

# 基于 RSEI 模型的玉溪市生态环境变化监测与评价

钟欣呈<sup>1,2,3,4</sup>, 许泉立<sup>1,2,3,4</sup>

(1.云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2.云南师范大学 西部资源环境 GIS 技术教育部工程研究中心, 昆明 650500;  
3.云南省地理空间信息技术工程技术研究中心, 昆明 650500; 4.云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 昆明 650500)

**摘 要:**城市化进程的不断推进引起了生态环境的改变,如何全方位、多尺度、长时间序列对城市生态环境质量动态监测是目前研究的一个重要方向。利用 2005—2020 年玉溪市的 Landsat-5/TM 和 Landsat-8/OLI 遥感影像为研究数据,计算绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)、热度(LST)4 个生态指数,基于主成分分析法构建 RSEI 模型,对玉溪市 16 年来的生态环境质量进行监测与评价。结果表明:(1) 2005—2020 年玉溪市生态环境质量呈“S”型波动,RSEI 均值从 0.605 下降到 0.568,玉溪市生态环境有所下降,但总体处于中等水平。(2) 生态环境质量差和较差的区域面积共增加了 1 014.05 km<sup>2</sup>,而优和良的区域面积共减少了 1 306.43 km<sup>2</sup>,其中生态环境质量较差的区域主要分布在元江干热河谷,生态环境质量较好的区域除元江干热河谷及建城区外均有分布,但最好区域位于哀牢山。(3) 生态环境质量变差的面积为 6 255.35 km<sup>2</sup>,占总面积的 42.51%,而生态环境质量变好的面积仅 2 514.26 km<sup>2</sup>,占总面积的 17.08%,改善的区域主要集中在玉溪市中部和西南部,但西北部和东部生态环境质量均出现退化。

**关键词:**生态环境质量; 遥感生态指数; 主成分分析; 变化监测; 玉溪市

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0350-08

## Monitoring and Evaluation of Ecological Environment Changes in Yuxi City Based on RSEI Model

ZHONG Xincheng<sup>1,2,3,4</sup>, XU Quanli<sup>1,2,3,4</sup>

(1.Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2.GIS Technology Engineering Research Centre for West-China Resources and Environment, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 3.Geospatial Information Technology Engineering Research Center of Yunnan Province, Kunming 650500, China; 4.Key Laboratory of Remote Sensing of Resources and Environment of Yunnan Province, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The continuous progress of urbanization has caused changes of the ecological environment. How to monitor the dynamic quality of urban ecological environment in a comprehensive, multi-scale, and long-term sequence is an important direction of current research. Using the Landsat TM and OLI remote sensing images of Yuxi City from 2005 to 2020 as the research data, we constructed a model of Remote Sensing Ecological Index (RSEI) with four indicators (vegetation index, wetness index, normalize difference build-up and soil index and land surface temperature), and used principal component analysis to monitor and evaluate the ecological environment quality of Yuxi City during 16 years. The results show that: (1) the ecological environment quality of Yuxi City fluctuates as the S-shaped pattern in the period from 2005 to 2020, and the average RSEI decreased from 0.605 to 0.568; the ecological environment of Yuxi City has declined, but the overall level is at a moderate level; (2) ecological environment quality is poorer, and the poor area has increased by 1 014.05 km<sup>2</sup>, and the total area of the excellent and good grades of this region has decreased by 1 306.43 km<sup>2</sup>, of which the poorer areas with ecological environment quality mainly distribute in Yuanjiang dry-hot valleys, areas with good ecological environment quality distribute across Yuxi except Yuanjiang dry-hot valleys and Jiancheng District, but area with the best ecological environment quality is located in the Ailao Mountain; (3) the area where the ecological environment quality becomes worse is 6 255.35 km<sup>2</sup>, accounting

收稿日期:2020-07-27

修回日期:2020-08-21

资助项目:国家自然科学基金(41461038,41561086,41661082)

第一作者:钟欣呈(1996—),男,云南玉溪人,硕士研究生,研究方向:遥感生态环境监测。E-mail:981438505@qq.com

通信作者:许泉立(1975—),男,湖北武汉人,博士,副教授,研究方向:地理信息系统与智能体建模。E-mail:go2happiness@163.com

for 42.51% of the total area, while the area where the ecological environment quality becomes better is only 2 514.26 km<sup>2</sup>, accounting for 17.08% of the total area; the improved areas with improved ecological environment quality are mainly in the central and southwestern parts of Yuxi City, but the ecological environment quality in the northwest and eastern parts of the city is degraded.

**Keywords:** ecological environment quality; remote sensing ecological index; principal component analysis; change monitoring; Yuxi City

近年来,随着我国城市化进程的不断推进,生态环境保护和经济的高质量发展之间矛盾日益突出并引起了社会的广泛关注。及时准确地监测生态环境变化,评估城市化进程对生态环境的影响,为政府部门在推进城市化进程和发展经济的同时兼顾生态环境效益,在实施生态环境治理措施方面提供一定的参考依据,促进生态环境保护与经济社会可持续发展<sup>[1]</sup>。

随着遥感技术的快速发展,其在生态环境监测与保护中得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。目前,常用的生态环境监测与评价的方法主要分为两类:一类是基于单一指标的生态环境评价法。如李应鑫等<sup>[3]</sup>以 Landsat 遥感影像及气象数据为数据源,探究云南省九大高原湖泊流域 NDVI 时空演变特征及其与气温、降水的关系;谢启姣等<sup>[4]</sup>基于 Landsat 遥感影像反演武汉主城区地表温度,探讨不同城市建设密度下热岛强度的变化;吴欣睿等<sup>[5]</sup>利用温度植被干旱指数,探讨松嫩平原土壤湿度变化对农作物产量的影响。另一类则是综合多个指标的生态评价方法,如包蕊等<sup>[6]</sup>利用人均 GDP、人口密度、植被覆盖度、年降水量等 28 个指标构建生态承载力综合评估指标体系,对锡林郭勒盟生态承载力水平进行动态评价;张沛等<sup>[7]</sup>从生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地胁迫、污染负荷 5 个方面构建 EI 模型对塔里木河干流生态环境变化进行评价。然而在以上生态环境质量评价方法中,单一指标评价方法未能全面反映区域的生态环境状况,多指标评价方法中统计数据难以获取,指标权重受人为因素干扰,存在一定的局限性。而徐涵秋<sup>[8]</sup>提出的基于 Landsat 数据利用主成分分析集成了植被指数、湿度分量、地表温度和建筑指数 4 个指标的遥感生态指数,该指数完全基于遥感影像反演,计算简便,无人为因素影响,具有客观性、多指标、可视化和高精度等优点<sup>[9-11]</sup>,在生态环境监测和保护方面得到了广泛应用。如茹克亚·萨吾提等<sup>[12]</sup>运用遥感生态指数对阜康市生态环境质量进行评价,分析得知干旱自然条件下超负荷开发是导致生态环境质量下降的重要因素;王勇等<sup>[13]</sup>基于遥感生态指数对丹江流域(河南段)生态质量动态变化监测,结果表明近 20 a 丹江流域(河南段)的生态质量得到明显改善,且该区域生态质量

状况与植被覆盖度的增加和建设用地的扩张关系密切。可见,基于遥感生态指数的城市生态环境质量监测已成为该领域的重点研究方向。

综上所述,当前可用于生态环境质量监测的手段非常丰富,但遥感能为多指标体系提供数据支撑和分析手段。因此,基于遥感生态指数来监测和评价城市生态环境质量是当前的一种有效途径。玉溪市位于云南省中部,是著名的高原水乡。但是 21 世纪以来,玉溪市在自然、人口、经济和政策等影响因素下生态环境状况出现了一系列问题,如星云湖、杞麓湖水体富营养化,新平县泥石流灾害,元江县滑坡严重以及气候干旱等对玉溪市生态环境造成的威胁。因此科学开展生态环境质量监测与评价对促进该地区社会经济的可持续发展具有重要意义。本文基于 RSEI 模型对玉溪市进行多尺度、全方位、长时间序列的生态环境状况评价,分析其 2005—2020 年变化特征及趋势,为玉溪市生态环境的保护与综合治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区与数据

1.1.1 研究区概况 玉溪市位于云南省中部,云贵高原西部,地处滇中重要经济区。地理坐标位于北纬 23°19′—24°53′,东经 101°16′—103°09′,地势西北高,东南低,山地、峡谷、高原、盆地交错分布,全市总面积 15 285 km<sup>2</sup>。玉溪属于亚热带半湿润高原季风气候,全年气候温和,年平均气温 17.4~23.8℃,年降雨量 670~2 412 mm。境内拥有抚仙湖、星云湖、杞麓湖 3 个高原湖泊,共有河流 294 条,水资源丰富。全市动植物种类繁多,植被主要以松林、常绿阔叶林为主,拥有 2 个国家森林公园,1 个国家级自然保护区,1 个省级自然保护区和 4 个市级自然保护区,植被覆盖率达 58%<sup>[14]</sup>。根据清华大学 2017 年全球 10 m 土地利用数据集可知,玉溪市土地利用类型主要以耕地、林地为主,建设用地占比较小,主要分布在东部红塔区及三湖流域。随着社会经济的不断发展,不合理的人类活动给生态环境带来了一定的破坏,生物多样性面临着严峻挑战,因此应深入了解生态环境动态变化,合理开展生态环境治理行动。

1.1.2 数据来源及预处理 研究所用遥感影像数据来源于美国地质勘测局([http:// glovis.usgs.gov/](http://glovis.usgs.gov/)),分别选用 2005 年、2010 年的 Landsat-5 TM 影像以及 2015 年、2020 年的 Landsat-8 OLI 影像。为保证研究结果的可靠性,所选遥感影像云量均小于 7%,主要集中在 1—3 月份,影像质量佳(表 1)。在影像预处理方面,对遥感影像进行辐射定标和大气校正,由于玉溪市需要 4 景影像才能完全覆盖,因此,需要对大气校正后的影像进行镶嵌和裁剪等处理。为了能真实反映研究区生态环境状况,需借助徐涵秋<sup>[15]</sup>提出的 MNDWI 掩膜掉大片的水体,得到研究区影像;气象数据主要来源于云南省统计年鉴,主要收集了玉溪市 2005 年、2010 年、2015 年年平均气温与年降水量。

表 1 遥感影像数据

传感器 类型	条带号	行列号	影像日期	云量
TM	129	43	2005-02-09	0
	129	44	2005-02-05	0
	130	43	2005-01-31	0
	130	44	2005-01-31	0
	129	43	2010-02-07	0
	129	44	2010-02-07	0
	130	43	2009-02-11	0
	130	44	2010-02-14	1
OLI	129	43	2015-02-21	0.01
	129	44	2015-02-21	0.24
	130	43	2015-03-16	0.18
	130	44	2015-03-16	0
	129	43	2020-01-18	0.03
	129	44	2020-01-18	6.89
	130	43	2020-03-13	0.01
	130	44	2020-03-13	0

1.2 基于 RSEI 的生态环境质量评价模型

1.2.1 绿 度 本文选用归一化植被指数(NDVI)代表绿度,它与植被覆盖度密切相关,是目前应用最广泛的一种植被指数<sup>[16]</sup>,具体计算公式如下:

$$NDVI=(\rho_{nir}-\rho_{red})/(\rho_{nir}+\rho_{red}) \tag{1}$$

式中: $\rho_{nir}$ 代表 Landsat 影像近红外波段的反射率; $\rho_{red}$ 代表红光波段的反射率。

1.2.2 湿 度 湿度是指地表中植被和土壤水分的含量,通过遥感缨帽变换所得的湿度分量能较好地反映生态系统中植被和土壤的湿度,已被广泛应用于生态环境监测中<sup>[17-18]</sup>。由于本文所选遥感影像类型有所差异,计算公式也有所不同:

$$Wet_{TM}=0.0315\rho_{blue}+0.2021\rho_{green}+0.3102\rho_{red}+0.1594\rho_{nir}-0.6806\rho_{swir1}-0.6109\rho_{swir2} \tag{2}$$

$$Wet_{OLI}=0.1511\rho_{blue}+0.1973\rho_{green}+0.3283\rho_{red}+0.3407\rho_{nir}-0.7117\rho_{swir1}-0.4559\rho_{swir2} \tag{3}$$

式中: $Wet_{TM}$ , $Wet_{OLI}$ 分别代表 TM 和 OLI 遥感影像的湿度分量; $\rho_i$ ( $i=blue, green, \cdots, swir2$ )分别为 Landsat TM 和 OLI 影像蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的光谱反射率。

1.2.3 干 度

$$SI=[(\rho_{swir1}+\rho_{red})-(\rho_{blue}+\rho_{nir})]/[(\rho_{swir1}+\rho_{red})+(\rho_{blue}+\rho_{nir})] \tag{4}$$

$$IBI=(\frac{2\rho_{swir1}}{\rho_{swir1}+\rho_{nir}}-\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir}+\rho_{red}}-\frac{\rho_{green}}{\rho_{green}+\rho_{swir1}})/(\frac{2\rho_{swir1}}{\rho_{swir1}+\rho_{nir}}+\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir}+\rho_{red}}+\frac{\rho_{green}}{\rho_{green}+\rho_{swir1}}) \tag{5}$$

$$NDBSI=(SI+IBI)/2 \tag{6}$$

1.2.4 热 度 热度是指地表温度。采用大气校正法反演地表温度的变化,具有较强的可靠性,计算公式<sup>[19]</sup>如下:

$$L_{\lambda}=[\epsilon B(LST)+(1-\epsilon)L_{\downarrow}]\tau+L_{\uparrow} \tag{7}$$

$$T=[L_{\lambda}-L_{\uparrow}-\tau(1-\epsilon)L_{\downarrow}]/\tau\epsilon \tag{8}$$

$$LST=\frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{T}+1)}-273 \tag{9}$$

式中: $LST$ 代表地表温度( $^{\circ}C$ ); $T$ 代表黑体热辐射亮度; $L_{\lambda}$ 为热红外辐射亮度值; $\epsilon$ 代表地表比辐射率; $\tau$ 为大气透过率; $L_{\uparrow}$ 为大气上行辐射亮度; $L_{\downarrow}$ 为大气下行辐射亮度; $K_1, K_2$ 为常量,对于 Landsat-5 TM 传感器, $K_1=607.76\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$ , $K_2=1260.56\text{ K}$ ,对于 Landsat-8 TIRS 传感器, $K_1=774.89\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$ , $K_2=1321.08\text{ K}$ 。

1.2.5 RSEI 的构建 遥感生态指数采用主成分分析法集成植被指数、湿度分量、建筑指数和地表温度 4 个生态评价指标,分别代表绿度、湿度、干度和热度<sup>[8]</sup>。由于以上 4 个指标量纲不统一,直接进行主成分分析会对最终计算结果造成影响,因此需对各指标进行归一化处理,使其值在 $[0,1]$ 范围内,归一化公式为:

$$NI=(I-I_{min})/(I_{max}-I_{min}) \tag{10}$$

式中: $NI$ 为指标归一化后的的结果; $I$ 为指标值; $I_{max}, I_{min}$ 分别为该指标的最大值和最小值。

对归一化后的 4 个指标进行主成分分析,得到第一主成分 PC1,对 PC1 进一步处理得到的 RSEI 初始值进行归一化处理后得到遥感生态指数,取值范围 $[0,1]$ 之间,值越大,说明生态环境状况越好。

$$RSEI_0=1-PC1 \tag{11}$$

$$RSEI=(RSEI_0-RSEI_{0_{min}})/(RSEI_{0_{max}}-RSEI_{0_{min}}) \tag{12}$$



式中: $RSEI_0$  为 RSEI 初始值; $RSEI_{0\_max}$ ,  $RSEI_{0\_min}$  分别为 RSEI 初始值的最大值和最小值。

### 1.3 生态环境质量变化分析方法

为了能直观地反映玉溪市生态环境质量的空间分布及其变化情况,基于已有的分级标准<sup>[20]</sup>,将 4 期 RSEI 值以 0.2 为间隔划分为差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)、中(0.4~0.6)、良(0.6~0.8)、优(0.8~1.0)5 个等级。并在此基础上,参考《生态环境状况评价技术规范》<sup>[21]</sup>中的生态质量变化分级标准,并结合本研究实际情况,对各时间段的 RSEI 进行差值处理,将变化类型分为显著变差(−1, −0.3]、中等变差(−0.3, −0.15]、轻微变差(−0.15, −0.05]、基本不变(−0.05, 0.05]、轻微变好(0.05, 0.15]、中等变好(0.15, 0.3]和显著变好(0.3, 1]7 个等级。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉溪市生态环境质量时空变化

根据上述公式计算绿度、湿度、干度、热度及 RSEI 结果可分析玉溪市生态环境质量的变化情况(图 1)。在时间尺度上,2005—2020 年玉溪市绿度指标 NDVI 和湿度指标 Wet 均呈现先下降后持续增长的趋势,2020 年 NDVI 平均值高达 0.79,植被覆盖状况显著改善;干度指标 NDBSI 呈上升—下降—上升的波动趋势,但干度指标均值总体下降;热度指标 LST 波动趋势与 RSEI 呈反比,2015 年出现低值 0.31。16 a 间玉溪市生态环境质量呈现出下降—上升—下降的趋势,呈“S”型波动,2010 年遥感生态指数达到最低点,生态环境质量相比 2005 年下降 10.5%,与柳德江等<sup>[22]</sup>利用生态足迹分析方法研究玉溪市 2000—2009 年生态承载力动态变化结果相比,生态环境处于不安全状态具有相似性。

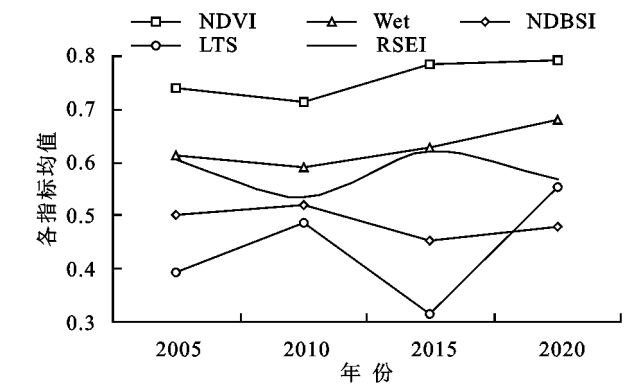


图 1 2005—2020 年单一指标和 RSEI 均值

为进一步验证本文计算的各项指标的精度,本文选取 2005 年、2010 年、2015 年玉溪市年降水量和年平均气温(图 2)。2005—2015 年玉溪市年平均气温呈倒“U”型波动,从 17.76℃ 上升到 17.9℃,年降水量

呈先下降后上升的趋势,由 2005 年的 852.3 mm 上升到 2015 年的 938.7 mm。由此看出,2005—2015 年玉溪市年平均气温与热度指标 LST、年降水量与湿度指标 Wet 变化趋势基本一致。《玉溪市土地利用总体规划(2006—2020 年)》<sup>[23]</sup>中提到,玉溪市 2006—2020 年农用地面积增长 473.61 km<sup>2</sup>,其中林地面积占 58.3%,说明玉溪市植被覆盖率有所上升,这与本文绿度指标 NDVI 变化规律基本一致;新增建设用地 89.67 km<sup>2</sup>,但自然保留地面积下降 563.28 km<sup>2</sup>,说明建设用地小面积增加的同时自然保留地大面积减少,侧面反映出建筑指数 IBI 的小幅增加和裸土指数 SI 大幅下降,最终导致干度指标 NDBSI 小幅下降,这与本文计算结果基本吻合。

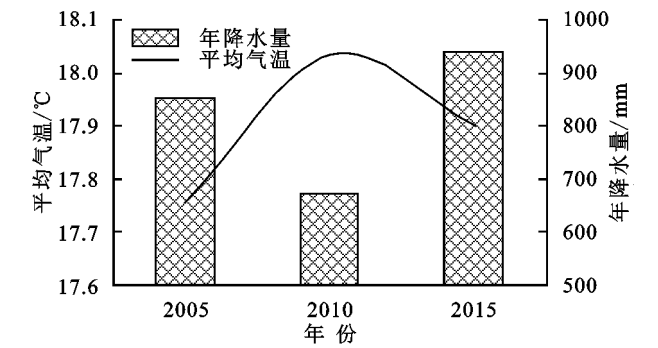


图 2 2005—2015 年玉溪市年平均气温与年降水量

由表 2 可知,从整体上来看,2005—2020 年玉溪市的 RSEI 等级主要以中和良为主,不同等级所占比例分别为 40.65%,48.64%,38.83%,42.61%和 46.78%,33.96%,49.81%,40.97%,尤其在 2015 年两者占比之和高达 88.64%,差和优的占比较小,因此玉溪市的生态环境质量处于中等状态;从单一年份来看,2005 年和 2015 年生态环境状况较好,优、良、中占比之和高达 90% 以上,差和较差占比很小,分别为 0.06%,6.46%和 0.01%,4.6%。2010 年较差和中所占比例达到最高,分别为 16.67%和 48.64%,生态环境状况相对较差。2020 年,差和优占比仍然较低,中占比适中,良所占面积下降较多;从变化情况来看,2005—2020 年,差所占比例呈现上升—下降—上升的趋势,所占面积总体上升,但比例不大;较差和中所占比例同样呈现上升—下降—上升的趋势,但比例较大且均在上升,上升幅度分别为 6.83%和 1.96%;然而良和优所占比例呈现出与中和较差等级相反的变化趋势,所占面积分别减少了 857.75 km<sup>2</sup> 和 448.68 km<sup>2</sup>,说明 RSEI 等级由良和优向中和较差等级转移。综上所述,玉溪市在快速发展城市化进程中对生态环境的保护力度不够,导致生态环境质量有所下降。

从空间分布格局看(图 3),RSEI 等级为差和较差的区域主要分布在玉溪市的西南部,即元江县境

内。元江县是云南三大火炉之一,也是我国最为典型的干热河谷,常年高温少雨,水土流失严重,是导致生态环境质量较差的主要原因;而等级为优的区域主要分布在哀牢山,生态环境质量较好,其主要原因是哀牢山为国家级自然保护区,其森林覆盖率高 达 85.1%,生物种类繁多,生态系统较为稳定。RSEI 等级为中和良的区域在全市境内均有分布,且分布面积较广。2005—2010 年,RSEI 等级为优和良的区域显著减少,等级为中和较差的区域明显增多,生态环境急剧下降,其主要原因是 2010 年大旱,降雨减少,温度上升,造成某些地区植被大面积死亡。2010—

2015 年,RSEI 等级为差、较差和中的区域向等级为优和良转移,说明生态环境质量得到明显改善。2015—2020 年,生态环境质量变化呈现出与 2010—2015 年相反的趋势,玉溪市生态环境质量出现局部恶化,北部和西南部地区尤为明显。总体上来看,16 a 来玉溪市 RSEI 等级为优和良的区域减少,等级为中、较差和差的区域增多,研究区生态环境质量略有下降。《玉溪市土地利用总体规划(2006—2020 年)》<sup>[23]</sup>指出,2006—2020 年玉溪市新增建设用地 8 967 hm<sup>2</sup>,大面积建筑用地的增加是生态环境退化的主要原因之一。

表 2 玉溪市不同时期的生态等级面积及比例

RSEI 等级	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
差	8.90	0.06	14.94	0.10	0.3	0.01	17.69	0.12
较差	951.81	6.46	2456.21	16.67	677.66	4.60	1957.07	13.29
中	5987.87	40.65	7164.62	48.64	5720.53	38.83	6274.37	42.61
良	6890.38	46.78	5002.15	33.96	7337.47	49.81	6032.63	40.97
优	891.51	6.05	92.55	0.63	994.6	6.75	442.83	3.01

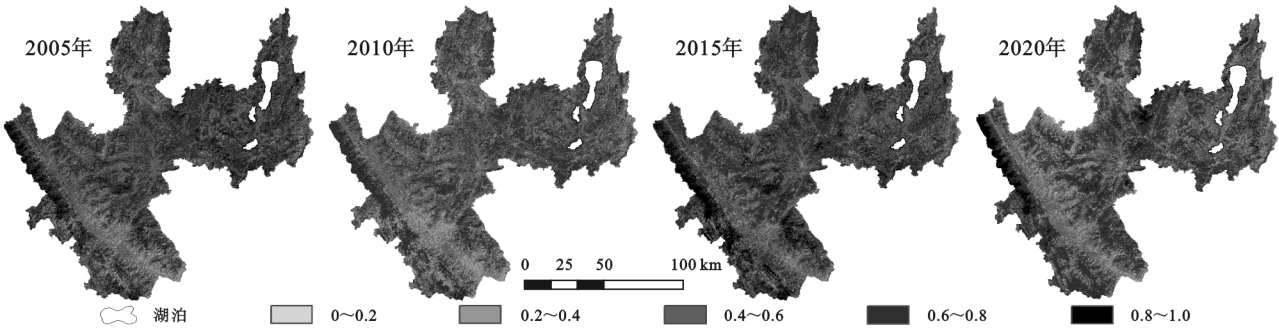


图 3 2005—2020 年玉溪市 RSEI 等级分布

2.2 玉溪市生态环境质量的差值分析

由表 3 可以看出,2005—2010 年玉溪市生态环境状况变好的面积为 454.39 km<sup>2</sup>,占总面积的 3.08%,而生态环境状况变差的面积为 9 490.87 km<sup>2</sup>,占总面积的 64.44%,其中,以降低 1 个等级为主。由此可见,玉溪市在 2005—2010 年生态环境质量有所下降,部分地区生态环境遭到了一定的破坏,因此需在治理生态环境质量差和较差区域的同时应该兼顾对生态环境的保护;2010—2015 年,生态环境状况变好的面积为 10 360.68 km<sup>2</sup>,占总面积的 70.34%,其中,以增加一个等级为主,变差的面积为 736.92 km<sup>2</sup>,占总面积的 5%。与前一阶段相比,变好面积增加,变差面积减小,生态环境质量呈现持续好转态势。说明玉溪市在城市化进程中对生态环境的保护越来越重视,并且取得了一定的成效;2015—2020 年,生态环境状况变好的面积为 1 261.32 km<sup>2</sup>,占总面积的 8.57%,变差的面积为 7 437.89,占总面积的 50.54%,其中下降一个等级的占总面积 41.27%,生态环境状况出现了大面

积的小幅降低。总的来说,玉溪市生态环境质量 2005—2020 年呈现出“下降—上升—下降”的趋势,总体生态环境质量小幅度下降。

从空间变化情况看(图 4),2005—2010 年玉溪市生态环境质量呈显著下降趋势,全市生态环境质量呈不同程度退化,但东部及西南部退化尤为明显;2010—2015 年,玉溪市生态环境得到了很大改善,但抚仙湖、星云湖、杞麓湖三湖流域及红塔区生态环境质量出现小面积退化;2015—2020 年,玉溪市生态环境质量略微下降,不变区域面积较大,显著变差区域主要集中在玉溪市西北部及东部三湖流域。总的来看,玉溪市 2005—2020 年生态环境质量略微下降,变差的区域超过了总面积的 40%,主要分布在东部三湖流域、新平县西北部及红塔区,玉溪市中部和西南部生态环境质量有所改善。《玉溪市城市总体规划(2011—2030)》<sup>[24]</sup>明确指出玉溪市七县两区的发展规划,城市化发展是必然趋势,不透水面面积的增加导致了生态环境的恶化。

表 3 2005—2020 年玉溪市生态环境质量等级变化

类别	级别	2005—2010 年		2010—2015 年		2015—2020 年		2005—2020 年	
		面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
变差	显著变差(-3)	70.32	0.48	8.78	0.06	69.37	0.47	162.52	1.1
	中等变差(-2)	1207.95	8.20	133.67	0.90	1295.70	8.80	1588.51	10.79
	轻微变差(-1)	8212.60	55.76	594.47	4.04	6072.83	41.27	4504.32	30.61
不变	基本不变(0)	4783.93	32.48	3631.89	24.66	6017.18	40.89	5946.63	40.41
	轻微变好(1)	394.14	2.67	7711.72	52.36	1127.66	7.66	2157.67	14.66
变好	中等变好(2)	58.61	0.40	2574.40	17.48	132.14	0.90	346.01	2.35
	显著变好(3)	1.64	0.01	74.56	0.50	1.52	0.01	10.57	0.07

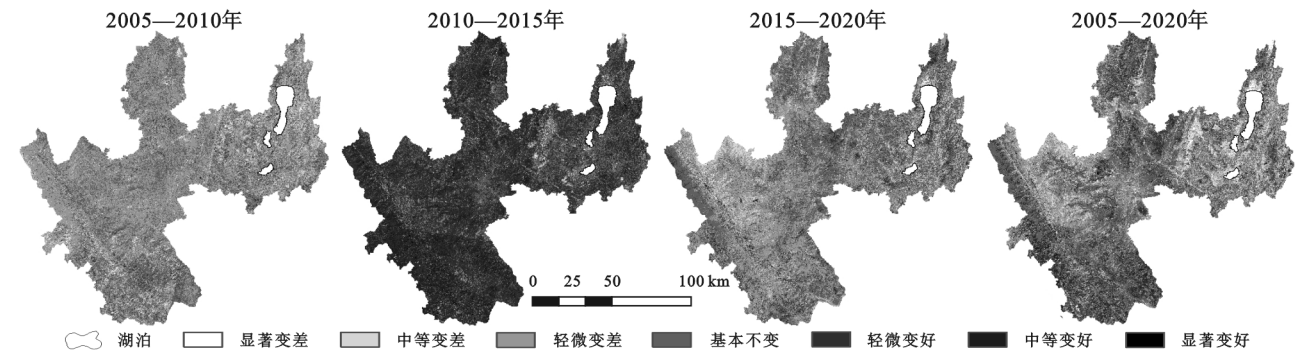


图 4 2005—2020 年玉溪市生态环境变化图

2.3 讨论

2.3.1 遥感生态指数敏感性分析 表 4 为各指标与遥感生态指数之间的相关性。由表 4 可以看出, 2005—2020 年, NDVI, WET, NDBSI, LST 之间平均相关度最高的是干度指标 NDBSI, 4 个年份的均值为 0.64; 平均相关度最低的是热度指标 LST, 4 个年份

的均值为 0.39。4 个年份的 RSEI 与 4 个指标的相关系数均值为 0.77, 比单指标相关度最高的干度分量高 0.15, 比最低的热度分量高 0.38, 比 4 个指标的平均值(0.52)高 0.25。由此可见, RSEI 与各指标之间敏感性较强, 可构建 RSEI 模型来综合反映玉溪市生态环境状况。

表 4 RSEI 与各指标的相关系数矩阵

年份	指标	NDVI	WET	NDBSI	LST	RSEI
2005	NDVI	1				0.76**
	WET	0.41**	1			0.87**
	NDBSI	-0.67**	-0.68**	1		-0.79**
	LST	-0.31**	-0.52**	0.45**	1	-0.67**
2010	NDVI	1				0.80**
	WET	0.47**	1			0.89**
	NDBSI	-0.78**	-0.71**	1		-0.9**
	LST	-0.24**	-0.32**	0.3**	1	-0.42**
2015	NDVI	1				0.92**
	WET	0.37**	1			0.65**
	NDBSI	-0.83**	-0.74**	1		-0.93**
	LST	-0.48**	-0.32**	0.47**	1	-0.66**
2020	NDVI	1				0.92**
	WET	0.43**	1			0.56**
	NDBSI	-0.87**	-0.73**	1		-0.87**
	LST	-0.46**	-0.35**	0.47**	1	-0.77**

注: “\*\*”表示 0.01 显著相关。

2.3.2 遥感生态指数适用性分析 为了分析各年份各指标参数与 RSEI 的关系, 以 RSEI 为因变量, 以 NDVI, WET, NDBSI, LST 为自变量进行逐步回归分析, 建立关系模型。本文采用 3 km×3 km 网格贯

穿全影像的采样方法, 每幅影像采集 10 000 个样点, 足够多的样点可以避免少量样点所带来结果的不确定性。以下是 4 个年份的回归模型(模型均通过了 1% 的显著性检验):



$$\begin{aligned} \text{RSEI}_{2005} = & 0.4559x_1 + 0.5083x_2 - 0.3041x_3 - \\ & 0.3967x_4 + 0.2674 \quad (R^2 = 0.987) \end{aligned}$$

(13)

$$\begin{aligned} \text{RSEI}_{2010} = & 0.3890x_1 + 0.4665x_2 - 0.3070x_3 - \\ & 0.2285x_4 + 0.2521 \quad (R^2 = 0.997) \end{aligned}$$

(14)

$$\begin{aligned} \text{RSEI}_{2015} = & 0.6096x_1 + 0.4256x_2 - 0.3776x_3 - \\ & 0.4568x_4 + 0.1871 \quad (R^2 = 1.000) \end{aligned}$$

(15)

$$\begin{aligned} \text{RSEI}_{2020} = & 0.6335x_1 + 0.3108x_2 - 0.0969x_3 - \\ & 0.6835x_4 + 0.2789 \quad (R^2 = 1.000) \end{aligned}$$

(16)

式中： $x_1, x_2, x_3, x_4$  分别代表 NDVI, WET, NDBSI, LST 的值。

从各年份回归模型中回归系数的绝对值可以看出, NDVI 对遥感生态指数的贡献度最大, 其次是 WET, LST, NDBSI。其中 NDVI 和 WET 系数为正, 说明对 RSEI 起正向作用, NDBSI 和 LST 系数为负, 说明对 RSEI 起负向作用。在逐年的回归模型

中, 正向指标中 NDVI 系数逐年增加, 说明植被覆盖在生态质量的提升中愈发重要, 而 WET 所表现出的影响力相对较弱。负向指标中, LST 的绝对值大于 NDBSI 的绝对值, 说明 LST 对生态质量的抑制更为明显, 侧面反映出地表温度的上升对生态环境质量的破坏程度越来越大。总的来说, NDVI 系数在回归模型中所占权重最大, 说明玉溪市封山育林、植树造林、退耕还林、退耕还草等政策实施结果较为显著。

为了验证上述回归模型的可靠性, 以 2020 年 10 000 个数据样点为例, 构建各指标的三维散点空间分布图来考察各指标与 RSEI 的关系(图 5)。从左图正向指标 NDVI, WET 的三维空间分布图来看, RSEI 高值区主要分布在植被覆盖度较高且水分条件好的区域, 说明植被覆盖的增加以及充足的水分对生态环境质量的改善效果明显; 而右图负向指标 NDBSI, LST 的三维空间分布表明生态环境质量随 NDBSI, LST 的增加而逐渐下降, RSEI 低值区主要集中在高密度建筑区和高地表温度区。综合来看, 该结果与上述回归模型结果相吻合, 模型的适用性较强。

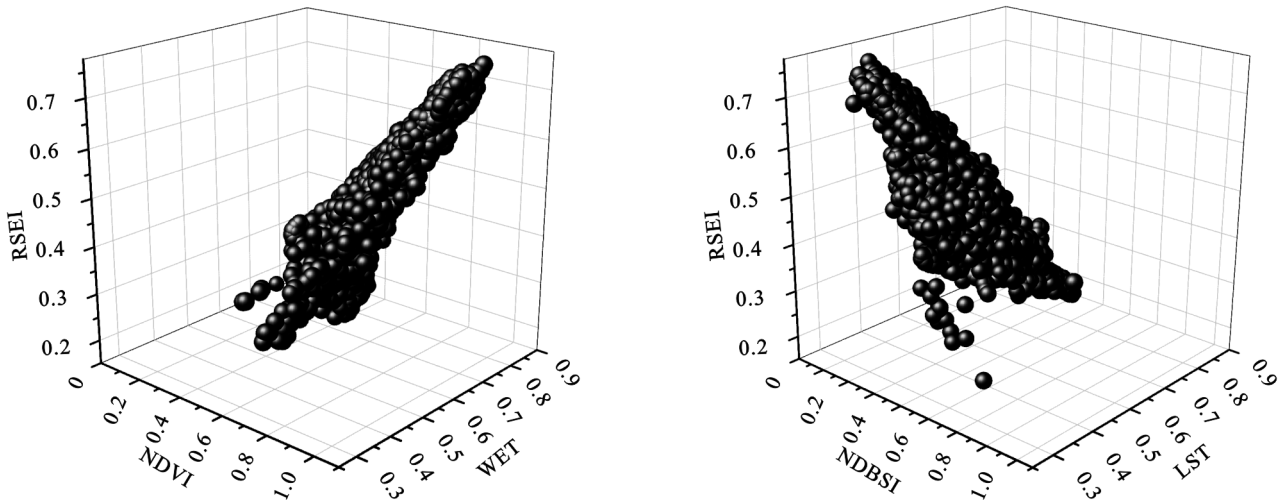


图 5 玉溪市生态环境质量三维散点特征

3 结论

本文基于遥感影像数据采用主成分分析法集成绿度、湿度、干度、热度 4 个指标构建 RSEI 模型, 对玉溪市 2005—2020 年生态质量进行监测和评价, 结果表明:

(1) RSEI 回归模型能较好地反映玉溪市生态环境质量时空变化特征, 其中 NDVI 和 WET 对生态环境质量起正向作用, NDBSI 和 LST 起负向作用。其中, NDVI 系数的绝对值最大, 说明植被覆盖是玉溪市生态环境质量重要的影响因子。

(2) 2005—2020 年, 玉溪市生态环境质量呈现

“下降—上升—下降”的趋势, 呈“S”型波动, RSEI 平均值由 0.605 下降到 0.568, 生态环境质量差和较差的区域面积共增加了 1 014.05 km<sup>2</sup>, 而优和良的区域面积共减少了 1 306.43 km<sup>2</sup>, 生态环境质量小幅度下降, 但总体生态环境质量处于中等水平。

(3) 2005—2020 年, 玉溪市生态环境质量退化区域面积大于改善区域面积, 生态环境质量变差的面积为 6 255.35 km<sup>2</sup>, 占总面积的 42.51%, 变好的面积为 2 514.26 km<sup>2</sup>, 占总面积的 17.08%, 生态等级变化均以变化 1 个等级为主。

(4) 在空间格局方面, 玉溪市生态环境质量较差的区域主要分布在玉溪市元江干热河谷, 生态质量较

好的区域除元江干热河谷及建城区外均有分布,但最好的位于哀牢山。2005—2020 年玉溪市中部和西南部生态环境质量有所改善,但西北部和东部三湖流域及红塔区生态环境质量均出现退化。

研究期间,生态环境质量小幅度下降,生态建设和保护还需进一步提高。城市化进程应合理配置土地资源,优化城市空间布局,提高植被覆盖度。三湖流域内加快推进退田、退塘、退人、退房、还湖、还水、还湿地及生态湿地建设,流域内部湖周边地区,应合理规划绿化区域、完善建城区、工厂等污水处理系统,统筹推进“三湖”径流区山水林田湖草系统治理。此外,还应该加强居民生态环境保护意识,优化生态环境,实现人与自然和谐共生。

本文运用遥感生态指数来监测与评价玉溪市生态环境质量,虽完全依赖遥感数据反演可避免人为因素造成的影响,可全方位、可视化及长时间序列的反映玉溪市近 16 a 来生态环境质量的变化,可为玉溪市生态环境的保护和治理提供科学依据,但仍存在不足之处:由于研究区范围较大,所涉影像较多,难以获取高分辨率、无云且月份相对集中的遥感影像数据;时间跨度较大,忽略了年份之间的细微变化,应缩短时间步长更好地分析生态环境质量的细微变化;生态系统的形成和发展受人为因素与自然因素的影响,应结合多种影响因素共同分析。后期的研究中应根据当前区域生态系统的复杂性,选择更高精度的遥感影像数据,缩短时间步长,结合多种生态影响因素,优化生态评价模型,更好地对研究区生态环境质量进行监测与评价。

参考文献:

[1] 杭鑫,罗晓春,曹云,等.基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响:以南京市为例[J].应用生态学报,2020,31(1):219-229.

[2] 赵少华,刘思含,刘芹芹,等.中国城镇生态环境遥感监测现状及发展趋势[J].生态环境学报,2019,28(6):1261-1271.

[3] 李应鑫,李石华,彭双云.云南省九大高原湖泊流域 NDVI 时空演变及其与气候的响应关系[J].水土保持研究,2020,27(4):192-200.

[4] 谢启姣,欧阳钟璐.武汉主城区热环境特征对城市建设的响应[J].测绘科学,2020,45(8):145-150,163.

[5] 吴欣睿,那晓东,臧淑英.温度植被干旱指数在 2000—2015 年松嫩平原土壤湿度中的应用[J].生态学报,2019,39(12):4432-4441.

[6] 包蕊,邱莎,唐明方,等.基于 DPSIR 模型的锡林郭勒盟生态承载力评价[J].生态经济,2020,36(8):139-145.

[7] 张沛,徐海量,杜清,等.基于 RS 和 GIS 的塔里木河干流生态环境状况评价[J].干旱区研究,2017,34(2):416-422.

[8] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.

[9] 王东升,王小磊,雷泽勇.基于遥感生态指数的阜新市生态质量评估[J].生态科学,2020,39(3):88-94.

[10] 周玲美,王世航.内蒙古杭锦旗生态环境时空变化的遥感监测与评价[J].应用生态学报,2020,31(6):1999-2006.

[11] 农兰萍,王金亮.基于 RSEI 模型的昆明市生态环境质量动态监测[J].生态学杂志,2020,39(6):2042-2050.

[12] 茹克亚·萨吾提,阿不都艾尼·阿不里,李虎,等.基于遥感生态指数模型的阜康市生态环境动态变化监测与评价[J].水土保持研究,2020,27(1):283-289,297.

[13] 王勇,王世东.基于 RSEI 的生态质量动态变化分析:以丹江流域(河南段)为例[J].中国水土保持科学,2019,17(3):57-65.

[14] 玉溪市人民政府.2020 年玉溪市人民政府工作报告[R].玉溪:玉溪市人民政府,2020.

[15] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):79-85.

[16] 孙锐,陈少辉,苏红波.黄土高原不同生态类型 NDVI 时空变化及其对气候变化响应[J].地理研究,2020,39(5):1200-1214.

[17] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. Remote Sensing of Environment, 1985,17:301-306.

[18] Baig M H A, Zhang L F, Tong S, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5:423-431.

[19] 伍健恒,孙彩歌,樊风雷.高原地区城市不透水面与地表温度时空分布研究[J].华南师范大学学报:自然科学版,2020,52(3):92-100.

[20] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.

[21] 中华人民共和国环境保护部.生态环境状况评价技术规范:HJ 192-2015[S].北京:中国环境科学出版社,2015.

[22] 柳德江,张琳莉,殷凤玲.基于生态足迹的玉溪市生态承载力研究[J].生态经济:学术版,2012(1):344-347.

[23] 玉溪市人民政府.玉溪市土地利用总体规划(2006—2020)[Z].玉溪:玉溪市人民政府,2010.

[24] 玉溪市人民政府.玉溪市城市总体规划(2011—2030)[Z].玉溪:玉溪市人民政府,2012.