

# 基于 RSEI 的巢湖流域生态环境质量时空变化分析

李鸿芝 (安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241000)

**摘要** [目的]分析巢湖流域生态环境质量时空变化。[方法]利用巢湖流域 2006 年和 2017 年 2 个时相的 Landsat 系列卫星影像,采用新型的遥感生态指数(RSEI)对研究区这 11 年间的生态环境质量变化进行分析。[结果]随着城市建成区的不断扩展,巢湖流域生态环境质量总体出现下降趋势,研究时间内 RSEI 均值从 0.562 下降至 0.500;生态环境较差和差的区域面积增加了 2.63%,生态环境优良区域面积减少了 18.79%。在空间分布上,合肥市区及舒城县生态质量相对较差,流域西南的岳西县部分地区和庐江县生态质量较好,且研究时间内合肥市区生态变差,肥西县北部和庐江县生态逐渐变好。[结论]总体来看,植被覆盖的减少和建筑用地的扩张是导致巢湖流域生态环境质量下降的重要因素。

**关键词** 遥感生态指数;巢湖流域;生态环境;Landsat 数据

中图分类号 S181.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)16-0082-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.16.024



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Temporal and Spatial Changes of Ecological Environment Quality in Chaohu Basin Based on RSEI

LI Hong-zhi (College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000)

**Abstract** [Objective] The research aimed to analyze the temporal and spatial changes in the ecological environment quality of the Chaohu Basin. [Method] Using the Landsat series of satellite images from the Chaohu Basin in 2006 and 2017, the new remote sensing ecological index (RSEI) was used to analyze the ecological environment quality changes in the study area during the 11 years. [Result] With the continuous expansion of urban built-up areas, the overall ecological quality of Chaohu Basin had decreased. The average RSEI value decreased from 0.562 to 0.500 during the studied period; the areas with relatively poor and poor ecological environment increased by 2.63%, and those with good ecological environment decreased by 18.79%. In terms of spatial distribution, the ecological quality of Hefei City and Shucheng County was relatively poor, and that of part of Yuexi County and Lujiang County was good. Besides, during the studied period, the ecological environment in Hefei became worse, while that in the north of Feixi County and Lujiang County became better. [Conclusion] Overall, the reduction of vegetation cover and the expansion of construction land are the important factors leading to the decline of ecological quality in the Chaohu Basin.

**Key words** Remote sensing ecological index (RSEI); Chaohu Basin; Ecological environment; Landsat data

随着当前中国城市化进程的不断加快,经济建设的发展可能会带来一定的生态问题,及时地监测多尺度生态系统的变化并发现所存在的问题,已成为保护生态系统的重要手段。随着遥感技术的不断发展,卫星遥感对地观测系统广泛应用于生态环境领域。目前,国内外许多学者利用各种遥感指数对生态系统进行了监测与评价<sup>[1-3]</sup>,为生态环境保护提供手段。但是当前的遥感监测技术大多基于单一的指标进行评测<sup>[4-7]</sup>,而对于整个生态系统来说,指标间互动综合至关重要,单独使用这些指标是不全面的,因而利用多种遥感数据来综合评价生态系统的研究也逐渐增多<sup>[8-9]</sup>。国家环境保护部于 2006 年颁发的《生态环境状况评价技术规范》<sup>[10]</sup>中提出了生态环境状况指数(EI),这个基于遥感技术的指数广泛应用于各省市<sup>[11-12]</sup>,为我国县级以上生态环境制定了年度的综合评价标准。但是 EI 指数中存在着指标获取困难、需要人为设定权重等问题,因此徐涵秋<sup>[13]</sup>在 2013 年提出一个既简便又能综合多种因素的指标——遥感生态指数(remote sensing based ecological index, RSEI),来对生态系统进行快速、全面的测评,对评价结果进行可视化,支持对研究区生态质量进行时空变化分析、建模和预测。这个完全基于遥感信息、包含多种指标因素的遥感综合生态指数,还可以作为 EI 的辅助指标来客观、定量地评价区域生态环境<sup>[14]</sup>。此后, RSEI 被学者广泛应用于研究中<sup>[15]</sup>。该研究基于遥感数据,

分别使用 Landsat-TM 及 Landsat-8 卫星遥感图像,根据不同波段下地物反射的特征值,利用主成分分析技术集成湿度、绿度、干度和热度 4 个指标构建 RSEI 指数,对巢湖流域生态环境质量进行评价,并对流域 11 年间的生态环境进行时空变化分析。

### 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 巢湖流域(巢湖闸上游)位于安徽省江淮地区中部,地理位置处于 116° 24' ~ 117° 56' E、30° 58' ~ 32° 06' N,整体流域面积约为 9 196 km<sup>2</sup>。行政区划上包括合肥市区、肥东县、肥西县、庐江县、长丰县、巢湖市、六安市、岳西县、含山县、舒城县及霍山县的全部或部分区域。流域西南部地区海拔较高,东北地区相对较低,整体呈现向巢湖倾斜的趋势,海拔最高处接近 1 500 m。流域主要分为平原区和丘陵山区,在巢湖流域中东部巢湖周围大部分地区高程均低于 30 m,为较平缓的平原区;巢湖流域北部地区和西部大别山区部分地区高程均在 30 m 以上,属于丘陵山区。从气候上看,流域为亚热带季风气候类型,年平均温度为 15 ~ 16 °C,年平均降水量为 1 000 ~ 1 215 mm,降水主要集中在夏季(6—8 月份)。流域植被以北亚热带落叶阔叶林和常绿阔叶林为主。

**1.2 数据来源与处理** 选用 2 景 Landsat 系列遥感影像作为数据源,日期分别为 2006 年 12 月 21 日(Landsat-TM)和 2017 年 12 月 7 日(Landsat-8)。为了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,分别对影像进行了辐射校正和几何校正。辐射

**作者简介** 李鸿芝(1994—),女,安徽芜湖人,硕士研究生,研究方向:环境参数的光学遥感。

**收稿日期** 2019-03-20

校正采用基于 Chander 等的 IACM 模型和参数<sup>[16-18]</sup>将影像的灰度值转换为传感器处反射率;采用二次多项式和最邻近象元法对影像进行几何校正,其均方根误差满足小于 0.5 个象

元的精度要求。提取县区、道路、河流、湖泊以及居民点,坐标系统统一采用 WGS84 坐标系统。

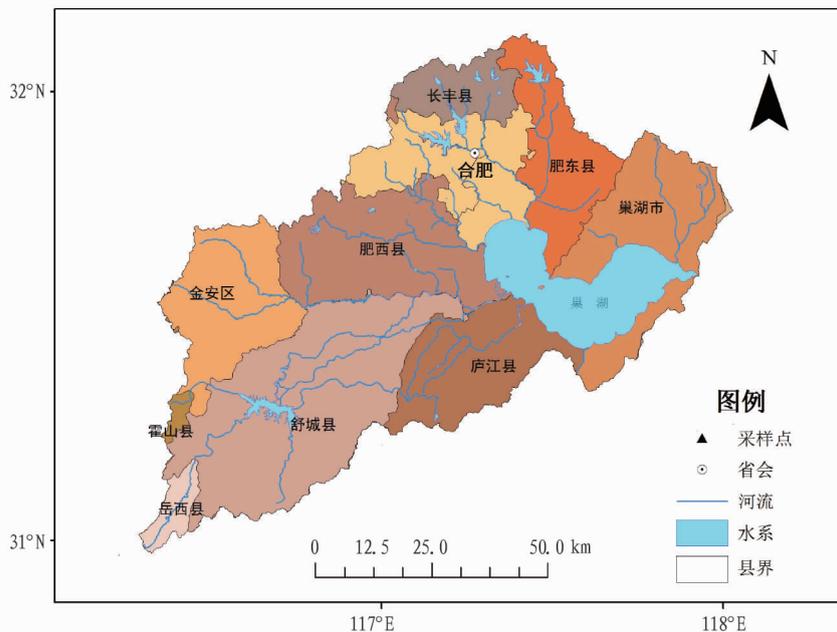


图 1 巢湖流域行政区划

Fig.1 Administrative division of Chaohu Basin

1.3 主要研究方法

1.3.1 生态环境质量评价指数提取。在许多反映生态质量环境因素中,绿色、湿度、热度、干度是与人类密不可分的重要部分,也是人类直观感觉生态条件优劣的重要因素,常被用于生态系统的监测与评价<sup>[19-22]</sup>。该研究根据徐涵秋<sup>[18]</sup>选取的指标构建遥感生态综合指数。采用植被指数代表绿色;采用地表温度代表热度;采用缨帽变换的湿度分量代表湿度;裸土和建筑不透水面都是地表“干化”的原因,因此采用建筑和裸土指数来代表“干度”,从中提取遥感信息。这样,构建的遥感生态指数(RSEI)就可以表示为这 4 个指标的函数,即:

特算法得到基于陆地成像仪大气表观反射率数据的缨帽变换系数。该系数与现有陆地成像仪变换系数相比,精度相对较高,误差较小,变换后的不同地物覆盖类型具有更好的可分性。由此得湿度分量的公式:

$$Wet = C_1 B + C_2 G + C_3 R + C_4 N + C_5 M_1 + C_6 M_2 \quad (3)$$

式中,  $B, G, R, N, M_1, M_2$  分别代表 TM 和 OLI 的蓝光、绿光、红光、近红外、短波红外 1、短波红外 2 波段的反射率(下同)。

(2) 绿色指标(NDVI)。即归一化植被指数,归一化植被指数(NDVI)在环境监测应用中最为广泛,它与植物生物量、叶面积指数和植被覆盖度都密切相关。其公式为:

$$NDVI = (N - R) / (N + R) \quad (4)$$

(3) 干度指标(NDSI)。即地表的“干化”程度,该指标并不是与湿度指标相反,它还包括地面的硬化程度等。因此除了裸土外,还要考虑建筑用地造成的土地“干化”。建筑物是人工生态系统的重要组成部分,地表原有的自然生态系统被大量出现建筑不透水面所取代,导致地表的“干化”,因此用建筑和裸土指数来代表“干度”。

干度指标由裸土指数  $SI^{[27]}$  和建筑指数  $IBI^{[28]}$  共同组成,其公式为:

$$NDSI = (SI + IBI) / 2 \quad (5)$$

其中:

$$SI = [(M_1 + R) - (N + B)] / [(M_1 + R) + (N + B)] \quad (6)$$

$$IBI = \{ 2M_1 / (M_1 + N) - [N / (N + R) + G / (G + M_1)] \} / \{ 2M_1 / (M_1 + N) + [N / (N + R) + G / (G + M_1)] \} \quad (7)$$

(4) 热度指标(LST)。热度指标由经比辐射率校正的温度来代表,可采用 Landsat 用户手册的模型<sup>[29]</sup>以及 Chander

$$RSEI = f(G, W, T, D) \quad (1)$$

其遥感定义为:

$$RSEI = f(VI, Wet, LST, NDBSI) \quad (2)$$

式中,  $G$  为绿色,  $W$  为湿度,  $T$  为热度,  $D$  为干度,  $VI$  为植被指数,  $Wet$  为湿度分量,  $LST$  为地表温度,  $NDBSI$  为建筑和裸土指数,可以分别由以下遥感指数或参量来求取。

(1) 湿度指标(Wet)。湿度指标采用缨帽变换中的湿度分量。缨帽变换在遥感影像处理中可以有效压缩数据和去除冗余,它的亮度、绿色、湿度分量与地表物理参量有直接的关系。因此可以抓住植被和土壤在多光谱空间中的特征计算出亮度、绿色、湿度等分量<sup>[23-24]</sup>,因此已被广泛地应用于生态监测中<sup>[25]</sup>。其中湿度作为第三分量与植被和土壤的湿度紧密相关,被广泛应用在生态环境监测之中。对于 Landsat-8 陆地成像仪影像,利用李博伦等<sup>[26]</sup>提出的缨帽变换系数的推算方法,利用普鲁克算法、广义普鲁克分析及格拉姆-施密

等<sup>[16]</sup>、Reza 等<sup>[30]</sup>最新修订的定标参数进行计算,首先分别将 Landsat-TM 及 Landsat-8 热红外波段 16 位量化图像的灰度值转化为光谱辐射值,再将光谱辐射值转化为亮温,公式如下:

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_\lambda + 1) \quad (8)$$

式中,  $L_\lambda$  为波段  $\lambda$  的象元在传感器处的辐射值, TM 选用 6 波段, Landsat TIRS 选用热红外 10 波段;  $K_1$  和  $K_2$  分别为定标参数。

经过计算后的亮温必须进行比辐射率纠正最后完成地表温度反演,这里 Landsat-TM 及 Landsat-8 的计算方式不同。其中 TM 的地表温度反演根据基于影像的反演算法 (IB 算法)<sup>[31]</sup> 利用 6 波段进行计算:

$$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon] - 273.15 \quad (9)$$

式中, LST 为经比辐射率校正后的温度 (°C);  $T$  为亮温 (K);  $\lambda$  为 Landsat-TM band6 的中心波长,  $\lambda = 11.45 \mu\text{m}$ ;  $\rho = h \times c / \sigma = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$ , 其中  $\sigma$  为斯特藩-波耳兹曼常数,  $\sigma = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , 普朗克常数  $h = 6.26 \times 10^{-34} \text{ Js}$ , 光速  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $\varepsilon$  为比辐射率, 其值根据 Sobrino 的模型通过 NDVI 进行估算<sup>[32-33]</sup>。

Landsat-8 的温度利用 Jiménez-Muñoz 等<sup>[34]</sup> 于 2009 年改进的单通道算法 (SC 算法) 来计算, 公式为:

$$ST = \gamma [ \varepsilon^{-1} (\psi_1 L + \psi_2) + \psi_3 ] + \delta \quad (10)$$

$$\gamma = T_2 / (b_\gamma L) \quad (11)$$

$$\delta = T - T_2 / b_\gamma \quad (12)$$

其中 Landsat-8 的热红外 10 波段与 TM/ETM+6 热红外波段具有近似的波谱范围, 因此采用 TM/ETM+6 相同的地表比辐射率计算方法。Landsat-8 的  $b_\gamma$  值为 1 324。  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、

$\psi_3$  为大气水含量参数, 由于巢湖流域大气水气含量较高, 根据徐涵秋等<sup>[35]</sup> 对地表温度反演的研究与验证, 采用 SC 算法的原始推导公式:

$$\psi_1 = 1 / \tau \quad (13)$$

$$\psi_2 = -L \uparrow - L \downarrow / \tau \quad (14)$$

$$\psi_3 = L \downarrow \quad (15)$$

式中,  $\tau$  为大气在热红外波段的透过率,  $L \uparrow$  和  $L \downarrow$  分别为大气上行和下行的辐射强度, 可以通过在 NASA 公布的网站 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) 查询, 输入成影时间、中心经纬度等参数后得到大气剖面信息:  $\tau$  为 0.97;  $L \uparrow$  为  $0.19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ;  $L \downarrow$  为  $0.33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。

**1.3.2 生态环境综合指数的构建。** 该研究采用的多元统计方法中的主成分分析 (PCA) 是一种将多个变量通过线性变换来选出少数重要变量的多维数据压缩技术<sup>[36]</sup>。它采取依次垂直旋转坐标轴的方法将多维的信息集中到少数几个特征分量, 每个特征分量往往代表一定的特征信息, 减小因人为确定权重而造成的结果潜在误差。为了统一量纲, 利用公式 (16) 将 4 个单一指标进行正规化后再进行主成分分析。再经过计算得到遥感生态指数 RSEI。为便于后期分等级评价生态, 将 RESI 正规化, 生成最终的综合指数 RSEI。

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (16)$$

## 2 结果与分析

**2.1 生态环境质量综合评价** 在遥感软件中进行主成分分析后得到协方差矩阵和相关系数矩阵, 利用特征值计算贡献率, 结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, PC1 和 PC2 的累计贡献率已经超过 85%, 表明他们集中了 4 个指标的大部分特征, 可以用这 2 个主成分来代替这 4 个指标。

表 1 指标主成分分析

Table 1 Principal component analysis of four factors

年份 Year	主成分 Main ingredient	植被指数 NDVI	湿度指数 WET	裸土-建筑指数 NDSI	地表温度 LST	特征值 Eigenvalue	特征值贡献率 Percent eigenvalue//%
2006	PC1	0.717	0.197	-0.528	0.011	0.005	58.70
	PC2	-0.684	-0.105	0.657	0.300	0.003	30.85
	PC3	-0.106	0.111	-0.485	0.861	0.001	8.88
	PC4	0.083	0.968	0.234	0.017	0	1.56
2017	PC1	0.880	0.209	-0.399	0.148	0.003	47.56
	PC2	-0.695	0.093	0.565	0.335	0.003	40.45
	PC3	-0.306	0.224	-0.111	0.919	0.001	11.58
	PC4	0.213	0.667	0.714	-0.006	0	0.42

从表 1 可以看出, 2006 年的主成分 PC1 主要与植被指数 NDVI 及湿度指数 WET 呈正相关, 与裸土-建筑指数 NDSI 呈负相关, 与地表温度 LST 相关性不明显。说明绿色指数及湿度指数对生态起正面作用, 而干度指数对生态起负面作用; 而 PC2 则是主要是与 NDSI 和 LST 呈正相关, 说明干度指数和热度指数对生态起正面作用, 虽然在第 1 主成分中 LST 也有贡献, 但是不如对第 2 主成分的贡献。2017 年中, 主成分 PC1 与 2006 年类似, 虽然 PC2 中湿度指数也有贡献, 但是不如对第 1 主成分的贡献。这些情况与实际情况也是大体吻合的。因此综合 2 个主成分与各指标的相关度可以看出, PC1 更能代表好

的生态质量, 而 PC2 更能代表差的生态质量。但是有些地区在 2 种指数上的表现并不是完全相反, 说明这 2 种指数只能表现生态质量的一部分, 因此将 PC1 和 PC2 的贡献率作为权重, 利用公式 (17) 得到最终综合指数 RSEI。

$$RSEI = (PC1 \times P_1) - (PC2 \times P_2) \quad (17)$$

式中,  $P_1$ 、 $P_2$  分别代表主成分 1、2 的贡献率。

**2.2 巢湖流域生态环境质量时空变化分析** 对指数归一化后作为评价的最终指标, 将全部数值按照 0.2 为一个间隔分为 5 个等级, 分别为差、较差、中、良和优, 得到最终统计图像和表格。从图 2 和表 2 可以看出, 巢湖流域生态环境整体上

是比较好的,2006 和 2017 年等级中等及以上的面积占陆地总面积的 90%以上,等级差和较差的面积仅占总面积的 9%不到。相较于 2006 年,2017 年的生态环境发生变化,RSEI 均值从 2006 年的 0.562 下降至 2017 年的 0.500。生态优良等

级所占面积的比例从 2006 年的 32.47%下降至 2017 年的 13.68%,减少了 18.79%;生态差和较差等级所占面积的比例从 2006 年的 5.98%上升至 2017 年的 8.61%,增加了 2.63%;生态中等的区域面积增加 16.15%。

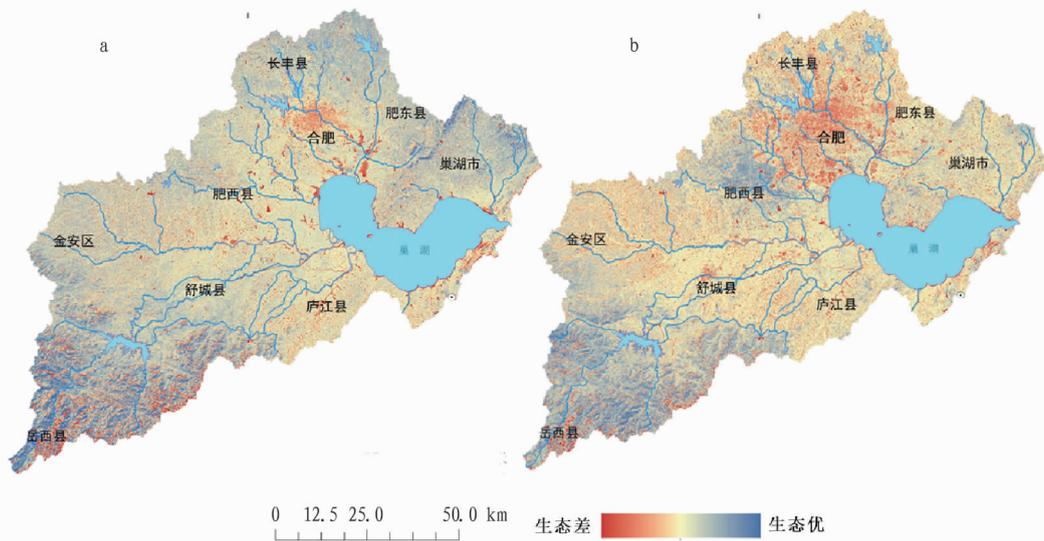


图 2 2006 年 (a) 和 2017 年 (b) 巢湖流域遥感生态指数 (RSEI) 影像

Fig.2 Remote sensing ecological index (RSEI) image of Chaohu Basin in 2006 (a) and 2017 (b)

表 2 生态等级和面积比例变化

Table 2 Changes of ecological grade and area ratio

RESI 等级 RESI grade	2006 年		2017 年	
	面积 Area km <sup>2</sup>	百分比 Percentage %	面积 Area km <sup>2</sup>	百分比 Percentage %
差(0~0.2) Poor	38.68	0.45	73.80	0.86
较差(>0.2~0.4) Relatively poor	473.19	5.53	662.97	7.75
中(>0.4~0.6) Medium	5 264.08	61.55	6 645.91	77.70
良(>0.6~0.8) Good	2 673.00	31.25	1 134.04	13.26
优(>0.8~1.0) Excellent	104.02	1.22	36.25	0.42

从空间分布上看(图 2),生态环境较差的区域集中在市级、县级行政区周围,其中合肥市区及舒城县集中呈放射状分布,而金安区、庐江区及巢湖市生态差和较差的区域较少,而岳西县整体生态环境较好。2017 年对比 2006 年,合肥市区中生态较差区域进一步扩大,向肥西、肥东、长丰县以及巢湖边缘发展,舒城县的生态较差的面积也在扩张。

通过研究区 2006—2017 年生态环境质量变化趋势(图 3)可以看出,合肥市区生态质量在研究时间内显著变差,舒城县和巢湖市略微变差,主要原因是由于社会经济和科技的发展进步,城市化的规模不断扩大,植被不断减少伴随着建筑和裸土不断增加,导致生态环境遭到破坏,巢湖流域西南的岳西县部分地区及金安区生态整体变化不大,肥西县和庐江县部分地区生态变好,因为这些地区受到人类活动的影响较少,因此生态环境较好。

### 3 结论与讨论

(1) 遥感生态指数 RSEI 选择了人们能够直接感觉的绿色

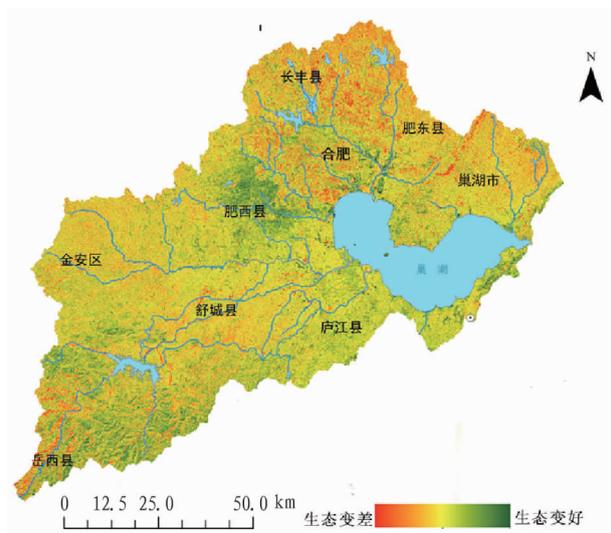


图 3 2006—2017 年巢湖流域生态环境变化趋势

Fig.3 Trends of the ecological environment of Chaohu Basin during 2006-2017

度、湿度、热度、干度 4 个指标来综合反映区域生态环境,并通过主成分变换来集成各指标,因此在克服了指标单一缺点的同时,又使得各分指标的集成更为合理,能够综合反映研究区生态质量的变化。

(2) 利用 RSEI 指数的研究表明,2006—2017 年巢湖流域总体生态质量下降明显,RSEI 均值从 2006 年的 0.562 下降至 2017 年的 0.500;生态环境较差和差的面积增加了 2.63%,生态环境优良区域面积减少了 18.79%,生态中等的区域面积增加 16.15%。在空间上,合肥市区及舒城县在整个巢湖流域中属于生态质量较差的区域,岳西县和庐江县部分地区生态质量较好。在研究时间内合肥市区生态显著变

差,肥西县北部和庐江县整体生态逐渐变好。

(3)在反映巢湖流域生态质量的4个分指标中,植被指数所代表的植被覆盖和干度指标所代表的建筑用地是影响生态质量的重要因素。绿地自然景观的大面积消减及建筑用地的大幅扩张导致了巢湖流域生态质量的下降。城市的生态质量与城市的合理规划密切相关,城市规划中需要对自然生态的保护,在发展的同时减少破坏环境,促进城市健康可持续发展。

## 参考文献

- [1] OCHOA-GAONA S, KAMPICHLER C, DE JONG B H J, 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] 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.
- [3] 李喆, 吴敏宁, 何政伟, 等. 基于 GIS 和 RS 的自贡市长山盐矿矿区生态环境评价[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 33(2): 222-226, 110.
- [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] ZHANG Y S, ODEH I O A, HAN C F. Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and ND-SI, using a sub-pixel image analysis [J]. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2009, 11(4): 256-264.
- [6] IMHOFF M L, ZHANG P, WOLFE R E, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA [J]. *Remote sensing of environment*, 2010, 114(3): 504-513.
- [7] 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.
- [8] 张燕, 隋传国, 张瑞瑾, 等. 基于 GIS 的长海海域环境信息分析[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(12): 61-63, 76.
- [9] GOWARD S N, XUE Y K, CZAJKOWSKI K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model [J]. *Remote sensing of environment*, 2002, 79(2/3): 225-242.
- [10] 国家环境保护总局. 生态环境状况评价技术规范(试行): HJ/T 192—2006 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [11] 张衍华, 毕建杰, 高珂歆, 等. 基于遥感和 GIS 的泰安市生态环境评价及动态监测研究[J]. *山东气象*, 2012, 32(1): 1-5.
- [12] 胡宝荣. 基于遥感和 GIS 技术的汶川地震前后生态环境质量评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [13] 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.
- [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] 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.
- [17] CHAVEZ P S, JR. Image-based atmospheric corrections-revisited and revised [J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1996, 62(9): 1025-1036.
- [18] 徐涵秋. 基于影像的 Landsat TM/ETM+数据正规化技术[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(1): 62-66.
- [19] IVITS E, CHERLET M, MEHL 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.
- [20] 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 [J]. *Remote sensing of environment*, 2007, 106(3): 375-386.
- [21] NICHOL J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2005, 71(6): 613-621.
- [22] ZHAO Y L, ZHANG L J. Study on method of quantitative assessment of fragile environment [J]. *Scientia geographica sinica*, 1998, 18(1): 73-79.
- [23] CRIST E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. *Remote sensing of environment*, 1985, 17(3): 301-306.
- [24] HUANG C Q, WYLIE B K, YANG L M, 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.
- [25] TODD S W, HOFFER R M. Responses of spectral indices to variations in vegetation cover and soil background [J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1998, 64(9): 915-921.
- [26] 李博伦, 逯超普, 颜晓元. Landsat 8 陆地成像仪影像的缨帽变换推导[J]. *测绘科学*, 2016, 41(4): 102-107.
- [27] RIKIMARU A, ROY P S, MIYATAKE S. Tropical forest cover density mapping [J]. *Tropical ecology*, 2002, 43(1): 39-47.
- [28] 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.
- [29] WILLIAMS D. Landsat 7 Science Data Users Handbook [M/OL]. (2012-09-05) [2019-01-15]. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html>.
- [30] REZA M I H, ABDULLAH S A. Regional Index of Ecological Integrity: A need for sustainable management of natural resources [J]. *Ecological indicators*, 2011, 11(2): 220-229.
- [31] Landsat Project Science Office. Landsat 7 science data user's handbook [M]. Washington, DC: Goddard Space Flight Center, NASA, 2002.
- [32] SOBRINO J A, JIMENEZ-MUNOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5 [J]. *Remote sensing of environment*, 2004, 90(5): 434-440.
- [33] 丁凤, 徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J]. *地球信息科学*, 2006, 8(3): 125-130.
- [34] JIMENEZ-MUNOZ J C, CRISTÓBAL J, SOBRINO J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for landsurface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 339-349.
- [35] 徐涵秋, 林中立, 潘卫华. 单通道算法地表温度反演的若干问题讨论: 以 Landsat 系列数据为例 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(4): 487-492.
- [36] 张鹏. 基于主成分分析的综合评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.

(上接第 81 页)

- [2] 刘彩虹, 徐力刚, 高海鹰. 河流水质评价方法及其研究进展[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(S2): 290-293.
- [3] 国家环保局科技标准司. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [4] 嵇晓燕, 孙宗光, 陈亚南. 城市地表水环境质量排名方法研究[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(4): 54-57.
- [5] 丁冉, 肖伟华, 于福亮, 等. 水资源质量评价方法的比较与改进[J]. *中国环境监测*, 2011, 27(3): 63-68.
- [6] 孙伟光, 邢佳, 马云, 等. 单因子水质标识指数评价方法在某流域水质评价中的应用[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(11): 181-184, 194.
- [7] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(4): 185-190.
- [8] 胡成, 苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(1): 186-192.
- [9] 孙进书, 冯海波. 河北省集中式地表饮用水评价方法研究[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2016, 26(1): 53-56, 64.
- [10] 韩雪. 河北省子牙河流域水质变化趋势及影响因子分析[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2016, 26(2): 77-81.
- [11] 生态环境部办公厅. 城市地表水环境质量排名技术规定(试行): 环办监测[2017]51号 [A]. 2017.