

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.05.018

喀斯特山地城市生态系统服务变化及关系研究

——以贵阳市为例

王秋红, 王勇, 李维杰, 高敏, 傅俐

西南大学 地理科学学院, 重庆 400715

摘要: 贵阳市是喀斯特山地城市的典型地区, 了解其生态系统服务之间的权衡/协同关系, 对生态系统管理策略的提出与应用以及有效促进区域生态保护与经济发展具有重要意义. 以贵阳市为例, 基于 RULSE、InVEST 模型评估了 2005 年、2015 年贵阳市土壤保持、产水量和碳固持 3 种生态系统服务, 利用双变量相关、空间自相关等分析方法研究生态系统服务时间与空间的权衡/协同关系. 结果表明: ① 2005—2015 年间, 3 种生态系统服务总体上呈增加趋势. 在空间分布上, 土壤保持与碳固持呈北高南低的空间分布, 产水量则表现出相反的空间格局. ② 2005 年和 2015 年 3 种生态系统服务存在空间自相关, 局部上正相关类型表现出较强的集聚性, 而负相关类型的集聚性较低. ③ 贵阳市生态系统服务主要由耕地、林地、草地提供, 单位面积上, 碳固持和土壤保持林地最高, 产水量建设用地最高. ④ 2005—2015 年间, 土壤保持—产水量、土壤保持—碳固持为协同关系, 产水量—碳固持为权衡关系; 在空间上, 贵阳市南部的城市建成区及周边地区土壤保持—产水量、产水量—碳固持两对生态系统服务均表现出权衡关系. 本研究旨在为贵阳市以及其他喀斯特山地城市生态系统管理决策提供参考依据.

关键词: 生态系统服务; 权衡/协同关系; 空间自相关;

喀斯特山地城市

中图分类号: X171.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2022)05-0158-11



Change and Relationship of Ecosystem Services in Karst Mountainous Cities

——Take Guiyang as an Example

WANG Qiuhong, WANG Yong, LI Weijie, GAO Min, FU Li

School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Guiyang is a typical karst mountainous city, understanding trade-offs/synergies relationship be-

收稿日期: 2020-11-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(41877369).
作者简介: 王秋红, 硕士研究生, 主要从事岩溶生态系统与生态恢复研究.
通信作者: 王勇, 副教授, 硕士研究生导师.

tween its ecosystem services is of great significance to the application of management strategies, and effectively achieving the “win-win” goal of regional ecological protection and economic development. Spatial and temporal changes of three ESs including soil conservation, carbon sequestration, and water yield in Guiyang in 2005 and 2015 were assessment based on RULSE and InVEST models. The trade-offs/synergies relationship of ecosystem services were analyzed using correlation coefficient and spatial autocorrelation. The results showed that three ESs were mainly increasing from 2005 to 2015. In terms of spatial distribution, soil conservation and carbon sequestration were high in north and low in south, while water yield presented an opposite spatial pattern. The three ecosystem services in 2005 and 2015 had spatial autocorrelation. The agglomeration of the positive correlation type of the local scales is strong, the agglomeration of the negative correlation type is low. The ecosystem services were mainly provided by cultivated land, forest land and grassland in Guiyang. The forest land provided the highest carbon sequestration and soil conservation. The construction land provided the highest water yield. There was a synergistic relationship between soil conservation and water yield, soil conservation and carbon sequestration, respectively, and a trade-offs relationship between water yield and carbon sequestration during 2005 to 2015. In terms of space, soil conservation-water yield and water yield-carbon sequestration showed trade-off relationships in urban built-up area and its surrounding areas in the south of Guiyang City. This study is to provide strategies of ecosystem management in Guiyang and other karst mountainous cities.

Key words: ecosystem services; trade-offs/synergies; spatial autocorrelation; Karst mountainous city

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中得到的产品和服务,通常包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4类^[1]。生态系统服务具有多样性、空间异质性等特点,其关系表现出复杂的动态变化,即相互增益的协同关系、此消彼长的权衡关系等^[2]。所谓协同关系是指两种生态系统服务同时增强或同时减弱,权衡关系是指一种生态系统服务的增强/减弱会导致另一种生态系统服务的减弱/增强。中国西南山地众多,喀斯特地貌发育典型,碳酸盐岩分布广泛,面积约为50多万km²^[3],在该地区城市发展过程中,不合理的人类活动导致水土流失和石漠化极为严重,生态系统稳定性降低,生态系统服务受到严重威胁。因此,明晰生态系统服务的时空变化,厘清生态系统服务之间的权衡/协同关系,可以有效推动喀斯特山地城市地区生态系统服务功能管理^[4],实现社会经济发展与生态保护“双赢”目标。

近年来,探究生态系统服务间的权衡/协同关系已经成为生态系统服务研究的重要议题,研究内容多涉及生态系统服务的权衡/协同关系识别^[5]、尺度依存^[6]以及影响因素^[7]等。由于喀斯特地区特殊的地质背景与敏感的生态环境,研究者纷纷对该地区生态系统服务权衡/协同关系展开研究。郎焱卿^[8]以喀斯特山区为研究区,利用InVEST模型分别评估营养截留量、产水量、土壤保持量、碳储量4种生态系统服务,通过生产可能性边界明确4种生态系统服务之间的权衡/协同关系。Tian等^[9]以贵州省西部典型喀斯特流域为例,结合SWAT和CASA模型,模拟和评估NPP、产水量、土壤侵蚀量3种生态系统服务的权衡协同关系,得出产水量与土壤侵蚀量为协同关系,NPP与产水量、土壤侵蚀量为权衡关系。Han等^[10]以贵州省为研究区,探讨1995—2015年间产水量、土壤保持、碳储存、粮食生产4种生态系统服务间权衡/协同关系以及对土地利用变化的响应。高敏等^[11]以实施了退耕还林等生态工程的典型喀斯特地区为研究区,研究不同生态系统服务权衡/协同关系,以明确生态工程对生态系统服务权衡/协同关系的影响。综上所述,喀斯特地区生态系统服务权衡/协同关系的研究多以流域、省域、喀斯特山区、生态工程实施地区等为研究区,而有关喀斯特典型山地城市地区生态系统服务关系的研究较少。

贵阳市地处喀斯特山地地区,其生态系统变异敏感性高、抗干扰能力弱^[12]。随着城市化发展加快和建

设用地的不断扩张,该地区植被破坏、土壤侵蚀等一系列生态问题日益严峻^[13-14],许多区域的生态系统服务水平降低。因此,本研究利用 RULSE、InVEST 模型分析该地区土壤保持、产水量及碳固持 3 种典型生态系统服务,并基于喀斯特地区特殊的下垫面性质对土壤保持量进行修正,利用 SPSS 20.0 软件中相关性分析和 GeoDa 软件中双变量局部空间自相关分析,探究 3 对生态系统服务时间和空间的权衡/协同关系,为管理者制定有效的生态管理策略提供参考依据,实现区域生态保护与可持续发展。

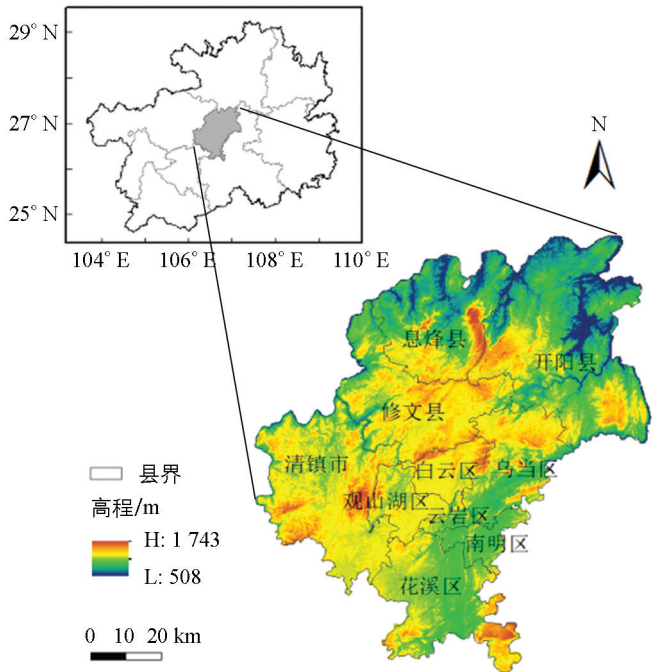
1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

贵阳市位于贵州省中部,地处东经 106°07′—107°17′,北纬 26°11′—26°55′,是贵州省的省会(图 1)。贵阳市属于亚热带季风湿润气候,年平均气温为 15.3℃,气温季节变化小,多年平均年降水量 1 120 mm 左右,干湿交替明显,良好的水热条件形成了贵阳市丰富多样的生态环境,但也是生态脆弱区和生态敏感区,土壤以酸性土壤为主,石灰岩、白云岩等碳酸盐岩分布广泛,占总面积的 85.02%,是石漠化、水土流失严重区。该市地处黔中山原丘陵中部,地势西南高、东北低,是以山地、丘陵地貌为主的丘原盆地地区。贵阳市下辖 6 个市辖区:观山湖区、云岩区、南明区、花溪区、乌当区、白云区,3 个县:修文县、息烽县、开阳县,代管 1 个县级市:清镇市,总面积 8 034 km²。近年来,贵阳市人口不断增加,由 2005 年的 350.7 万人增加到 2015 年的 391.8 万人,经济水平得到快速发展,2005 年贵阳市 GDP 为 4 436 292 万元,2015 年上升为 24 972 691 万元,人均 GDP 由 2005 年的 12 683 元增加到 2015 年的 55 018 元。贵阳市在贵州省的经济发展中占有重要地位,到 2015 年,贵阳市 GDP 占贵州省 GDP 的 31.82%,其人均 GDP 为全省最高。

1.2 数据来源

① 气象数据。2005 年和 2015 年降水量、气温空间插值数据集,分辨率为 1 km,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。② 土地利用数据。2005 年和 2015 年的中国土地利用现状遥感监测数据,分辨率为 1 km,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。③ 数字高程数据。30 m 分辨率的 ASTGTM2 DEM 数据,来源于美国地质勘探局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。④ 植被覆盖指数 NDVI 数据。分辨率为 1 km,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。⑤ 土壤数据。分辨率为 1 km,来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),包括土壤深度,土壤沙粒、粉粒、黏粒、有机碳质量分数等数据。⑥ 净初级生产力(NPP)数据。来源于全球变化科学研究数据出版系统的《北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 km 栅格数据集(1985—2015)》^[15](<http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/HistoryList.aspx>),分辨率为 1 km,利用 ArcGIS 10.2 中 Map Algebra 工具将 2005 年和 2015 年各月 NPP 相加得到年数据。



审图号: 黔 S(2020)007 号, 下同。

图 1 研究区位置

1.3 研究方法

1.3.1 土壤保持服务

生态系统服务中的土壤保持服务通常用土壤保持量来进行评估, 本研究采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 估算贵阳市土壤保持量, 计算公式如下:

$$A_c = A_p - A_r \quad (1)$$

$$A_p = R \times K \times LS \quad (2)$$

$$A_r = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

式中: A_c 为土壤保持量 (t/hm^2); A_p 为实际土壤流失量 (t/hm^2); A_r 为潜在土壤流失量 (t/hm^2); R 为降雨可侵蚀因子, 是基于年降雨量估算降雨侵蚀力的简易算法^[16], 由于此种方法忽视了喀斯特地区下垫面的性质, 根据钱庆欢等^[17]研究对降雨侵蚀力进行修正; K 为土壤可侵蚀性因子, 采用 Williams 等^[18]提出的利用土壤粒度和土壤有机碳数据进行计算; L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 为植被覆盖因子, 无量纲, 采用 Zhang 等^[19]提出的公式计算; P 为土壤保持措施因子, 无量纲, 参考许月卿等^[20]研究对本研究区土壤保持措施因子赋值, 其中旱地 0.4, 水田 0.15, 林地 1, 草地 1, 水域 0, 城镇、工矿及居民用地 0, 未利用地 1.

1.3.2 产水量服务

本研究运用 InVEST 模型中 Water Yield 模块对贵阳市产水量服务进行估算, 该模块是基于水量平衡原理对区域的产水量进行估算, 计算公式如下:

$$Y_{(x)} = \left(1 - \frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}}\right) \times P_{(x)} \quad (4)$$

$$\frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}} = 1 + \frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}} - \left[1 + \left(\frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \quad (5)$$

$$PET_{(x)} = K_{c(x)} \times ET_{0(x)} \quad (6)$$

$$w_{(x)} = Z \times \frac{AWC_{(x)}}{P_{(x)}} + 1.25 \quad (7)$$

式中: $Y_{(x)}$ 为栅格象元 x 上年均产水量 (mm); $AET_{(x)}$ 为栅格象元 x 的年实际蒸散量 (mm); $P_{(x)}$ 为栅格象元 x 的年降雨量 (mm); $PET_{(x)}$ 为潜在蒸散量; $w_{(x)}$ 为非物理参数; $ET_{0(x)}$ 为参考蒸散量; $K_{c(x)}$ 为蒸散发系数; $AWC_{(x)}$ 为植物可利用含水量; Z 为 Zhang 系数^[21].

1.3.3 碳固持服务

本研究碳固持服务采用 NPP 来进行表征, 陈鹏飞^[15]主要采用 Carnegie Ames-Stanford Approach (CASA) 模型对 NPP 进行定量估算, 该模型由光合有效辐射和光能利用率两个因子决定, 计算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (8)$$

式中: x 为栅格数据像元的空间位置; t 为时间 (月份); $NPP(x, t)$ 为 x 像元上 t 月份净初级生产力 (gC/m^2); $APAR(x, t)$ 为 x 像元上 t 月份光合有效辐射 (MJ/m^2); $\epsilon(x, t)$ 为 x 像元上 t 月份光能利用率 (gC/MJ).

1.3.4 空间自相关分析法

空间自相关是指某一变量在同一个分布区内的相邻或相近空间单元之间潜在相互依赖性, 包括全局空间自相关与局部空间自相关^[22], 为了描述多个变量间的空间相关性, Anselin 等^[23]在单变量空间自相关的基础上提出了双变量空间自相关.

全局空间自相关反映整个研究区域内各空间单元与邻近空间单元之间的相似性, 本研究采用全局空间自相关指数 Moran's I 作为全局自相关统计量, 计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

与全局空间自相关相比,局部空间自相关可以反映每个空间单元与邻近空间单元之间的空间异质性,可以用 Gi 统计量、Moran 散点图、LISA 集聚图等方法进行分析^[24-25]. 本研究选用局部 LISA 集聚图对贵阳市生态系统服务的空间聚集差异进行分析,计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{m_0} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

(10)

式 9-10 中: x_i 和 x_j 分别表示为单元 i 和单元 j 的属性值; $\bar{x}$ 为 x 的均值; $(x_i - \bar{x})$ 第 i 个空间单元上的观测值与平均值的偏差; $(x_j - \bar{x})$ 为第 j 个空间单元上的观测值与平均值的偏差; w_{ij} 为空间权重矩阵; $m_0 = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 / n$.

2 研究结果

2.1 生态系统服务时空变化

本研究评估了 2005 年、2015 年贵阳市土壤保持、产水量和碳固持 3 种典型的生态系统服务. 从时间变化趋势看(表 1),在 2005—2015 年间,土壤保持量、产水量和碳固持总量上均为增加趋势,土壤保持量约增加 200 471.27 t/hm²,产水量约增加 2 105 547.25 mm,碳固持约增加 362 508.00 gC/m²,其中产水量的变化率最高,可达 89.64%. 自 2002 年贵阳市成为首个全国建设循环经济生态试点城市以来,贵阳市政府在对贵阳生态、经济和社会等状况分析的基础上通过了《关于建设生态文明城市的决定》,大力进行生态文明建设,林地质量不断提高,使得贵阳市生态系统服务整体状况得到改善.

从空间变化趋势看(图 2),贵阳市生态系统服务空间格局差异性显著. 土壤保持与碳固持服务呈现出南部地区低、北部地区高的空间格局,产水量服务则呈现出南部地区高、北部地区低的空间格局. 其中,碳固持与土壤保持服务的高值区主要分布在开阳县东部、息烽县东部、乌当区南部等地区,低值区主要分布于白云区、观山湖区以及清镇市南部. 产水量服务的高值区集中分布在白云区、云岩区、南明区以及观山湖区东部,低值区分布在开阳县、息烽县、修文县西部. 2005—2015 年间,土壤保持服务东部地区增益高,西南部地区增益低,产水量服务由西部向东部地区增益逐步增加,碳固持服务在白云区、云岩区、南明区、花溪区北部等城市建成区及周边表现为减少趋势.

表 1 2005 和 2015 年贵阳市生态系统服务时间变化

	土壤保持/(t·hm ⁻²)		产水量/mm		碳固持/(gC·m ⁻²)	
	均值	总量	均值	总量	均值	总量
2005 年	45.60	365 631.65	292.06	2 348 775.72	282.52	2 271 988.00
2015 年	70.60	566 102.92	553.88	4 454 322.97	327.59	2 634 496.00
变化量	25	200 471.27	261.82	2 105 547.25	45.07	362 508.00
变化率/%	—	54.83	—	89.64	—	15.96

2.2 生态系统服务空间集聚特征

为了明确各项生态系统服务在空间上的集聚特征,更直观地分析生态系统服务的空间分布差异,本研究在 DEM 的基础上将贵阳市划分为 432 个小流域,运用 ArcGIS 10.2 软件 Zone Statistic 工具将 2005 年和 2015 年 3 种生态系统服务的栅格值进行分区统计,再赋值给矢量图层,将结果导入到 GeoDa 软件中进行单变量空间自相关分析.

贵阳市生态系统服务的 Moran's I 指数(表 2)反映出各流域单元均具有全局空间自相关性. 从 Moran's I 值的大小可以看出,2005 年和 2015 年 3 种生态系统服务的集聚程度从高到低依次为碳固持、产水量、土壤保持,且 2015 年生态系统服务的集聚程度高于 2005 年.

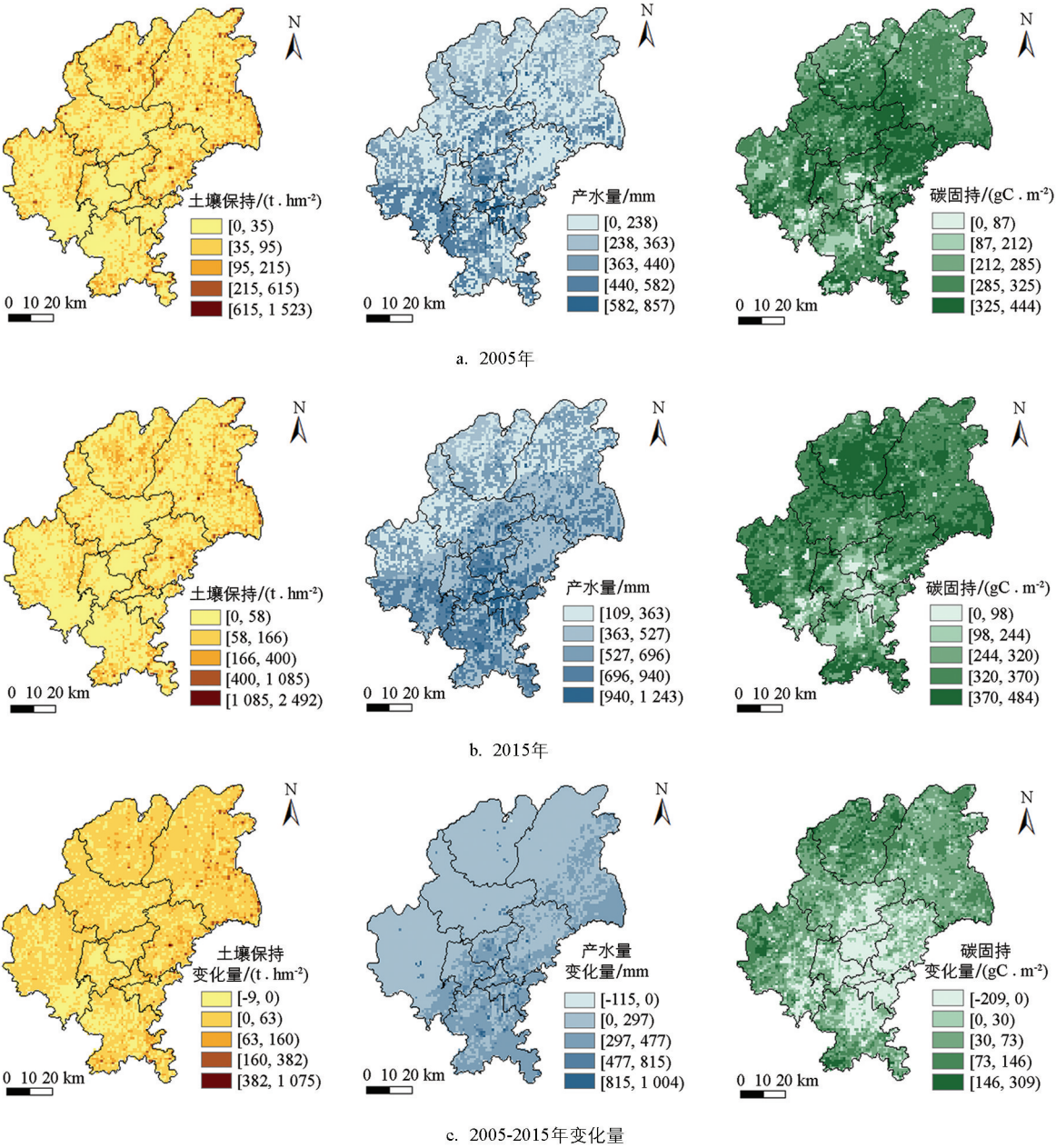


图 2 2005 和 2015 年贵阳市生态系统服务空间分布变化

表 2 贵阳市生态系统服务的 Moran's I 估计值

	土壤保持	产水量	碳固持
2005 年	0.332	0.574	0.576
2015 年	0.363	0.733	0.736

从局部 LISA 聚类图(图 3)可知,贵阳市 3 种典型生态系统服务在空间上的集聚特征具有显著的差异性。总体上,正相关类型(高高集聚和低低集聚)表现出较强的集聚特征,而负相关类型(高低集聚和低高集聚)零散分布,集聚性较低。具体来看,2005 年和 2015 年土壤保持的显著高高集聚单元与显著低低集聚单元在数目和集中区域上均没有明显变化,显著高高集聚单元零散地分布于东北、西北等地区,显著低低集聚单元集中分布在观山湖、清镇市南部、花溪区北部等地区。与 2005 年相比,2015 年产水量的显著高高集聚单元由 61 个上升至 76 个,集中扩张区域范围主要分布在贵阳市主城区及周边,主要由于 2005—2015 年

间贵阳市主城区周边建设用地及居民工矿用地显著扩张;显著低低集聚单元数目由 65 个上升至 86 个,显著低低集聚单元集中区明显转移,由 2005 年贵阳市北部地区及西部地区零散分布向贵阳市西北部地区集聚. 2015 年流域碳固持显著高高集聚单元由 2005 年的 57 个上升至 67 个,集中区域由乌当区、修文县的东部地区等向西北部的息烽县转移;显著低低集聚单元由 38 个上升至 58 个,集中区域未发生明显转移,主要分布在贵阳市南部,但范围有明显的扩张.

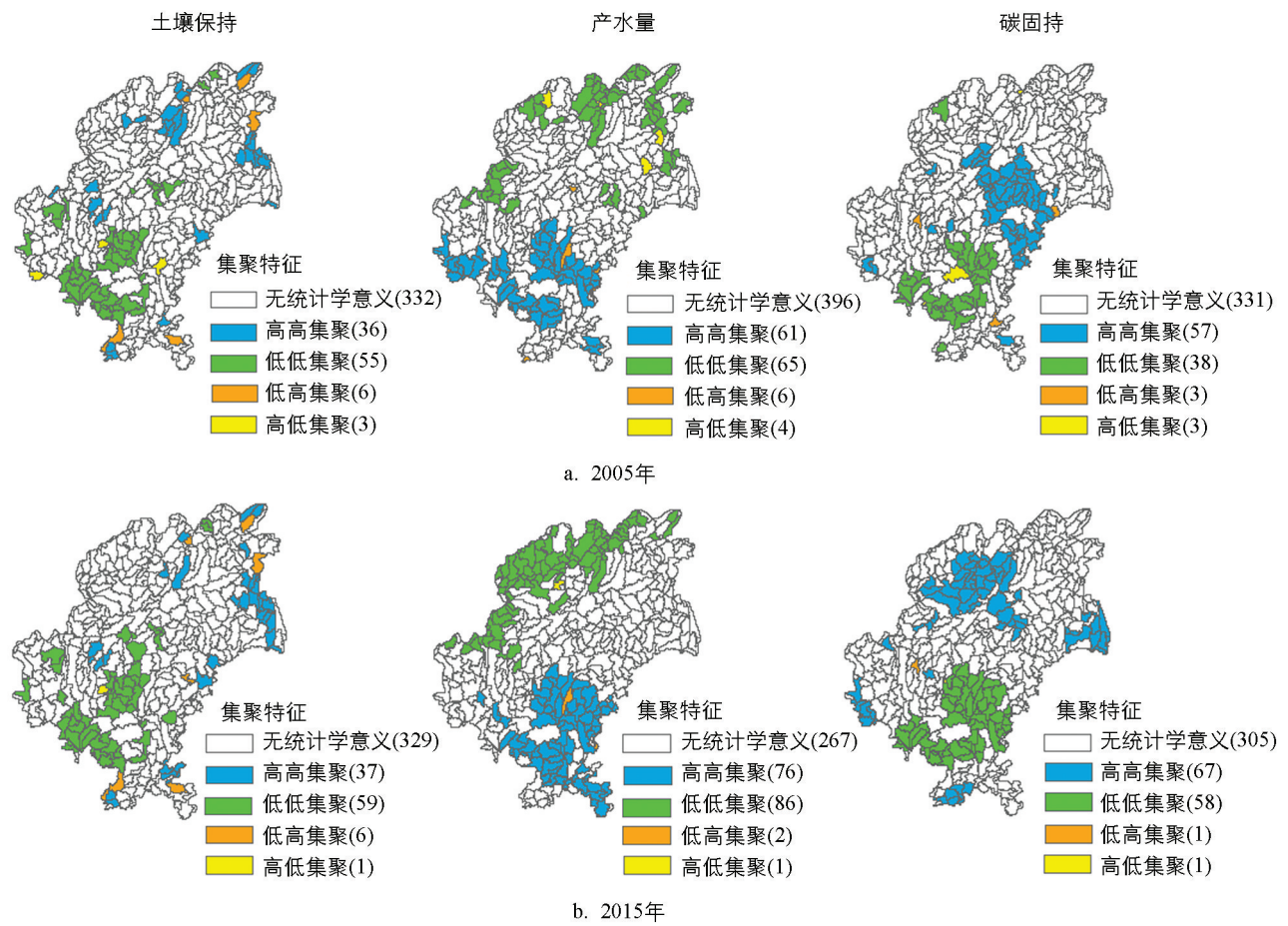


图 3 2005 和 2015 年贵阳市 3 种典型生态系统服务局部 LISA 图

2.3 不同地类的生态系统服务功能对比

土地利用类型对生态系统服务影响的差异主要表现在两个方面,即同一种土地利用类型对不同生态系统服务影响的差异,以及同一种生态系统服务在不同土地利用类型上的差异^[26]. 结合贵阳市土地利用,本研究重点关注 2005 年、2015 年贵阳市耕地、林地、草地以及建设用地中生态系统服务变化情况. 利用 ArcGIS 10.2 软件 Zone Statistic 得到 3 种生态系统服务在 2005 年和 2015 年不同土地利用类型中的均值和总量,对不同土地利用类型中的生态系统服务进行统计,结果如图 4 所示.

从单位面积中可以看出(图 4a),碳固持服务林地最高,草地略大于耕地,三者单位面积总量达 72% 以上;土壤保持服务林地最高,草地与耕地相差不大,三者单位面积总量达 75% 左右;产水量服务建设用地最高,林地最低,草地大于耕地. 从总量供给百分比上看(图 4b),林地提供的 3 种生态系统服务强度从高到低依次为:土壤保持、碳固持、产水量,说明该研究区的土壤保持服务与碳固持服务主要由林地提供. 草地在研究区所占的面积虽然小于耕地的面积,但是其提供的 3 种生态系统服务总量均高于耕地,并且耕地和草地的产水量服务较强,从高到低依次为:产水量、碳固持、土壤保持. 建设用地虽然单位面积上提供的产水量服务较高,但是相比于耕地、林地、草地而言,在研究区所占面积较小,提供的总产水量服务较少. 总体来看,贵阳市土壤保持服务、产水量服务、碳固持服务主要由耕地、林地、草地提供,2005 年三者提供

的土壤保持服务、产水量服务、碳固持服务总供给量分别占整个研究区的 98.34%, 93.39%, 98.05%, 2015 年分别占整个研究区的 96.96%, 89.91%, 96.75%。

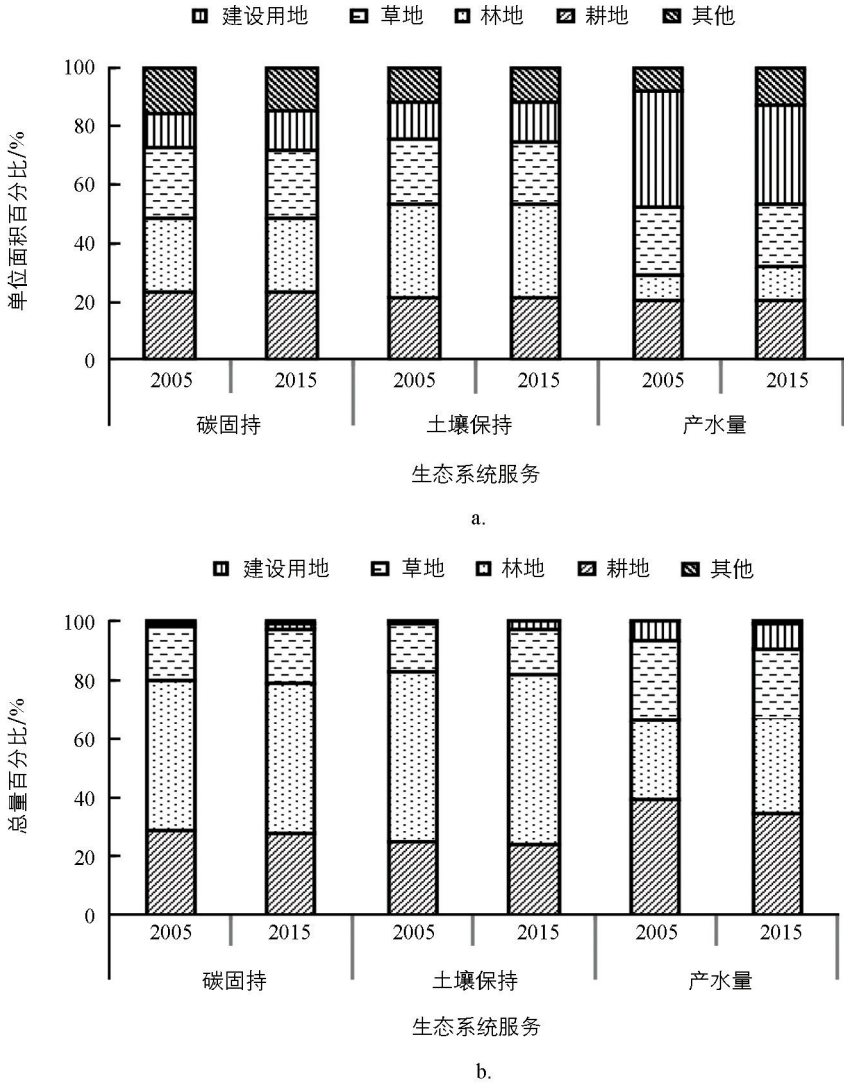


图 4 不同土地利用类型中生态系统服务百分比

2.4 生态系统服务的权衡/协同关系

基于流域单元, 将 3 种生态系统服务 2005—2015 年间的变化量进行分区统计, 并对其数值进行标准化后, 利用 SPSS 20.0 软件进行双变量相关分析, 用 GeoDa 软件进行双变量局部空间自相关分析, 研究贵阳市生态系统服务权衡/协同关系及空间分布特征。

从双变量相关分析的结果看(表 3), 土壤保持—产水量、土壤保持—碳固持为相互增益的协同关系, 其中, 土壤保持与碳固持呈现出较强的协同关系, 相关系数为 0.143; 土壤保持与产水量呈现出较弱的协同关系, 相关系数仅为 0.071; 产水量与碳固持为此消彼长的权衡关系, 相关系数为-0.536, 呈现出较强的权衡关系。土壤保持—碳固持为协同关系, 是因为植被覆盖的改善有利于碳固持能力的增加, 降低土壤侵蚀, 促进土壤保持服务的提升^[27]。产水量—土壤保持为协同关系, 产水量为降水量减去实际蒸散发量, 2005—2015 年间, 贵阳市降水量增加明显, 但是温度升高不显著, 降水成为影响产水量服务的主要气候因子, 降水的增加也会促进土壤保持功能增加, 从而使土壤保持与产水量为协同关系。产水量—碳固持为权衡关系, 植被与碳固持的关系密切, 植被的增加有利于碳固持的增加, 但是植被与产水量呈负相关, 植被的增加会增大蒸发, 使产水量减少^[28], 从而导致二者为权衡关系。

表 3 贵阳市 3 种生态系统服务的相关性

服务对	Person 相关系数	Moran's <i>I</i> 指数
土壤保持—碳固持	0.143 **	0.149
产水量—碳固持	−0.536 **	−0.499
土壤保持—产水量	0.071	0.125

注：* *，在 0.01 水平(双侧)上有统计学意义。

通过流域尺度的 Moran's *I* 指数值(表 3)可以看出，2005—2015 年间土壤保持—碳固持、土壤保持—产水量在空间上呈现协同关系，Moran's *I* 指数分别为 0.149 和 0.125，产水量—碳固持在空间上为权衡关系，Moran's *I* 指数为−0.499，这与双变量相关分析所得的结果一致，说明 2005—2015 年间贵阳市生态系统服务权衡/协同关系时空变化一致。

从流域尺度的 LISA 图(图 5)可以看出，土壤保持—碳固持、产水量—碳固持、土壤保持—产水量权衡/协同关系的空间异质性有统计学意义。土壤保持—碳固持的协同关系主要分布在观山湖区、白云区、清镇市南部、开阳县东部等地区，权衡关系零散地分布在贵阳市西南、西北地区。产水量—碳固持主要表现为权衡关系，集中分布在贵阳市东南部以及西北部地区，主要包括云岩区、南明区、花溪区北部、乌当区南部、观山湖区东部、息烽县等地区。土壤保持与产水量协同关系主要分布在贵阳市西北部地区，主要包括息烽县与修文县西部、清镇市北部等地区，权衡关系主要分布在贵阳市东南部地区，主要包括花溪区中部、南明区、观山湖区东部等地区。贵阳市东南部为中心城区，其城市化水平显著提高，导致该地区人地矛盾尤为突出，在本研究的 3 对生态系统服务中，产水量—碳固持、土壤保持—产水量 2 对生态系统服务在该地区均表现出权衡关系。一方面，贵阳市中心城区经济的迅速发展与人口的迅速增加，城市建设用地以及居民工矿用地面积增加，导致不透水表面增加，土壤蓄水能力下降，产水量服务显著提高^[29]；另一方面，城市建设用地及居民工矿用地扩大会大量占用耕地、林地与草地，而耕地、林地、草地的土壤保持与碳固持服务远高于建设用地，导致该地区土壤保持与碳固持服务降低。

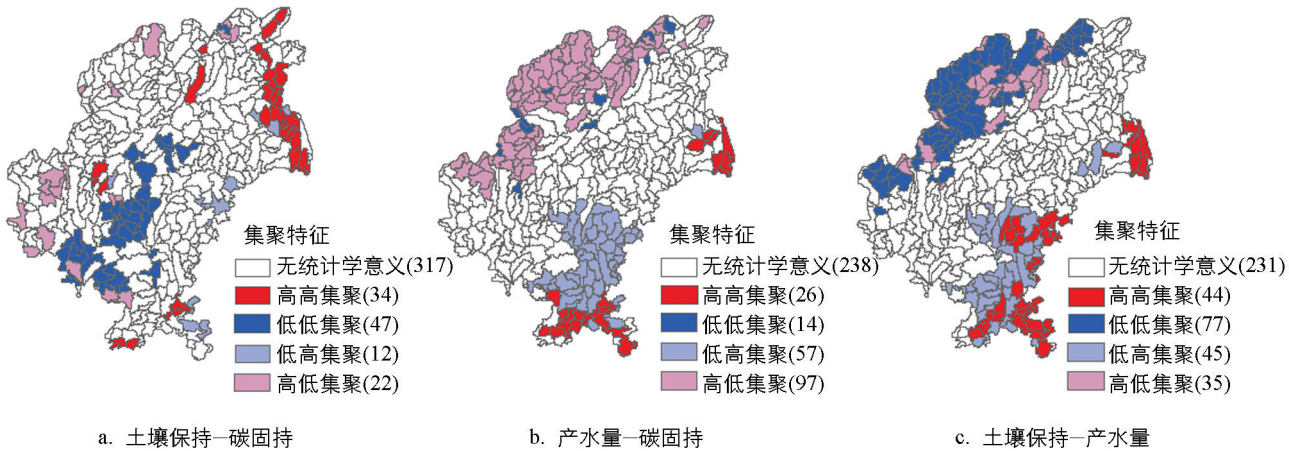


图 5 贵阳市 3 种典型生态系统服务间局部 LISA 图

3 结论与讨论

本研究利用 RULSE、InVEST 模型分析 2005—2015 年贵阳市土壤保持、产水量及碳固持 3 种典型生态系统服务时空变化，利用 SPSS 20.0 软件中相关性分析和 GeoDa 软件中双变量局部空间自相关分析，探讨了土壤保持—碳固持、产水量—碳固持、土壤保持—产水量 3 对生态系统服务权衡/协同关系，得到以下结论：

(1) 2005—2015 年间贵阳市生态系统服务整体上呈上升趋势，从空间分布上看，土壤保持与碳固持均表现出南部地区低、北部地区高的空间分布特征，主要与北部地区林地面积分布较广关系密切，产水量则

表现出相反的空间分布特征. 2005年和2015年贵阳市土壤保持、产水量、碳固持3种生态系统服务均具有空间自相关性,与2005年相比,2015年除土壤保持服务集聚特征没有明显变化外,其余两种生态系统服务在集聚单元数目、范围与位置上均有变化.

(2)单位面积百分比中土壤保持服务与碳固持服务林地最高,产水量服务建设用地最高;总量百分比中,贵阳市土壤保持、产水量、碳固持3种生态系统服务主要由耕地、林地、草地提供.因此,在贵阳市城市建设中,需保护林地、草地等土地资源,加大城市绿色基础设施建设,例如,在城市建成区设立绿化带,一方面植被的生长可以提高碳固持与土壤保持服务,另一方面可以消除城市不透水面的负面影响,提高主城区的生态系统服务功能.

(3)贵阳市土壤保持—产水量、土壤保持—碳固持为协同关系,产水量—碳固持为权衡关系.在空间上,贵阳市西南部地区土壤保持—碳固持为协同关系,贵阳市西北部地区土壤保持—产水量为协同关系,但是贵阳市东南部经济发展水平较高的地区,主要包括花溪区中部、南明区、观山湖区东部等,产水量—碳固持、土壤保持—产水量2对生态系统服务均为权衡关系.一方面,城市建设用地、工业用地与商业用地增加会占用耕地、林地、草地等土地资源.另一方面,城市化建设需要利用林木来提供原材料,进一步降低了生态系统服务功能.因此,在城市化建设中土地资源要集约化发展,政府要严格把控审批项目,限制城市建设中工业用地与商业用地的扩张,减少因耕地、林地、草地的占用所造成的负面影响.

通过与喀斯特地区相关研究对比可看出,土壤保持与碳固持在多数研究中均表现出协同关系,但是产水量与碳固持、土壤保持与产水量在不同地区表现出不同的关系.例如,郎焱卿^[8]以喀斯特山区为研究区探讨生态系统服务的关系,结果显示产水量与碳固持、土壤保持与产水量均为权衡关系;但是Han等^[10]以贵州省为研究区,结果显示产水量与碳固持、土壤保持与产水量为协同关系.因此,在喀斯特背景下,不同研究尺度的自然环境条件不同,加上人类活动对生态系统的影响程度不同,生态系统服务之间表现出的关系也就不同.

本研究对生态系统服务权衡/协同关系的判断是在2005年和2015年两个时间节点的基础上,有研究表明仅静态研究两个时间节点或某几个时间节点可能对生态系统服务间的相互关系造成误判^[30],未来研究需要使用长时间序列的数据探究生态系统服务关系,来提高权衡/协同关系判断的准确性.另外,本文仅对贵阳市土壤保持、产水量和碳固持3种典型的生态系统服务进行研究,但是生态系统服务类型多样,今后应对其他重要的生态系统服务,如食物供给、生物多样性、水体净化、休闲娱乐等进行研究,为贵阳市生态与经济协调发展提供更加全面有效的生态系统管理策略.

参考文献:

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital [J]. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] 李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].地理研究,2013,32(8): 1379-1390.
- [3] 苏维词.中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J].水土保持学报,2002,16(2): 29-32, 79.
- [4] 郑华,李屹峰,欧阳志云,等.生态系统服务功能管理研究进展[J].生态学报,2013,33(3): 702-710.
- [5] 巩杰,柳冬青,高秉丽,等.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[J].应用生态学报,2020,31(4): 1278-1288.
- [6] 戴路炜,唐海萍,张钦,等.北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J].生态学报,2020,40(9): 2863-2876.
- [7] 刘洋,毕军,吕建树.生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例[J].生态学报,2019,39(19): 7067-7078.
- [8] 郎焱卿.喀斯特山区生态服务功能的权衡研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[9] TIAN Y C, WANG S J, BAI X Y, et al. Trade-Offs among Ecosystem Services in a Typical Karst Watershed, SW China [J]. Science of the Total Environment, 2016(566-567): 1297-1308.

[10] HAN H Q, YIN C Y, ZHANG C Q, et al. Response of Trade-Offs and Synergies between Ecosystem Services and Land Use Change in the Karst Area [J]. Tropical Ecology, 2019, 60(2): 230-237.

[11] 高敏, 王勇, 高洁, 等. 喀斯特地区退耕还林工程下生态系统服务变化与关系分析 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 276-283.

[12] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性 [J]. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21-29.

[13] 张盼盼, 胡远满, 李秀珍, 等. 基于 GIS 的喀斯特高原山区石漠化景观格局变化分析 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 306-311, 404.

[14] 王志杰, 程玉卓, 班先娅, 等. 典型喀斯特山地城市生态空间格局演变研究——以贵阳市花溪区为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(9): 155-164.

[15] 陈鹏飞. 北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集(1985—2015) [J]. 全球变化数据学报(中英文), 2019, 3(1): 34-41, 143.

[16] 史东梅, 江东, 卢喜平, 等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 16-21.

[17] 钱庆欢, 王世杰, 白晓永, 等. 基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究 [J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2135-2149.

[18] WILLIAMS J R, ARNOLD J G. A System of Erosion-Sediment Yield Models [J]. Soil Technology, 1997, 11(1): 43-55.

[19] ZHANG L W, FU B J, LÜ Y H, et al. Balancing Multiple Ecosystem Services in Conservation Priority Setting [J]. Landscape Ecology, 2014, 30(3): 535-546.

[20] 许月卿, 黄靖, 冯艳, 等. 不同土地利用结构下的土壤侵蚀经济损失——以贵州省猫跳河流域为例 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1451-1456.

[21] ZHANG L, HICKEL K, DAWES W R, et al. A Rational Function Approach for Estimating Mean Annual Evapotranspiration [J]. Water Resources Research, 2004, 40(2): W02502.

[22] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 249-256.

[23] ANSELIN L, SYABRI I, KHO Y. GeoDa: an Introduction to Spatial Data Analysis [J]. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 5-22.

[24] 李慧, 王云鹏, 李岩, 等. 珠江三角洲土地利用变化空间自相关分析 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1879-1885.

[25] 莫莹, 朱煜峰, 张明, 等. 基于 GIS 的清远市人口分布时空演变特征分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 41-48.

[26] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 等. 关中—天水经济区生态系统服务的权衡关系 [J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1762-1773.

[27] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值 [J]. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.

[28] 李素晓. 京津冀生态系统服务演变规律与驱动因素研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.

[29] LI B J, CHEN &, WU &, et al. Spatio-Temporal Assessment of Urbanization Impacts on Ecosystem Services: Case Study of Nanjing City, China [J]. Ecological Indicators, 2016, 71: 416-427.

[30] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征 [J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.