

# 基于遥感生态指数的甬江流域生态环境变化分析

缪鑫辉 梁勤欧<sup>1</sup>

(1. 浙江师范大学 地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004;

2. 浙江师范大学 卫星遥感与环境灾害研究中心, 浙江 金华 321004)

**【摘要】:** 生态环境是人类生存发展的物质基础, 城市化进程不断加快带来一系列生态环境问题, 遥感技术可以快速、定量地评价生态环境变化。选取 2000、2009、2017 年 Landsat 遥感影像提取湿度、绿度、干度、热度 4 个评价指标, 通过主成分分析方法计算遥感生态指数 RSEI (Remote Sensing Ecological Index), 对 17 年间甬江流域进行生态环境变化定量分析和动态监测评价。结果表明: (1) 2000~2017 年间甬江流域生态环境质量整体上呈下降趋势, 2000、2009 和 2017 年的 RSEI 均值分别为 0.724、0.651 和 0.687, 17 年来下降了 5.11%。(2) 2000~2009 年甬江流域生态逐步恶化, 而 2009~2017 年生态环境质量有所改善; 明显变差的面积为 1392.49km<sup>2</sup>, 约占 29.63%, 明显好转的面积仅为 699.1km<sup>2</sup>, 仅占 14.88%, 呈现老城区变好, 城市外围地带变差, 林地、农田等保持稳定的特点。(3) 在 4 个指标中, 绿度指标的影响力较大, 受建筑因素作用的热度指标影响力最具潜力, 说明生态环境质量下降与不透水面的增加以及绿地景观的消减有关。

**【关键词】:** 生态变化 遥感生态指数 时空变化 甬江流域

**【中图分类号】:** TP79;X87;X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)02-0427-12

流域具有调节气候、净化环境、供给淡水、通航发电的生态服务与经济发展功能, 对人类生产生活的作用不可替代, 同时又具有脆弱性的生态属性。人类在不合理利用流域一种或多种功能时, 往往会对流域内生态环境产生负面影响, 并超出其自我整合运转的能力, 从而导致流域生态失衡与环境破坏。因此, 对流域生态环境进行实时、快速、准确的监测是流域生态保护以及生态文明建设的重要环节。

利用卫星遥感技术对生态系统进行监测和评价已成为生态遥感领域的重要组成部分。许多学者通过选择不同的指标体系以及构建不同的模型方法, 以各类遥感指数作为表征, 从国家、省级、县域和流域等不同尺度对各类生态系统<sup>[1~6]</sup>的生态环境开展了监测评价。在指标体系研究方面, 可分为仅用单一指标和构建综合指标来评价。从单一指标来看, 生态系统的不同功能是相互联系而构成系统的整体功能, 以 NDVI 为代表的植被指数、LST 为代表的温度反演指标以及土地利用类型变化指标等单一指标只能片面反映生态系统的某一功能而割裂了整体功能。从综合指标来看, 以 EI (Ecological Index) 指标为主流的综合评价体系在对不同生态指标的选取以及各生态指标权重的确定上存在着较大的主观随意性, 其不同参数的确定也具有复杂性。因此, 徐涵秋<sup>[7]</sup>提出了一种基于主成分分析法的能够耦合多种单一指标的综合指标评价法, 既能够综合反映生态系统的整体特征, 又避免了评价工作的主观随意性, 从而实现了针对不同生态系统快速、客观和综合的评价。

**作者简介:** 缪鑫辉(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地理信息系统应用. E-mail:593681005@qq.com

梁勤欧, E-mail:qoliang@sina.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(70773089)

自 1999 年以来,宁波市将甬江流域治理和城市防洪整治工程紧急结合。2011 年,甬江防洪工程陆续开工,逐渐成为宁波市防洪保安的重要工程。2013 年,强台风“菲特”造成宁波地区 113 万人受灾,尤其是甬江流域。之后,宁波大力部署实施了甬江流域的系统防洪治涝水利工程。在近年来以梅雨与台风为主要降水来源的洪涝灾害中,这些水利工程有效缓解了中心城区内涝的情况。但与此同时,由于防洪工程的建设与资源开发,加之宁波地区人口数量的增加与城市规模的扩大,甬江流域生态脆弱性逐渐暴露并随之引发生态环境破坏等问题。

作为中国东南沿海重要的港口城市,宁波地区人口密集区与产业活动集聚区多位于甬江流域。因此,监测甬江流域生态环境变化对促进流域的可持续发展和提高城市的生态宜居性具有深远意义。宁波城市发展过程中所引发的生态环境问题日益引起诸多学者的关注,其研究主要集中在中心城区生态环境综合评价<sup>[8~10]</sup>、城市生态安全评价<sup>[11,12]</sup>、以及生态文明评价<sup>[13]</sup>等方面。综上所述,现有研究多针对中心城区等局部区域的生态变化,或从其他维度来对生态进行解读,而缺乏对甬江流域长时间序列的客观综合的生态环境变化研究。有鉴于此,本文通过主成分分析法利用新型遥感生态指数 RSEI<sup>[14,15]</sup>对 17 年间甬江流域生态环境变化进行定量分析和动态监测研究,探讨影响流域生态环境变化的潜在因素,为甬江流域开发与保护、宁波生态文明城市建设提供参考。

## 1 研究区域概况

甬江流域位于 29° 24′ 31″ N~30° 19′ 4″ N, 120° 48′ 53″ E~120° 49′ 9″ E,位于浙江省东部沿海,杭州湾之南,地处浙江宁绍冲积平原东端,行政区划包括宁波市与绍兴市(图 1a)。甬江流域面积约 5262.2km<sup>2</sup>,占全省国土面积的 4.99%,中下游平原河网密布,并分布有大量水库和湖泊(图 1b),属于亚热带季风气候区。甬江由奉化江和姚江两江汇集而成,向东北流经外游山汇入东海。

由于流域往往受到冷暖气团、台风和西南气流的交替影响,并且其依山靠海的地理位置与平原地带对水流的汇流作用,加之流域内感潮性河流广布,甬江流域多异常天气,灾害性天气诸如台风和洪涝灾害频发。近年来,在开发流域资源与发展多种经营为人口、产业与城市服务的背景下,甬江流域生态退化与环境污染问题日益严重。

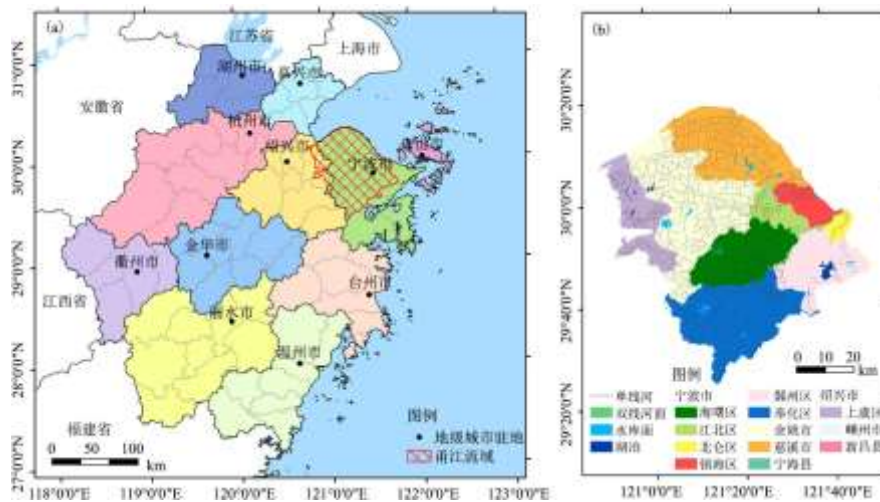


图 1 甬江流域示意图

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源及预处理

本研究以甬江流域为研究区，选取 2000、2009 和 2017 年 3 景 Landsat 遥感影像作为主要数据源。所选数据季相相同，自然下垫面要素状态相似，保证了研究具有可比性，云量少，数据精确性较高，详细信息见表 1。此外，获取浙江省、宁波市和绍兴市行政区划矢量文件作为底图，以及甬江流域开发与宁波市城市发展的相关资料等作为补充。

表 1 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	2000-06-14	Landsat-7/ETM+	118-039	0	8
2	2009-07-17	Landsat-5/TM	118-039	0.07	7
3	2017-08-24	Landsat-8/OLI_TIRS	118-039	0.26	11

影像的预处理为根据 Landsat 系列卫星用户手册和大气校正模型<sup>[16]</sup>将 3 期遥感影像的原始亮度值转换为反射率，并根据水文模型基于 DEM 数据提取甬江流域范围，对 3 期遥感影像进行甬江流域研究区域不规则剪裁，结果如图 2 所示。

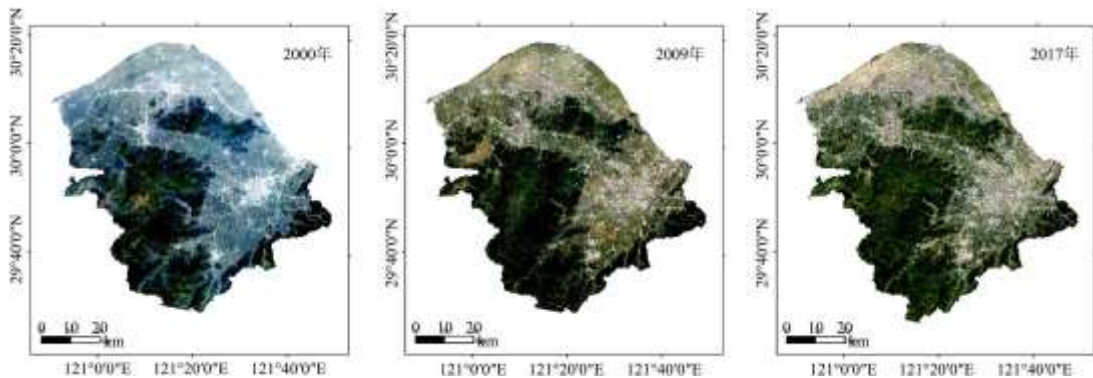


图 2 甬江流域遥感影像

## 2.2 研究方法

遥感生态指数 RSEI<sup>[7]</sup>选取了与人类生存环境密不可分的 4 个重要指标——湿度、绿色、干度、热度来客观综合评价生态环境状况。4 个指标可通过遥感影像信息提取得到，分别采用通过 K-T 变换的湿度分量(Wet)表征湿度指标，植被指数(VI)表征绿色指标，建筑—裸土指数(NDBSI)表征干度指标，地表温度(LST)表征温度指标。综上，遥感生态指数 RSEI 可以表示为集成上述 4 个指标的函数，即：

$$RSEI = f(Wet, VI, NDBSI, LST) \quad (1)$$

### 2.2.1 指标的构建

(1)湿度指标：K-T 变换是一种转换系数固定的主成分分析方法，可以实现遥感信息压缩，又能增强影像信息。生态环境中的湿度指标与植被和土壤的含水量密切相关，因此湿度分量(Wet)可由 K-T 变换得到，公式为<sup>[17,18]</sup>：

$$\begin{aligned} \text{Wet}(\text{Landsat5\_TM}) = & 0.0315\rho_B + 0.2021\rho_G \\ & + 0.3102\rho_R + 0.1594\rho_{\text{NIR}} - 0.6806\rho_{\text{SWIR}_1} - \\ & 0.6109\rho_{\text{SWIR}_2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Wet}(\text{Landsat7\_ETM+}) = 0.1509\rho_B + 0.1973\rho_G$$

$$\begin{aligned} & + 0.3279\rho_R + 0.3406\rho_{\text{NIR}} - 0.7112\rho_{\text{SWIR}_1} - \\ & 0.4572\rho_{\text{SWIR}_2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Wet}(\text{Landsat8\_OLI}) = & 0.1511\rho_B + 0.1973\rho_G \\ & + 0.3283\rho_R + 0.3407\rho_{\text{NIR}} - 0.7117\rho_{\text{SWIR}_1} - \\ & 0.4559\rho_{\text{SWIR}_2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\rho_B$ 、 $\rho_G$ 、 $\rho_R$ 、 $\rho_{\text{NIR}}$ 、 $\rho_{\text{SWIR}_1}$ 、 $\rho_{\text{SWIR}_2}$ 分别代表经辐射定标后传感器 TM、ETM+第 1、2、3、4、5、7 波段及 OLI 第 2、3、4、5、6、7 波段的反射率。

(2) 绿度指标：归一化植被指数 (NDVI) 是表征植被生长状态的常用指标。因此绿度指标可由 NDVI 来表示，公式为：

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_R}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_R} \quad (5)$$

(3) 干度指标：区域环境中，建筑与裸土是导致地表干化的重要下垫面因素。取建筑指数 (IBI<sup>[19]</sup>) 和土壤指数 (SI<sup>[20]</sup>) 的平均值，构造建筑—裸土指数 (NDBSI) 表示干度指标，公式为：

$$\text{NDBSI} = \frac{\text{IBI} + \text{SI}}{2} \quad (6)$$

其中，

$$\begin{aligned} \text{IBI} = & \left[ \frac{2\rho_{\text{SWIR}_1}}{\rho_{\text{SWIR}_1} + \rho_{\text{NIR}}} - \frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_R} - \right. \\ & \left. \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{\text{SWIR}_1}} \right] / \left[ \frac{2\rho_{\text{SWIR}_1}}{\rho_{\text{SWIR}_1} + \rho_{\text{NIR}}} + \frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_R} + \right. \\ & \left. \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{\text{SWIR}_1}} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{SI} = \frac{(\rho_{\text{SWIR}_1} + \rho_R) - (\rho_{\text{NIR}} + \rho_B)}{(\rho_{\text{SWIR}_1} + \rho_R) + (\rho_{\text{NIR}} + \rho_B)} \quad (8)$$

(4) 热度指标：表征热度指标的地表温度可通过亮度温度修正得到。可通过辐射定标后根据定标参数  $K_1$ 、 $K_2$ <sup>[21]</sup> 将辐射亮度  $L_\lambda$

转换为亮度温度 T, 公式为:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{6/10}} + 1\right)} \quad (9)$$

亮度温度 T 必须通过比辐射率修正<sup>[22]</sup>从而转换为地表温度 (LST), 公式为:

$$LST = \frac{T}{1 + \frac{\lambda T}{\rho} \ln \varepsilon} \quad (10)$$

式中:  $\lambda = 11.5 \mu\text{m}$ ;  $\rho = 1.428 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ ;  $\varepsilon$  为使用 NDVI 阈值法<sup>[23]</sup>计算得到的地表比辐射率。

### 2.2.2 综合指标的构建

本研究采用主成分分析法 (PCA), 基于 4 个指标的原始数据特点, 自动客观地确定权重值来实现变换多种单一指标从而耦合成为一个综合指标, 避免了主观随意性且过程较为简便。

在做主成分变换前, 首先对 4 个指标进行极差标准化处理, 从而避免指标权重失衡。另外, 由于甬江流域内分布有三江、天然湖泊与大量水库, 需使用 MNDWI 水体指数与阈值分割法对 4 个指标的水域进行掩膜处理<sup>[24]</sup>, 从而消除大片水域对主分量的载荷影响。通过数据融合对新影像进行 PCA 变换, 并计算 PC1。为使生态环境质量与数值大小成正比, 需要进一步变换得到初始的生态指数  $RSEI_0$ , 公式为:

$$RSEI_0 = 1 - \{PC1 [f(Wet, NDVI, NDBSI, LST)]\} \quad (11)$$

最后, 需对  $RSEI_0$  进行极差标准化得到值域为 [0, 1] 的遥感生态指数 RSEI, 公式为:

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{\min}}{RSEI_{\max} - RSEI_{\min}} \quad (12)$$

RSEI 值越趋近于 1, 表示生态环境越优, 反之, 生态环境越差。

## 3 结果与分析

### 3.1 主成份分析

由主成分分析结果 (表 2) 可得, 3 个年份 4 个指标对 PC1 均有一定载荷, 并且 3 个年份 PC1 的特征值贡献率分别为 82.80%、

83.00%与 88.84%,均超过了 80%,说明 PC1 集成了 4 个指标的绝大部分特征。同时,对比 4 个指标在 PC2~PC4 中大小与正负均显无常的载荷,湿度指标(Wet)和绿度指标(NDVI)在 PC1 中的特征向量为正数,而干度指标(NDBSI)和热度指标(LST)的特征向量为负数,说明在各指标一定范围内,湿度和绿度指标对生态环境的有利影响以及干度和热度指标的不利影响,符合生态学客观规律。因此,PC1 集成了单一指标的原始信息,并能够真实合理反映生态环境状况。

表 2 各年份指标主成分分析结果

指标	2000 年				2009 年				2017 年			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
Wet	0.272	0.804	0.030	0.528	0.166	0.079	0.756	0.628	0.086	0.137	0.343	-0.925
NDVI	0.631	-0.526	-0.291	0.490	0.676	0.394	-0.499	0.372	0.610	0.273	-0.724	-0.171
NDBSI	-0.616	-0.255	0.284	0.689	-0.517	-0.294	-0.423	0.683	-0.536	-0.525	-0.569	-0.338
LST	-0.384	0.115	-0.913	0.075	-0.498	0.867	0.014	0.006	-0.578	0.795	-0.186	-0.005
特征值	0.013	0.002	0.001	0.000	0.034	0.005	0.002	0.000	0.033	0.003	0.001	0.000
特征值贡献率	82.80	12.82	3.88	0.50	83.00	12.45	4.07	0.48	88.84	8.30	2.76	0.10

### 3.2 RSEI 指数的代表性

将生态指数 RSEI 以等间距分为差、较差、中等、良、优 5 个等级<sup>[14]</sup>(表 3)。通过考察 3 个年份各生态条件等级间 4 个指标的变化趋势,来反映 RSEI 的合理性。从表 3 可以看出,3 个年份中,各个指标的均值都随着生态级别的变化而规律变化,即 Wet 和 NDVI 的均值均表现为随着生态级别的升高而升高,而 NDBSI 和 LST 的均值则随着生态级别的升高而降低,并没有出现反常与异常现象,说明该生态指数确实能够综合代表生态条件的变化情况。

由各指标间相关系数(表 4)来看,3 个年份中干度指标(NDBSI)与其余 3 个指标的平均相关系数最大,在 2017 年达到 0.854,3 个年份平均为 0.821。而生态指数与这 4 个指标的各年份平均相关系数都大于 0.854,3 个年份的平均值达 0.871,比单指标最高的 NDBSI 的 0.821 高出了 6.1%,比 4 个指标的平均值(0.717),高出了 21.5%。显然,该生态指数除了集成了各指标的信息外,还比任一单指标更具代表性,能比任一单指标更好地反映甬江流域生态状况。

表 3 各年份各生态级别及其对应的标准化指标均值

RESI 等级	2000 年				2009 年				2017 年			
	Wet	NDVI	NDBSI	LST	Wet	NDVI	NDBSI	LST	Wet	NDVI	NDBSI	LST
1: (0.0~0.2)	0.271	0.653	0.643	0.642	0.543	0.395	0.745	0.752	0.753	0.551	0.709	0.661
2: (0.2~0.4)	0.627	0.656	0.533	0.632	0.656	0.453	0.658	0.671	0.789	0.608	0.632	0.493
3: (0.4~0.6)	0.696	0.733	0.456	0.567	0.691	0.587	0.565	0.573	0.801	0.704	0.558	0.387

4: (0.6~0.8)	0.737	0.838	0.363	0.511	0.723	0.739	0.450	0.498	0.818	0.861	0.436	0.274
5: (0.8~1.0)	0.764	0.909	0.285	0.467	0.741	0.806	0.390	0.398	0.833	0.924	0.357	0.183

表 4 各年份各指标与 RSEI 指数的相关系数表

年份	指标	Wet	NDVI	NDBSI	LST	RSEI
2000	Wet	1.000	0.384	-0.746	-0.502	0.649
	NDVI	0.384	1.000	-0.879	-0.824	0.945
	NDBSI	-0.746	-0.879	1.000	0.806	-0.979
	LST	-0.502	-0.824	0.806	1.000	-0.884
	平均相关系数	0.544	0.696	0.810	0.710	0.864
2009	Wet	1.000	0.585	-0.782	-0.493	0.683
	NDVI	0.585	1.000	-0.936	-0.677	0.962
	NDBSI	-0.782	-0.936	1.000	0.674	-0.957
	LST	-0.493	-0.677	0.674	1.000	-0.828
	平均相关系数	0.620	0.733	0.798	0.615	0.858
2017	Wet	1.000	0.657	-0.879	-0.565	0.734
	NDVI	0.657	1.000	-0.916	-0.831	0.970
	NDBSI	-0.879	-0.916	1.000	0.768	-0.943
	LST	-0.565	-0.831	0.768	1.000	-0.921
	平均相关系数	0.700	0.801	0.854	0.721	0.892
3 年平均值	Wet=0.621, NDVI=0.743, NDBSI=0.821, LST=0.682, RSEI=0.871					

### 3.3 甬江流域生态环境时空变化分析

通过统计各年份各指标与遥感生态指数 RSEI 的统计指标(表 5),可以发现,17 年间甬江流域的生态质量总体呈现恶化趋势。分阶段来看,甬江流域的 RSEI 均值由 2000 年的 0.724 下降到 2009 年的 0.651,到 2010 年又上升至 0.687,17 年来总体下降了 5.11%。其中在 2000~2009 年的 9 年间下降了 10.08%,在 2009~2017 年的 8 年间上升了 5.53%,前 9 年 RSEI 均值下降比后 8 年上升更快。从各指标变化情况来看,湿度指标(Wet)和绿度指标(NDVI)的均值逐渐升高,干度指标(NDBSI)逐渐降低。经标准化处理后的 2000、2009、2017 年的 LST 均值分别为:0.516、0.558、0.318,则说明了热度指标(LST)呈现先上升后下降的趋势。结合各指标对 PC1 的载荷值,湿度指标(Wet)的载荷最小并逐年减小,而热度值指标(LST)逐年增大。同时,表征植被覆盖状况

的绿度指标 (NDVI) 对 PC1 的载荷最大, 3 个年份均为 0.6 以上, 说明了作为流域生态环境中重要的下垫面, 植被对生态环境影响最为明显。

表 5 各年份各指标与遥感生态指数 RSEI 的统计指标值

年份	指标	Wet	NDVI	NDBSI	LST	RSEI
2000	最小值	-0.480	0.021	-0.439	6.222	0.000
	最大值	-0.016	0.752	0.235	43.756	1.000
	均值	-0.080	0.484	-0.222	25.604	0.724
	标准差	0.029	0.136	0.084	1.925	0.139
2009	最小值	-0.651	-0.043	-0.505	14.592	0.000
	最大值	-0.001	0.829	0.334	39.410	1.000
	均值	-0.069	0.527	-0.228	28.446	0.651
	标准差	0.037	0.195	0.109	3.003	0.184
2017	最小值	-0.728	-0.145	-0.586	23.596	0.000
	最大值	0.115	0.878	0.379	40.098	1.000
	均值	-0.001	0.592	-0.238	28.840	0.687
	标准差	0.033	0.219	0.126	2.122	0.176

相应地, 在甬江流域遥感生态指数 RSEI 分布图(图 3)中也有所体现。相较于 2000 年, 2009 年中表示生态环境较差的橙色区域随着城市建设用地的扩张而逐渐扩散。在 2009 年的扩散范围基础上, 2017 年橙色区域持续扩散, 呈现零星化分布, 破碎化程度更高, 其边界范围更大; 但其中心城区橙色区域逐渐被蓝绿区域所代替, 说明城市中心地区生态环境有较大幅度的改善。数据表明, 宁波市的建成区面积从 2000 年的 69km<sup>2</sup> 增加至 2017 年的 310.18km<sup>2</sup>, 增加了近 3.50 倍, 生态较差的橙色区域边界与建成区扩张的边界基本保持一致。

对各年份各等级生态指数所占面积与比例进行统计(表 6、图 4)和对生态指数进行分级显示(图 5)。从时间来看, 2000~2017 年甬江流域生态级别为优、良等级所占的面积下降了 8.91%, 表明 17 年间生态逐渐恶化。生态级别为优的面积最大的是 2000 年, 占 38.07%, 最小的是 2009 年, 占 25.97%, 较 2000 年下降了 12.1%, 2017 年为 35.31%, 17 年间共下降了 2.76%。17 年间生态级别差、较差所占面积先明显上升后略有下降, 2000 年最小, 占 2.32%, 最大的是 2009 年, 占 13.73%, 较 2000 年上升了 11.41%, 2017 年为 9.7%。2000~2009 年, 优、良等级所占比例下降了 13.53%, 而 2009~2017 年, 优、良等级所占比例则上升了 4.62%。以上印证了甬江流域生态环境状况呈现先明显下滑后略有回升的趋势, 其中, 2000~2009 年是甬江流域生态质量迅速恶化的 9 年, 而自 2009 年以来, 甬江流域的生态环境得到了明显的改善。

表 6 各年份生态等级和面积比例变化

	2000		2009		2017	
	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(%)
1:差(0.0~0.2)	1.26	0.03	24.66	0.52	2.60	0.05
2:较差(0.2~0.4)	109.64	2.28	629.30	13.21	481.63	9.65
3:中(0.4~0.6)	871.92	18.16	965.49	20.27	982.07	19.68
4:良(0.6~0.8)	1990.46	41.46	1906.91	40.04	1761.74	35.31
5:优(0.8~1.0)	1827.98	38.07	1236.75	25.97	1761.64	35.31

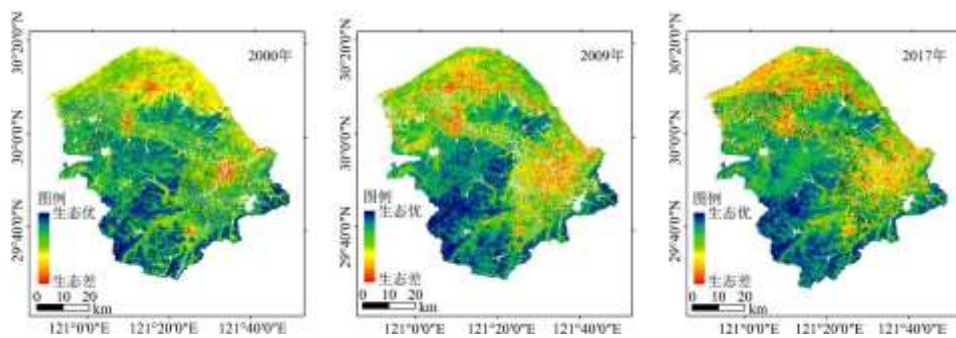


图3 甬江流域遥感生态指数 RSEI 图

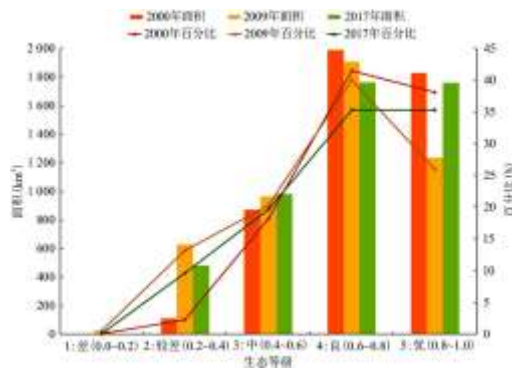


图4 各年份生态等级和面积比例统计图

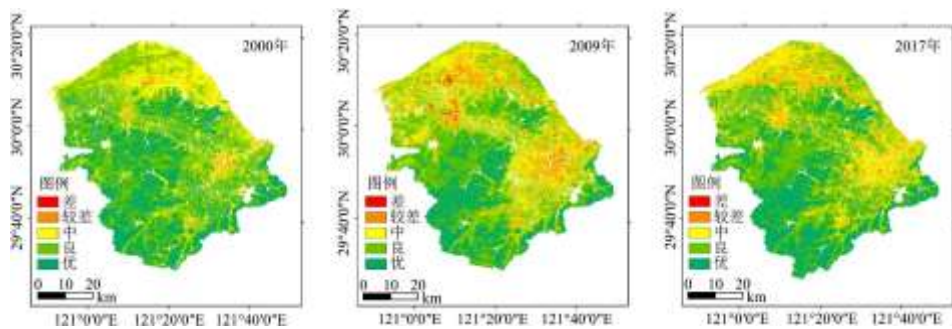


图 5 甬江流域遥感生态指数 RSEI 分级空间分布图

从图 5 来看, 3 个年份甬江流域西南部的四明山、中部偏北的五磊山、东南部的九峰山地区生态级别明显优于其他地区, 山区以天然林地覆被为主, 湿度和绿度指标较高, 在热度指标上表现为冷岛区; 流域生态级别较差和位于中东部、西北部、北部和中部偏南地区, 主要为宁波市以三江口为中心的中心城区以及余姚市、慈溪市和奉化区三县域的主城区, 植被覆盖度较低的城市建设用地则属于典型的热岛区。其中, 2000 年生态环境较差的区域与城市建成区基本吻合。2009 年, 随着城市扩张与多个高耗能生产企业集中运行, 生态较差区域范围扩大并呈现破碎化分布。2017 年, 随着老城区道路拓宽与绿化工作, 生态优的区域以建成区为中心逐渐扩大, 生态差与较差的区域分布在各建成区的外围地带。

### 3.4 甬江流域生态环境质量动态监测

对各年份 RSEI 指数两两进行差值分析来表征变化幅度, 并将变化幅度分为无明显变化、略有变好、明显变好、略有变差和明显变差 5 级(表 7), 其空间分布如图 6 所示。

从变化检测的结果来看(表 7), 总体而言, 17 年间甬江流域的生态状况以不变为主, 约占 55.49%。分阶段来看, 2000~2009 年该流域生态等级下降的面积为 1763.37km<sup>2</sup>, 占 38.81%, 主要表现为略微变差, 而生态好转的面积仅为 430.78km<sup>2</sup>, 只占 9.48%, 主要表现为略微变好, 表明 2000~2009 年甬江流域生态逐渐恶化。2009~2017 年间, 生态条件变差的面积达 496.05km<sup>2</sup>, 约占 10.59%, 而生态好转的面积为 1281.58km<sup>2</sup>, 占 27.35%, 生态环境质量好转比例有所上升, 而变差比例明显下降, 表明 2009~2017 年甬江流域生态逐渐改善。

表 7 各年份生态环境质量面积变化

时间	类别	情况	级差	级面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)	类面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)
2000~2009	变差	明显变差	-4	1.97	0.04	1763.37	38.81
			-3	47.61	1.05		
		略微变差	-2	281.66	6.20		
			-1	1432.13	31.52		
	不变	无明显变化	0	2349.17	51.71	2349.17	51.71
	变好	略微变好	1	423.42	9.32	430.78	9.48
			2	7.19	0.16		
		明显变好	3	0.17	0.00		
			4	0.00	0.00		
	2009~2017	变差	明显变差	-4	0.02	0.00	496.05
-3				1.35	0.03		
略微变差			-2	44.07	0.94		
			-1	450.61	9.62		

	不变	无明显变化	0	2908.50	62.07	2908.50	62.07
	变好	略微变好	1	1174.06	25.05	1281.58	27.35
			2	100.16	2.14		
		明显变好	3	7.35	0.16		
4	0.02		0.00				
2000~2017	变差	明显变差	-4	0.35	0.01	1392.49	29.63
			-3	29.49	0.63		
		略微变差	-2	208.38	4.43		
			-1	1154.27	24.56		
	不变	无明显变化	0	2607.38	55.49	2607.38	55.49
	变好	略微变好	1	655.32	13.95	699.10	14.88
			2	43.21	0.92		
		明显变好	3	0.58	0.01		
4			0.00	0.00			

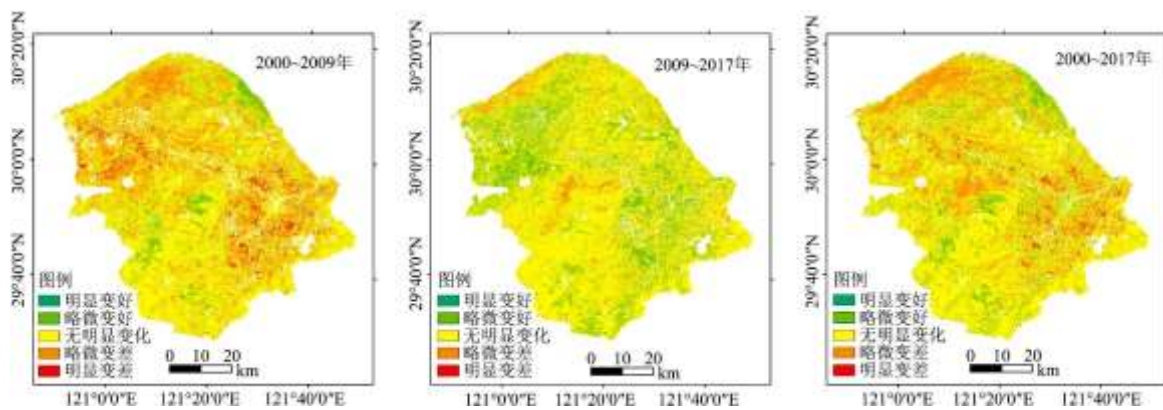


图6 甬江流域遥感生态环境变化监测图

从空间上看(图6)17年间甬江流域生态环境恶化区域主要分布在宁波市以三江口为中心的中心城区外围地带、杭州湾南岸地区以及四明山北部山区,而改善区域主要分布在三江口城市中心、慈溪市东北部滨海区以及四明山南部山区。说明17年间城市周边随着城市扩张而生态环境恶化的同时,其老城区生态环境因生态改造却在改善。其中,2000~2009年间生态环境改善的区域主要分布在慈溪市东北部滨海区与四明山部分山区,而生态质量恶化的区域主要为宁波市以三江口为中心的中心城区外围地带以及杭州湾南岸地区。2009~2017年间,生态环境质量恶化面积比例显著下降,而改善面积明显增加,改善区域主要分布在三江口和奉化区的城市中心以及四明山北麓地区,恶化地区主要为曹娥江河口以东的杭州湾南岸与四明山部分山区。

为了分析甬江流域不同生态环境等级的转化方向与特征,统计出了2000、2009和2017年3个年份间的等级转移矩阵(表8、9、10)。从表8可知,等级变化整体上“三增二减”,差、较差、中等级面积增加,优、良等级面积减少。差等级转出量为0.81km<sup>2</sup>,主要转成较差等级;转入量为22.62km<sup>2</sup>,主要转入源是较差和中等,表明2009年存在生态环境恶化的现象。较差等级主要转出形式是差等级,这也表明生态环境出现恶化。中等转出以较差等级为主,良、优等级分别减少了66.78、549.65km<sup>2</sup>,主要转出形式分别是中和良等级,进一步说明由于生态等级下降的幅度和比例显著高于上升的幅度和比例,2000~2009年流域生态环境质量恶化。同理,根据表9可知,差、较差、中、良等级面积减少,优等级面积大量增加。从转入源来看,各等级都向更高等级转换,从转出地来看,都是由低等级向更高等级进行转换,说明2009~2017年流域生态环境质量得到明显的改善。总体来看,由表10可知,从转入源来看,17年间各等级转入都以高一等级为主,而从转出地来看,17年间各等级转出都以次一等级为主,证明了2000~2017年17年间甬江流域生态环境总体呈现下降的趋势。

表8 2000~2009年甬江流域生态环境等级转移矩阵(km<sup>2</sup>)

RSEI 等级		2000						
		差	较差	中	良	优	转入	变化
2009	差	0.27	8.21	6.35	6.09	1.97	22.62	21.82
	较差	0.76	81.54	310.21	162.18	41.52	514.66	498.13
	中	0.04	7.24	299.62	486.72	113.13	607.14	96.49
	良	0.00	0.91	187.86	985.97	627.00	815.77	-66.78
	优	0.00	0.17	6.24	227.56	981.77	233.97	-549.65
	转出	0.81	16.53	510.65	882.55	783.62		

表9 2009~2017年甬江流域生态环境等级转移矩阵(km<sup>2</sup>)

RSEI 等级		2009						
		差	较差	中	良	优	转入	变化
2017	差	0.80	1.26	0.16	0.12	0.02	1.56	-20.46
	较差	19.28	304.75	73.83	35.19	1.23	129.53	-169.33
	中	2.47	257.96	446.88	196.27	8.72	465.43	-28.61
	良	0.25	32.54	354.90	1110.25	179.25	566.95	-206.56
	优	0.02	7.10	65.14	541.93	1045.82	614.18	424.96
	转出	22.02	298.86	494.03	773.50	189.22		

表10 2000~2017年甬江流域生态环境等级转移矩阵(km<sup>2</sup>)

RSEI 等级		2000						
		差	较差	中	良	优	转入	变化
2017	差	0.02	0.26	0.60	1.07	0.35	2.27	1.12
	较差	0.77	67.58	223.46	133.42	28.42	386.06	348.14
	中	0.35	33.21	371.30	443.29	74.36	551.21	77.89
	良	0.04	3.91	210.32	949.73	487.27	701.53	-287.26
	优	0.00	0.54	38.95	411.02	1218.75	450.51	-139.88
	转出	1.15	37.92	473.33	988.80	590.39		

### 3.5 RSEI 建模与参数分析

建立生态模型能定量模拟流域生态环境，并能为改善生态环境提供数据支撑。采用设置最小距离的采样方法，在研究区内随机生成 40000 个采样点，提取各年份采样点的 4 个指标值与 RSEI 值，并根据水体掩模将水体中的无效点予以剔除。足够多的采样点和设置最小距离的随机采样方法提高了采样点的代表性。在 SPSS 中以 4 个指标为自变量，以 RSEI 为因变量，进行逐步回归分析并建模。分别计算甬江流域 3 个年份的回归模型，结果如下：

2000 年： $RSEI=0.165Wet+0.603NDVI-0.95NDBSI-0.505LST+0.688$ ,  $R^2=0.997$

2009 年： $RSEI=0.488Wet+0.86NDVI-0.191NDBSI-0.493LST+0.58$ ,  $R^2=0.998$

2017 年： $RSEI=0.039Wet+0.575NDVI-0.477NDBSI-0.615LST+0.57$ ,  $R^2=0.937$

从各年份结果可以看出，4 个自变量在逐步回归分析中均被保留，说明了 4 个指标对生态环境的代表性，模型拟合优度  $R^2$  都在 0.9 以上，并在  $\alpha=0.01$  水平上显著。从各指标影响力来看，NDVI 的影响力始终较大，说明了植被对于流域生态环境的重要性；而 LST 的影响力不可忽视，而 NDBSI 中的建筑因素与植被此消彼长的关系是增加 LST 的影响力的主要驱动力，城市热岛效应即为实证。因此，在流域资源开发与城市规划中，需要注重流域植被保护和城市绿化工作，并在控制不透水面比例的同时建设海绵城市。

## 4 结论与讨论

基于 Landsat 系列卫星遥感数据，利用主成分变换法将湿度、绿度、干度、热度 4 个指标耦合为遥感生态指数 RSEI，对 17 年间甬江流域生态环境进行客观量化的时空变化、动态监测与建模研究，并分析了影响生态环境变化的潜在因素。研究表明：

(1) 从时空分布来看，2000~2017 年间，甬江流域生态环境质量整体上呈下降趋势。RSEI 均值由 2000 年的 0.724 下降到 2009 年的 0.651，到 2010 年又上升至 0.687，17 年来总体下降了 5.11%，且前 9 年间的下降幅度大于后 8 年间的上升幅度。其中，生态优良等级区域比例由 2000 年的 79.53% 减少为 2009 年的 55.01%，2017 年又增至 70.62%，17 年间减少了 8.91%。生态状况优良区域主要为四明山、五磊山与九峰山等山区，生态级别较差和差区域主要为各行政区内主城区。

(2)从动态监测来看,2000~2009年甬江流域生态逐步恶化,而2009~2017年流域生态环境质量开始改善。17年间甬江流域生态环境明显变差的面积为1392.49km<sup>2</sup>,约占29.63%,而明显好转区域仅为699.1km<sup>2</sup>,仅占14.88%。2000~2017年三江口主城区因受生态改造而生态环境改善,而新建的城市副中心外围地带是主要的生态恶化区域。

(3)从建模分析来看,在4个指标中,绿度指标的影响力较大,而热度指标影响力最具潜力,热度指标受干度指标中建筑因素影响与绿度指标此消彼长,说明流域生态环境质量下降与不透水面的大幅增加以及绿地自然景观的大面积消减密切相关,流域生态环境改善需要处理好植被与建筑的关系。

#### 参考文献:

[1]OCHOA-GAONA S, KAMPICHLER C, JONG B H J D, et al. A multi-criterion index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(5):618-627.

[2]SULLIVAN C A, SKEFFINGTON M S, GORMALLY M J, et al. The ecological status of grasslands on lowland farmlands in western Ireland and implications for grassland classification and nature value assessment[J]. *Biological Conservation*, 2010, 143(6):1529-1539.

[3]XU H Q, DING F, WEN X L. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009, 2(2):74-79.

[4]GUPTA K, KUMAR P, PATHAN S K, et al. Urban Neighborhood Green Index—A measure of green spaces in urban areas[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(3):325-335.

[5]IVITS E, CHERLET M, MCHL W, et al. Estimating the ecological status and change of riparian zones in Andalusia assessed by multi-temporal AVHRR datasets[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(3):422-431.

[6]MORAN M S, PETERS-LIDARD C D, WATTS J M, et al. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(5):805-826.

[7]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.

[8]高占国, 朱坚, 翁燕波, 等. 多尺度生态系统健康综合评价——以宁波市为例[J]. *生态学报*, 2010, 30(7):1706-1717.

[9]李加林. 沿海城市生态环境质量动态评价系统研究——以宁波市为例[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2008, 21(2):263-268.

[10]吴建, 李鹏, 林溢, 等. 中心城区城市化生态环境综合评价——以宁波为例[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(4):491-496.

[11]赵静静, 柴立和, 杜慧滨. 基于MIEP模型的城市生态安全评价——以宁波市为例[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(9):2989-2995.

[12]李莹. 城市生态安全评价研究——以宁波市为例[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2013.

[13]张茜, 王益澄, 马仁锋. 基于熵权法与协调度模型的宁波市生态文明评价[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2014(3):113-118.

- 
- [14]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.
- [15]徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7):91-97.
- [16]CHAVEZ P S J. Image-based atmospheric corrections-Revisited and improved[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(9):1025-1036.
- [17]HUANG C, WYLIE B, YANG L, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(8):1741-1748.
- [18]BAIG M H A, ZHANG L, SHUAI T, et al. Derivation of a Tasseled Cap Transformation Based on Landsat 8 at-Satellite Reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5):423-431.
- [19]XU H Q. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14):4269-4276.
- [20]ROY P S, RIKIMARU A, MIYATAKE S. Tropical forest cover density mapping[J]. Tropical Ecology, 2002, 43(1):39-47.
- [21]CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5):893-903.
- [22]NICHOL J. Remote sensing of urban heat islands by day and night[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(6):613-621.
- [23]SOVRINO J A, JIMÉNEZ-MUNOZ J C, PAOLINI L. Land Surface Temperature Retrieval From LANDSAT TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4):434-440.
- [24]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.