生态系统水源涵养、水土保持、生物多样性、碳储存服务功能时空演变趋势,并通过地理探测器方法分析了影响服务功能时空变化特征的主要因素。结果表明:(1) 研究区单位面积水源涵养、水土保持量均呈先上升后下降趋势,分别以 2000 年、2010 年达到最高,主要是由于年际气象条件的影响;生境质量、碳储存则受土地利用变化影响,呈逐年下降趋势。(2) 1990—2017 年 4 个时期生态系统服务低值区主要分布在区内韶关中心城区及南雄、翁源、乐昌盆地区域,高值区则各有差异,水源涵养高值区分布在研究区南部,与区域降水量南高北低的趋势一致;水土保持高值区集中分布在乐昌—乳源县中部的大东山、始兴仁化县交界处的瑶岭,与区域地形一致;生物多样性、碳储存高值区分布与土地利用类型较高一致性。随着韶关中心城区及各县城区的扩张,以各城区为中心的生态系统服务功能低值区范围持续扩大。(3) 水源涵养量空间异质性主要受土地利用类型、降水量影响,生境质量、碳储存主要由土地利用类型、坡度、海拔影响,土壤保持量则受各因素影响相对均等。除土壤保持量外,土地利用类型对生态系统服务功能空间异质性的影响显著大于其他因素。(4) 气象因素在很大程度上决定了生态系统服务功能的年际差异,土地利用类型则是影响其空间分布的主要因素。

**关键词:** Invest 模型; 生态系统服务功能; 水源涵养; 水土保持; 地理探测器

中图分类号: S157; X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)05-0381-08

## Spatial-Temporal Changes and Influencing Factors of Ecosystem Services in Shaoguan City Based on Improved InVEST

WANG Xiuming, LIU Xucheng, LONG Yingxian,

ZHANG Yinbo, LIANG Wei, HONG Man, YU Xiaodong

(South China Institute of Environmental Sciences, Ministry Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China)

**Abstract:** Based on the improved InVEST model, the spatial-temporal evolution trends of water conservation, soil conservation, biodiversity, and carbon storage service functions in Shaoguan City during the four periods from 1990 to 2017 were evaluated, and the main factors affecting service functions were analyzed by using methods such as geographic detectors. The results showed that: (1) the water conservation and soil conservation per unit area in the study area first increased and then decreased, mainly due to the impact of interannual meteorological conditions; habitat quality and carbon storage had been decreasing year by year, and affected by land use change; (2) in the four periods from 1990 to 2017, the areas with low values of ecosystem services mainly distributed in the central cities of Shaoguan and Nanxiong, Wengyuan, and Lechang basins; the areas with high values were different, and areas with the high values of water conservation distributed in the south of the study area, which was consistent with the distribution of precipitation; the areas with high soil conservation values concentrated in the Dadong Mountain at the middle of Lechang-Ruyuan County and Yaoling at the junction of Shixing Renhua County, which was consistent with the topog-

收稿日期: 2020-02-27

修回日期: 2020-03-15

资助项目: 重大环保专项资金“区域和行业重大发展战略环境评价: 珠三角地区发展战略环境评价”(2110203); 生态环境部华南环境科学研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目(PM-zx097-202002-080)

第一作者: 王秀明(1988—), 女, 河南安阳林州市人, 硕士, 工程师, 研究方向为宏观生态与环境遥感。E-mail: 382001717@qq.com

通信作者: 梁炜(1984—), 男, 广东肇庆广宁县人, 学士, 工程师, 研究方向为环境遥感应用。E-mail: 8396982@qq.com

raphy; the distribution areas with high values of biodiversity and carbon storage was highly consistent with land types; with the expansion of Shaoguan's central and county districts, the area with low value of ecosystem service functions continued to expand; (3) the analysis of geographic detectors indicated that the spatial heterogeneity of water conservation was mainly affected by land type and precipitation, habitat quality and carbon storage were mainly affected by land type, slope, and altitude, and soil conservation was affected by various factors. Except soil conservation services, the impacts of land types on spatial heterogeneity of ecosystem service functions were significantly greater than other factors; (4) meteorological factors largely determined the inter-annual differences in ecosystem service functions, and land types were the main factors affecting their spatial distribution.

**Keywords:** InVEST model; ecosystem service function; water conservation; soil conservation; geographical detector

生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,即人类通过生态系统的各种功能直接或间接得到的产品和服务<sup>[1]</sup>。生态系统服务类型包括支持服务(养分循环、土壤形成、初级生产)、供给服务(食物、淡水、燃料)、调节服务(调节气候、洪水、净化水质)和文化服务(美学、精神、教育、消遣等)<sup>[2]</sup>。

目前,生态系统服务评价方法主要包括价值量评估法、能值评估法、物质质量评估法三大类,由于生态系统服务功能多样、难以定价、能指转换率分析复杂等原因<sup>[3]</sup>,价值量评估、能值评估法主观性、不确定性较大,物质质量评估法评估结果相对客观、恒定,并便于比较不同区域和时期生态系统服务功能变化情况,因而得以广泛应用,如黄麟<sup>[4]</sup>、侯鹏<sup>[5]</sup>、刘璐璐<sup>[6]</sup>等利用降水储量法、水土流失方程、土壤风蚀方程、人类扰动指数等方法定量分析了国家重点生态功能区生态系统水源涵养、土壤保持、防风固沙、生物多样性维持等服务功能变化情况。

生态系统服务评估与权衡模型(InVEST)以物质质量评价法为基础,基于 GIS 平台,实现了评估结果的空间可视化,并且可以预测模拟未来不同情景下生态服务功能的变化趋势。目前 InVEST 模型已在国内外得到广泛应用,如 haunreiter 等<sup>[7]</sup>运用该模型评价产水量、碳储存、土壤保持、生物多样性等服务功能,并将区域内自然资本以地图标注; Tallis H 等<sup>[8]</sup>运用该模型预测 2020 年亚马逊盆地内森林退化和道路发展带来的生态系统功能变化;国内方面,张媛媛<sup>[9]</sup>、贾芳芳<sup>[10]</sup>、荣月静<sup>[11]</sup>、黄从红<sup>[12]</sup>等分别利用该模型对三江源区、赣江流域、南京市、北京门头沟区一种或多种生态系统服务功能进行了评估模拟。目前研究关注生态系统服务功能时空变化格局分析,缺少对时空变化特征影响因素的定量分析,或仅对比不同

土地利用类型的生态系统服务功能差异,难以说明其时空变化主要由何种因素决定。

韶关市地处北江中上游、五岭山脉南麓,地形复杂多样,生态资源丰富,是广东省重要的生态屏障和水源涵养区。市内省级以上自然保护区 15 个,世界生物圈保护区——车八岭被誉为“物种宝库,南岭明珠”。2019 年,广东省发改委印发了《粤北生态特别保护区范围划定及建设实施方案》,将韶关市西部部分区域纳入粤北特别生态保护区范围,并提出将其建设成为南岭山地森林及生物多样性生态保护示范区,可见其生态功能的重要性。改革开放以来,珠三角地区工业化进程不断加快,韶关市依托丰富的矿产资源在 20 世纪九十年代成为广东重工业基地,由此带来人类干扰增加、土地利用方式转变,在此背景下,其生态系统服务功能是否受工业化和城镇化影响明显下降?影响生态系统服务功能的主要因素以自然因素还是人为因素为主?本研究基于改进的 InVEST 模型评估韶关市水源涵养、水土保持、生物多样性、碳储存服务功能时空变化,并研究影响生态系统服务功能时间变化和空间分布特征的主导因素,以期客观评估韶关市生态服务功能变化、为韶关市生态保护政策提供参考。

## 1 研究区概况

韶关市位于广东省北部,北江上游,下辖浈江区、武江区、曲江区、仁化县、始兴县、翁源县、新丰县和乳源瑶族自治县,代管乐昌市和南雄市,全市面积 1.84 km<sup>2</sup>。韶关地形以山地丘陵为主,自北向南三列弧形山系排列,其间分布两行河谷盆地。河流主要属珠江水系北江流域,北江以浈江为干流,自北向南贯穿全境,主要支流有武江、墨江、锦江、翁江、南水。韶关市属中亚热带湿润型季风气候,年均降雨 1 400~2 400

mm,年平均气温  $18.8^{\circ}\sim 21.6^{\circ}\text{C}$ ,全年无霜期 310 d 左右,年日照时间 1 473~1 925 h。区域地带性土壤为红壤,占研究区总面积的 50%以上。海拔 800 m 以下为亚热带常绿阔叶林,800~1 300 m 为落叶阔叶林,1 300~1 600 m 为针阔混合林。韶关是全国重点林区,林地面积 127.4 万  $\text{hm}^2$ ,活立木蓄积量 9 054 万  $\text{m}^3$ ,森林覆盖率 75.05%。

## 2 研究方法数据来源

### 2.1 InVEST 模型简介

本文应用的 InVEST 3.2.0 版本可用于评估两大类生态系统服务功能:一是支持服务,包括生境质量、生境风险评估、海水质量;二是最终服务,包括碳储存、水源涵养(产水量)、养分持留、土壤保持(泥沙输移)、气候调节、木材生产、作物生产等。另外该模型还可以用于叠加分析(识别重要海洋和海岸带)和海岸脆弱性分析。

2.1.1 水源涵养服务功能 InVEST 模型产水量模块(hydropower)基于水量平衡原理计算研究区水源涵养量,由于该模型未考虑地表径流因素,造成林地等生态用地单位面积产水量低于建设用地等不合理结果(区域降水差异不大的情况下,由于林地蒸腾量较高,计算得到产水量较低),因此,在计算结果的基础上,扣除了地表径流产生量。公式如下:

$$Y_{xj} = P_x \times \left(1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}\right) - D_{xj} \quad (1)$$

$$\frac{\text{AET}_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x + R_{xj}}{1 + \omega_x + R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \times (\text{AWC}_x / P_x) \quad (3)$$

$$R_{xj} = (k_{xj} \times \text{ET}_{0x}) / P_x \quad (4)$$

$$\text{ET}_{0x} = 0.0013 \times 0.408 \times \text{RA} \times (T_{\text{avg}} + 17.8) \times (\text{TD} - 0.0123P_x) \times 0.76 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{AWC}_x = & 54.509 - 0.132 \times \text{SAN} - 0.003 \times \text{SAN}^2 - \\ & 0.055 \times \text{SIL} - 0.006 \times \text{SIL}^2 - 0.738 \times \\ & \text{CLA} + 0.007 \times \text{CLA}^2 - 2.688 \times \text{C} + 0.501 \times \text{C}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $Y_{xj}$ 表示第  $j$  种生态系统类型中单元格  $x$  上的年水源涵养量; $P_x$ 表示单元格  $x$  上的年降水量; $\text{AET}_{xj}$ 表示栅格单元  $x$  的年实际蒸散量, $\text{AET}_{xj}/P_x$ 是实际蒸散与降水的比值; $D_{xj}$ 表示地表径流量,由  $x$  单元格年均降水量与对应生态系统类型的地表径流系数相乘得到; $\omega_x$ 表示植被年需水量与年降水量的比值; $Z$ 是降雨深度和降雨时间的分布,其值为常数; $R_{xj}$ 是景观类型  $j$  中单元格  $x$  上的 budyko 干燥指数,

表示潜在蒸散与降水的比值; $\text{AWC}_x$ 表示植被可利用含水量(mm); $k_{xj}$ 是植被蒸散系数,表示不同发育期植被蒸散量  $\text{ET}$  与潜在蒸散量  $\text{ET}_{0x}$  的比值; $\text{RA}$ 是太阳顶层辐射(MJ); $T_{\text{avg}}$ 是日最高气温均值和日最低温均值的平均值( $^{\circ}\text{C}$ ); $\text{TD}$ 是日最高气温均值和日最低温均值的差值( $^{\circ}\text{C}$ ); $\text{SAN}$ , $\text{SIL}$ , $\text{CLA}$ , $\text{C}$ 分别是沙粒、粉粒、黏粒和有机碳的含量。

2.1.2 水土保持服务功能 InVEST 模型泥沙输移比模块(SDR)首先基于地形和气候条件计算潜在土壤侵蚀量,再基于植被覆盖因子和水土保持措施计算实际侵蚀量,两者的差值即为土壤保持量。

$$\text{RKLS}_x = R_x \times K_x \times \text{LS}_x \quad (7)$$

$$\text{USLE}_x = R_x \times K_x \times \text{LS}_x \times C_x \times G_x \quad (8)$$

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10 \left(1.5 \lg \frac{P_{ix}^2}{P_x}\right) - 0.8188 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} K = & (0.2 + 0.3e^{-(0.0256\text{SAN} \times (1 - \text{SIL}))}) \times \\ & \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA}} + \text{SIL}\right) \times 0.3 \times \left(\frac{1 - 0.25\text{C}}{\text{C} + e^{3.72 - 2.95\text{C}}}\right) \times \\ & \left(\frac{1 - 0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + e^{-5.51 + 22.9\text{SN1}}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\text{RKLS}_x$ 为栅格  $x$  的土壤潜在侵蚀量,是仅考虑地貌与气候条件下的计算结果; $\text{USLE}_x$ 是栅格  $x$  的实际土壤侵蚀量,主要考虑了植被覆盖、拦截作用及实施了水土保持措施后的计算结果; $R_x$ 为降雨侵蚀力; $K_x$ 为土壤可蚀性; $\text{LS}_x$ 为坡度坡长因子; $C_x$ 为植被覆盖因子; $G_x$ 为水土保持措施因子。 $P_x$ 表示降水量; $\text{SAN}$ , $\text{SIL}$ , $\text{CLA}$ , $\text{C}$ 分别是沙粒、粉粒、黏粒和有机碳的含量; $\text{SN1} = 1 - \text{SAN}$ 。

2.1.3 生物多样性维持功能 InVEST 模型利用生境质量表征生物多样性维持功能(表 1)。生境质量模块结合土地覆被和生物多样性威胁因素生成生境质量地图,计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \times \left(1 - \frac{D_{xj}}{D_{xj} + k}\right)$$

式中: $Q_{xj}$ 是土地利用与土地覆盖  $j$  中栅格  $x$  的生境质量; $D_{xj}$ 是生境类型  $j$  栅格  $x$  的生境胁迫水平。

2.1.4 碳储存功能 碳储存模块通过输入各年度土地利用数据及对应碳密度数据评估区域生态系统碳储量。本文考虑四大碳库(表 1),即地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳,计算公式如下:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}$$

式中: $C_{\text{tot}}$ 为碳储量( $\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ); $C_{\text{above}}$ , $C_{\text{below}}$ , $C_{\text{soil}}$ , $C_{\text{dead}}$ 分别是地上生物碳、地下生物碳、土壤碳、死亡有机碳。

### 2.2 地理探测器简介

地理探测器是度量、挖掘和利用空间异性的新

工具,其理论核心是通过空间异质性来探测因变量与自变量之间空间分布格局的一致性,据此度量自变量对因变量的解释度,即  $q$  值。统计结果  $q$  值越大表示自变量对因变量的解释力越强,反之则越弱。地理探测器比一般统计量有更强的势 (Power),因为两个变

量在二维空间分布一致比两个变量的一维曲线的一致要难得多<sup>[19]</sup>。利用地理探测器分析时,自变量为类型量(数值型变量可离散化为类型量),解决了本文拟分析的土地利用类型、土壤类型为非数值量而无法进行相关分析的问题。

表 1 InVEST 模型运行所需数据来源及处理过程

| 子模块名称 | 运行数据需求及格式               | 数据来源及处理过程   |
|-------|-------------------------|---|
| 水库产水量 | 土地利用分类,栅格               | 生态环境部卫星环境应用中心,利用 ArcGIS 将矢量数据转为分辨率为 30m 的栅格数据   |
|       | 年降水量( $P_x$ ),栅格        | 基于研究区周边气象站逐日降水量数据,去除极值后生成各气象站年降水量数据,经克里金空间插值、统一坐标系和投影后得到栅格图层  |
|       | 年潜在蒸散量( $ET_{0x}$ ),栅格  | 基于研究区周边气象站逐日日照、气温数据,利用公式(5)计算得到逐月太阳顶层辐射 RA 及 $T_{avg}$ ,TD,并计算逐月潜在蒸散量和年潜在蒸散量,经克里金空间插值、统一坐标系和投影后得到栅格图层 |
|       | 根系约束层土层深度,栅格            | 寒区旱区科学数据中心中国土壤数据集,参考土层深度数据  |
|       | 植被可利用含水量( $AWC_x$ ),栅格  | 基于寒区旱区科学数据中心中国土壤数据集,沙粒、粉粒、黏粒和有机碳的含量数据,利用公式(6)计算得到 $AWC_x$ ,并进行克里金空间插值、统一坐标和投影                         |
|       | 植被蒸散系数( $k_{xj}$ ),csv  | 参考李彪 <sup>[18]</sup> 、陈姗姗 <sup>[14]</sup> 、吴哲 <sup>[15]</sup> 等研究设定                                   |
|       | 集水区,矢量                  | 基于地理空间数据云 DEM 数据,利用 ArcGIS10.5 空间分析工具 hydrology,生成 112 个集水区   |
| 水土保持  | 土地利用分类,栅格               | 同上  |
|       | DEM 数据,栅格               | 地理空间数据云   |
|       | 降雨侵蚀力因子( $R_x$ ),栅格     | 基于各气象站逐日降水量数据按照公式(9)计算 $R_x$ ,经克里金空间插值、统一坐标系和投影后得到栅格图层  |
|       | 土壤可蚀性因子( $K_x$ ),栅格     | 基于寒区旱区科学数据中心中国土壤数据集,沙粒、粉粒、黏粒和有机碳的含量数据,按照公式(10)计算得到  |
| 生物多样性 | 物理参数表( $C_x, G_x$ ),csv | 参考李彪 <sup>[18]</sup> 、党虹 <sup>[16]</sup> 、何莎莎 <sup>[17]</sup> 等研究设定                                   |
|       | 土地利用分类,栅格               | 同上  |
|       | 生境威胁因素, csv             | 以建设用地和耕地为生境威胁因素,参考荣月静 <sup>[11]</sup> 、赵梦雨 <sup>[18]</sup> 设定权重和衰退相关性                                 |
| 碳储存   | 生境类型及其对威胁源的敏感性, csv     | 参考荣月静 <sup>[11]</sup> 、赵梦雨 <sup>[18]</sup> 等研究设定  |
|       | 土地利用分类,栅格               | 同上  |
|       | 碳库数据, csv               | 参考李敏 <sup>[3]</sup> 、黄从红 <sup>[12]</sup> 、李彪 <sup>[18]</sup> 等研究设定                                    |

### 2.3 数据来源

本文涉及数据包括:(1)土地利用分类数据:1990年、2000年、2010年、2017年土地利用数据来源于生态环境部卫星环境应用中心,将研究区划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地 5 个一级类,及早地、水田、有林地、灌木林、湖泊、城镇用地等 20 个二级类;(2)气象数据:来自国家气象信息中心,包括 4 个年度广东省及周边 84 个气象站降水、温度、日照逐日数据;(3)土壤质地数据:来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)中国土壤数据集;(4)高程数据:来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。 (5)植被类型数据:中科院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/data>),用于研究

生态系统服务功能影响因素。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统类型与转换

韶关市生态系统类型包括林地、耕地、草地、水域、建设用地,以林地为主,1990年、2017年林地面积占比分别为 73.1、72.5%,除韶关市区外,各区县均分布较多;1990年、2017年耕地占比分别为 18.2%、16.8%,较集中分布在南雄盆地及韶关市区周边、乐昌县城、翁源县城周边。1990—2017年,林地、耕地、草地面积持续下降,建设用地面积由 252.5 km<sup>2</sup>急剧增加到 674.6 km<sup>2</sup>,年均增幅为 9.8%。利用 ArcGIS 空间叠加功能分析 1990—2017 年土地利用转化情况见表 2。可见,

转化面积最大的类型是林地→耕地、耕地→林地,较均匀分布在全市。各类用地向建设用地的总面积为 446.89 km<sup>2</sup>,以耕地、林地为主,耕地→建设用地主要分布在中心城区、南雄盆地及各区县建成区周边,主要由于城镇开发建设侵占;林地→建设用地则呈线状分布中心城区及乳源、仁化、始兴等区县,主要由于交通道路建设侵占。

表 2 1990—2017 年研究区生态系统类型转化面积

| 类别   | km <sup>2</sup> |          |        |        |        |
|------|-----------------|----------|--------|--------|--------|
|      | 耕地              | 林地       | 草地     | 水域     | 建设用地   |
| 耕地   | 2720.26         | 283.78   | 41.67  | 22.38  | 275.49 |
| 林地   | 296.30          | 12845.32 | 152.11 | 30.23  | 127.63 |
| 草地   | 47.46           | 184.23   | 889.73 | 3.59   | 31.05  |
| 水域   | 13.95           | 14.13    | 2.15   | 151.18 | 12.72  |
| 建设用地 | 18.62           | 3.79     | 0.91   | 1.50   | 227.73 |

### 3.2 生态系统服务功能时间变化特征及影响因素

(1) 时间变化特征。利用 InVEST 模型计算得到研究区单位面积生态系统服务量见表 3。2000—2017 年全市水源涵养、水土保持服务功能均呈先上升后下降趋势,分别以 2000 年、2010 年为最高;2000—2010 年生境质量基本一致,2017 年则明显下降;碳储存呈逐年下降趋势,尤以 1990—2000 年下降幅度最大。

(2) 时间变化特征影响因素。根据模型计算原理,生物多样性维持、碳储存功能主要由土地利用方

表 4 1990—2017 年 4 个时期单位面积水源涵养、水土保持量与气象因素

| 年度   | 单位面积水源涵养量/<br>(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> ) | 年降水量/mm | 单位面积水土保持量/<br>(t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> ) | 降水侵蚀力/<br>(MJ · mm · t · hm <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> ) | 年均<br>温度/0.1℃ |
|------|--|---------|---|---|---------------|
| 1990 | 756.9  | 1605.3  | 28.0  | 258.8   | 205.4         |
| 2000 | 1045.4   | 1873.7  | 44.6  | 403.3   | 204.7         |
| 2010 | 1006.5   | 1845.9  | 67.9  | 618.6   | 201.4         |
| 2017 | 689.3  | 1450.8  | 41.4  | 377.7   | 207.5         |

表 5 1990 年气象下研究区各年度单位面积水源涵养、水土保持量

| 年度   | 1990   | 2000  | 2010   | 2017   |
|--|--------|-------|--------|--------|
| 单位面积水源涵养量/<br>(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> ) | 756.92 | 757.1 | 759.12 | 746.88 |
| 单位面积水土保持量/<br>(t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )              | 27.98  | 27.95 | 28.0   | 28.03  |

### 3.3 生态系统服务功能空间分布特征及影响因素

(1) 空间分布特征。利用 InVEST 模型计算得到研究区生态系统服务空间分布见图 1。4 个时期研究区生态系统水源涵养、水土保持、生物多样性、碳储存服务功能空间分布呈现一致性和一定的差异性。一致性在于,各类生态系统服务功能空间分布均与地形呈现一致性,低值区主要分布在区内韶关中心城区及南雄、翁源、乐昌盆地区域。差异性在于,生态系统产水量高值区集中分布在新丰、翁源县及武江区和曲

式决定,水源涵养、水土保持服务功能则受降水量、温度、土地利用方式、水土保持措施等多种因素影响。为进一步探究造成水源涵养、水土保持功能年际差异的主要因素,比较 4 个年度研究区气象条件与单位面积水源涵养、水土保持量计算结果见表 4,可见研究区水源涵养量的年际差异主要受年际降水不均的影响,与吕乐婷<sup>[20]</sup>等人的研究一致;水土保持功能则主要受年际降水量不同导致的降水侵蚀力差异影响。

表 3 1990—2017 年 4 个时期研究区单位面积生态系统服务量

| 年度   | 水源涵养量/<br>(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> ) | 水土保持量/<br>(t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> ) | 生境质量<br>指数 | 碳储存量/<br>(t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> ) |
|------|--|---|------------|--|
|      | 1990   | 756.92  | 27.98      | 0.804  |
| 2000 | 1045.38  | 44.60   | 0.804      | 119.43   |
| 2010 | 1006.50  | 67.92   | 0.803      | 118.42   |
| 2017 | 689.27   | 41.36   | 0.790      | 113.91   |

为比较同等气象条件下土地利用方式不同造成的结果差异,按照 1990 年气象条件下计算单位面积水源涵养、水土保持服务功能结果见表 5,可见同等气象条件下研究区 4 个年度单位面积水源涵养、水土保持量基本相当,仅 2017 年水源涵养量有一定下降,说明当气候变化效应发挥主导作用时,土地利用变化对水源涵养量、水土保持量的影响并不明显<sup>[20]</sup>。

江区南部,整体呈南高北低的趋势,与区域降水量空间分布特征一致,与王川等<sup>[21]</sup>的研究一致;水土保持高值区集中分布在乐昌—乳源县中部的大东山、始兴仁化县交界处的瑶岭;生物多样性、碳储存则除上述低值区外,其余区域均为高值区。随着韶关中心城区及各县城区的扩张,以各城区为中心的生态系统服务功能低值区范围持续扩大。

(2) 空间分布特征影响因素。参考相关研究<sup>[13,22-24]</sup>,选择土地利用类型、土壤类型、植被类型、坡度、高程、降水量作为影响因素。利用 ArcGIS 10.5 中 creatrandpoints 功能在研究区生成 1 900 个随机点(图 1 服务功能计算结果包括约 184 万个栅格,随机点数量约占总量的 1%),统计各点位 4 个时期生态系统服务功能及对应的影响因素值,并将坡度、高程、降水量 3 个数值型变量在 SPSS 中进行等频率离散化,在此基础上进行地

理探测器分析。

因子探测结果表明某因素多大程度上解释了生态系统服务功能的空间分异( $q$  值),结果见图 2。可见 4 个年度各影响因素对各类生态系统服务功能的解释力相对大小基本一致,即对水源涵养空间分布解释力最大的因素主要是土地利用类型、降水量,对水土保持则是坡度、海拔,对生境质量、碳储存均为土地利用类型、坡度、海拔等。其中除土壤类型和水源涵养量、降水量与土壤保持量、降水量与生境质量不显著相关外,其余因素均

与各类生态系统服务功能极显著相关( $p < 0.01$ )。

生态探测用于分析两因素对生态系统服务功能空间分布的影响是否存在显著差异。结果表明,4 个年度土地利用类型、降水量对水源涵养量的解释力显著大于其他因素( $p < 0.05$ )。各因素对土壤保持量的解释力均无显著差异。各因素对生境质量、碳储存的解释力均存在显著差异,影响生境质量、碳储存空间异质性的因素从大到小均为:土地利用类型 > 坡度 > 海拔 > 植被类型 > 土壤类型 > 降水量。

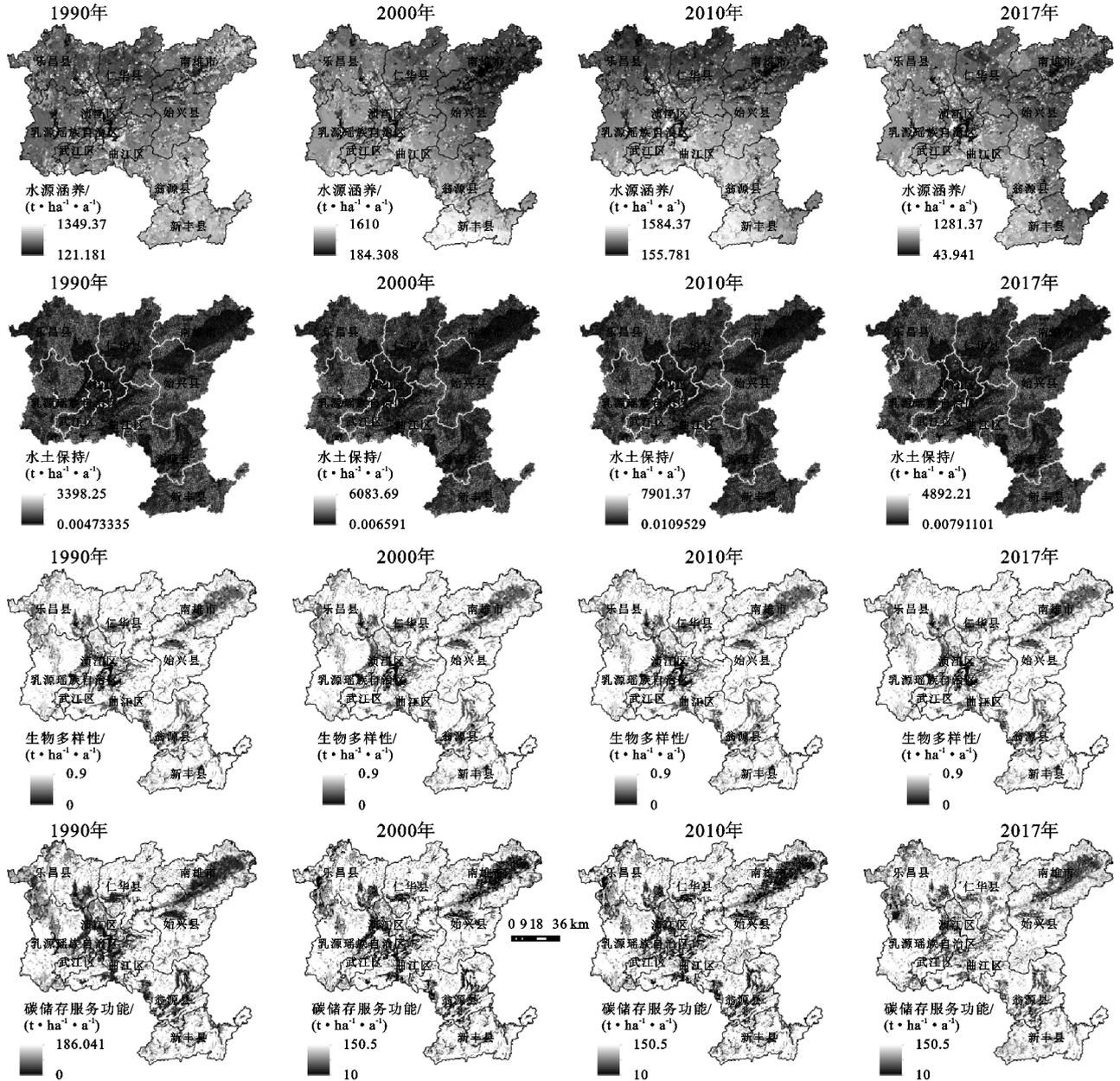


图 1 4 个时期韶关市生态系统服务功能空间分布

交互探测结果表明两因素共同作用下对生态系统服务功能的解释力。结果表明:两因素共同作用下的解释力普遍高于单因素,仅碳储存空间分布由土地利用类型单一因素决定。两因素协同作用下,对水源涵养解释力最大的是土地利用类型协同降水

量,各年度解释力达到 0.42~0.95;对水土保持量的解释力最大的是坡度、海拔,各年度解释力为 0.14~0.18;对生境质量解释力最大的是土地利用类型协同坡度、土地利用类型协同海拔,解释力分别为 0.67~0.82,0.66~0.82。

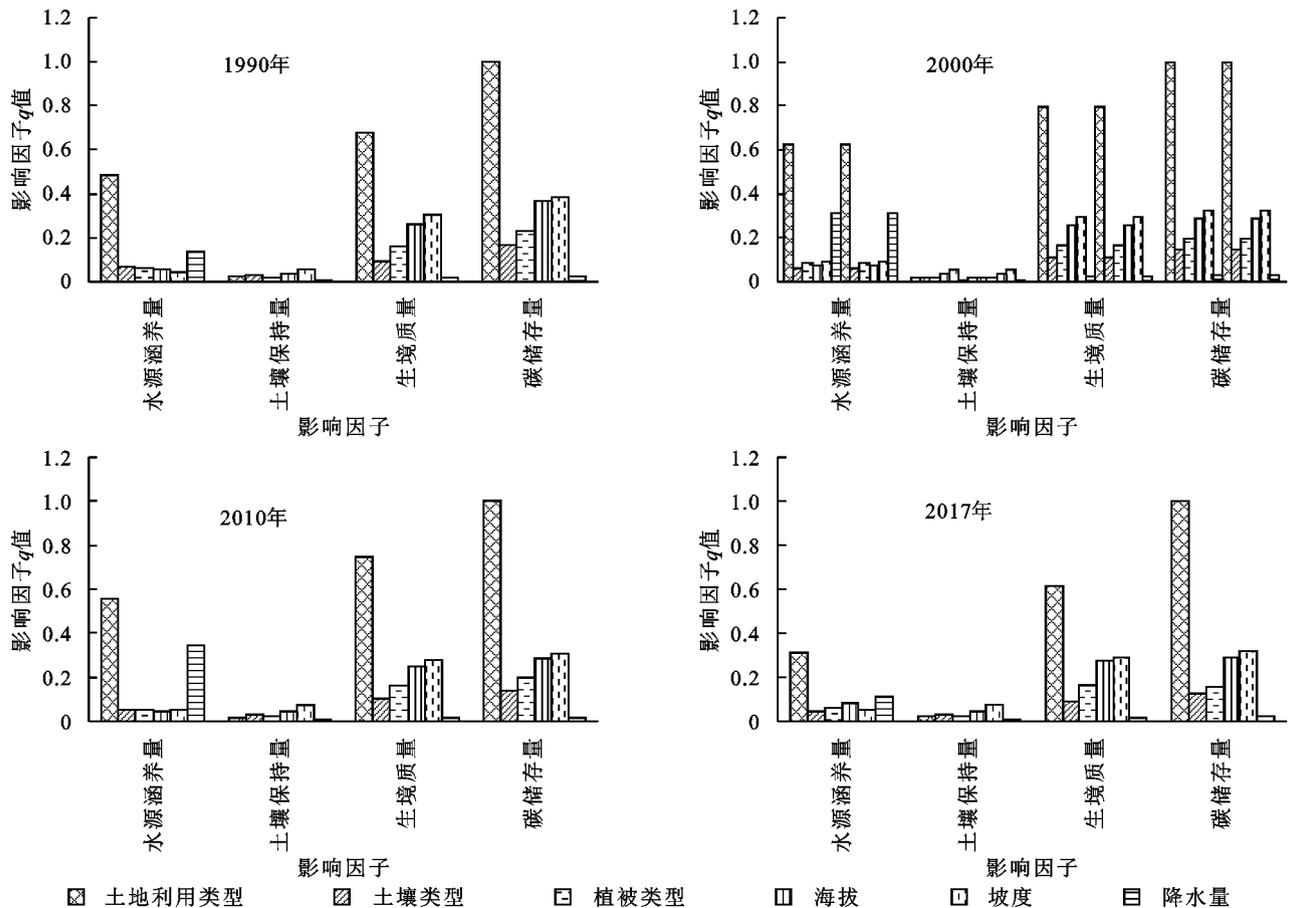


图2 各影响因素对各生态系统服务功能地理探测器因子探测结果

## 4 结论

(1) 受到气象因素影响,研究区单位面积水源涵养、水土保持量均呈先上升后下降趋势,分别以2000年、2010年达到最高;生境质量、碳储存则受土地利用变化影响,呈逐年下降趋势。(2) 1990—2017年4个时期生态系统服务功能低值区主要分布在区内韶关中心城区及南雄、翁源、乐昌盆地区域,高值区则各有差异,产水量高值区分布在研究区南部,水土保持高值区集中分布在乐昌—乳源县中部的大东山、始兴仁化县交界处的瑶岭。随着韶关中心城区及各城区的扩张,以各城区为中心的生态系统服务功能低值区范围持续扩大。(3) 利用地理探测器分析影响生态系统服务功能空间异质性的结果表明,水源涵养量主要受土地利用类型、降水量影响,生境质量、碳储存主要受土地利用类型、坡度、海拔影响,水土保持量则受各因素影响相对均等。除水土保持量外,土地利用类型对生态系统服务功能空间异质性的影响显著大于其他因素。(4) 气象因素在很大程度上决定了生态系统服务功能的年际差异,土地利用类型则是影响其空间分布的主要因素。

由于 InVEST 模型存在一定的局限性,如水源

涵养、水土保持、碳储存模块中多个参数以土地利用类型为基础,是对实际地表的一个概化<sup>[25-26]</sup>,未根本反映不同植被类型、不同生态系统完整性等影响下的生态服务功能时空差异,因此未来研究应在细化生态系统分类的基础上加强参数校验,进一步提高结果的精确性,并应进一步考虑水质净化、食物供给等服务类型,综合评价区域生态系统服务功能时空变化。

### 参考文献:

- [1] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [2] Reid W V, Mooney H A, Cropper A, et al. Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] 李敏.基于 Invest 模型的生态系统服务评价研究:以北京延庆为例[D].北京:北京林业大学.
- [4] 黄麟,曹巍,吴丹,等.2000—2010年我国重点生态功能区生态系统变化状况[J].应用生态学报,2015,26(9):2758-2766.
- [5] 侯鹏,翟俊,曹巍,等.国家重点生态功能区生态状况变化与保护成效评估:以海南岛中部山区国家重点生态功能区为例[J].地理学报,2018,73(3):429-441.
- [6] 刘璐璐,曹巍,吴丹,等.国家重点生态功能区生态系统

- 服务时空格局及其变化特征[J].地理科学,2018,38(9):1508-1515.
- [7] Haunreiter E, Cameron D. Mapping ecosystem services in the Sierra Nevada, CA[J]. The Nature Conservancy, California Program, 2001,12(1):16-32.
- [8] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2009,1162(1):265-283.
- [9] 张媛媛.1980—2015年三江源区水源涵养生态系统服务功能评估分析[D].北京:首都师范大学,2012.
- [10] 贾芳芳.基于 Invest 模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D].北京:中国地质大学,2014.
- [11] 荣月静.基于土地利用变化的南京市碳储量与生物多样性功能模拟[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [12] 黄从红.基于 InVEST 模型的生态系统服务功能研究:以四川宝兴县和北京门头沟区为例[D].北京:北京林业大学,2014.
- [13] 李彪.基于 GIS 和 InVEST 模型的南流江流域生态系统服务评估[D].南宁:广西师范大学,2017.
- [14] 陈姗姗.南水北调水源区水源涵养与土壤保持生态系统服务功能研究:以洛洛市为例[D].西安:西北大学,2016.
- [15] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等.不同土地利用/覆盖类型下海南岛产水量空间分布模拟[J].水资源保护,2014,30(3):9-13.
- [16] 党虹.基于 Invest 模型的钩秤河流域土壤保持功能研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2018,54(5):633-639.
- [17] 何莎莎,朱文博,张静静,等.基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤保持功能研究[J].河南大学学报:自然科学版,2018,48(5):542-553.
- [18] 赵梦雨.基于景观格局变化的咸阳市生境质量演变研究[D].山西临汾:山西师范大学,2018.
- [19] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [20] 吕乐婷,任甜甜,李赛赛,等.基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析[J].水土保持通报,2019,39(4):144-150,157.
- [21] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J].生态学杂志,2019,38(2):521-531.
- [22] 刘晓娜,裴厦,陈龙,等.基于 invest 模型的门头沟区生态系统土壤保持功能研究[J].水土保持研究,2018,25(6):168-176.
- [23] 王耕,韩冬雪.基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区水源涵养功能评估[J].水土保持通报,2018,38(3):206-211.
- [24] 柳冬青,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能时空变异及其影响因子[J].水土保持研究,2018,25(4):98-103.
- [25] 王蓓,赵军,胡秀芳.基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J].生态学杂志,2016,35(10):2783-2792.
- [26] 薛卓彬.基于 InVEST 模型的延河流域生态系统服务功能评估[D].西安:西北大学,2017.

(上接第 380 页)

- [21] 陈娅玲.陕西秦岭地区旅游社会—生态系统脆弱性评价及适应性管理对策研究[D].西安:西北大学,2013.
- [22] 余中元,李波,张新时.湖泊流域社会生态系统脆弱性时空演变及调控研究:以滇池为例[J].人文地理,2015,30(2):110-116.
- [23] 杨新军,张慧,王子侨.基于情景分析的西北农村社会—生态系统脆弱性研究:以榆中县中连川乡为例[J].地理科学,2015,35(8):952-959.
- [24] 何艳冰,黄晓军,翟令鑫,等.西安快速城市化边缘区社会脆弱性评价与影响因素[J].地理学报,2016,71(8):1315-1328.
- [25] 田亚平,向清成,王鹏.区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系[J].地理研究,2013,32(1):55-63.
- [26] 邬建国.景观生态学—格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [27] 谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.
- [28] 李洁,赵锐锋,谢作轮.甘肃省区域社会—生态系统脆弱性综合评价[J].经济地理,2015,35(12):168-175.
- [29] 职璐爽,薛惠锋.基于熵权法的城市水资源脆弱性研究:以广东省为例[J].水土保持通报,2018,38(5):322-329.
- [30] Barros V, Stocker T F. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2012,18(6):586-599.
- [31] 周苏娥,张明军,王圣杰,等.甘肃省河西地区自然—社会系统脆弱性评价[J].资源科学,2018,40(2):452-462.
- [32] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等.基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541.
- [33] 史鹏宇.雨水集流工程在安定区的利用成效[J].甘肃农业,2006(1):102.