

DOI: 10.5846/stxb201909242006

王志杰,代磊.黔中喀斯特山地城市土地利用/覆被变化及其生态效应评价——以贵阳市花溪区为例.生态学报,2021,41(9):3429-3440.

Wang Z J, Dai L. Assessment of land use/cover changes and its ecological effect in karst mountainous cities in central Guizhou Province: Taking Huaxi District of Guiyang City as a case. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3429-3440.

# 黔中喀斯特山地城市土地利用/覆被变化及其生态效应评价

——以贵阳市花溪区为例

王志杰\*, 代 磊

贵州大学生命科学学院, 贵阳 550025

**摘要:**快速城市化发展对脆弱喀斯特山地城市生态环境造成严重威胁,系统监测评价城市土地利用/覆被格局变化及其生态效应,协调生态保护与城市发展的关系是新时期喀斯特山地城市生态文明示范城市建设的重要命题。以贵阳市花溪区为对象,以 2013 年和 2018 年 Landsat ETM/OLI 遥感影像为主要数据源,运用遥感和 GIS 技术,采用遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)模型,在系统分析研究区土地利用/覆被类型和生态环境质量时空动态变化的基础上,剖析土地利用/覆被变化的生态效应。结果表明:(1)2013—2018 年花溪区土地利用/覆被格局发生明显变化,形成以林地、建设用地和耕地 3 种类型占优的格局态势,以耕地的大量减少(减少约 15353.37 hm<sup>2</sup>)且 90% 转为建设用地或林地、灌木地为主要特征,并伴有局部林地退化(约 2683.80 hm<sup>2</sup>)的现象;(2)5 年间,花溪区生态环境质量呈下降趋势,RSEI 从 2013 年的 0.622 下降到 2018 年的 0.499,下降约 20%,反映植被覆盖度和不透水建设用地的绿度指标和干度指标对花溪区生态环境质量的贡献最大;(3)土地利用/覆被与生态环境质量的分布和变化在空间上基本吻合;林地面积或林地与灌木地面积的增减对生态环境质量的变化具有显著影响,林地或林地与灌木地面积增加 10%,可使生态质量好转面积增加约 15%—20%,或减少生态质量恶化面积约 4%;而林地的退化面积增加 10%,可导致生态质量恶化面积增加约 14%。研究可为喀斯特山地城市国土空间格局优化、城市生态环境改善、生态文明城市建设提供科学依据。

**关键词:**遥感生态指数;生态环境质量;土地利用/覆被变化;喀斯特山地城市

## Assessment of land use/cover changes and its ecological effect in karst mountainous cities in central Guizhou Province: Taking Huaxi District of Guiyang City as a case

WANG Zhijie\*, DAI Lei

College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China

**Abstract:** Rapid urbanization poses a serious threat to the ecological environment in the fragile karst mountainous cities. Systematic monitoring and evaluation of urban land use/cover pattern changes and its ecological effects, and coordination between ecological protection and urban development are important propositions for the construction of demonstration cities of ecological civilization in karst mountainous cities. Taking Huaxi District of Guiyang City as the object, Landsat ETM/OLI remote sensing images in 2013 and 2018 were the main data source. Based on remote sensing and GIS technology and using remote sensing ecological index (RSEI) model, the land use/cover types and eco-environment quality were systematically

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41701319, 42061039);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2017]2854);贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009)

**收稿日期:**2019-09-24; **网络出版日期:**2021-03-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zjwang3@gzu.edu.cn

analyzed, and the ecological effects of land use/cover change were assessed. The results show that: (1) The land use/cover pattern of Huaxi District has changed significantly from 2013 to 2018. The cultivated land was decreased nearly 15353.37 hm<sup>2</sup>, and 90% of the transferred cultivated land were converted to construction land or woodland and/or shrubbery land, accompanied by partial forest land degradation (2683.80 hm<sup>2</sup>), which formed a pattern dominated by woodland, construction land and cultivated land types. (2) In the past five years, the ecological environment quality in Huaxi District showed a downward trend with RSEI value decreased from 0.622 in 2013 to 0.499 in 2018. The greenness index and dryness index were the most contribution factors to the quality of ecological environment in Huaxi District. (3) The spatial distribution and change of land use/cover and ecological environment quality were coincided with each other. The increase or decrease of forest land or forest land and shrub land area had the significant impact on the change of ecological environment quality. The 10% increase of forest land or forest land+shrub land area could increase the area of ecological quality improvement by 15%—20%, or reduce the area of ecological quality deterioration by 4%. However, the forest land degradation area increased by 10% might lead to the ecological quality deterioration area increased by about 14%. The research can provide scientific basis for the optimization of land use space pattern, the improvement of urban ecological environment, and the construction of ecologically civilized cities in karst mountainous cities.

**Key Words:** RSEI; eco-environmental quality; land use/cover change; karst mountainous cities

生态环境是人类生存的基本保障和社会发展的物质基础,随着社会的发展,人类活动与生态环境的关系日益密切,由此也给全球生态系统造成了很大破坏,生态环境问题日趋严重<sup>[1]</sup>。特别是近年来快速城市化发展,加速了人类活动对地表环境造成的破坏程度,导致城市生态环境问题日益凸显,严重威胁城市生态安全<sup>[2-3]</sup>。因此,科学监测和评价人类活动对城市生态环境状况的影响及其时空变化,并针对其关键驱动因素,优化国土空间格局,已成为保护生态环境的重要手段和热点研究内容,对于协调人类活动与生态环境的关系,促进人与自然和谐,推动社会经济可持续发展具有重要的理论和现实意义<sup>[4]</sup>。

近年来,利用遥感技术对生态系统进行监测和评价以成为生态遥感领域的重要组成部分<sup>[4]</sup>。如利用归一化植被指数进行植被覆盖度变化的监测<sup>[5]</sup>、利用水体指数进行水环境评估<sup>[6]</sup>、以及利用热红外遥感地表温度反演评价城市热环境问题<sup>[7-8]</sup>等等,也有学者基于压力-状态-响应模型<sup>[9]</sup>、综合指数法<sup>[10]</sup>、模糊评价法<sup>[11]</sup>、生态环境状况指数<sup>[12]</sup>等众多方法进行生态环境质量的评价。但单一的遥感指数往往不能完全反应区域生态环境质量状况<sup>[4,13]</sup>,而综合评价方法也存在指标选取和权重分配的主观性和随意性,或部分指标代表性不强、适用范围受限、评价结果难以实现空间可视化等问题<sup>[14]</sup>。2013年,徐涵秋<sup>[4,13]</sup>利用主成分分析技术集成了反映生态环境最直观的、以自然因子为主的绿度、湿度、热度和干度4个因子所建立的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI),因具有指标获取的便利性、评价过程的快捷性、评价结果的客观可靠性、以及生态质量时空分析的可视化等优点,已被广泛应用于城市<sup>[15]</sup>、湿地<sup>[16]</sup>、矿区<sup>[17]</sup>、自然保护区<sup>[14,18]</sup>等的生态环境质量状况评价,但运用遥感和GIS技术开展喀斯特地区生态环境状况评价的研究报道鲜见。

黔中地区的贵阳市花溪区地处我国西南喀斯特山区腹地,属国家级生态示范区和首批国家全域旅游示范区,具有自然生态环境优良和生态脆弱的双重特征。长期以来,城市发展水平与国内发达城市相比较为落后,城市扩张和经济发展一度成为缩小差距的主要途径<sup>[19]</sup>。有研究表明,21世纪以来,花溪区成为贵阳市城市化及经济快速发展的典型区,并随着城市化进程不断加快,导致城市土地利用景观格局发生剧烈变化,城市建设用地面积激增,原有的喀斯特自然景观被不断蚕食、割裂或包围,城市化快速发展给生态环境带来的促进作用有限,并且脆弱的喀斯特生态环境与有限的资源也难以承受城市化快速发展带来的压力<sup>[20-21]</sup>。因此,如何协调好生态环境保护建设和城市发展的关系成为当前喀斯特山地城市生态学和景观生态学亟待解决的科学问题。近年来,在贵州省大生态战略行动的指导下,花溪区通过裸地综合整治和林地建设等一系列生态环境保护与建设工程先后实施,植被覆盖得到显著提高,林地面积也得到极大提高<sup>[22]</sup>。当前,运用遥感和GIS技

术开展土地利用变化对生态环境的影响及生态效应评价已引起了学者们的广泛关注,如张文强等<sup>[23]</sup>运用RSEI指数对晋西南黄土高原区生态恢复导致的植被覆盖变化的生态效应进行了评价;施婷婷等<sup>[24]</sup>对福建省敖江流域贵安开发区项目开发建设引发的生态环境质量变化进行了系统评价,得出建设用地的增长造成区域生态环境质量显著下降,并且建筑用地面积比例每增加10%,其RSEI值将下降0.041的研究成果。然而,在喀斯特地区的研究主要体现在喀斯特山地城市扩张过程与驱动机制<sup>[25-26]</sup>,以及由此导致的城市土地利用变化及其对生态风险<sup>[27]</sup>、生态系统服务价值的影响<sup>[28]</sup>等方面,蔡振饶等<sup>[19]</sup>运用协调发展度模型揭示了黔中喀斯特城市化与生态环境耦合协调的演化轨迹,关于科学客观地评价城市土地利用变化对生态环境质量的影响,揭示土地利用变化的生态效应依然是喀斯特山地城市相关研究的薄弱点。尤其是,在当前生态文明示范城市建设和快速城市化发展的双重驱动下,喀斯特山地城市土地利用格局发生什么样的变化?对生态环境状况产生什么样的影响?这些科学问题的解析对于优化黔中喀斯特山地城市国土空间格局,推动生态文明城市建设具有重要的科学和现实意义。

本文以黔中喀斯特山地贵阳市城市化快速发展和生态环境优势突出且二者矛盾突出的典型区——花溪区为研究对象,以2013年和2018年Landsat遥感影像为主要数据源,运用遥感和GIS技术,在系统分析2013—2018年花溪区土地利用/覆被格局时空变化特征的基础上,利用RSEI模型,评价生态环境质量的时空特征与变化规律,剖析土地利用/覆被变化对生态环境质量的影响,揭示土地利用/覆被变化的生态效应,以期对喀斯特山地城市生态环境保护与改善、城市国土空间格局优化和生态文明城市建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贵阳市花溪区(东经106°27′—106°52′,北纬26°11′—26°34′),地处黔中腹地,位于贵阳市南部,国土面积825.26 km<sup>2</sup>,属云贵高原苗岭山脉中段,贵州高原的第二台阶上,长江流域和珠江流域的分水岭带,地势呈明显的东西高、中间低特征。东南部最高,海拔1400 m以上,中部海拔在1100 m左右。全区地貌以山地和丘陵为主,剥蚀丘陵与盆地、谷地、洼地相间,地貌破碎。气候类型属于亚热带湿润温和型气候,冬无严寒,夏无酷热,无霜期长,雨量充沛,湿度较大,年平均气温为14.9℃,无霜期平均246 d,年降雨量1178.3 mm,空气优良天数341 d。花溪区也是贵阳市重要的水源保护区,区内有大小河流51条、总长390 km,松柏山水库、花溪水库两座中型水库总库容达7140万m<sup>3</sup>。2000年贵州省全面启动天然林保护工程,加之贵阳环城林带生态防护林建设的需要,花溪区成为天然林保护工程实施的重点地区,森林覆盖率达41.53%。

### 1.2 数据源与数据预处理

采用Landsat遥感影像为主要数据源,分别为2013年4月14日Landsat 7 ETM+影像和2018年3月3日Landsat 8 OLI影像,影像行列号为127/42,空间分辨率为30 m×30 m,影像时相基本一致,含云量均小于1%,图像质量好,避免了因影像时相差异对处理结果造成的影响,保证了数据的一致性和结果的可比性,两期影像均来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。基于ENVI 5.3软件平台对获取的原始遥感影像进行几何校正、辐射定标、大气校正、裁剪等预处理操作。其中:几何校正以研究区1:1万地形图参照,运用二

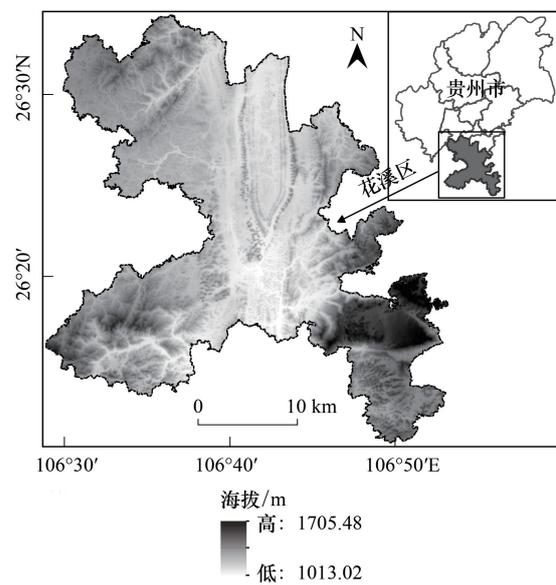


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area

次多项式校正法进行校正,校正中误差(RMS)小于1个像元;通过辐射定标将像元灰度值(DN)转换为辐射亮度值;采用FLAASH大气校正模块进行大气校正,以消除因大气、光照等引起的辐射畸变。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地利用/覆被类型解译

依据全国土地利用现状分类标准(GB/T21010—2017),结合研究区土地利用现状特征,基于ENVI 5.3软件平台,采用支持向量机法(Support Vector Machine, SVM)监督分类方法,将研究区土地利用/覆被类型划分为林地、灌木地、草地、建设用地、水体、耕地和未利用地7类,得到研究区2013年和2018年土地利用/覆被类型空间分布图(图2),并对分类结果依据野外实地验证点进行精度评价,两期影像监督分类结果的各种类型分类精度和总体精度均达到90%以上, kappa系数在0.85以上,分类结果精度满足研究需求。

#### 1.3.2 遥感生态指数计算

遥感生态指数(RSEI)集成了绿度、湿度、干度和热度4个指标因子来衡量生态环境质量,分别对应归一化植被指数、遥感影像湿度分量、干度指数和地表温度,并且具有指标获取的便利性、评价过程的快捷性、评价结果的客观可靠性、以及生态质量时空分析的可视化等特点<sup>[4,13]</sup>,本研究采用遥感生态指数进行研究区生态质量动态评价。各指标的计算方法如下:

##### (1) 绿度指标

遥感生态指数选用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)来代表绿度指标,计算公式为:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{NIR}$  为近红外波段地表反射率,  $\rho_{red}$  为红光波段地表反射率。

##### (2) 湿度指标

湿度指标采用生态监测中广泛应用的缨帽变换湿度分量来衡量,其与植被和土壤的湿度紧密相关。Landsat 7 ETM 和 Landsat 8 OLI 遥感影像的表达式分别为:

$$WET_{ETM} = 0.1509\rho_{blue} + 0.1973\rho_{green} + 0.3279\rho_{red} + 0.3406\rho_{NIR} - 0.7112\rho_{SWIR1} - 0.4272\rho_{SWIR2} \quad (2)$$

$$WET_{OLI} = 0.1511\rho_{blue} + 0.1972\rho_{green} + 0.3283\rho_{red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} \quad (3)$$

式中,  $\rho_{blue}$ 、 $\rho_{green}$ 、 $\rho_{red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$  和  $\rho_{SWIR2}$  分别为 ETM 遥感影像第 1、2、3、4、5、7 波段的反射率和 OLI 数据第 2、3、4、5、6、7 波段的反射率,  $WET_{ETM}$  表示 Landsat 7 ETM 遥感影像的湿度分量,  $WET_{OLI}$  表示 Landsat 8 OLI 遥感影像的湿度分量。

##### (3) 干度指标

干度指标利用土壤指数和建筑指数合成干度指标(Normalized Difference Built-up and Soil Index, NDBSI)来代表研究区土壤干化程度,计算公式为:

$$SI = \frac{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{blue})]}{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{blue})]} \quad (4)$$

$$IBI = \left[ \frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left( \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR1}} \right) \right] / \left[ \frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left( \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR1}} \right) \right] \quad (5)$$

$$NDBSI = (SI + IBI) / 2 \quad (6)$$

式中,  $\rho_{blue}$ 、 $\rho_{green}$ 、 $\rho_{red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$  和  $\rho_{SWIR2}$  分别为 ETM 遥感影像第 1、2、3、4、5、7 波段的反射率和 OLI 数据第 2、3、4、5、6、7 波段的反射率,  $SI$  表示土壤指数,  $IBI$  表示建筑指数,  $NDBSI$  为干度指标

##### (4) 热度指标

热度指标由经过比辐射率校正的遥感影像热红外波段反演的地表温度来代替。计算公式如下:

$$L_{6/10} = gain \times DN + bias \quad (7)$$

$$T_{6/10} = \frac{K_2}{\ln(K_1/L_{6/10} + 1)} \quad (8)$$

$$LST_{6/10} = \frac{T_{6/10}}{1 + (\lambda T_{6/10}/\rho) \ln \varepsilon} \quad (9)$$

式中,  $L_{6/10}$  为 Landsat 7 ETM 遥感影像热红外 6 波段或 Landsat 8 OLI 遥感影像热红外 10 波段的辐射值,  $DN$  为像元灰度值;  $gain$  和  $bias$  分别为 6 波段或 10 波段的增益值和偏置值,  $K_1$  和  $K_2$  分别为辐射定标参数,  $\lambda$  为热红外 6 波段或热红外 10 波段的中心波长, 这些参数可从影像头文件获得;  $T_{6/10}$  为传感器处的温度值,  $LST_{6/10}$  为地表温度;  $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{mK}$ ,  $\varepsilon$  为地表比辐射率。  $\varepsilon$  根据 Valor 等提出的植被指数混合模型提取, 计算公式如下:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.995 & \text{NDVI} \leq 0 \\ 0.960 & 0 < \text{NDVI} \leq 0.1 \\ 0.985P_v + 0.96(1 - P_v) + d\varepsilon & 0.1 < \text{NDVI} \leq 0.72 \\ 0.985 & \text{NDVI} > 0.72 \end{cases} \quad (10)$$

$$P_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (11)$$

式中,  $P_v$  为植被覆盖度,  $d\varepsilon$  为地表几何形状系数, 对于粗糙表面, 其可取值为 0.015。

#### (5) 遥感生态指数构建

遥感生态指数的构建通过对上述 4 个指标通过空间主成分分析耦合变化后的第一主成分因子生成。然而, 由于遥感数据提取的 4 个指标量纲不同, 需对各指标进行归一化处理, 同时, 为了避免大量水域分布影响主成分分析的载荷分布, 采用水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 将各指标中的水体掩膜处理后, 再进行指标归一化处理和主成分分析。指标归一化方法如下:

$$NI_i = \frac{(I - I_{\min})}{(I_{\max} - I_{\min})} \quad (12)$$

式中,  $NI_i$  为第  $i$  种指标归一化后的值, 取值范围为  $[0, 1]$ ,  $I_{\min}$  为该指标的最小值,  $I_{\max}$  为该指标的最大值。

对归一化后的 4 个指标基于 ArcGIS 10.5 软件的空间主成分分析工具进行主成分分析, 提取第一主成分因子 ( $PC1$ ), 并通过 1 减去  $PC1$  获得初始的生态质量指数  $RSEI_0$ , 以保证数值越大, 生态质量越好; 进而对  $RSEI_0$  进行归一化处理, 以方便指标之间的对比和生态质量的比较。最后, 运用等间距分级方法, 对生态质量指数 ( $RSEI$ ) 划分为 5 个等级, 即 0.0—0.2、0.2—0.4、0.4—0.6、0.6—0.8 和 0.8—1.0 等 5 个等级, 分别对应生态质量差、较差、中等、良和优。

$$RSEI_0 = 1 - PC1(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDBSI}) \quad (13)$$

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{\min}}{RSEI_{\max} - RSEI_{\min}} \quad (14)$$

#### 1.3.3 土地利用/覆被变化对生态质量的影响分析

为揭示土地利用/覆被变化对喀斯特山地城市生态质量变化的影响, 定量分析土地利用/覆被变化的生态效应, 利用 2013 年和 2018 年两期土地利用/覆被类型空间分布数据和遥感生态质量等级空间分布数据, 基于 ArcGIS 10.5 软件的叠加分析工具, 得到研究区 2013—2018 年土地利用/覆被类型变化图和生态质量等级变化图, 并根据不同等级生态质量的变化特征将生态质量等级分布图划分为好转区、恶化区和不变区 3 个区; 然后, 采用 Fishnet 工具, 将研究区按  $1\text{km} \times 1\text{km}$  的大小划分网格 (剔除研究区边缘的碎小网格), 共 716 个网格, 分别统计各网格内土地利用/覆被类型的主要变化 (转移) 方式及其占网格的面积比例 ( $NI_{ij}$ )、好转面积比例 ( $AEI_j$ ) 和恶化面积比例 ( $AED_j$ )。

$$NI_{ij} = \frac{ALU_{ij}}{SN_j} \times 100 \quad (15)$$

$$AEI_j = \frac{ArEI_j}{SN_j} \times 100 \tag{16}$$

$$AED_j = \frac{ArED_j}{SN_j} \times 100 \tag{17}$$

式中,  $NI_{ij}$  为第  $j$  个格网内第  $i$  种土地利用/覆被类型转移方式占格网面积的比例,  $ALU_{ij}$  为第  $j$  个格网内第  $i$  种土地利用/覆被类型转移方式面积,  $AEI_j$  为第  $j$  个格网内生态质量好转面积占格网面积的比例,  $ArEI_j$  为第  $j$  个格网内生态质量好转面积,  $AED_j$  为第  $j$  个格网内生态质量恶化面积占格网面积的比例,  $ArED_j$  为第  $j$  个格网内生态质量恶化面积,  $SN_j$  为第  $j$  个格网的面积。

进而, 运用相关与回归分析方法, 分析显著影响生态质量好转(恶化)的土地利用/覆被变化(转移)方式, 进而拟合二者之间的关系, 揭示土地利用/覆被变化的生态质量响应与生态效应。

$$Y_{AEI} = f(NI_m) \text{ 或 } Y_{AED} = f(NI_n) \tag{18}$$

此外, 本研究运用土地利用动态度和土地利用程度变化量、变化率指数来分析研究区各类和整体土地利用/覆被类型变化速度与特征。计算公式如下:

单一土地利用动态度:

$$K_2 = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{19}$$

土地利用程度变化量:

$$\Delta L_i = L_{ib} - L_{ia} = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_{ib} - 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_{ia} \tag{20}$$

土地利用程度变化率:

$$R = \frac{L_{ib} - L_{ia}}{L_{ia}} \times 100\% \tag{21}$$

式中,  $K_2$  为研究时段内某一具体土地利用类型的土地利用动态度;  $U_a$ 、 $U_b$  分别为研究初期及研究末期该土地利用类型的数量。  $T$  为研究时段长。  $\Delta L_i$  为土地利用程度变化量,  $R$  为土地利用程度变化率,  $A_i$  为第  $i$  级土地利用程度分级指数,  $C_{ia}$  和  $C_{ib}$  分别为研究期始末第  $i$  级土地利用/覆被类型面积百分比,  $L_{ia}$  和  $L_{ib}$  分别为研究期始末土地利用程度综合指数,  $n$  为土地利用程度分级数。各土地利用程度分级指数取值见表 1。

表 1 花溪区不同土地利用/覆被类型分级指数表<sup>[29]</sup>

Table 1 Classification index of different land use/cover types in Huaxi District

类型 Types	未利用土地级 Unutilized land grade	林、草、水用地级 Forest, grass and water land grade	农业用地级 Agricultural land grade	城镇聚落地级 Urban settlement land grade
土地利用类型 Land use type	未利用地	林地、灌木、草地、水域	耕地	建设用地
分级指数 Grade index	1	2	3	4

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用/覆被结构时空变化特征

统计分析 2013—2018 年花溪区不同土地利用/覆被类型面积特征可以看出(表 2, 图 2); 5 年间花溪区土地利用结构发生明显变化, 传统的农业用地占主导的土地利用格局被打破, 优势土地利用/覆被类型由耕地转为林地、耕地和建设用地的“三足鼎立”之势。具体而言, 2013 年花溪区土地利用/覆被类型以耕地为主, 约占研究区总面积的 44.29%, 其次为林地, 约占 38.02%。到 2018 年, 耕地面积减少到约 22429.53  $hm^2$ , 仅占 27.19%; 而林地、灌木和草地面积得到快速增加, 三者约占 55%, 成为花溪区的主导土地利用/覆被类型, 与此同时, 建设用地面积也有快速增加, 占研究区总面积的约 15%。从土地利用/覆被类型的变化速度来看, 5 年

间增速最快的是未利用地,单一动态度(年增速)达 44.48%,其次为灌木地和建设用地,单一动态度分别为 17.20% 和 10.63%,土地利用程度的变化量和变化率分别为 -8.38 和 -3.19%,研究区土地利用格局进入调整期。

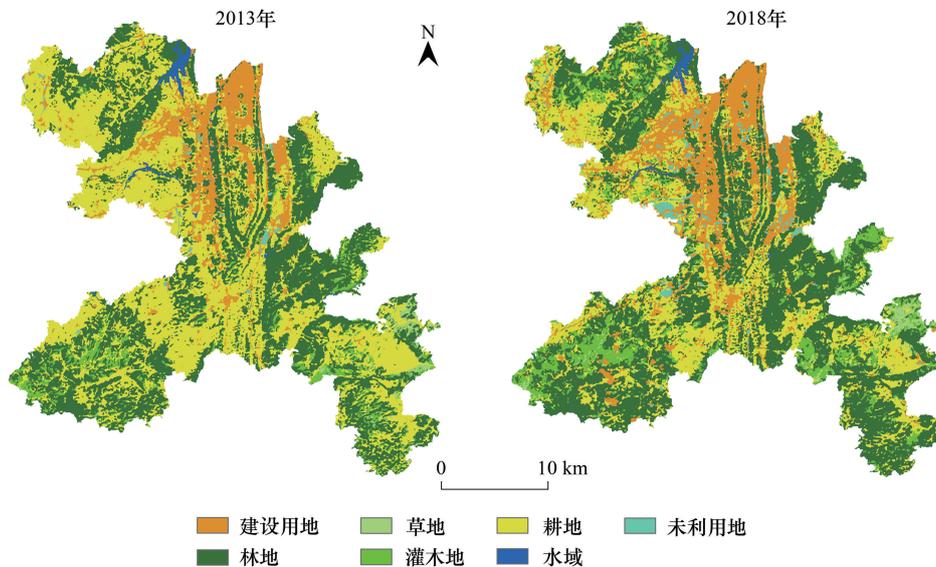


图 2 花溪区 2013 年和 2018 年土地利用/覆被类型空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of land use/cover types of Huaxi District in 2013 and 2018

表 2 花溪区 2013—2018 年土地利用/覆被类型面积比例及变化

Table 2 Area ratio and change of different land use/cover types in Huaxi District from 2013 to 2018

类型 Types	2013 年		2018 年		单一动态度/% Single dynamic degree
	面积 Area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%	面积 Area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%	
建设用地 Construction land	7794.27	9.45	11938.05	14.47	10.63
林地 Woodland	31358.25	38.02	36084.78	43.75	3.01
草地 Grassland	664.65	0.81	889.83	1.08	6.78
灌木地 Shrub land	4876.20	5.91	9070.65	11.00	17.20
耕地 Arable land	36532.98	44.29	22429.53	27.19	-7.72
水域 Water body	766.17	0.93	484.56	0.59	-7.35
未利用地 Unutilized land	492.39	0.60	1587.51	1.92	44.48
土地利用程度变化量 Land use degree index	-8.38		土地利用程度变化率/% Land use degree index		-3.19

叠加分析花溪区 2013—2018 年土地利用的空间变化特征,可以看出(图 3):2013—2018 年间,花溪区土地利用空间变化面积达 24379.92 hm<sup>2</sup>,占研究区总面积的 29.56%,表现出耕地的大量转出(转出面积 15353.37 hm<sup>2</sup>)和林地、灌木地与建设用地的大量转入(转入面积分别为 8725.59 hm<sup>2</sup>、7229.79 hm<sup>2</sup>和 5006.61 hm<sup>2</sup>)的特征。其中:耕地主要转出为林地、建设用地和灌木地,分别占耕地总转出面积的 37.50%、28.19%和 25.07%。林地主要由耕地和灌木地转入,分别转入 5757.30 hm<sup>2</sup>和 2466.99 hm<sup>2</sup>;灌木地主要由耕地和林地转入,分别占灌木地总转入面积的 59.86%和 37.12%,林地向灌木地的大面积转入在一定程度上反映出研究区在林地面积总体增大的同时,存在林地的局部退化现象;建设用地主要由耕地转入,转入面积约 3849.30 hm<sup>2</sup>,占建设用地总转入面积的 76.88%。其他土地利用类型之间也有不同程度的转入转出,但转换率均相对较低。

## 2.2 生态环境质量时空变化特征

从遥感生态指数的 4 个指标主成分分析结果可以看出(表 4):2013 年和 2018 年第一主成分因子(PC1)对 RSEI 的贡献率分别为 87.15%和 73.83%,表明第一主成分因子已集成了 4 个指标的主要特征信息。并且,

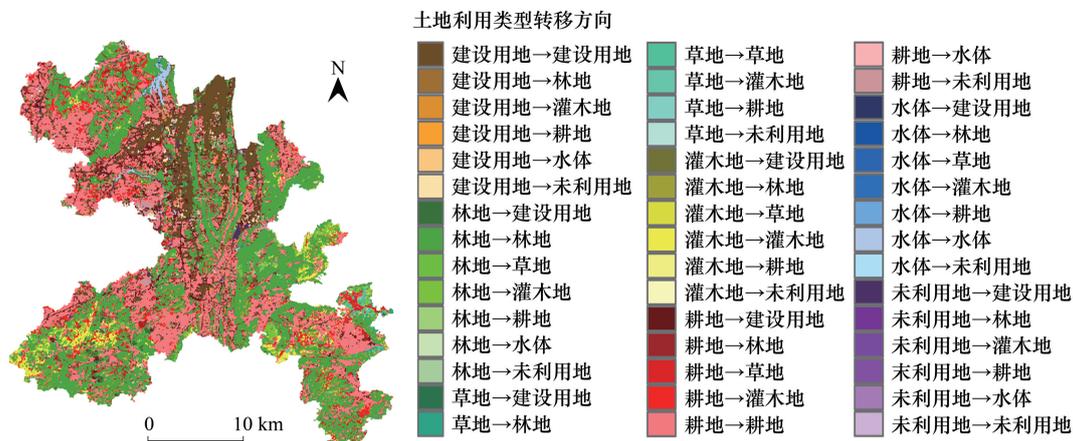


图3 花溪区 2013—2018 年土地利用/覆被类型转移图谱

Fig.3 Transfer map of land use/cover types in Huaxi District from 2013 to 2018

对生态质量具有正效应的湿度指标和绿度指标均为正值,对生态质量具有负效应的干度指标和热度指标均为负值,这与实际情况吻合。同时,两个时期各指标对 PC1 的贡献度均表现出绿度指标大于湿度指标,干度指标大于热度指标的特征,说明绿度指标和干度指标对研究区生态质量的优劣具有较大的影响。此外,2013—2018 年第一主成分因子中湿度指标和绿度指标均值均表现为下降,而干度指标和热度指标均表现为上升;并且,RSEI 均值从 2013 年的 0.622 下降到 2018 年的 0.499,下降了约 19.77%,说明 5 年间花溪区生态质量总体有所下降。

表 4 花溪区 2013 年和 2018 年遥感生态指数主成分分析结果及各指标与 RSEI 均值统计

Table 4 Principal component analysis and RSEI mean statistics in Huaxi District in 2013 and 2018

年份 Year	类别 Class	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3	第四主成分 PC4	均值 Mean±SD	遥感生态指数 RSEI±SD
2013	热度(LST)	-0.148	0.391	0.908	-0.031	0.386±0.048	0.622±0.154
	干度(NDBSI)	-0.522	0.647	-0.349	0.433	0.466±0.110	
	湿度(WET)	0.139	-0.371	0.212	0.893	0.773±0.038	
	绿度(NDVI)	0.828	0.539	-0.094	0.118	0.647±0.163	
	特征值	0.018	0.002	0.000	0.000	—	
	贡献率/%	87.149	10.272	2.332	0.248	—	
2018	热度(LST)	-0.192	0.136	0.972	-0.010	0.451±0.069	0.499±0.148
	干度(NDBSI)	-0.664	0.448	-0.188	0.568	0.586±0.148	
	湿度(WET)	0.334	-0.468	0.140	0.806	0.668±0.089	
	绿度(NDVI)	0.641	0.749	0.023	0.165	0.539±0.157	
	特征值	0.021	0.006	0.002	0.000	—	
	贡献率/%	73.825	19.799	5.470	0.906	—	

RSEI: 遥感生态指数 Remote sensing ecological index

进一步分析不同生态质量等级的变化情况可以发现(图 4,表 5):2013 年生态质量以良为主,约占 48%;而 2018 年以中等为主,约占 45.58%。2013—2018 年间,生态质量中等及以下等级面积明显增加,其中差、较差和中等分别增加 466.65 hm<sup>2</sup>、14482.80 hm<sup>2</sup>和 11749.41 hm<sup>2</sup>,而优、良等级面积大幅减少,减幅分别达 80.83%和 50.10%。结合研究区土地利用/覆被类型空间分布图(图 2),可以直观地看出生态质量好的区域主要以林地、灌木地和草地为主,而生态质量差的区域则以建设用地和未利用地为主,表现出生态质量的优劣与土地利用/覆被类型的格局基本符合的特征。

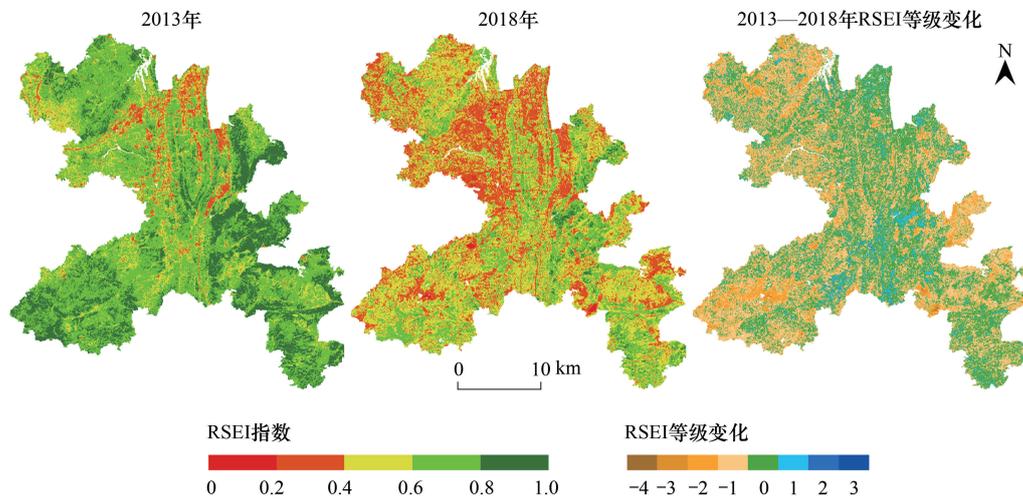


图4 花溪区2013年和2018年生态质量等级分布及其变化分布

Fig.4 Grade distribution and change distribution of eco-environmental quality of Huaxi District in 2013 and 2018

表5 花溪区2013年和2018年生态质量等级面积和比例

Table 5 Area and proportion of different eco-environmental quality grades of Huaxi District in 2013 and 2018

生态质量等级 Grade of RSEI	2013年		2018年		生态质量等级变化 Changes of RSEI degree	
	面积 Area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%	面积 Area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%	面积 Area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%
差 Bad(0.0—0.2)	181.53	0.22	648.18	0.79	466.65	257.06
较差 Poor(0.2—0.4)	7961.22	9.68	22444.02	27.45	14482.80	181.92
中等 Moderate(0.4—0.6)	25521.66	31.04	37271.07	45.58	11749.41	46.04
良 Good(0.6—0.8)	39387.33	47.91	19656.09	24.04	-19731.20	-50.10
优 High(0.8—1.0)	9166.23	11.15	1757.52	2.15	-7408.71	-80.83
合计 Total	82217.97	100.00	81776.88	100.00	—	—

通过对2013年和2018年花溪区RSEI指数进行差值变化检测,可以发现(图4,表6):2013—2018年间,花溪区生态质量等级下降(恶化)区域面积达44929.71 hm<sup>2</sup>,占总面积的54.95%,而生态质量等级上升(好转)的区域面积仅4922.01 hm<sup>2</sup>,仅占到6.02%,表明花溪区生态质量发生明显的恶化或下降。但生态质量等级好转或恶化的级差主要以±1级的变化为主,面积分别为4692.96 hm<sup>2</sup>和35506.35 hm<sup>2</sup>,均占好转或恶化总面积的80%以上,说明花溪区生态质量变化尚以轻微变动为主。并且,生态质量恶化的区域主要分布在研究区周边乡镇,与研究期间建设用地的扩张区域和林地转为灌木地或草地的退化区域在空间分布上基本吻合,而生态质量有所好转的区域则主要零星分布与研究区中南部和西北部的部分乡镇内,与这些区域林地面积的增长有明显的对应关系。

### 2.3 土地利用/覆被变化对生态环境质量的影响

#### 2.3.1 生态质量好转区土地利用/覆被变化的生态效应

2013—2018年花溪区生态质量好转区土地利用/覆被类型发生的转移面积约786.15 hm<sup>2</sup>,其中以耕地转为建设用地、林地、灌木地,以及建设用地转为耕地为主要转移方式,转移面积约635.13 hm<sup>2</sup>,占好转区土地利用/覆被类型总转移面积的80.79%。因此,选取发生主要变化的耕地转建设用地、耕地转林地、耕地转灌木地和建设用地转耕地4种土地利用/覆被类型变化方式,分析好转区生态质量好转面积比例与4种主要土地利用转移方式的相关性,可以发现(表7):好转区生态质量好转面积比例(AEI)与林地净增加面积比(NIw)呈极显著正相关关系( $R=0.300, P<0.01$ ),与林灌用地净增加面积比例(NIws)呈极显著正相关关系( $R=0.260, P<0.01$ ),与建设用地净增加面积比例(NIc)和灌木地净增加面积比例(NIs)分别呈负相关和正相关关系,但相

关性不显著( $P>0.05$ )。回归方程显示出在当前水平和 1 km 空间尺度下,林地面积增加 10%,生态环境质量的好转面积约增加 21%;而林灌复合的生态用地面积增加 10%时,生态环境质量好转面积可增加约 15%。

$$y_{AEI} = 2.089x_{NIw} + 5.259 \quad (R=0.300, P=0.000) \quad (22)$$

$$y_{AEI} = 1.489x_{NIws} + 5.414 \quad (R=0.260, P=0.000) \quad (23)$$

表 6 花溪区 2013—2018 年生态质量 (RSEI) 变化检测

Table 6 Change detection of RSEI of Huaxi District from 2013 to 2018

类别 Class	级差 Level	级面积 Class area/hm <sup>2</sup>	类面积 Level area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%
变差 Degraded	-4	19.80	44929.71	54.95
	-3	642.24		
	-2	8761.32		
	-1	35506.35		
不变 No changed	0	31911.03	31911.03	39.03
变好 Improved	+1	4692.96	4922.01	6.02
	+2	219.24		
	+3	9.81		

表 7 好转区生态质量好转面积比例与主要土地利用/覆被类型转移方式相关分析结果

Table 7 Correlation analysis between ecological quality improvement area ratio and main land use/cover type transfer mode in improved area

	NIc	NIw	NI <sub>s</sub>	NI <sub>ws</sub>
相关系数 Correlation coefficient	-0.010	0.300 **	0.043	0.260 **
双侧显著性 Bilateral significance	0.795	0.000	0.260	0.000
样本数 Number of samples	695	695	695	695

NIc: 建设用地净增加面积比; Net increase area ratio of Construction land; NIw: 林地净增加面积比 Net increase area ratio of woodland; NI<sub>s</sub>: 灌木净增加面积比 Net increase area ratio of shrub land; NI<sub>ws</sub>: 林灌净增加面积比例 Net increase area ratio of woodland and shrub land; \*\* 代表具有极显著相关关系( $P<0.01$ )

### 2.3.2 生态质量恶化区土地利用/覆被变化的生态效应

2013—2018 年花溪区生态质量恶化区发生转移变化的面积达 16820.64 hm<sup>2</sup>,其中以耕地转为林地、灌木地、建设用地或未利用地、以及林地与灌木地之间的互转为主(占总转移面积的 82.58%),并存在明显的林地退化特征(即林地转为灌木地,转移面积约 2466.09 hm<sup>2</sup>)。因此,分析 5 种主要土地利用/覆被类型空间转移方式和恶化面积比例的关系,可以发现(表 8):恶化区生态质量恶化面积比例(AED)与林地退化面积比例(ADw)呈极显著正相关关系( $R=0.462, P<0.01$ ),与林地净增加面积比例(NIw)呈极显著负相关关系( $R=-0.180, P<0.01$ ),而与林灌综合净增加面积比例(NIws)呈负相关关系、与建设用地净增加面积比例(NIc)和未利用地净增加面积比例(NI<sub>u</sub>)呈正相关关系,但均未达到显著性水平( $P>0.05$ )。从回归方程来看,林地是影响生态质量恶化与否的关键因子,林地退化面积每增加 10%,生态质量恶化面积可增大约 14%,而林地的净增加面积增大 10%,只能减少生态质量恶化面积比例约 4%。

表 8 恶化区生态质量恶化面积比例与主要土地利用/覆被类型转移方式相关分析结果

Table 8 Correlation analysis between ecological quality deterioration area ratio and main land use/cover type transfer mode in deteriorated area

	ADw	NIw	NI <sub>ws</sub>	NIc	NI <sub>u</sub>
相关系数	0.462 **	-0.180 **	-0.033	0.020	0.069
双侧显著性	0.000	0.000	0.383	0.587	0.066
样本数	716	716	716	716	716

ADw: 林地退化面积比 Area ratio of degraded area of woodland; NIw: 林地净增加面积比 Net increase area ratio of woodland; NI<sub>ws</sub>: 林灌净增加面积比例 Net increase area ratio of woodland and shrub land; NIc: 建设用地净增加面积 Net increase area ratio of Construction land; NI<sub>u</sub>: 未利用地净增加面积 Net increase area ratio of Unutilized land; \*\* 代表具有极显著相关关系( $P<0.01$ )

$$y_{AED} = 1.403x_{ADw} + 49.967 (R = 0.462, P = 0.000) \quad (24)$$

$$y_{AED} = -0.424x_{NIw} + 55.150 (R = -0.180, P = 0.000) \quad (25)$$

### 3 结论

(1)花溪区 2013—2018 年间土地利用/覆被格局发生明显变化,表现为耕地的大量减少,林灌地与建设用地的大量增加,并伴有林地局部退化的特征,土地利用格局变化进入调整期,传统的以耕地为主导地位的土地利用空间格局被打破,形成以林地、建设用地和耕地 3 类用地占优的基本态势。土地利用时空格局的变化体现出生态保护与城市化发展双重驱动的结果,以耕地转为林地、耕地转为建设用地为主要特征。

(2)2013—2108 年花溪区生态环境状况呈明显退化趋势,RSEI 均值由 2013 年的 0.622 下降到 2018 年的 0.499,总体下降了约 20%,在空间上呈“总体恶化、局部好转”的特征。绿度和干度对花溪区生态环境质量变化的贡献最大,这与花溪区地处喀斯特地区,区内山地分布广泛、植被覆盖度相对较高,加之近年来城市化快速发展导致城市建设用地不断增加有关,同时,一定程度上说明研究区生态环境状况的优劣与植被覆盖度和建设用地等不透水面的变化有密切关系<sup>[15]</sup>。

(3)生态环境状况空间分布及其变化与土地利用/覆被类型的分布变化在空间上基本吻合。生态质量较好区域主要分布在研究区林地、灌木地和草地等生态用地的分布区,生态质量的恶化与林地面积的退化减小和建设用地的增加在空间上有直观的对对应关系。建设用地的增加在一定程度上促进了生态环境状况的恶化,但不及林地面积的变化对生态质量的影响显著,林地或林地与灌木地面积增加 10%,可使生态质量好转面积增加约 15%—20%,可减少生态质量恶化面积约 4%;而林地的退化面积增加 10%,可导致生态质量恶化面积增加约 14%。这说明对于喀斯特山地城市而言,生态环境保护与建设是保障生态环境状况的关键因素,植被的恢复与建设对于生态质量的好转具有积极的促进作用,而林地的破坏也导致生态质量的快速恶化。因此,在今后的生态保护与城市发展过程中,还需最大限度的减少对原有植被为主的自然生态的破坏,继续大力加强植被恢复与建设,并在城市发展过程中,合理控制建筑用地面积,有效保护绿水青山,合理优化国土空间格局。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 王桥,刘思含. 国家环境遥感监测体系研究与实现. 遥感学报, 2016, 20(5): 1161-1169.
- [ 2 ] 管祥友. 城镇化与生态环境质量之间的关系研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2013.
- [ 3 ] 张保卫. 基于 RSEI 模型的生态环境质量评价及系统设计[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [ 4 ] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [ 5 ] 罗敏,古丽·加帕尔,郭浩,郭辉,张鹏飞,孟凡浩,刘铁. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50-63.
- [ 6 ] 王小平,张飞, Ghulam A, 于海洋,任岩,王娟,张月. 艾比湖流域地表水水质指标与水体指数关系研究. 环境科学学报, 2017, 37(3): 900-909.
- [ 7 ] Yuan F, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(3): 375-386.
- [ 8 ] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3): 504-513.
- [ 9 ] 陈强,陈云浩,王萌杰,蒋卫国,侯鹏,李营. 2001—2010 年洞庭湖生态系统质量遥感综合评价与变化分析. 生态学报, 2015, 35(13): 4347-4356.
- [ 10 ] 高艺宁,赵萌莉,王宏亮,熊梅,赵天启. 景观生态视角下草地生态质量的时空差异及其影响因素——以内蒙古四子王旗为例. 生态学报, 2019, 39(14): 5288-5300.
- [ 11 ] 刘德晶,邓立斌,陈端吕,邓丽群. 模糊综合评价法在九万山自然保护区综合评价中的应用. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(7): 7-11.

- [12] 张沛, 徐海量, 杜清, 赵新风, 凌红波. 综合治理前后和田河流域生态环境状况变化及原因探讨. 水土保持研究, 2016, 23(4): 174-178, 184-184.
- [13] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897.
- [14] 刘盼, 任春颖, 王宗明, 张柏, 陈琳. 南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3347-3356.
- [15] 张立伟, 张运, 黄晨. 皖江城市带近 20 a 生态环境变化遥感指数分析. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1061-1070.
- [16] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 张乃明. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价. 生态学报, 2019, 39(8): 2963-2972.
- [17] 夏楠. 准东矿区生态环境遥感监测及生态质量评价模型研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [18] 徐志刚, 郑鸿瑞, 戴晨曦, 高鹏, 杜培军. 永定客家土楼世界遗产地土地覆盖与生态变化遥感评价. 国土资源遥感, 2018, 30(1): 102-108.
- [19] 蔡振饶, 李玉红, 李旭东. 贵阳市城市化与生态环境耦合研究. 生态科学, 2017, 36(5): 196-203.
- [20] 韩会庆, 王喆, 张英佳, 苏志华, 尹昌应. 2005—2015 年贵阳市生境退化程度对土地利用变化的响应. 中国岩溶, 2018, 37(2): 185-191.
- [21] 李松, 罗绪强. 基于 RS 的多数据源的 700 多年来贵阳城市扩展时空特征研究. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1734-1745.
- [22] 张林杰, 蔡宏, 王小祎, 管林军, 陈刚. 贵阳市花溪区城市生态环境变化研究. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(2): 50-53, 57-57.
- [23] 张文强, 孙从建, 李新功. 晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1748-1758.
- [24] 施婷婷, 徐涵秋, 孙凤琴, 陈善沐, 杨绘婷. 建设项目引发的区域生态变化的遥感评估——以敖江流域为例. 生态学报, 2019, 39(18): 6826-6839.
- [25] 韩冰倩. 贵阳市土地利用变化及驱动因素分析. 贵州科学, 2017, 35(1): 79-86.
- [26] 李卫海, 李阳兵, 周焱, 陈鑫. 1991—2006 年贵阳市土地利用变化及其驱动因素分析. 资源科学, 2008, 30(12): 1890-1896.
- [27] 任红玉, 周旭, 张迪, 文兴霞, 姚体帖. 快速城市化过程中喀斯特山区城镇生态风险变化——以贵阳市花溪区为例. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2018, 36(5): 16-23.
- [28] 魏媛, 吴长勇, 徐筑燕. 贵阳市土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 贵州农业科学, 2015, 43(2): 185-188, 192-192.
- [29] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111.