

# 喀斯特山地城市生态系统服务价值地形梯度响应 ——以贵阳市中心城区为例

周寒冰<sup>1</sup>, 王志泰<sup>1,2</sup>, 王志杰<sup>3</sup>, 包玉<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 风景园林规划设计研究中心,  
贵阳 550025; 3. 贵州大学 生命科学学院, 贵阳 550025)

**摘 要:**喀斯特地区具有特殊的地理地貌性质,为探究“城山镶嵌”的特殊山地城市地形因素对城市生态系统服务价值的影响,以典型喀斯特城市贵阳市为研究区域,2018 年贵阳市中心城区 Pleiades 卫星影像图(0.5 m 空间分辨率,含 DEM 高程)为数据源,运用地形位指数、地形分布指数结合修正后的“当量因子法”,对贵阳市中心城区生态系统服务价值的地形梯度进行了研究。结果表明:(1)土地利用类型在空间上呈三段式分布,随着地形梯度的增加,由以水域、耕地、草地、建设用地主导的地形优势区逐渐转为以林地为主导的地形优势区。(2)2018 年贵阳市中心城区生态系统服务总价值为 7.23 亿元,于地形梯度上整体呈先升后降趋势,单位面积生态系统服务价值呈升高—降低—升高波动趋势。(3)各单项生态系统服务价值及大小分布指数优势在地形梯度上呈显著差异性,地形梯度对各单项生态系统服务有显著响应( $R^2$ 均大于 0.75,最大值达 0.96),在地形梯度优势更为突出的为水文调节及气候调节。总体而言,地形及土地利用类型面积对贵阳市中心城区生态系统服务价值影响显著。

**关键词:**喀斯特地区;山地城市;生态系统服务价值;地形梯度;贵阳市

**中图分类号:**X171.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)06-0337-11

## Response of Ecosystem Service Value of Karst Mountainous City to Terrain Gradient — A Case Study of Downtown of Guiyang City

ZHOU Hanbing<sup>1</sup>, WANG Zhitai<sup>1,2</sup>, WANG Zhijie<sup>3</sup>, BAO Yu<sup>1,2</sup>

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2.Landscape Architecture Planning and Design Center,  
Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3.College of Life Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Karst area has its special geographical and geomorphological properties. In order to explore the influence of ‘City mountain mosaic’ special mountain city terrain factors on urban ecosystem service value, we took Guiyang City, a typical karst mountainous city, as the research area, and used terrain potential index, terrain distribution index combined with the modified ‘equivalent factor method’ and Landsat TM remoted sensing image map in the downtown of Guiyang City in 2018 to evaluate the ecosystem service value of downtown of Guiyang City. The results showed that: (1) the land use types distributed in three sections in space, water land, cropland, grassland and built land had obvious advantages in the low-terrain area (1~10); bare land and cropland had certain advantages in the middle-terrain area (10~20); forest land had an absolute advantage in the high-terrain area (20~50); with the increase of terrain gradient, the dominant terrain area of wetland, water area, cultivated land, grassland and built land gradually changed to the dominant terrain area dominated by forest land; (2) the total ecosystem service value in central district of Guiyang in 2018 was 723 million yuan; on the whole, the terrain gradient showed a trend of first rising and then descending; the service value of ecosystem per unit area increased first, then decreased and finally raised; (3) there were significant differences in the topographic gradient in the exponential advantages of service

收稿日期:2020-11-14

修回日期:2020-11-25

资助项目:国家自然科学基金(32060367,42061039);贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2020]1Z011)

第一作者:周寒冰(1994—),女,贵州瓮安人,硕士研究生,研究方向为地景规划与生态修复。E-mail:502486466@qq.com

通信作者:王志泰(1975—),男,甘肃会宁人,博士,教授,主要从事山地城市景观生态与景观规划设计研究。E-mail:ztwang@gzu.edu.cn

value and size distribution of individual ecosystems; terrain gradients responded significantly ( $R^2 > 0.75$ , and the maximum is 0.96) to individual ecosystem services; the advantages of topographic gradient were hydrological regulation and climate regulation. In general, the terrain and land use type area had the significant impact on the ecosystem service value in the central urban area of Guiyang.

**Keywords:** karst area; mountainous city; ecosystem service value; terrain gradient; Guiyang

人类从自然生态系统中获得的直接或间接福利称为生态系统服务,包含人类赖以生存的各项资源和条件<sup>[1]</sup>。对生态系统服务价值估算有利于人类理解自然系统,促进人与自然和谐共处,对人类生计及经济增长等至关重要<sup>[2-3]</sup>。过去 40 a 里,快速城市化进程中以经济发展为导向的密集土地利用方式和人类高度城市化的发展策略<sup>[4]</sup>造成生态系统服务的严重退化<sup>[5]</sup>。而城市人口的激增以及自然体验的丧失,使得城市居民对生态系统服务功能的需求与日俱增<sup>[6]</sup>。当前,世界各国对于生态系统服务的重视提升到又一个新高度,越来越多的研究团队参与其中,生态系统服务现已成为国际生态研究的热点与前沿领域<sup>[7]</sup>。尽管在生态系统服务价值评估和权衡与空间规划相结合方面已有一些实践尝试<sup>[8]</sup>,但由于相关研究存在不足,生态系统服务尚未被有效地利用到城市及区域的可持续发展实践中<sup>[9]</sup>。地形是自然空间要素的综合体现,在很大程度上影响人类对土地的利用方式及决策方向,进而影响相关区域生态环境<sup>[10-11]</sup>。基于地形梯度的生态系统服务价值探究,可为山地区域生态规划提供参考。目前针对地形梯度的生态系统服务价值研究,主要集中在浅山丘陵地区<sup>[11-13]</sup>、水域及流域<sup>[14-15]</sup>,且多以县域为尺度<sup>[16]</sup>,而在生态系统服务供需矛盾突出的城市中心城区,基于地形梯度的生态系统服务价值研究鲜见报道。不同的地形地貌决定不同的城市空间形态,以及城市生态斑块(尤其是自然或近自然生态斑块)数量与空间格局。黔中岩溶地区特殊的喀斯特峰林盆地(洼地)背景下形成的“城山镶嵌体”景观格局具有独特的区域特色,大量的自然或近自然的生态斑块依托喀斯特峰林镶嵌于城市中心城区内部,能够向城市提供非常重要的生态系统服务功能。贵阳市地处黔中岩溶地区腹地,遗存于城市的喀斯特山体资源丰富,形成典型的“城在山间,山在城中”喀斯特山地城市<sup>[17]</sup>。截至 2018 年。有 527 座锥状、塔状喀斯特山体星罗棋布镶嵌于中心城区建成区内部及周边,总面积 44.93 km<sup>2</sup>,因此贵阳市中心城区除了整体下垫面的地形变化外,还有数量众多的局部地形突起。基于此,本文以贵阳市中心城区建成区为研究对象,探究城市建成环境中的生态系统服务价值的地形梯度响应,旨在丰富不同地貌背景下的地形梯度对生

态系统服务价值的相关研究,为城市由粗放式的“增量”发展向精明化的“存量”发展转型期<sup>[18]</sup>、岩溶地区山地城市更新与城市空间规划提供权衡决策依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

贵阳市为贵州省省会,地处东经 106°07′—107°17′,北纬 26°11′—26°55′,市域内残留有较广阔的山盆期剥夷面,以盆区景观为主,低山次之<sup>[19]</sup>,是西南地区重要的中心城市之一。贵阳市属于亚热带湿润温和型气候,年平均气温为 15.3℃,年平均总降水量为 1 129.5 mm。2010 年后城市进入高速发展阶段,5 a 扩增速度高达 27.40 km<sup>2</sup>/a<sup>[20]</sup>,导致脆弱的自然生态破坏较为严重。至 2018 年底,贵阳市常住人口为 418.45 万人,建成区绿地率为 38.08%,绿化覆盖率为 40.8%,人均公园绿地面积为 13.16 m<sup>2</sup>/人,国内生产总值为 3 798.46 亿元。通过对 2018 年遥感影像解译,参照《贵阳市城市总体规划(2009—2020 年)》《贵阳市中心城区绿地系统规划(2015—2020 年)》《贵阳市公园城市建设规划(2015 年)》《贵阳市山体公园规划(2015—2020 年)》《贵阳市中心城区山体保护利用专项规划(2016—2030 年)》等相关资料,划定集中连片已建和在建区域作为本研究所确定的 2018 年城市建成区范围,包括白云区、乌当区、云岩区、观山湖区、花溪区、南明区 6 个城区,最高海拔为 1 426 m,最低海拔为 993 m,面积 468.31 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源与处理

土地利用数据基于 2018 年研究区范围 Pleiades 卫星影像图(0.5 m 空间分辨率,含 DEM 高程图),参照《土地利用现状分类标准(GB/T21010—2017)》《城市用地分类与规划建设用地标准(GB50137—2011)》等相应的国家标准和《贵阳市城市总体规划(2009—2020 年)》,根据相关文献<sup>[12-14]</sup>、中国科学院资源环境数据库土地利用分类体系,结合研究区土地类型分异情况,将土地利用类型分为林地、草地、耕地、建设用地、水域以及裸地 6 类,在 ArcMap 10.2 平台上对遥感影像进行人工目视解译,结合实地调查,对各景观斑块进行复查和修正,建立城市土地利用空间数据库。以 DEM 图像为数据源提取高程、坡度数据,建立地形

因子数据库。2018 年贵阳市相关社会经济数据来源于《2019 贵阳统计年鉴》。数据库采用 Excel 软件构建,统计分析在 SPSS Statistics 20 软件中实现。

1.3 研究方法

1.3.1 地形位指数与地形分布指数 地形条件的空间分异,并不只是高程或坡度单方面的作用结果,往往需要综合考虑相关地形因子才能体现地形的复杂性<sup>[21]</sup>。贵阳市具典型岩溶地貌,高原山地、丘陵、盆地、台地等多种地形在市域内错综分布<sup>[19]</sup>,采用地形位指数可以综合表征贵阳市喀斯特地形地貌特点,公式如下<sup>[12,21-22]</sup>：

$$TPI=\lg[(\frac{E}{\bar{E}}+1)\times(\frac{L}{\bar{L}}+1)] \tag{1}$$

式中:TPI 为地形位指数; $E$  和  $L$  为研究区内任意一点高程和坡度; $\bar{E}$  和  $\bar{L}$  为研究区的平均高程和平均坡度。利用栅格计算器计算出每个空间点的地形位,即可等分为若干梯度,形成相关地形梯度层。

利用地形位指数将地形特征表征为不同土地利用类型组分的分布频率比值,其中仍存在各地形梯度面积以及各类土地利用类型面积的比重及量纲差异问题<sup>[21]</sup>,采用标准化无量纲的地形分布指数来比较不同区间或不同土地利用类型的空间地形差异,公式如下<sup>[12,15]</sup>：

$$P_{ie}=(S_{ie}/S_i)/(S_e/S) \tag{2}$$

式中: $P_{ie}$  为地形分布指数; $S$  为土地利用类型总面积; $i$  为某种土地利用类型; $e$  为地形梯度层级别。 $P_{ie}>1$  的区间表示该类土地利用类型为地形位优势分布区间, $P_{ie}$

越大表明该土地利用类型出现的频率越高。

1.3.2 生态系统服务价值评估 本研究采用谢高地等<sup>[23-25]</sup>在前人基础<sup>[26-27]</sup>上改进的方法,即设定 1 hm<sup>2</sup> 农田生态系统粮食生产的服务价值为 1,并以此为衡量标准制定“中国生态系统单位面积生态系统服务价值当量表”,根据研究区 1 个当量生态系统服务价值为当年平均单产粮食价值量的 1/7 的测算标准进行计算,其计算公式如下：

$$D=\frac{1}{7}\sum_k^n\frac{A_k\times p_k\times q_k}{A} \tag{3}$$

式中: $D$  为研究区单位标准因子当量的生态系统服务价值量; $k$  为主要粮食种类; $A_k$  为第  $k$  类粮食种植面积; $p_k$  为第  $k$  种粮食平均价格; $q_k$  为第  $k$  种粮食单产量; $A$  为粮食总种植面积。根据相关资料测算得出,2018 年贵阳市单位标准因子当量的生态系统服务价值量为 1 569.68 元/hm<sup>2</sup>。

生态服务功能货币计算公式如下<sup>[2]</sup>：

$$ESV=\sum(S_i\times VC_i) \tag{4}$$

式中:ESV 为生态服务总价值; $VC_i$  为生态系统服务价值系数; $S_i$  为土地利用类型总面积; $i$  为某种土地利用类型。由上述公式结合贵阳市 2018 年土地利用类型进行系数修正(由于城市中生态斑块除占比较少的耕地能提供较多食物生产及原料生产服务价值,其他用地类型不以提供这两种生态服务为主,因此暂不考虑这两种生态服务价值),得到贵阳市中心城区单位面积生态系统服务价值系数(表 1)。

表 1 贵阳市中心城区单位面积生态系统服务价值系数 元/hm<sup>2</sup>

土地利用类型	水源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
林地	580.78	3688.75	11034.86	3123.67	5509.58	4489.29	345.33	4081.17	1789.44
草地	486.60	3092.27	8178.04	2699.85	5996.18	3767.23	282.54	3421.90	1506.89
耕地	31.39	1051.69	565.09	156.97	423.81	1616.77	188.36	204.06	94.18
水域	13012.66	1208.65	3594.57	8711.73	160484.20	1459.80	109.88	4002.69	2966.70
裸地	0.00	31.39	0.00	156.97	47.09	31.39	0.00	31.39	15.70
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1.3.3 各项生态系统服务价值大小分布指数 地形梯度层上的生态系统服务价值由于大小不均的关系,可能无法显示其差异性,为了更好地比较不同梯度单位面积生态系统服务价值,合理定位优势区间,本研究参照地形分布指数,引入生态系统服务价值大小分布指数<sup>[12,15]</sup>,公式如下：

$$LESV_{ie}=\frac{ESV_{ie}}{S_e}\times\frac{S}{ESV_i} \tag{5}$$

式中:LESV<sub>ie</sub> 为生态系统服务价值大小分布指数;ESV 为生态系统服务总价值; $S$  为土地利用类型总面积; $i$  为某种土地利用类型; $e$  为地形梯度层级别。

LESV<sub>ie</sub>>1 的区间表示该类土地利用类型为地形位优势分布区间,LESV<sub>ie</sub> 越大表明在该梯度层此种生态服务类型价值越高。

1.3.4 敏感性指数分析 根据相关参考文献<sup>[28]</sup>,对生态系统服务价值系数和生态系统服务价值之间使用敏感性指数分析,有利于探讨两者间的准确性。若 CS>1,则表明 ESV 对于 VC 具有弹性;若 CS<1,则表明 ESV 不具弹性,比值越大,对生态服务功能价值指数的准确性就越关键。具体公式如下：

$$CS=|\frac{(ESV_a-ESV_b)/ESV_b}{(VC_{ai}-VC_{bi})/VC_{bi}}| \tag{6}$$



式中:CS 为敏感性指数; $a$ 、 $b$  分别为初始数值和调整数值;ESV 为生态系统服务总价值;VC 为生态系统服务价值系数。其中,各类土地利用类型的价值指数将调整 50%,以用来预估总生态系统服务价值的变化。

2 结果与分析

2.1 土地利用类型空间分异特征

贵阳市中心城区 2018 年土地利用类型分布情况见图 1,相关统计数据见表 2。结果表明,土地利用类型在贵阳市各区域分布有明显差异。其中,建设用地占比最多,超过贵阳市城区面积一半,建设用地占比最高的几个区分别为花溪区、南明区以及白云区;林地次之,占比为 24.77%,主要来源于喀斯特孤立峰林、喀斯特峰丛、山体公园中的林地以及城市中的园林绿化形成的林地等,南明区、白云区及乌当区多连绵山体,因此林地主要分布于这 3 个区域;草地占比为 10.84%,多为伴随自然山体生长的野生草地及人工园林绿化中的种植草坪,主要分布在南明区和花溪区;水域占比为 1.71%,花溪区、南明区及乌当区内的水系是水域面积主要贡献源,还有水库、坑塘等分布于各

区域;裸地占研究区面积的 3.10%,主要为尚未形成建设用地且植被覆盖度 5%以下的土地,较多分布在南明区、观山湖区及白云区。因喀斯特特有地貌而形成的土地利用类型在各区域分布显示出其区域特点。

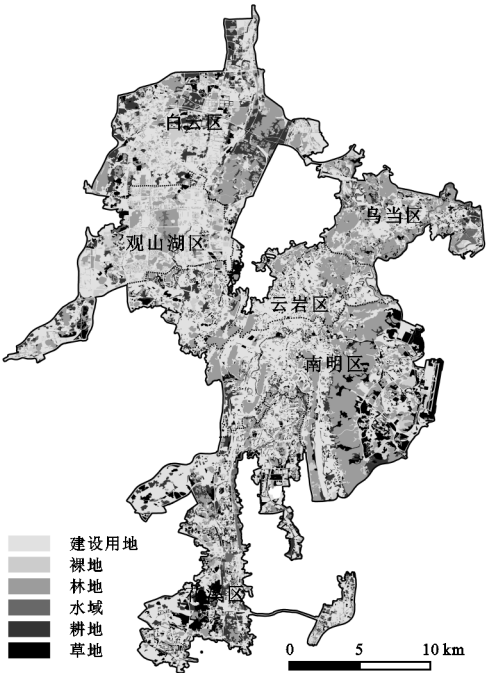


图 1 贵阳市中心城区 2018 年土地利用类型分布

表 2 贵阳市中心城区各分区 2018 年土地利用类型面积 hm<sup>2</sup>

分区	林地	草地	耕地	水域	裸地	建设用地	合计
云岩区	1249.85	637.49	220.29	41.59	58.74	3902.75	6110.73
花溪区	897.04	1598.54	776.48	242.09	103.70	5564.97	9182.82
南明区	3823.05	1863.90	462.63	152.53	461.47	5149.11	11912.69
乌当区	1638.14	342.01	142.30	222.35	146.38	1803.12	4294.30
观山湖区	1552.49	273.27	258.08	87.96	383.41	3555.88	6111.10
白云区	2437.91	359.95	1676.02	53.67	299.10	4392.81	9219.46
总计	11598.49	5075.16	3535.79	800.19	1452.80	24368.65	46831.09
占比/%	24.77	10.84	7.55	1.71	3.10	52.04	100.00

按照地形位指数计算公式得出,贵阳市城区地形位指数 TPI 为 0.26~1.27(图 2),参考前人研究<sup>[12,15]</sup>,将其按等间距法划分为 50 个梯度层,并根据地形分布指数优势区间分为低地形位区间(1~10),中地形位区间(10~20),高地形位区间(20~50)。贵阳市中心城区地形差异明显,总体上呈东西高,南北低的地貌特征。由图 2—3 可知,贵阳市中心城区各区域及土地利用类型在地形位级别上具显著分异特征。低地形位区间主要集中在花溪区、白云区、南明区南部、南明区东部及云岩区中部,此研究区由于地势低洼,地形平坦,较有利于建设用地及水域的形成,而建设用地聚集密度影响人口数量,在一定程度上对耕地的形成影响最大<sup>[12]</sup>,因此水域、耕地、草地、建设用地在该区位具有明显优势;中地形位区

间在各区域均有分布,裸地、耕地在中区位具有优势,可能是由于中区位虽不十分利于建设用地的形成,但适宜的地形较适合人为活动,所以有此结果;高地形位区间主要集中在乌当区、云岩区东部及西部、观山湖区以及南明区,林地在该区间有显著优势,大体呈上升趋势,草地在 20~27 区间有一定优势,在高区位呈一定起伏波动状态。主要原因是这些地段的城镇镶嵌山体较多,依托山体而存在的自然或近自然的林地和草地在城市人工建成环境中得以保留,且因锥状或塔状喀斯特山体坡度陡导致人为干扰较小,但林地在 48 处地形位优势有所降低,究其原因山体坡度过大,且部分地区石漠化较严重,以及受风化等自然因素影响,植被类型多为灌草或草本,在近山顶部分植被覆盖度低,岩石裸露率高,因而有此现象。另外,在最高

地形位(50)时,草地呈激增变化,说明在该地形位,草地伴随林地生长,两者在此地形位具有绝对优势。总体而言,随着地形梯度的增加,由以水域、耕地、草地、建设用地主导的地形优势区逐渐转为以林地为主导的地形优势区,可以看出地形因素对提供生态系统服务的生态斑块的空间分布起着主导作用<sup>[14]</sup>。

2.2 土地利用类型与地形梯度相关关系

为探究土地利用类型受地形影响程度,运用 SPSS 软件对各土地利用类型地形分布指数与地形位级别进行回归分析,结果见图 4。随着地形位级别增大,各土地利用类型变化不一。林地、建设用地与地形位级别呈极显著拟合( $R^2>0.9$ ),林地随地形增加而上升,建设用地随地形增加而下降,林地与建设用地呈相反变化趋势;耕地、水域及裸地对地形位级别有一定响应( $R^2>0.5$ );草地与地形位级别拟合程度不明显( $R^2=0.355$ ),说明草地的形成不受地形位的限制,但受其他因素影响较大。

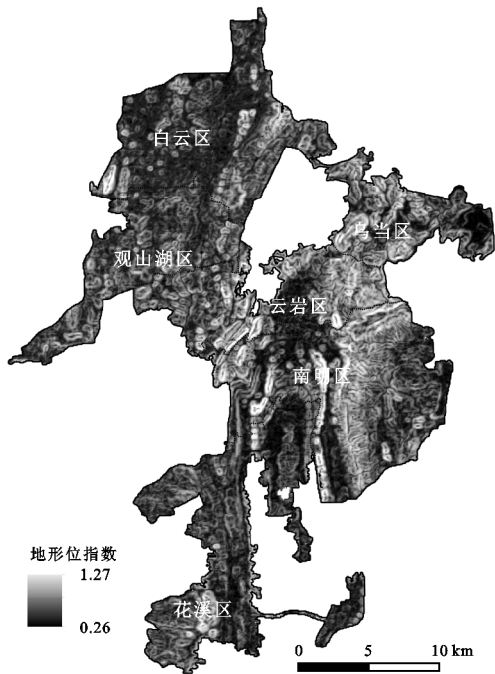


图 2 贵阳市中心城区地形位指数分布

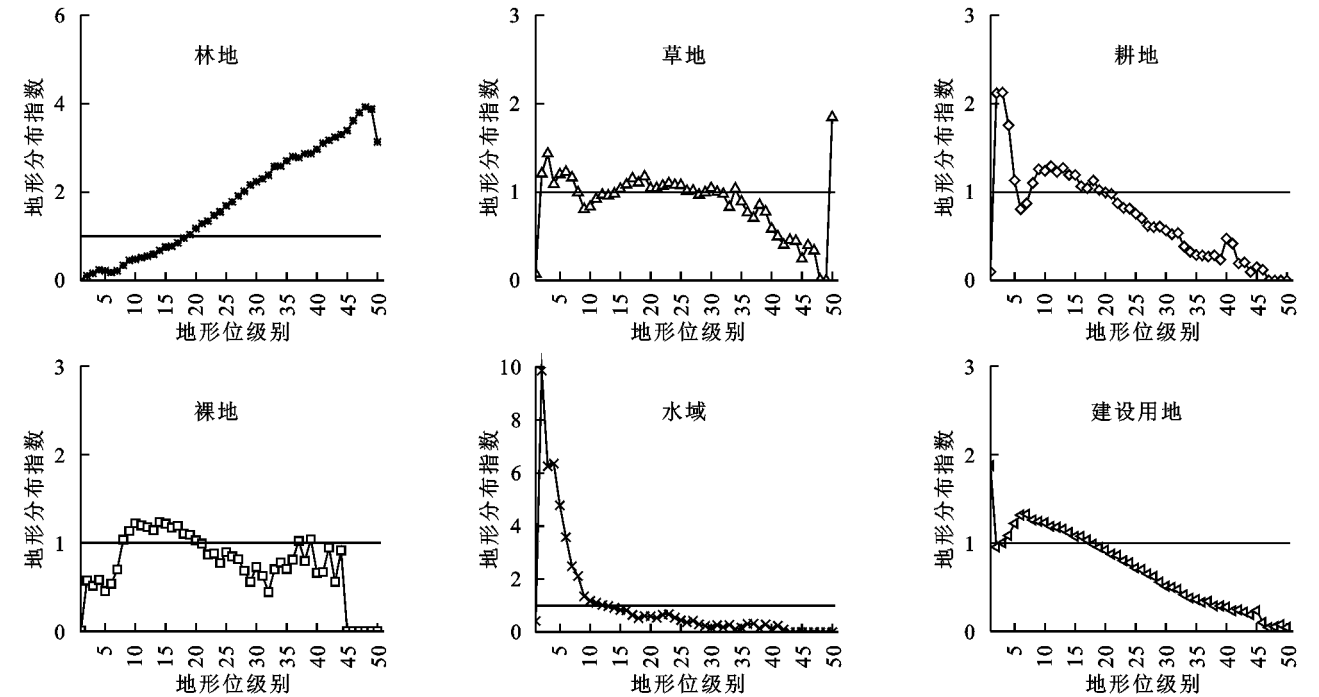


图 3 不同地形梯度各土地利用类型分布情况

2.3 不同区域及地形梯度生态系统服务价值评估

根据各土地利用类型分布面积结合生态系统服务价值系数,得出各城区生态系统服务价值(表 3)。贵阳市城区 2018 年生态系统服务总价值为 7.23 亿元,其中林地提供的生态系统服务最多(4.02 亿元),约占整个生态系统服务总价值的 55.54%,裸地提供价值最小,约 0.06%,仅 46.0 万元(建设用地暂不考虑生态系统服务价值)。从贵阳市中心城区各区域来看,生态系统服务价值各有差异,按价值大小分布顺序为:南明区>花溪区>白云区>乌当区>观山湖区>云岩区。南明区生态

系统服务价值最多,为 2.19 亿元,而云岩区最少,仅约 0.71 亿元。价值系数对各区域生态系统服务价值起到决策性作用,因此林地、草地、水域在各区域的分布面积决定了该区的生态系统服务总价值的多寡。

由图 5 可知,生态系统服务价值在不同地形梯度上呈波动状态,主要表现为先升高后降低。在第 9 地形位前,各地形位上生态系统服务价值呈 S 型曲线增长,于第 9 地形位达到峰值(0.329 亿元),随后总体呈下降趋势,在第 50 地形位处的生态系统服务价值最小(7.87 万元),说明在地形位上整体生态系统服务

价值差异性较大。为更好显示地形梯度上生态系统服务分布特征,消除面积干扰,本文利用单位面积生态系统服务价值探究地形梯度的影响情况。由图 5 可知,单位面积生态系统服务价值在总体呈升高—降低—升高波动趋势,于第 2 地形位达到最大波峰值(3.85 万元),在第 48 地形位达到二次波峰(3.37 万元)。地形位单位面积生态系统服务价值与总生态系统服务价值波动趋势呈一定负相关关系,说明地形梯度上的土地利用面积对生态系统服务价值影响显著。

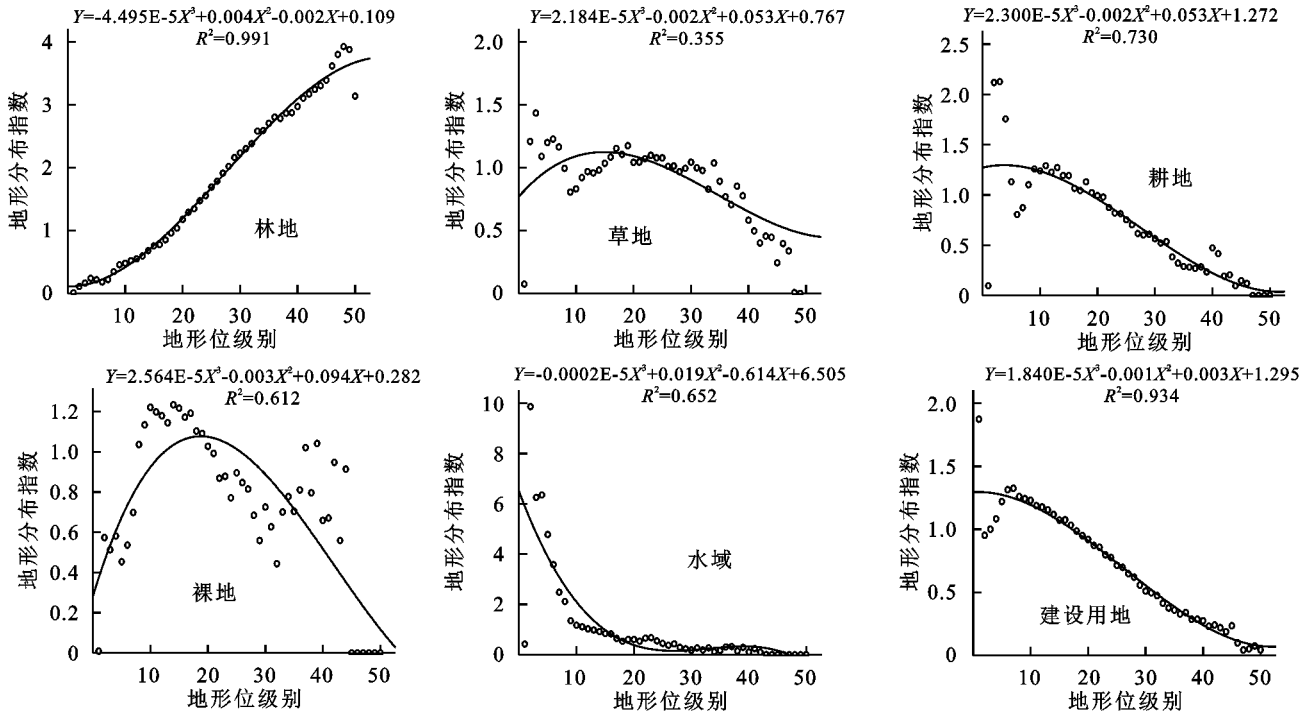


图 4 各土地利用类型地形分布指数与地形梯度关系

表 3 贵阳市中心城区各区域 2018 年生态系统服务价值

分区	林地	草地	耕地	水域	裸地	建设用地	合计	比例/%
云岩区/10 <sup>6</sup> 元	43.30	18.76	0.95	8.13	0.02	0.00	71.17	9.84
花溪区/10 <sup>6</sup> 元	31.08	47.05	3.36	47.34	0.03	0.00	128.86	17.81
南明区/10 <sup>6</sup> 元	132.44	54.86	2.00	29.83	0.14	0.00	219.28	30.31
乌当区/10 <sup>6</sup> 元	56.75	10.07	0.62	43.48	0.05	0.00	110.96	15.34
观山湖区/10 <sup>6</sup> 元	53.78	8.04	1.12	17.20	0.12	0.00	80.26	11.10
白云区/10 <sup>6</sup> 元	84.46	10.59	7.26	10.50	0.09	0.00	112.90	15.61
总计	401.80	149.37	15.32	156.48	0.46	0.00	723.43	100.00
占比/%	55.54	20.65	2.12	21.63	0.06	0.00	100.00	

2.4 生态系统服务价值与地形位级别的相关性

对生态系统服务价值与地形位级别进行回归分析,并绘制相关散点图及回归方程(图 6)。结果表明生态系统服务总价值、单项生态系统服务价值与地形梯度呈显著相关关系。生态系统服务总价值随地形梯度的增加呈先升后降关系;单项生态系统服务价值与地形梯度关系主要呈 M 型先升后降随后又升高关系,而水源供给及水文调节功能呈先升后减倒 V 型。从拟合程度来看,地形梯度对气体调节、气候调节、净

在低地形位区间,由于建设用地分布多,人口密度较大,人类活动频繁<sup>[16]</sup>,因此引起单位面积生态系统服务价值波动较大;在中低地形位区间及高地形位区间,随着地形起伏的增大,人为活动及建设面积逐渐减少<sup>[29]</sup>,因此单位面积生态系统服务价值逐渐增多;在 49—50 地形位间,由于处于贵阳市最大地形梯度区,受自然因素影响较大,生态脆弱,因此单位面积生态系统服务价值有衰减趋势。总体来说,生态系统服务价值在地形梯度影响下具有明显差异变化。

化环境、土壤保持、维持养分循环、生物多样性及美学景观均具显著影响( $R^2$  大于 0.95),说明地形梯度对这 7 种生态系统服务价值有极大影响;水源供给及水文调节价值对梯度的响应较为显著( $R^2$  大于 0.75),说明地形梯度是影响这些生态系统服务功能的重要因素之一。受价值系数及土地利用类型分布面积影响,生态系统服务总价值在地形梯度上呈先升高后下降趋势。受各类土地利用类型分布影响,9 项单项生态系统服务价值随地形梯度增加变化态势具有一定



差异性,如水源供给、水文调节、净化环境及美学景观功能受水域影响显著,余下 5 项生态服务功能与林地

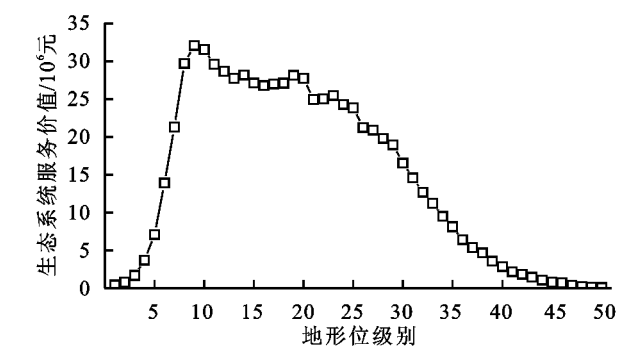


图 5 不同地形梯度生态系统服务价值变化

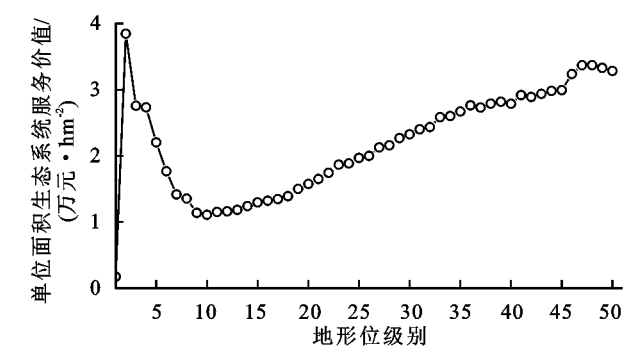
2.5 单项生态系统服务价值的区域及梯度效应

由表 4 可知,单项生态系统服务价值中占比最大为水文调节和气候调节,占比最小的是维持养分循环。单项生态系统服务价值由多到少顺序依次为:水文调节>气候调节>土壤保持>生物多样性>气体调节>净化环境>美学景观>水源供给>维持养分循环。水文调节及气候调节为贵阳市提供的生态服务最多,说明贵阳市中心城区各土地利用类型对城市气候、城市空气质量、水源涵养等方面具有重要影响。在各区域中,南明区各项生态系统服务价值均高于其他区域,说明南明区对贵阳市生态系统有极大影响,除此之外,白云区,花溪区对贵阳市生态系统也有较大影响,这与各区域所占面积大小有显著关系。

在不同梯度上,单项生态系统服务大小分布指数变化随梯度增加表现有所不同(图 7)。整体而言,在地形梯度上波动较大的为水文调节及气候调节,其他 7 项单项生态系统服务波动趋势趋于平缓,说明水文调节及气候调节在地形梯度上具有突出作用;在各地形位上均不具优势的单项生态系统服务价值为水源供给、气体调节、净化环境、维持养分循环、生物多样性及美学景观,其中,维持养分的生态系统服务价值在各区间均为最低,说明此 6 种生态服务在地形梯度上发挥的生态效益分布均匀。各土地利用类型在地形梯度分布的面积多少决定单项生态系统服务价值在该区间是否存在优势。

水文调节在 2—25 区间具有绝对优势,这与水域地形分布指数优势区间呈一定响应关系,说明水文调节很大程度受水域的影响;气候调节与林地地形分布指数变化趋势较为一致,说明林地对气候调节起到至关重要的作用,这也可以间接解释贵阳市号称“避暑之都”夏天凉爽的原因;其余单项生态服务与土地利用类型未见明显拟合趋势,说明地形因素并不占据主导地位,而是自然与人文的叠加效应。

关系密切,所以,各项单项生态系统服务价值对地形梯度有不同程度的分布响应。



2.6 敏感性指数分析

根据相关公式,计算敏感性指数,能有效判断研究结果的准确性。经计算得出如下结果(表 5),裸地及耕地受生态服务价值系数影响最小,林地对价值系数有较显著响应,水域及草地在一定程度上依赖于价值系数,但各土地利用类型敏感性指数均小于 1,说明生态系数对生态系统服务价值不具弹性,该研究结果可信。

3 讨论

(1) 地形地貌是地球通过各种演化而形成的自然产物<sup>[30]</sup>,在各个方面与生态系统服务息息相关<sup>[29]</sup>。喀斯特地区由于地质构造复杂,地势垂直分异较大,城市形态受地形限制严重<sup>[31]</sup>,因此在土地利用的空间分异方面,各土地利用类型在地形梯度的分布特征与其他地区相比有其异同之处。林地生长在喀斯特地区受自然因素制约,在 48—50 地形位呈衰减趋势,这与非喀斯特地形山地区域研究不同<sup>[12,15]</sup>;水域由于坡度及重力影响,较易在低洼处形成,因此在低地形位区间具有绝对优势,这与戴云哲等<sup>[15]</sup>研究较为一致;草地受自然和人文的双重响应,所以在高地形位上呈增加趋势,这与徐媛银等<sup>[11]</sup>研究结果一致;建筑用地由于受地形因素影响较大,因此在地形位较大区间呈下降趋势,这印证了周晓芳等<sup>[32]</sup>的研究。总体而言,各土地利用类型分布受喀斯特山地限制,而“城在山间,山在城中”的喀斯特多山城市景观空间格局,也决定了城市中生态斑块的空间分布特征,从而表现出生态系统服务价值的地形空间分异。另外,城市遗存喀斯特自然山体具有生态系统服务价值高和生态脆弱的双重性,一方面其遗存的自然或近自然的林地向城市提供多种生态系统服务,另一方面,由于在城市人工环境中形成生态孤岛,在人工干扰下会加剧石漠化进而导致其生态退化,因此作为得天独厚的城市生态资源,喀斯特自然山体的保护与其生态过程的维持必须引起高度的关注。

建议今后在低地形位区间加强城市绿化建设,管控人类形为,多关注裸地的发展趋势,在保证居民生产生活的情况下,合理将裸地转化为林地将有利于增加未来贵阳

市生态系统服务价值;在中高地形位区间,应保护现有资源,治理石漠化区域,继续实施相关退耕还林政策,重视林草种植及恢复,有助于提升区域环境生态质量。

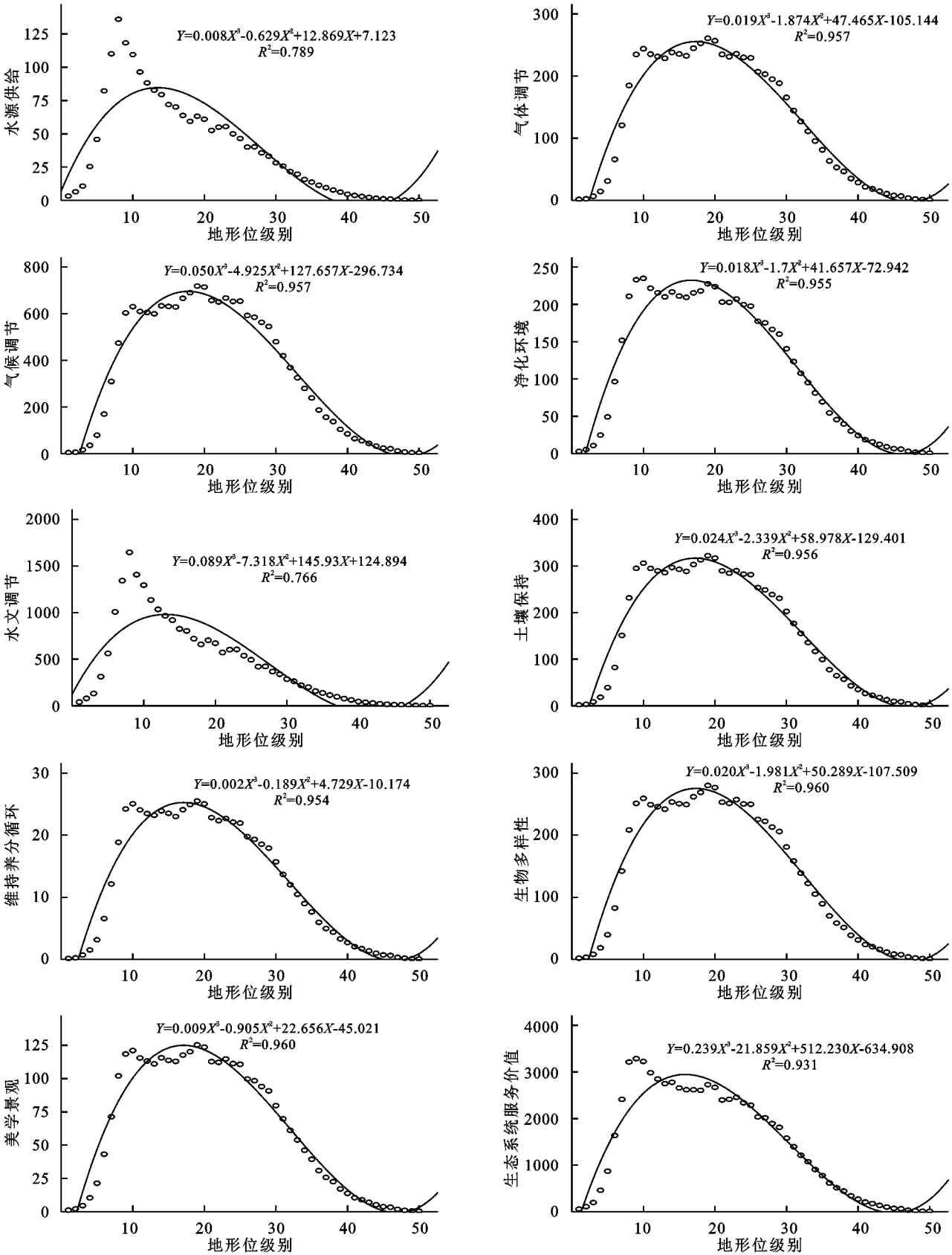


图 6 生态系统服务价值与地形梯度关系



表 4 贵阳市中心城区各区域 2018 年单项生态系统服务价值

分 区	水源 供给	气体 调节	气候 调节	净化 环境	水文 调节	土壤 保持	维持 养分循环	生物 多样性	美学 景观	合计
云岩区(10 <sup>6</sup> 元)	1.58	6.87	19.28	6.03	17.48	8.43	0.66	7.50	3.34	71.17
花溪区(10 <sup>6</sup> 元)	4.47	9.36	24.28	9.37	53.71	11.66	0.93	10.26	4.81	128.86
南明区(10 <sup>6</sup> 元)	5.13	20.55	58.24	18.45	56.94	25.17	1.95	22.7	10.15	219.28
乌当区(10 <sup>6</sup> 元)	4.02	7.52	21.75	8.02	46.83	9.20	0.71	8.78	4.12	110.96
观山湖区(10 <sup>6</sup> 元)	2.19	6.96	19.83	6.45	24.44	8.56	0.67	7.69	3.48	80.26
白云区(10 <sup>6</sup> 元)	2.34	11.94	30.99	9.36	24.93	15.10	1.27	11.75	5.23	112.90
总计	19.73	63.21	174.37	57.69	224.32	78.12	6.19	68.67	31.13	723.43
占比/%	2.73	8.74	24.1	7.97	31.01	10.80	0.86	9.49	4.30	100.00

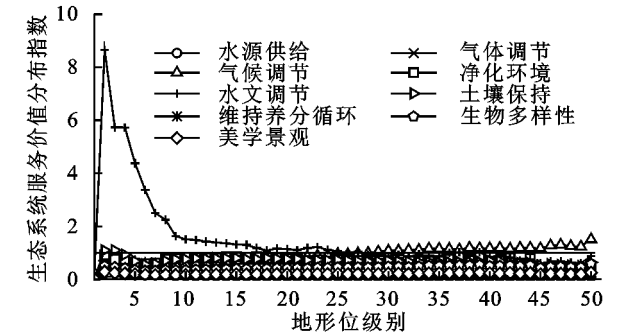


图 7 不同地形梯度单项生态系统服务价值分布情况

表 5 贵阳市 2018 年各土地利用类型对生态服务  
总价值敏感系数

土地利用类型	林地	草地	耕地	水域	裸地	建设用地
敏感性指数(CS)	0.65	0.28	0.03	0.29	0.001	0

(2) 以往研究仅从单一地形因素探讨喀斯特地区生态系统服务价值<sup>[33]</sup>,或仅探讨喀斯特地区生态系统服务重要性空间分布<sup>[34]</sup>而未涉及到地形因素,本文基于喀斯特地形空间分异特点对贵阳市生态系统服务价值进行相关研究,综合考虑高程及坡度融合后的地形因子,较全面反映喀斯特地区生态系统服务价值地形特征。结果显示,生态系统服务价值随地形梯度变化呈先上升后波动下降趋势,这与浅山丘陵区有明显差异<sup>[12]</sup>;单位面积生态系统服务价值在总体呈升高—降低—升高波动趋势,这与湘西地区有所不同<sup>[13]</sup>;单项生态系统服务价值均对地形有显著响应,这与长江中游地区有所区别<sup>[14]</sup>。在地形作用下,水文调节及气候调节能发挥较大作用,与之相关的土地利用类型为林地和水域,在今后城市管理中,应加强保护森林和水域保护,以降低生态脆弱性和风险性,为居民提供更好的生态福祉。

(3) 在生态系统服务价值评估方面,贵阳市中心城区生态系统服务价值仅为贵阳市 2018 年 GDP 的 0.24%(仅含 6 个区域)。有相关学者研究得出,中国生态系统服务价值为全国 GDP 的 94.97%,贵州省生

态系统服务价值为贵州省 GDP 的 229.41%<sup>[35]</sup>,这与本研究结果相差甚远。究其原因,可能是由于本研究区域位于贵阳市建成区,且部分潜在生态系统服务价值未能深入探索,城市外部的农田、山地、林地等提供的生态系统服务价值对区域生态系统服务价值影响更重要,城市化对生态系统服务价值呈一定负面影响,这与唐秀美等<sup>[36]</sup>研究一致。在进行城市生态系统服务价值评估时,对于美学景观方面的生态系统服务可能会低估其价值,国外学者在研究中提出,城市中心房价会随着离城市绿地的远近而影响其价值高低,通常与其呈负面影响,即距离城市绿地越近的房价会越高<sup>[37-39]</sup>,而喀斯特城市山体作为城市中呈自然状态的绿地资源,在注重城市环境品质的当前,靠近山体开发房地产的热度越来越高,因此城市内自然山体还具有城市建设经济价值,但并未在本研究中深入挖掘,在今后进行相关研究时,应结合当地实际情况进行适宜性评价。

(4) 本文对 2018 年贵阳市城区生态性服务价值进行区域及梯度研究,对喀斯特地区未来进行相关城市生态规划有一定参考价值。但由于本文着重于地形空间 9 项生态系统服务价值分析,对社会经济造成的价值差异研究较为浅显,喀斯特地区地貌复杂,人地关系矛盾尖锐,更多潜在生态服务需深入实地研究。喀斯特城市中自然山体是特殊存在,针对散布在喀斯特城市中的锥状山体能提供的生态系统服务价值,还应以山体自身特征结合城市景观格局,从点线面进行相关研究。由于数据获取困难及指标难以量化等原因,本文未能细化相关生态服务价值,希望在今后采用生态经济学原理结合城市化程度、多民族文化以及社会人文因素进行适宜性研究,以便探索出人地和谐的共生模式<sup>[40]</sup>。

4 结 论

(1) 贵阳市城区内土地利用类型面积在各区域

有所差异,并具有显著的地形梯度响应规律。城区内主要土地利用类型为建设用地和林地,地形特征整体呈东西高、南北低的状态。土地利用类型在空间上呈三段式分布,随着地形梯度的增加,由以水域、耕地、草地、建设用地主导的地形优势区逐渐转为以林地为主导的地形优势区。林地、建设用地与喀斯特地形关系密切,耕地、水域及裸地受地形影响较为显著,而草地受地形限制不明显。

(2) 2018年贵阳市城区生态系统服务总价值为7.23亿元,生态系统服务价值在不同地形梯度上呈先升高后降低波动状态,单位面积生态系统服务价值呈升高—降低—升高波动趋势。各土地利用类型中林地提供生态系统服务最多,裸地提供系统生态服务最小(不考虑建设用地)。各区中南明区为贵阳市中心城区生态系统服务价值贡献最大,云岩区贡献最小。就地形梯度而言,在第9地形位有最大生态系统服务价值,50地形位生态系统服务价值最小。单位面积生态系统服务价值与生态系统服务价值波动趋势呈一定负相关关系,于第2地形位达到最大波峰值,说明面积及地形因素均对生态系统服务价值造成很大影响。

(3) 单项生态系统服务价值大小呈较大差异化,受地形及面积因素影响显著,在地形梯度上大小分布指数优势差别明显。水文调节及气候调节在生态服务价值中占比最多;地形梯度对气体调节、气候调节、净化环境、土壤保持、维持养分循环、生物多样性及美学景观有极大影响( $R^2 > 0.95$ ),对水源供给及水文调节有较大响应( $R^2 > 0.75$ );受面积影响,水文调节及气候调节在地形层级优势显著,其余7项生态系统服务价值分布均匀,且不具优势。

#### 参考文献:

- [1] Dally G C, Power M. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [J]. *Nature*, 1997, 388 (6642): 529-530.
- [2] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *nature*, 1997, 387 (6630): 253-260.
- [3] 郑德凤,王燕燕,曹永强,等.基于生态系统服务的生态福祉分类与时空格局:以中国地级及以上城市为例[J]. *资源科学*, 2020, 42(6): 1110-1122.
- [4] 毛齐正,黄甘霖,邬建国.城市生态系统服务研究综述 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1023-1033.
- [5] McKenzie E, Posner S, Tillmann P, et al. Understanding the use of ecosystem service knowledge in decision making: lesson from international experiences of spatial planning [J]. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 2014, 32(2): 320-340.
- [6] Soga M, Gaston K J. Extinction of experience: the loss of human-nature interactions [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(2): 94-101.
- [7] 巩杰,徐彩仙,燕玲玲,等.1997—2018年生态系统服务研究热点变化与动向[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3265-3276.
- [8] 王志芳,彭瑶瑶,徐传语.生态系统服务权衡研究的实践应用进展及趋势[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2019, 55(4): 773-781.
- [9] 傅伯杰,于丹丹.生态系统服务权衡与集成方法[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [10] 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[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1432-1439.
- [11] 徐媛银,孙思琦,薛达元,等.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[J]. *生态学报*, 2019, 39(1): 97-107.
- [12] 赵艳霞,武爱彬,刘欣,等.浅山丘陵区土地利用地形梯度特征与生态系统服务价值响应[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 141-145.
- [13] 陈奕竹,肖轶,孙思琦,等.基于地形梯度的湘西地区生态系统服务价值时空变化[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(4): 623-631.
- [14] 杨锁华,胡守庚,瞿诗进.长江中游地区生态系统服务价值的地形梯度效应[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 976-986.
- [15] 戴云哲,李江风.洞庭湖区生态用地生态服务价值时空演化的地形梯度效应[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 197-204.
- [16] 石焱,袁大鹏,赵雪杉,等.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[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 184-190.
- [17] 任梅,王志杰,王志泰,等.黔中喀斯特山地城市景观格局指数粒度效应:以安顺市为例[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 3137-3145.
- [18] 王绍博,罗小龙,顾宗倪,等.精明增长背景下上海城市空间扩展演变特征与驱动机制[J]. *经济地理*, 2019, 39 (6): 58-65.
- [19] 陈娟,王龙,赵欣运,等.贵阳市城镇化进程与土地利用转变关系[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 2944-2954.
- [20] 刘玺,何守阳,刘贝贝.岩溶山区城镇化进程的土地利用景观格局演变特征:以贵阳市为例[J]. *地球与环境*, 2019, 47(4): 527-536.
- [21] 喻红,曾辉,江子瀛.快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. *地理科学*, 2001, 21(1): 64-69.
- [22] 郭洪峰,许月卿,吴艳芳.基于地形梯度的土地利用格

- 局与时空变化分析:以北京市平谷区为例[J].经济地理,2013,33(1):160-166,186.
- [23] 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.
- [24] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [25] 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.
- [26] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas[J]. Ecological Economics, 2001, 39(3): 333-346.
- [27] Curtis I A. Valuing ecosystem goods and services: a new approach using a surrogate market and the combination of a multiple criteria analysis and a Delphi panel to assign weights to the attributes[J]. Ecological Economics, 2004, 50(3/4): 163-194.
- [28] 唐启琳,刘方,刘秀明,等.基于 LUCC 的喀斯特山区生态系统服务价值评价[J].环境科学与技术,2019,42(1):170-177.
- [29] 徐彩仙,巩杰,李焱,等.基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J].生态学报,2020,40(13):4291-4301.
- [30] 栾崧,曹建文,赵良杰,等.地球上奇特地貌的形成过程[J].中国矿业,2019,28(S1):366-367,370.
- [31] 高红艳,刁承泰.试论喀斯特地貌对城市发展的影响:以喀斯特山区城市贵阳为例[J].中国岩溶,2010,29(1):81-86.
- [32] 周晓芳,周永章,欧阳军.贵州喀斯特地貌区聚落的垂直分异探讨[J].中国人口·资源与环境,2011,21(12):158-162.
- [33] 张明阳,王克林,刘会玉,等.桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征[J].生态学报,2011,31(14):3947-3955.
- [34] 刘世梁,董玉红,孙永秀,等.基于生态系统服务提升的山水林田湖草优先区分析:以贵州省为例[J].生态学报,2019,39(23):8957-8965.
- [35] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [36] 唐秀美,郝星耀,刘玉,等.生态系统服务价值驱动因素与空间异质性分析[J].农业机械学报,2016,47(5):336-342.
- [37] Brandt S, Maennig W. Perceived externalities of cell phone base stations: the case of property prices in Hamburg, Germany[J]. Environment and Planning, 2012,44(2):396-410.
- [38] Palmquist R B. Welfare measurement for environmental improvements using the hedonic model: the case of nonparametric marginal prices[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1988,15(3): 297-312.
- [39] Liebelt V, Bartke S, Schwarz N. Urban green spaces and housing prices: an alternative perspective[J]. Sustainability, 2019,11(13). DOI:10.3390/su11133707.
- [40] 柳冬青,张金茜,巩杰,等.陇中黄土丘陵区土地利用强度—生态系统服务—人类福祉时空关系研究:以安定区为例[J].生态学报,2019,39(2):637-648.
- ~~~~~
- (上接第 336 页)
- [25] 李炳元,潘保田,韩嘉福.中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J].第四纪研究,2008,28(4):535-543.
- [26] 张诗羽,张毅,王昌全,等.岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J].水土保持通报,2018,38(1):69-75.
- [27] 俱战省,杨青森,邢培茹.1987—2015 年嘉陵江源区植被覆盖度时空变化特征[J].地球与环境,2020,48(4):452-460.
- [28] 罗新蕊,杨武年,陈桃.川中丘陵区植被遥感动态监测及其驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(1):103-111.
- [29] 吕华丽.长江流域植被覆盖变化及其驱动力因子研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [30] 潘颖,林杰,佟光臣,等.2004—2014 年太湖流域植被覆盖时空变化特征[J].生态与农村环境学报,2018,34(1):37-45.
- [31] 马海云,张林林,魏学琼,等.2000—2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2021,32(2):618-628.
- [32] 梁尧钦,曾辉,李菁.深圳市大鹏半岛土地利用变化对植被覆盖动态的影响[J].应用生态学报,2012,23(1):199-205.