

# 基于遥感生态指数的东江源区 2000—2019 年 生态环境质量评价

周萌<sup>1</sup>, 刘友存<sup>2</sup>, 孟丽红<sup>3</sup>, 焦克勤<sup>4</sup>, 李奇<sup>2</sup>, 邹心怡<sup>1</sup>

(1.江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000;  
3.赣南师范大学 地理与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 4.中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 对 2000—2019 年东江源区域生态环境变化进行分析, 从而为该区水源地的保护和利用提供科学依据。[方法] 以东江源为研究对象, 选取 2000, 2004, 2009, 2014 和 2019 年 5 期的 Landsat 影像数据, 提取绿色度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)和热度(LST)4 项指标, 采用主成分分析法与遥感生态指数(RSEI)法, 对东江源生态环境质量进行了评价分析。[结果] 2000—2019 年研究区的 RSEI 指数分别为 0.356, 0.538, 0.332, 0.608 和 0.637, 生态环境质量呈现上升、下降和上升趋势, 总体上生态环境质量明显改善。生态环境较好的区域主要分布在植被覆盖率较高的中部和东南部, 较差的区域主要分布在人类活动密切的东部和西北部的城镇区。研究区内优良等级的生态环境质量占主导地位, 其面积比例由 2000 年的 0.204 9% 上升到 2019 年的 92.346 4%, 生态环境明显变好。热度(LST)和干度指标(NDBSI)重心偏移变化较小, 为 1.616 km 和 1.482 km, 而绿色度(NDVI)和湿度指标(WET)受人口密度和开发程度的影响, 绿地分布和土壤含水量随着建设用地的开发而开始分散, 使偏移量增大。[结论] 在 2000—2019 年, 除城市交通造成周边的环境质量下降外, 其余地区较之前都有明显的改善。植被覆盖和城市用地之间的关系是造成东江源生态环境变化的主要成因。

**关键词:** 遥感生态指数; 生态环境质量; 时空变化; 重心偏移; 东江源

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)04-0231-10

**中图分类号:** X826, X87

**文献参数:** 周萌, 刘友存, 孟丽红, 等. 基于遥感生态指数的东江源区 2000—2019 年生态环境质量评价 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 231-240. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.032; Zhou Meng, Liu Youcun, Meng Lihong, et al. Evaluation of ecological environment quality of Dongjiang River headwaters based on Remote Sensing Ecological Index during 2000—2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 231-240.

## Evaluation of Ecological Environment Quality of Dongjiang River Headwaters Based on Remote Sensing Ecological Index During 2000—2019

Zhou Meng<sup>1</sup>, Liu Youcun<sup>2</sup>, Meng Lihong<sup>3</sup>, Jiao Keqin<sup>4</sup>, LI Qi<sup>2</sup>, Zou Xinyi<sup>1</sup>

(1.School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi

University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2.School of Resources and

Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;

3.College of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;

4.Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological environmental changes in the headwaters of Dongjiang River in 2000—2019 were analyzed to provide scientific basis for the protection and utilization of the water source area. [Methods] Based on Landsat image data of 2000, 2004, 2009, 2014 and 2019, four indexes including green degree (NDVI), humidity (WET), dryness (NDBSI) and heat (LST) were extracted. Principal component

**收稿日期:** 2021-01-18

**修回日期:** 2021-05-11

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“稀土矿区典型流域水沙过程与氮氮及重金属多界面迁移机制研究”(41861002); 江西省自然科学基金资助项目(20202BABL203031); 江西省教育厅科技项目(GJJ202015); 江西省创新创业高层次人才“千人计划”项目(JXSQ2018106054)

**第一作者:** 周萌(1997—), 女(汉族), 江西省上饶市人, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境遥感。Email: 1915573707@qq.com。

**通讯作者:** 刘友存(1977—), 男(汉族), 河北省迁安市人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事流域水资源与水环境方面的教学研究工作。Email: liuyoucun@126.com。

analysis and remote sensing ecological index (RSEI) were used. The ecological environment quality of the headwaters of Dongjiang River was evaluated and analyzed. [Results] From 2000 to 2019, the RSEI index in the study area was 0.356, 0.538, 0.332, 0.608 and 0.637, respectively. The ecological environment quality showed an upward trend, a downward trend and an upward trend. Overall, the ecological environment quality was significantly improved. The regions with better ecological environment were mainly distributed in the central and southeastern areas with higher vegetation coverage, while the regions with worse ecological environment were mainly distributed in the eastern and northwestern urban areas with close human activities. In the study area, the ecological environment quality of excellent level was dominant, and its area proportion had increased from 0.204 9% in 2000 to 92.346 4% in 2019, indicating that the ecological environment had significantly improved. The shift of gravity center of heat (LST) and dryness index (NDBSI) was 1.616 km and 1.482 km, while the shift of green density (NDVI) and moisture index (WET) was affected by population density and development degree. The distribution of green land and soil moisture began to scatter with the development of construction land, which increased the shift. [Conclusion] From 2000 to 2019, except for the deterioration of the surrounding environmental quality caused by urban transportation, the rest of the region had significant improvement compared with the previous period. The relationship between vegetation cover and urban land use was the main cause of ecological environment change in the headwaters of Dongjiang River.

**Keywords:** remote sensing ecological index; ecological environment quality; spatiotemporal variation; center of gravity deviation; Dongjiang River headwaters

生态环境质量状况与人类生活息息相关<sup>[1]</sup>,当前社会经济的快速发展,人类的物质生活水平显著改善,对于环境质量的要求也不断提高,因此正确认识和评价流域生态环境状况对生态环境保护和水资源高效利用具有十分重要的意义<sup>[2]</sup>。目前,基于单一指标的评价方法是区域生态环境质量评价的常用方法,如相对指标法<sup>[3]</sup>、模糊评价法<sup>[4]</sup>、指数评价法<sup>[5]</sup>和相关分析法等<sup>[6]</sup>。2006 年国家环保总局提出了评价一个地区的生态环境质量状况的生态环境质量指数(EI, ecological index)<sup>[7]</sup>。然而,EI 指数往往只用单一数值表示研究区域整体的生态环境质量情况,且其指标权重的确定存在一定的主观性,对于反映其内部的生态环境状况的差异特征存在一定的复杂性。如何运用综合指标对区域内部生态环境状况进行准确监测已成为当前生态环境研究领域的热点。近年来,随着遥感技术的广泛应用,为区域生态环境研究提供了实时监测和准确评价的可能<sup>[8]</sup>。徐涵秋<sup>[9]</sup>提出了基于 Landsat-TM 影像的 RSEI (remote sensing based ecological index)的概念,并通过耦合一个地区的地表湿度(WET)、干度(NDBSI)、热度(LST)和绿度(NDVI)4 项与人类活动息息相关的生态环境指标,以福州市主城区为例,建立了区域生态环境质量评价体系,研究表明,新建立的生态指数能比单一指标更好地综合代表生态环境的变化情况。刘智才等<sup>[10]</sup>采用遥感生态指数对杭州市的城市生态环境变化进行了分析,印证了建设用地是影响杭州市生态

质量最重要的因素。Estoque 等<sup>[11]</sup>利用 Landsat 8 OLI/TIRS 探讨了大都市城区不透水表面和绿地的丰度和空间模式之间的关系,并发现不透水地表与地表温度有显著相关性,对东南亚大城区的城市生态规划提供参考价值。Goward 等<sup>[12]</sup>利用遥感观测获取陆地土壤水分并结合地表温度,评估了生态土壤与温度随土壤湿度的变化而变化,研究结果可为后续土壤湿度条件在评估生态环境方面有着重要作用。Andrew 等<sup>[13]</sup>人利用 VHR TIR 数据在较低分辨率下识别地表温度(LST),并用于定位城市热岛效应。Caccamo 等<sup>[14]</sup>人利用 MODIS 监测澳大利亚新南威尔士州悉尼盆地火灾易发区的森林植被类型的干旱情况,发现光谱指数能为物质植被类型提供最合适的干旱指标。总之,遥感技术应用于在城市生态环境领域的研究都取得了较好的成果<sup>[15]</sup>,然而综合利用多评价指标进行的研究,尤其是针对于流域<sup>[16]</sup>尺度的生态环境质量变化的研究更不多见。东江源流域作为粤港地区主要的饮用水源,流域的生态环境安全事关粤东尤其是港澳地区的饮水安全和可持续发展,而如何监测流域的环境变化及对其生态环境进行保护显得尤为重要。因此,本文选择江西省东江源区作为研究区,采用 Landsat 影像集成耦合各时段的 RSEI,对 2000—2019 年东江源区域生态环境变化进行长时间序列的分析,探讨了各指标重心偏移情况<sup>[17]</sup>及研究区的社会经济发展<sup>[18]</sup>状况,进而分析其生态环境的驱动因素,从而为东江源水源地的保护和利用提供合理的科学依据和数据支撑。

# 1 研究区概况

东江源位于江西省南部,主要包括寻乌水和定南水两条支流。研究区位置介于 114°47′36″—115°52′36″E 与 24°33′—25°12′18″N 之间,涉及江西省寻乌和定南两县的大部分地区以及安远、龙南和会昌三县的小部分地区。地势地形以低山和丘陵为主,地势上东、北和西部高,南部低(图 1)。东江源区近似扇形,东西宽 110.0 km,南北长 95.5 km,江西省境内面积 3 524.0 km<sup>2</sup>,约占东江流域总面积的 13.0%。东江源区位于亚热带南缘,是典型的亚热带丘陵山区湿润季风气候区。

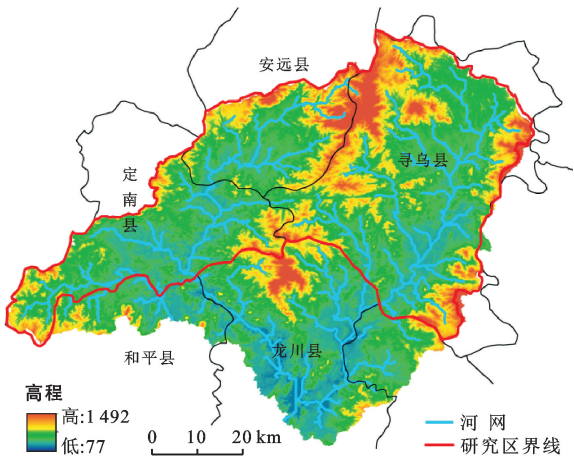


图 1 东江源区域概况

# 2 研究数据与方法

## 2.1 数据源及预处理

为了避免植被生长状况不同和下垫面要素各异

造成的影响,同时使分析研究具有可比性,并考虑了云量和数据精度要素。本文选取 2000,2004,2009,2014 年和 2019 年秋季 Landsat 遥感影像作为主要的数据源(表 1)。同时,以东江源区的行政区划矢量文件、DEM 图和重心偏移图以及东江源区社会经济发展等相关资料作为补充。运用 ENVI 遥感图像处理软件对 5 期影像进行预处理,主要包括:辐射定标、大气校正和几何校正。从而减少不同时相影像在地形、光照和大气等方面的差异以及保证影像间空间叠加分析的准确性<sup>[19]</sup>。

表 1 东江源区遥感影像数据信息

序号	成像日期	卫星/传感器	轨道号	云量	波段数
1	20001102	Landsat-5/TM	121~043	0.01	7
2	20041012	Landsat-5/TM	121~043	0	7
3	20091026	Landsat-5/TM	121~043	0.12	7
4	20141008	Landsat-8/OLI	121~043	3.14	11
5	20190920	Landsat-8/OLI	121~043	0	11

## 2.2 研究方法

2.2.1 RSEI 的计算 相比 2006 年国家环保总局颁发的《生态环境状况评价技术规范》中的生态环境状况指数 EI,RSEI 避免了人为因素的影响<sup>[7]</sup>。RSEI 除了可以定量评价区域的生态环境质量外,还可以对研究区的生态环境质量进行可视化,同时支持对研究区生态环境质量进行时空变化分析、建模和预测,从而弥补了现有技术存在的不足<sup>[20]</sup>。其 4 项指标包括 K—T 变换的湿度分量(Wet)表征的湿度指标<sup>[21-22]</sup>,植被指数(NDVI)表征的绿色指标<sup>[23]</sup>,地表温度(LST)表征的热度指标<sup>[24]</sup>,建筑—裸土指数(NDBSI)表征的干度指标(表 2)<sup>[25-26]</sup>。

表 2 RSEI 评价指标及其计算公式

指标	计算公式
湿度	$\text{Wet(Landsat 5\_TM)}=0.031\ 5\rho_B+0.202\ 1\rho_G+0.310\ 2\rho_R+0.159\ 4\rho_{\text{NIR}}-0.680\ 6\rho_{\text{SWIR1}}-0.610\ 9\rho_{\text{SWIR2}}$ $\text{Wet(Landsat 8\_OLI)}=0.151\ 1\rho_B+0.197\ 3\rho_G+0.328\ 3\rho_R+0.340\ 7\rho_{\text{NIR}}-0.711\ 7\rho_{\text{SWIR1}}-0.455\ 9\rho_{\text{SWIR2}}$
绿色	$\text{NDVI}=\frac{\rho_{\text{NIR}}-\rho_R}{\rho_{\text{NIR}}+\rho_R}$
热度	$L_6=\text{gain}\times\text{DN}+\text{bias},\quad T=\frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_6}+1\right)},\quad \text{LST}=\frac{T}{1+\frac{\lambda T}{\alpha}\ln\epsilon}$
干度	$\text{NDBSI}=\frac{\text{SI}+\text{IBI}}{2},\quad \text{SI}=\frac{(\rho_{\text{SWIR1}}+\rho_R)-(\rho_{\text{SWIR1}}+\rho_B)}{(\rho_{\text{SWIR1}}+\rho_R)+(\rho_{\text{SWIR1}}+\rho_B)},\quad \text{IBI}=\frac{\frac{2\rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{SWIR1}}+\rho_{\text{NIR}}}-\left(\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}}+\rho_R}+\frac{\rho_G}{\rho_G+\rho_{\text{SWIR1}}}\right)}{\frac{2\rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{SWIR1}}+\rho_{\text{NIR}}}+\left(\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}}+\rho_R}+\frac{\rho_G}{\rho_G+\rho_{\text{SWIR1}}}\right)}$

注: $\rho_B,\rho_G,\rho_R,\rho_{\text{NIR}},\rho_{\text{SWIR1}},\rho_{\text{SWIR2}}$  分别代表经辐射定标后传感器 TM 第 1,2,3,4,5,7 波段及 OLI 第 2,3,4,5,6,7 波段的反射率; $L_6$  为热红外 6 波段在传感器中的辐射值;DN 为灰度值;gain,bias 为 6 波段的增益与偏置值; $T$  为传感器温度值; $K_1,K_2$  为定标参数; $\lambda$  为热红外 6 波段的中心波长, $\lambda=11.5\ \mu\text{m}$ ; $\alpha=1.438\times10^{-2}\ \text{mK}$ ; $\epsilon$  为地表比辐射率;SI 为裸土指数;IBI 为建筑指数。下同。

2.2.2 综合指标的构建 RSEI 是运用第一主成分分析方法(PCA)来耦合湿度、绿色、热度和干度 4 项

指标,并集成各指标的权重而得到的综合指数。为了避免主成分分析造成的结果偏差,在进行主成分分析



前,需要对 4 项指标进行归一化处理,其计算公式为:

$$NI_i = \frac{(I_i - I_{\min})}{(I_{\max} - I_{\min})} \tag{1}$$

式中: $NI_i$ 为正规化后的某一指标值; $I_i$ 为该指标在像元  $i$  的值; $I_{\max}$ 为该指标的最大值; $I_{\min}$ 为该指标的最小值。

其次,为使湿度分量能够真实的表征地面的湿度条件,采用改进的归一化水体指数(MNDWI)<sup>[27]</sup>实现水体信息的掩膜,从而避免大面积水体影响 PCA 的荷载分布。而后对新的影像进行主成分分析,并保留方差最大的第一主成分,即初始生态指数  $RSEI_0$ 。

$RSEI_0 = 1 - \{PC_1[f(Wet, NDVI, NDBSI, LST)]\}$  (2)

最后,对  $RSEI_0$  进行归一化得到值域为 $[0, 1]$ 之间的  $RSEI$ ,其计算公式为:

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{\min}}{RSEI_{\max} - RSEI_{\min}} \tag{3}$$

$RSEI$  值越趋近于 1,代表生态环境质量越优,反之越差。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态环境的时间变化分析

通过各时段指标和  $RSEI$  统计指标(表 3),可以发现:过去 20 a 东江源生态环境质量总体上呈现向好趋势。从不同时段来看, $RSEI$  均值由 2000 年的 0.356 上升到 2004 年的 0.538,2009 年又下降到 0.332,2019 年又上升到 0.637,20 a 间上升了 44.1%。从不同指标来看,绿度和湿度指标的均值是先降后升,而归一化后的干度和热度指标先升后降,这是符合实际情况的。结合研究区的行政区划和社会经济发展状况来看,定南县历市镇和寻乌县文峰乡的绿度变化最为明显,其次为寻乌县澄江镇、吉潭镇和留车镇以及安远县孔田镇。主要原因是这些区域属于城镇地区,植被覆盖度较低,导致  $NDVI$  值较低。湿度较低的区域主要集中在流域附近的居民地,而在植被覆盖度较高的区域,土壤含水量多,湿度分量较大。干度分量的变化主要受土壤和建筑物的影响,2000 年地表多为裸土,造成地表严重干化。2004—2009 年,开荒种地和建造房屋等城镇化的发展导致用地面积不断扩大,地表干化相较之前具有明显的升高。近年来为保护东江源的生态环境,当地政府采取了部分居民搬迁,使建筑用地和裸地面积减少,干化程度下降,生态环境好转。热度指标的高温区主要集中在寻乌县文峰乡和留车镇等城镇区和裸地区,而植被覆盖较多的地方,温度是适宜的。在东江源  $RSEI$  分布图(图 2)中也体现出相应的情况。相较于 2000 年,2004 年

表示生态环境差的红色区域随着城市建设用地的扩张而逐渐扩散,且分布范围较广。在 2009 年部分区域开始出现好转,主要在寻乌县文峰乡和安远县孔田镇与三百山镇。同时在 2009—2014 年定南县境内前期受山洪灾害影响导致历市镇的生态环境出现恶化趋势。而在 2014 年开始对山洪灾害区进行防护和整治工作,到了 2019 年橙红区域逐渐被蓝绿区域取代,使研究区的生态环境得到大大改善。从 5 期  $RSEI$  分布图来看,在 20 a 间东江源区的生态环境是逐渐好转的,尤其是在 2014 年之后,生态环境保护工作成效显著,大部分区域的生态环境质量明显提升。因此,所建立的  $RSEI$  生态指数得到的结果与 4 项指标所描述的结果相吻合,故可以综合反映研究区的生态环境质量。

表 3 东江源区各时段各指标和  $RSEI$  的统计值

年份	指 标	WET	NDVI	NDBSI	LST	RSEI
2000	最小值	-1.000	0.472	-0.349	4.443	0.000
	最大值	0.140	0.883	0.035	41.133	1.000
	均 值	-0.007	0.678	-0.187	17.033	0.356
	标准差	0.028	0.159	0.112	2.497	0.085
2004	最小值	-1.000	-0.991	-0.393	15.466	0.000
	最大值	0.106	0.998	0.425	39.512	1.000
	均 值	-0.006	0.634	-0.245	25.169	0.538
	标准差	0.026	0.148	0.117	2.411	0.117
2009	最小值	-0.616	0.527	-0.417	7.288	0.000
	最大值	0.249	0.921	0.498	43.798	1.000
	均 值	-0.006	0.724	-0.241	25.929	0.332
	标准差	0.028	0.197	0.133	2.592	0.028
2014	最小值	-0.838	-0.822	-0.902	5.930	0.000
	最大值	0.225	0.847	0.804	42.908	1.000
	均 值	-0.019	0.731	-0.244	25.855	0.608
	标准差	0.041	0.172	0.168	3.097	0.092
2019	最小值	-0.753	-0.992	-0.903	19.369	0.000
	最大值	0.262	0.887	0.992	48.991	1.000
	均 值	-0.013	0.778	-0.273	29.299	0.637
	标准差	0.036	0.152	0.150	2.500	0.059

依据统计的各等级生态指数面积比例(表 4)和生态指数分级(图 3)。在时间尺度上,2000—2019 年优和良生态等级的面积比例上升了 46.070 7%,表明 20 a 间研究区生态环境在不断好转。生态级别为优的面积逐年递增,2019 年最大为 1 953.435 6 km<sup>2</sup>,比例 56.283 1%,2000 年最小,比例 0.000 3%。2000—2019 年为中和良的生态等级呈现先上升后下降,2019 年为中的生态等级最小,面积为 230.913 km<sup>2</sup>,比例 6.653 2%,2014 年良等级比例最大为 75.145 9%。20 a 间生态级别为差和较差的面积比例明显降低,2014 年比例最小 0.308 7%,2000 年最大 74.254 9%。所述的实际数据验证了东江源生态环境状况呈现先下降后



上升的趋势,其中 2000—2009 年是研究区生态恶化的 10 a,此后,生态环境明显的改善。从生态指数分级图可以看出,研究区生态级别较优的地区位于东北部的桧髻钵山、东部的项山甌和西南部的岢美山等地。而以天然林地和植被覆盖为主的山区,湿度和绿度指标均较高。生态级别较差的地区主要位于寻乌县文峰乡、澄江镇和留车镇,定南县历市镇以及安远县孔田镇和三百山镇等主城区,植被覆盖度较低的城

市建设用地属于典型的热岛区。2000 年环境质量处于较差的等级,2000—2004 年有所好转,而 2004—2009 年,主城区开始前期发展,城市扩张和道路建设以及高耗能生产企业快速发展等造成生态环境质量下降。2009 年之后,当地政府环保部门意识到了环境保护的重要性,相继出台了一些生态环境保护的政策,如人口迁移和水源地保护等措施,使得东江源生态环境近些年来发生了明显的变化。

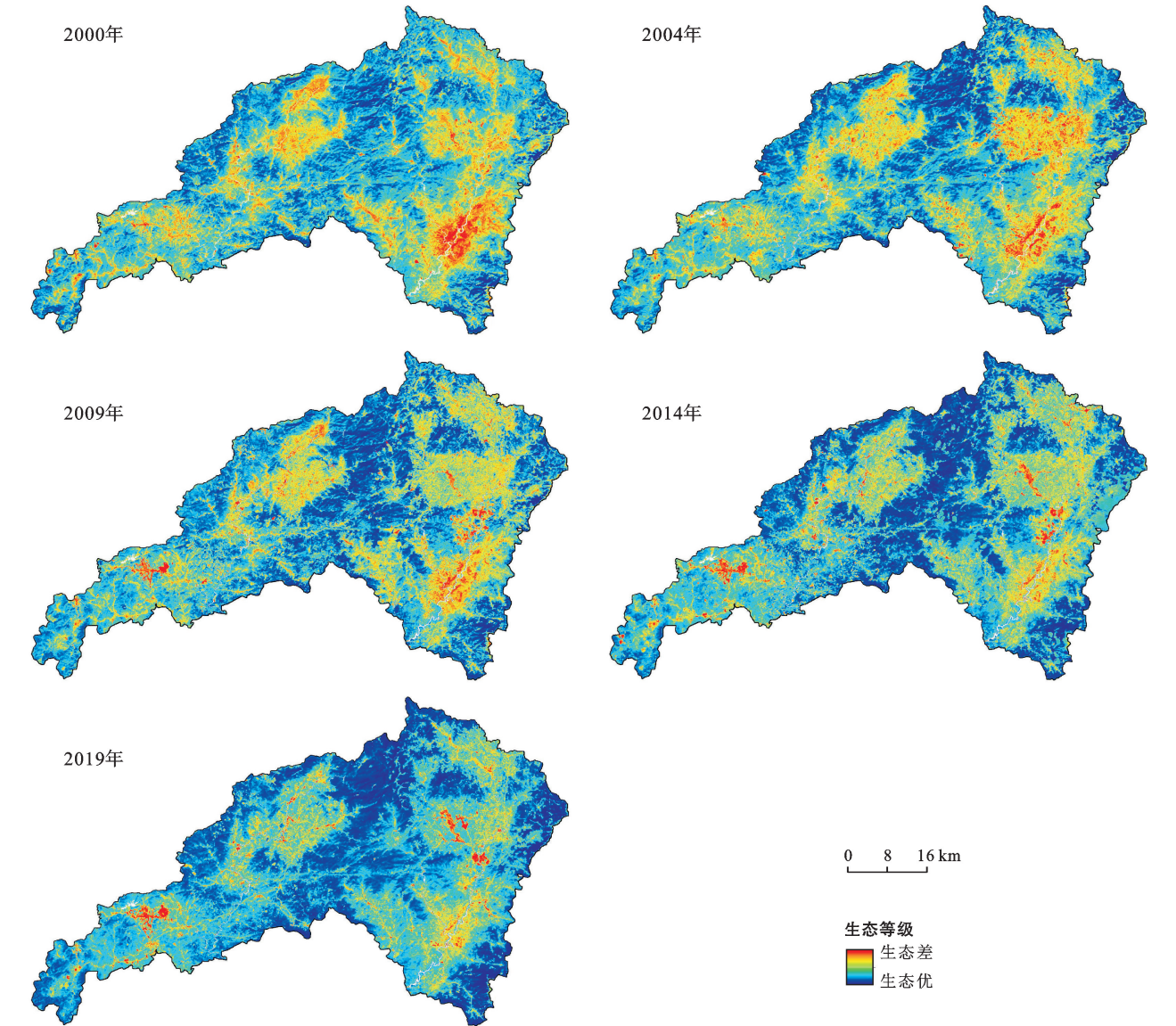


图 2 东江源区各时期 RSEI 分布

表 4 东江源各时段生态等级和面积变化比例

生态等级	2000 年		2004 年		2009 年		2014 年		2019 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
差[0,0.2]	12.820 5	0.369 4	13.866 3	0.399 5	0.322 2	0.009 3	0.038 7	0.001 1	0.022 5	0.000 6
较差(0.2,0.4]	2 564.349 3	73.885 5	549.089 1	15.820 7	30.076 2	0.866 6	10.677 6	0.307 6	14.182 2	0.408 6
中(0.4,0.6]	865.915 2	24.949 2	1 744.695 9	50.269 2	783.000	22.560 2	486.768 6	14.025 1	230.913	6.653 2
良(0.6,0.8]	7.101	0.204 6	1 142.663 4	32.923 1	2 399.411 7	69.133 2	2 608.094 7	75.145 9	1 251.638 1	36.062 9
优(0.8,1]	0.009 9	0.000 3	0.205 2	0.005 9	237.388 5	6.839 8	344.613 6	9.929 2	1 953.435 6	56.283 5

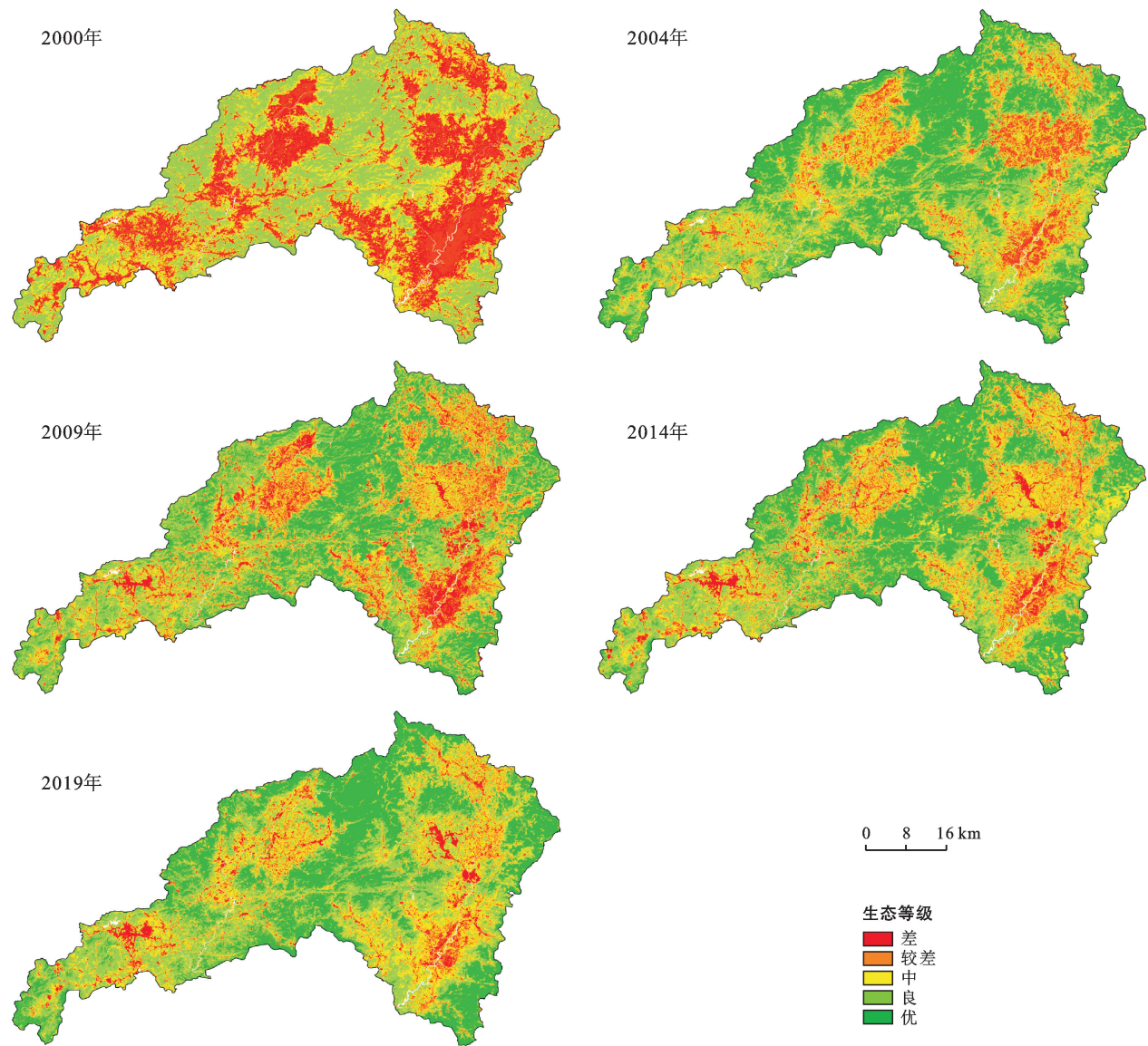


图 3 东江源区 RSEI 分级的空间分布

3.2 生态环境的空间变化分析

利用各项指标的重心偏移可以从宏观上分析东江源生态环境的空间变化,有利于分析 4 项指标在空间上的具体偏移量。由东江源 4 项指标重心偏移分析(表 5)可知,每项指标在不同的时段均存在着偏移。对于 NDBSI 和 LST 来说,总的重心偏移量较小,分别为 1.616 km 和 1.482 km。而就 NDBSI 来说,2004—2009 年和 2009—2014 年两个时段的偏移量较大,达到了 5.0 km 以上。而对于 LST 来说,只有 2009—2014 年的重心偏移量较大,达到了 5.0 km 以上。究其原因,2009 年、2014 年两个时段是城市化快速发展阶段,也是各种工业化产业崛起的时期,土地利用不断扩张,即造成重心偏移。对于 NDVI 和 WET 来说,总体上偏移量较大。而就 NDVI 来说,前 10 a 整体上偏移比较均衡。但在 2014—2019 年重心

偏移减小很多,说明在上一时段的基础上植被覆盖未出现较大变化。而就 WET 来说,在 2009—2014 年重心偏移达到最大,为 29.607 km。在 2004—2009 年重心偏移最小,为 5.657 km。对于 NDVI 和 WET 的重心偏移变化可能的原因是:城镇化规模扩大,人口密度和开发密度不断增大,绿地分布和土壤含水量随着建设用地的开发而开始分散,从而使得植被和土壤含水量也随之变化,故存在上述的差异。

表 5 研究区各指标重心偏移量 km

时 段	指 标			
	NDBSI	LST	NDVI	WET
2000—2004 年	1.528	2.271	15.472	26.028
2004—2009 年	5.767	1.365	18.069	5.657
2009—2014 年	5.326	5.360	16.227	29.607
2014—2019 年	0.579	3.795	3.146	13.208
2000—2019 年	1.616	1.482	16.668	13.969



从重心偏移(图 4)也可以看出,绿度和湿度指标变化幅度较大,且规律性不强。对于绿度而言,NDVI 主要向西部移动,但偏移量不大,这可能与东江源头保护区位置有关,作为水源地保护区,附近居民较少,植被生长良好;而湿度的变化主要向东部的城镇区靠近,城区的发展与居民生活都离不开水,且现在大力

发展文明城市,城区绿化环境越来越好,土壤湿度增强。近几年,西南部的定南县经历洪灾后重建,建设用地增加,植被数量较少,导致干度和热度指标往西部移动。这 4 项指标变化主要与城镇地区每年的发展不同而存在差异,相较于绿度和湿度指标,干度和热度指标分布比较集中,且变化曲线较平缓。

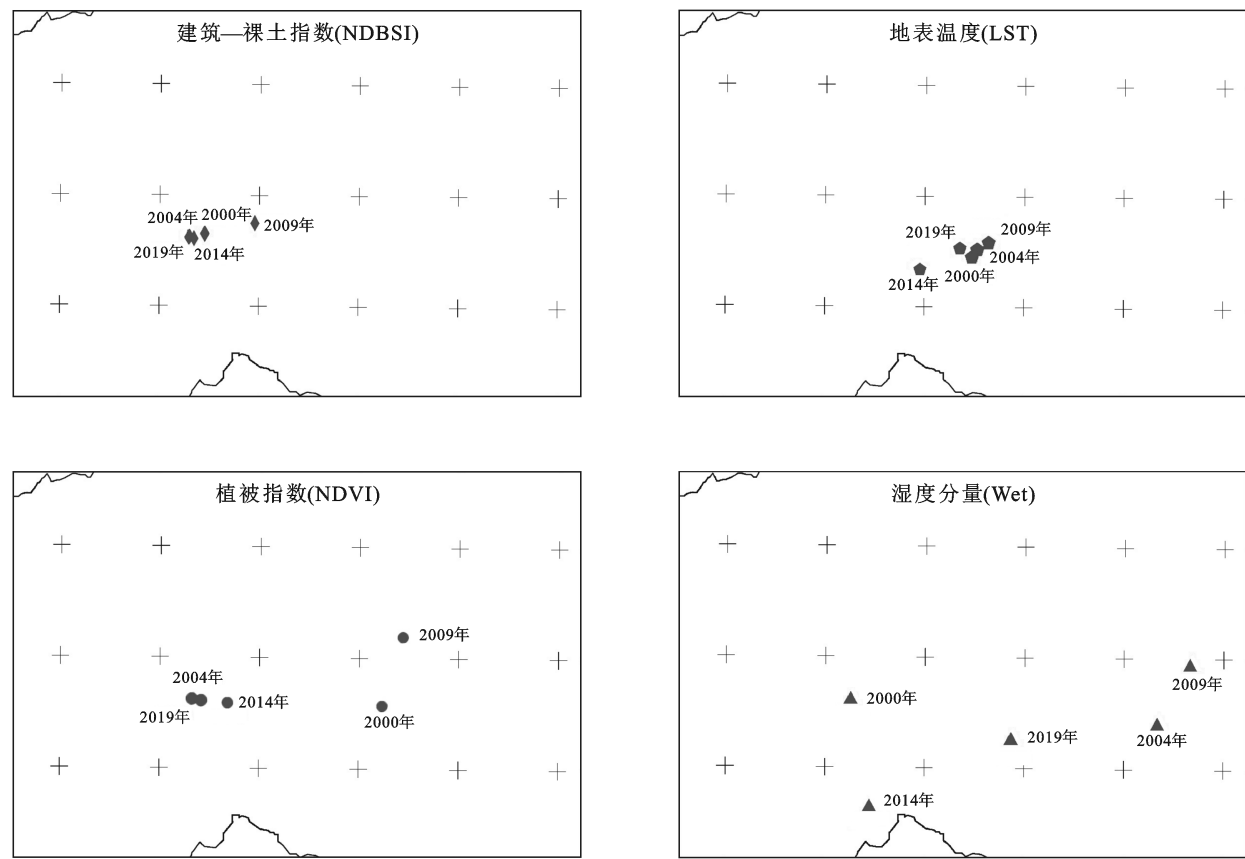


图 4 东江源区各指标重心偏移

### 3.3 生态环境的影响因素分析

3.3.1 主成分分析结果 PCA 集成了单一指标的原始信息,并能够真实地反映生态环境状况,此方法更加符合生态学客观规律。因此,由主成分分析结果可知(表 6),5 个时段的 4 项指标对  $PC_1$  均有一定的荷载,且贡献度均达到 85% 以上,说明  $PC_1$  能够综合 4 项指标绝大部分的有用信息,其他分量( $PC_2$ - $PC_4$ )虽有部分贡献度,但是相对  $PC_1$  来说, $PC_2$ - $PC_4$  中的 4 项指标值存在忽大忽小的现象,从而可能忽略了某些重要的信息。而在  $PC_1$  中,代表湿度的 WET 和绿度的 NDVI 指标呈现正值,说明对生态环境起正面作用。代表干度的 NDBSI 和热度的 LST 指标呈现负值,说明对生态环境起负面作用。这与实际情况是相符的。但对于其他分量来说,其指标值有正有负,没有规律可循。因此,难以解释生态环境的实际状况。

由此可见,相对于其他分量, $PC_1$  能够集成 4 项指标的绝大部分信息,并具有明显的优势,即可用来创建生态指数。

3.3.2 生态环境质量的动态监测 对各时段的 RSEI 指数进行差值分析来表征研究区的环境变化幅度,并将变化幅度分为明显变差、略微变差、无明显变化、略微变好和明显变好 5 个等级,其空间分布如图 5 所示。20 a 间生态环境明显变差区域主要分布在定南县历市镇和寻乌县文峰乡中心城区以及安远县孔田镇周边城区,而明显变好区域主要分布在安远县孔田镇中心城区、寻乌县水源乡和澄江镇周边城镇区域以及文峰乡和留车镇主城区附近的环山区。说明 20 a 间城镇周边随着城镇化扩张生态环境恶化的同时,其周边城区生态环境却在改善。其中,在 2000—2004 年,生态环境较好的区域主要是城镇周边的林地山



区,而城镇中心的生态环境在不断恶化。在 2004—2009 年,生态环境改善区域分布在各主城区周边的县镇,说明人们已经开始意识到了生态环境保护的重要性。在 2009—2014 年和 2014—2019 年,由于其空间分布影像图受 2014 年影像云量的影响,明显变差区域除云层覆盖地区外,主要是城镇周边的建设用地和交通设施使得生态环境恶化。但总体上来看,从 2009 年之后,生态环境的保护措施已经开始显现成效,大部分区域的生态环境质量具有明显的改善。从 2000—2019 年的生态环境变化监测结果(图 5)可以明显看出,研究区生态环境较差区域为定南县历市镇和寻乌县文峰乡部分零碎地区以及安远县孔田镇附近的小区域。但是,3 个县不管是城镇区还是周边林地区,生态环境质量均有明显的改善,特别是东江源头的桎髻钵山,说明东江源头生态环境保护工作取得了显著成效。

### 4 结 论

(1) 从研究区生态环境的时空分布来看,在 2000—2019 年,研究区域的生态环境整体上呈现上升趋势。RSEI 值由 2000 年的 0.356 上升到 2004 年的 0.538,2009 年又下降到 0.332,2019 年又上升到 0.637,20 a 间总体上升了 44.1%,且后 10 a 比前 10 a 的上升幅度更大。东江源东北部的桎髻钵山、东部的项山甌和西南部的岵美山等地区生态环境级别优于其他地区。而生态环境较差的区域分布于西南部、中部和西部,主要为寻乌县文峰乡、澄江镇和留车镇,以及定南县历市镇与安远县孔田镇和三百山镇等主城区。

(2) 从研究区生态环境的各指标重心偏移来看,干度和热度指标偏移量较小,而湿度和绿度指标偏移量较大,主要与城市快速发展,城镇规模扩大,以及人口密度和开发密度不断增大。植被分布和土壤含水量随着土地利用开发开始分散,造成重心偏移差异较大。

(3) 从研究区生态环境的动态环境监测来看,在 2000—2004 年,城区周边林地和植被覆盖度较高,生态环境明显优于主城区。在 2004—2009 年,城镇区附近的乡镇生态环境开始改善。而在 2009—2019 年,除城市交通造成附近的生态环境质量下降外,其余地区都有明显的改善。由此看来,要改善整个区域的生态环境质量状况,需要处理好植被覆盖与城市用地的关系。

本文将东江源作为长时间序列研究的整体,不仅丰富了动态、快速监测生态环境质量变化过程的研究内容,且能为快速评估生态环境质量、构建生态环境质量模型以分析主要驱动力提供参考依据。但由于生态环境自身的复杂性,研究区范围涉及多幅影像,且较难获取分辨率高以及各月份相对应的影像,所以在评价研究区生态环境质量变化时,未能够达到更加精细化的探讨。与此同时,研究分析的时间步长也相对较长,忽略了年份及年内之间的细微变化。因此,在后期的研究中,可融合其他更高分辨率的数据源,优化生态环境质量评价指标,以便更好地分析生态环境质量的演变规律。

表 6 不同时段研究区 RSEI 主成分分析结果					
年份	指 标	PC <sub>1</sub>	PC <sub>2</sub>	PC <sub>3</sub>	PC <sub>4</sub>
2000	Wet	0.340 776	−0.036 337	0.663 828	0.664 743
	NDVI	0.647 750	0.448 107	−0.561 653	0.253 310
	NDBSI	−0.483 137	−0.271 243	−0.460 972	0.693 188
	LST	−0.480 489	0.851 062	0.177 151	0.115 934
	特征值	0.013 094	0.002 160	0.001 283	0.000 228
	贡献率	89.63%	9.01%	1.36%	0%
2004	Wet	0.538 761	0.473 249	−0.574 008	0.624 080
	NDVI	0.0635 638	−0.771 308	0.757 644	0.029 250
	NDBSI	−0.303 430	−0.232 937	0.013 888	0.724 006
	LST	−0.462 203	−0.356 174	0.310 317	0.292 376
	特征值	0.020 225	0.003 158	0.001 327	0.000 184
	贡献率	93.19%	6.07%	0.74%	0%
2009	Wet	0.391 238	−0.247 770	0.679 834	0.568 656
	NDVI	0.686 246	0.543 639	−0.410 318	0.255 268
	NDBSI	−0.458 840	−0.103 200	−0.421 911	0.775 118
	LST	−0.406 774	0.795 246	0.437 558	0.103 256
	特征值	0.018 213	0.002 678	0.001 719	0.000 451
	贡献率	88.63%	9.41%	1.96%	0%
2014	Wet	0.281 442	−0.006 983	0.590 638	0.756 233
	NDVI	0.634 987	0.556 769	−0.509 032	0.166 391
	NDBSI	−0.501 055	−0.141 640	−0.573 117	0.632 786
	LST	−0.516 261	0.818 472	0.252 130	0.002 771
	特征值	0.013 214	0.005 106	0.001 148	0.000 78
	贡献率	93.33%	6.72%	0.4%	0%
2019	Wet	0.252 945	0.177 812	−0.580 279	0.753 444
	NDVI	0.609 235	0.480 805	0.611 727	0.153 132
	NDBSI	−0.446 190	−0.321 714	0.537 167	0.639 427
	LST	−0.604 786	0.796 059	−0.022 770	−0.002 369
	特征值	0.012 578	0.003 256	0.000 925	0.000 057
	贡献率	93.82%	5.84%	0.34%	0%

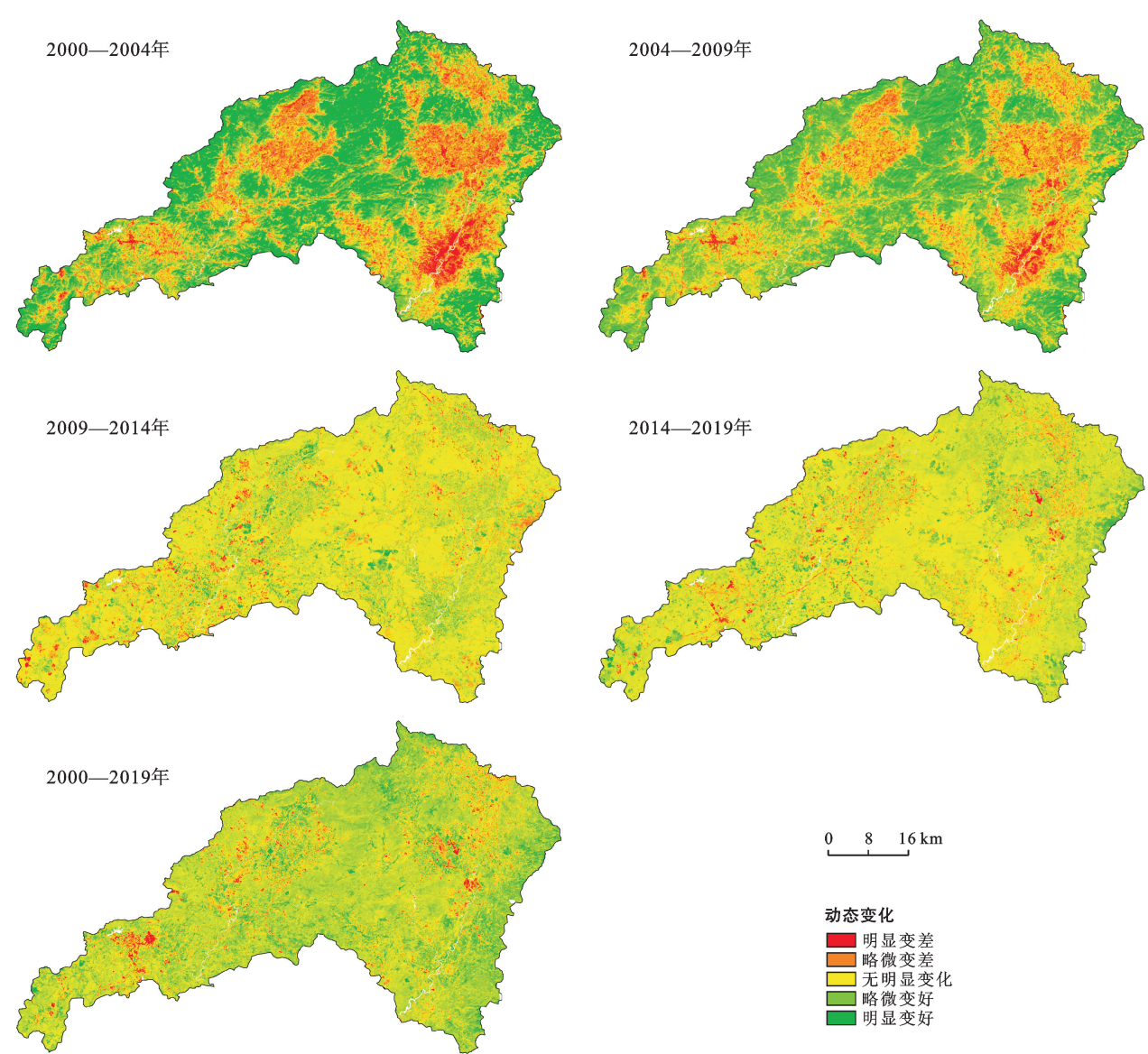


图 5 东江源区生态环境动态变化监测结果

[参 考 文 献]

- [1] Erik Stokstad. Can a dire ecological warning lead to action [J]. Science, 2019,364(6440):517-518.
- [2] Liu Youcun, Lu Miaojie, Huo Xueli, et al. A Bayesian analysis of Generalized Pareto Distribution of runoff minima [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(3): 424-432.
- [3] 叶亚平,刘鲁君.中国省域生态环境质量评价指标体系研究[J].环境科学研究,2000,13(3):33-36.
- [4] 付哲,周云轩,刘殿伟,等.生态环境质量的空间模糊综合评价研究:以吉林省西部为例[J].干旱区资源与环境, 2005,19(5):97-102.
- [5] 李恺.层次分析法在生态环境综合评价中的应用[J].环境科学与技术,2009,32(2):183-185.
- [6] 高志强,刘纪远,庄大方.基于遥感和 GIS 的中国土地资源生态环境质量同人口分布的关系研究[J].遥感学报, 1999,3(1):3-5.
- [7] 国家环境保护总局.HJ/T192-2006 生态环境状况评价技术规范(试行)[S].北京:中国环境科学出版社,2006.
- [8] 张洪敏,张艳芳,田茂,等.基于主成分分析的生态变化遥感监测:以宝鸡市城区为例[J].国土资源遥感,2018,30(1):203-209.
- [9] 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.
- [10] 刘智才,徐涵秋,李乐,等.基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(4):728-739.
- [11] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia [J]. Science of the Total Environment, 2017, 577:359-369.
- [12] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An ex-

- ploration with the simplified simple biosphere model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 225-242.
- [13] Coutts A M, Harris R J, Phan T, et al. Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186:637-651.
- [14] Caccamo G, Chisholm L A, Bradstock R A, et al. Assessing the sensitivity of MODIS to monitor drought in high biomass ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10):2626-2639.
- [15] 张恩伟,彭双云,冯华梅.基于 GIS 和 RUSLE 的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J].*水土保持学报*, 2020, 34(2):115-122.
- [16] Liu Youcun, Ding Qianqian, Chen M, et al. Analyses of Runoff and Sediment Transport and their Drivers in a rare earth mine drainage basin of the Yangtze River, China [J]. *Water*, 2020, 12(8): 2283.
- [17] 边晓辉,刘燕,丁倩倩,等.浙江省湖州市土地利用和覆被变化对热岛效应的响应[J].*水土保持通报*, 2019, 39(3):263-269, 275.
- [18] 王宁,杨光,韩雪莹,等.内蒙古 1990—2018 年土地利用变化及生态系统服务价值[J].*水土保持学报*, 2020, 34(5):244-250.
- [19] 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.
- [20] 朱冬雨,陈涛,牛瑞卿,等.基于移动窗口遥感生态指数的矿区生态环境监测与评价[J/OL].*武汉大学学报(信息科学版)*: (202001-08) [2020-12-30]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis.20190122>.
- [21] Baig M H A, Zhang L, Shuai Tong, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(4/6):423-431.
- [22] Chen Chao, Fu Jiaoqi, Zhang Shai, et al. Coastline information extraction based on the tasseled cap transformation of Landsat-8OLI images [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 217(5):281-291.
- [23] 王君,杨晓梅,隋立春,等.西安市 1995—2016 年植被覆盖度动态变化监测及景观格局分析[J].*生态科学*, 2019, 38(6):81-91.
- [24] Masina M, Lambertini A, Irene Daprà, et al. Remote sensing analysis of surface temperature from heterogeneous data in a maize field and related water stress [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15):2-31.
- [25] Xu Hanqiu. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(13/14):4269-4276.
- [26] Roy P S, Rikimaru A, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping [J]. *Tropical Ecology*, 2002, 43(1):39-47.
- [27] 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):589-595.

(上接第 157 页)

- [16] 陈洋,张海东,于东升,等.南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响[J].*农业工程学报*, 2020, 36(5):150-157.
- [17] 王磊.多种外营力作用的黑土坡面复合土壤侵蚀过程与机理研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
- [18] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J].*水土保持通报*, 2019, 39(4):314-319.
- [19] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].*水土保持学报*, 2004, 18(2):66-70.
- [20] Guo Wenzhao, Chen Zhuoxin, Wang Wenlong, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2020, 350:106879.
- [21] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].*水利水电技术*, 2020, 51(1):1-11.
- [22] 李桂芳,杨任翔,谢福倩,等.不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征[J].*水土保持学报*, 2020, 34(2): 101-107.
- [23] 王佳妮,马戌,张晓明.干湿循环下崩岗土体裂隙发育对其渗透性能的影响[J].*水土保持学报*, 2021, 35(1): 90-95.
- [24] 张宇,易仲强,张习传,等.西藏输变电工程水土流失特点及防治措施分析[J].*中国水土保持*, 2015(6):65-67.
- [25] 洪传勋.新疆戈壁荒漠区域风蚀影响因子分析[J].*中国水土保持科学*, 2013, 11(S1):25-28.
- [26] 潘晓颖,张长伟,孙蓓.输变电工程特征及其水土流失防治措施[J].*人民长江*, 2016, 47(23):28-30.
- [27] 王光丽.高海拔地区电网工程冻土施工技术效果评价研究[D].北京:华北电力大学, 2016.
- [28] 杨贺菲,张长伟,陈兰.西藏水土流失特征及生产建设项目水土保持措施设计:以川藏铁路拉萨至林芝段供电工程为例[J].*中国水土保持*, 2020(5):30-32.
- [29] 孙强,雷磊,邹斌,等.输变电工程水土保持在线监测系统关键技术研究[J].*水土保持通报*, 2018, 38(2): 241-245.
- [30] 汪立峰.500 kV 输电线路设计中的水土保持问题[J].*电力建设*, 1999(8):27-29.