引文格式：何孟琦, 汪承平, 海燕, 等. 长江三角洲地区生态环境与土地利用变化研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 95-99. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.08.025

长江三角洲地区生态环境与土地利用变化研究

何孟琦[1,2]，汪承平[1,2]，海　燕[1,2]，郑舒元[1,2]，王建雄[1,2*]
（1. 云南省高校农业遥感与精准农业工程研究中心，云南 昆明 650201；2. 云南农业大学水利学院，云南 昆明 650201）

摘　要：利用遥感影像来提取与生态环境密切相关的指标，通过主成分分析及逐像元算法计算研究区遥感生态指数，同时采用标准差椭圆，并结合土地利用信息，揭示长三角地区生态环境质量空间特征以及与土地利用间的关系，结果表明：①2004—2020年长三角地区以中等和良好的生态环境状况为主，整体生态变差的区域有所减少。②从标准差椭圆转变发现，各省份生态扩展的主方向未发生较大变化，但有各自发展趋势。③研究区土地利用类型主要为耕地。生态空间用地变化中，“半生态用地→弱生态用地”占比最大。④生态质量较好的区域位于生态用地，而处于建设用地的生态环境偏差。

关键词：生态环境；遥感生态指数；土地利用信息；生态空间
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0095-05

Research on Ecological Environment and Land-use Change inYangtze River Delta

HE Mengqi[1,2], WANG Chengping[1,2], HAI Yan[1,2], ZHENG Shuyuan[1,2], WANG Jianxiong[1,2]
(1. Research Center of Agricultural Remote Sensing and Precision Agriculture Engineering in Yunnan Universities, Kunming 650201, China;
2. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In this paper, based on remote sensing images, we principal component analysis and pixel by pixel algorithm tocalculatedremote sensing ecological indicators (RSEI). Combining with land-use information, we used the standard deviation ellipse to reveal the spatial characteristics of ecological environment quality and the relationship with ecological land in Yangtze River Delta. The results show that①from 2004 to 2020, the Yangtze River Delta region is dominated by medium and good ecological environment conditions, with a decreasing in the overall ecological deterioration area. ②From the ellipse of standard deviation, it is found that the main direction of ecological expansion in each province has not changed significantly, but their own development trends are obvious. ③The land-use type in the study area is mainly arable land. Among the changes of ecological space land-use, “semi-ecological land to weak ecological land” accounted for the largest proportion. ④The area with better ecological quality is located in the ecological land, and the ecological environment deviation of the construction land is located.

Key words: ecological environment, RSEI, land-use information, ecological space

遥感技术在长期的生态监测与评估中发挥着重要作用，主要通过遥感影像信息构建各类指数来反映环境的动态变化[1-4]，但基于单方向指标或多指标加权集成描述生态环境变化不能够全面反映整个区域的生态特征，而新型的遥感生态指数（RSEI）完全基于遥感信息，能客观、定量地评价区域生态质量，因而得以广泛应用[5-6]。

选取的长江三角洲地区是我国经济产业规模最大的核心区域，采用遥感生态指数结合土地利用数据定量评估其生态系统的变化状况，并对该地区进行多指标、多时相、多角度的研究，为长三角地区的生态环境和城市发展协调规划提供一定的科学依据，进一步检验遥感生态指数的适用性。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概括

关于长江三角洲地区范围的界定缺乏统一标准，普遍认可的包括自然地理学、经济学及沉积学上划定的长江三角洲[7]。采用2019年12月国务院印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》的长江三角洲区域作为主要研究区范围，即上海市、江苏省、浙江省及安徽省全域，面积35.8 km^2。长江三角洲地区（114°～123°E，27°～35°N）整体地势平坦，由西南向东北呈降低趋势。研究区主要为亚热带季风气候，

收稿日期：2022-04-07；修回日期：2023-03-22。
项目来源：云南省教育厅科学研究基金研究生项目（2022Y285）。
第一作者简介：何孟琦（1997—），硕士研究生，研究方向为资源与环境遥感，E-mail：he_mengq@163.com。
通信作者：王建雄（1975—），博士，教授，研究方向为资源与环境遥感，E-mail：jianxiongw@126.com。

温暖湿润，雨热同期，季节分配较均匀。

1.2 数据来源

采用的遥感数据源来自于美国国家航空航天局(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/) 的 MODIS 产品，主要是选取MOD13Q1、MOD15A2H、MOD11A2和MOD09A1的数据产品，对应的指标分别为NDVI、LAI、LST、SWCI和NDBSI，年份选取为2004、2012、2020年5—10月多期影像数据。同时参考相关分类标准，结合Landsat TM/ETM数据，利用ENVI训练样本监督分类将研究区的土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等常见6类。

2 研究方法及内容

利用IDL调用MRT（modis reprojection tools）软件进行批量的格式和投影转换，并合成得到500 m×500 m空间分辨率数据，对5—10月（生长季度）的影像采用最大值合成法获得每月的生态参数信息，对其数据取均值后进行标准化无量纲处理，再利用ENVI 5.3的主成分分析模块通过原始波谱波段的线性合成，输出互不相关的主成分波段来对数据进行处理[8]。为避免主成分分析过程中大面积水体的影响，利用MNDWI水体指数增强水域信息来进行水体范围的提取，在归一化前先对水体进行掩膜处理[9]。

遥感生态指数（RSEI）是通过主成分变换得出的一个指标来评价一个地区的生态环境质量。该指数主要是通过对遥感特征增强进而从复杂的影像中提取出这些重要指标信息[10]。通常情况下，生态质量评价指标越全面，越能真实反映一个地区的生态状况，但在实际选取指标过程中应选择更具代表性、可量化的指标来参与评估体系的构建[11]。植被是生态系统中重要部分，同时地表温度、土壤湿度会影响植被生长，与生态系统状况紧密相关，因此选取能有效反映区域植被状况和地表状态的NDVI、LAI、SWCI、LST和NDBSI等指标来进行遥感生态指数的构建。

LAI和NDVI的有效范围应该分别在0~100和−1~1之间，因此要进行简单处理，如式（1）和（2）：

$$\mathrm{LAI}=DN_{\mathrm{LAI}}\times 0.1 \tag{1}$$

$$\mathrm{NDVI}=DN_{\mathrm{NDVI}}\times 0.1 \tag{2}$$

式中，DN_{LAI}，DN_{NDVI}为MOD13Q1、MOD15A2H影像的像元灰度值。

LST地表温度数据需要处理后换算为摄氏温度，如式（3）：

$$\mathrm{LST}=DN_{\mathrm{LST}}\times 0.02-273.15 \tag{3}$$

式中，DN_{LST}为MOD11A2影像的像元灰度值。

SWCI指数可较好地反映地表植被、土壤中的含水量，并有效减少大气影响，此处利用地表反射数据产品的中红外波段反射波段值进行计算，如公式（4）[12]：

$$\mathrm{SWCI}=(b_6-b_7)/(b_6+b_7) \tag{4}$$

式中，b_6、b_7为MOD09A1影像的第6、7波段的反射率值。

NDBSI指数是以裸土指数（SI）和建筑指数（IBI）两者合成得到，能同时考虑到土壤和建筑用地带来的土地干化影响[13]。

$$\mathrm{NDBSI}=(SI+\mathrm{IBI})/2 \tag{5}$$

式中，SI、IBI分别为MOD09A1影像的相关波段计算得到的裸土指数和建筑指数。

公式（1）~（5）处理后若出现异常值会影响后续归一化的效果，需要将异常值剔除，并将值处理到有效范围内，在进行主成分变换前，必须先对这些指标进行标准化，避免权重失衡。

主成分分析后的第一主成分PC1涵盖了原变量主要信息，遥感生态指数（RSEI）是各评价指标综合作用的结果，还需对PCA分析的初始值PC1进行正规化处理并归一化后得到最终研究区的遥感生态指数。

$$\mathrm{RSEI}_0=1-\mathrm{PC}_1\{f(\mathrm{NDVI},\mathrm{LAI},\mathrm{SWCI},\mathrm{LST},\mathrm{NDBSI})\} \tag{6}$$

$$\mathrm{RSEI}=\frac{(\mathrm{RSEI}_0-\mathrm{RSEI}_{\mathrm{MIN}})}{(\mathrm{RSEI}_{\mathrm{MAX}}-\mathrm{RSEI}_{\mathrm{MIN}})} \tag{7}$$

式中，RSEI为最终建立的遥感生态指数，其值大小反映生态系统质量好坏；RSEI_0为原始遥感生态指数；$\mathrm{RSEI}_{\mathrm{MAX}}$、$\mathrm{RSEI}_{\mathrm{MIN}}$分别为$\mathrm{RSEI}_0$的最大值和最小值。

3 结果与分析

3.1 生态环境指标主成分分析

从主成分分析表1可看出：3个时间段的第一主成分（PC1）的贡献率都大于85%，表明PC1已涵盖指标的大部分特征较为稳定；在第一主成分中，SWCI、NDVI、LAI呈正值，表明这几个分量共同对生态起正面的作用；而LST、NDBSI呈负值，说明对生态起负面影响。

2004年、2012年和2020年各指标间及各指标与遥感生态指数的相关性。指标中各生态指标之间相关度绝对值范围为0.594 ~0.843，平均相关度最高的为SWCI，3个时间段平均值为0.833，平均相关度最

表1　指标主成分分析

年份	指标	PCI	PC2	PC3	PC4	PC5
2004	NDVI	0.348	−0.057	−0.020	−0.027	0.001
	LAI	0.061	0.131	0.005	−0.024	−0.002
	SWCI	0.388	0.078	−0.014	0.020	0.003
	LST	−0.251	−0.010	0.054	−0.001	−0.003
	NDBSI	−0.047	−0.002	0.014	−0.005	0.018
	特征值	0.341	0.027	0.004	0.002	0.001
	特征值贡献率/%	91.33	7.11	1.00	0.46	0.09
2012	NDVI	0.361	−0.065	−0.021	−0.025	0.001
	LAI	0.057	0.137	0.004	−0.025	−0.001
	SWCI	0.379	0.088	−0.017	0.020	0.003
	LST	−0.271	−0.008	0.056	−0.001	−0.002
	NDBSI	−0.054	−0.003	0.012	−0.004	0.017
	特征值	0.353	0.031	0.004	0.002	0.001
	特征值贡献率/%	90.59	7.88	1.02	0.44	0.08
2020	NDVI	0.357	0.069	0.023	0.025	−0.001
	LAI	0.058	0.137	0.005	−0.026	−0.001
	SWCI	0.370	0.094	−0.019	0.020	0.002
	LST	−0.264	−0.009	0.059	0.000	−0.003
	NDBSI	−0.025	0.001	0.013	−0.003	0.016
	特征值	0.338	0.033	0.005	0.002	0.001
	特征值贡献率/%	89.64	8.62	1.22	0.46	0.07

高最低的为LST，3个时间段平均值为0.611。遥感生态指数与其他生态指标间3个年份的相关系数平均值为0.834，比单个指标的总平均值0.742高12.5%。遥感生态指数与各生态因子的相关度越强，表示它更能综合代表各因子信息，反映地区生态状况。

3.2　生态环境质量分级时空特征

为了更好地分析研究区的生态环境状况变化特征，参考相关分级标准[14]，将生态指数以0.2间隔划分为5个等级，分别代表着不同的生态环境状况。研究区域2004—2020年主要以中等和良好的生态环境状况为主，所占比例为82.85%、68.94%、67.58%，呈下降态势，但仍处于主导地位，其中2012—2020年中等和良好的等级比例下降了1.36%，相较于2004—2012年下降比例（13.97%）明显减少，说明早期长江三角洲地区发展迅速，加大城市建设推进，生态环境资源为经济社会发展而服务，进而环境承载压力增加。随着对长三角兼顾生态效益的绿色发展要求，加大生态治理为改善环境做出了贡献。

结合图1可知，在空间上生态等级好的地区主要集中于长三角西南和东南部，即浙江省份大部分区域和安徽省南部，以山地丘陵地势为主，植被覆盖度高，生态环境状况也较其他地区更好。生态等级差的地区主要集中于中部偏东处城市建成区，沿江发展的东段城市化相比西段较高，生态指数也较低。

2004年区域生态环境整体适中，等级偏低的区域集中于长江口沿岸江苏、上海的城建区以及浙江北部，城区的人口密度相对较高，对植被生态影响大，生态等级差。随着城建规模扩大、生态环境也随之受到影响，2012年区域生态环境质量呈下降趋势，生态等级差的区域范围以长江口为中心向外扩大，江苏、安徽的北部以及浙江中部、沿海地带也存在少量聚集分布。相较于2012年，2020年城市发展扩张，造成生态退化的同时，部分东部城市建成区中心生态指数升高，生态等级有所增加，这是城市化达到一定程度后，这些区域采取对应保护措施使得环境得到轻微改善。

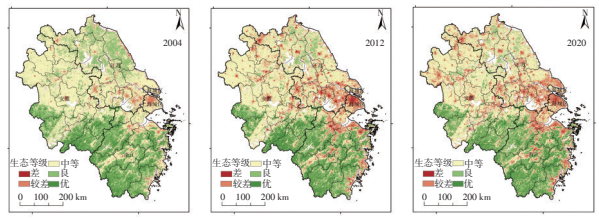


图1　2004、2012和2020年长三角地区生态环境状况分布

3.3　生态环境质量变化及空间分布

为进一步分析长三角地区2004—2020年生态环境质量变化的差异状况，对数据进行差值处理，得到的等级变化统计结果如表2所示，可以看出2004—2012年和2012—2020年生态变好的区域面积分别达15 448.25 km^2 和 28 284.50 km^2，占比为4.82%和8.78%，生态变差的区域面积分别为82 705.00 km^2 和42 446.75 km^2，占比为25.79%和13.17%，尽管2004—2020年长三角整体生态变差的区域占比为28.86%远高于生态变好的区域（5.00%），但2012—2020年变差和变好区域占比差值远小于2004—2012年。

利用标准差椭圆方法可展现空间点要素密集程度，描述分布范围动态变化[15]。通过该方法来分析3个年份整体上生态质量的动态变化及分布，椭圆长轴代表数据分布方向，短轴代表分布范围。由于研究区较大不具代表性，因此将方法应用于研究区所包含的各个省份。整体上，3个时间段内，各省份标准差椭圆长轴方向一致，上海和浙江呈东北—西南走向，江苏和安徽呈东南—西北走向，说明未来的生态扩张也是同样的方向。从空间差异来看，上海2020年椭圆短

表2 长三角生态等级变化

级别	2004—2012年		2012—2020年		2004—2020年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
变差	82 705.00	25.79	42 446.75	13.17	94 655.50	28.86
不变	222 475.25	69.39	251 541.50	78.05	216 859.25	66.14
变好	15 448.25	4.82	28 284.50	8.78	16 355.25	5.00

轴相较于2004年有所增加，说明上海生态质量未来往东西两侧方向发展，而长轴2012年呈收缩趋势，2020年有所减缓，说明上海前期城区建设与生态不协调，后期推进生态治理，生态退化有所减缓。浙江的椭圆短半轴接近于长半轴，且标准差椭圆的变化幅度不大，表明浙江的生态整体都是处于比较稳定的状态，这得益于该地区山地植被覆盖高，生态环境水平高。江苏长轴2012年和2020年较2004年有所增加，且生态质量重心向南部偏移，与生态治理方向一致。安徽因其地势南高北低，决定了城镇分布的格局，长轴2012年和2020年较2004年明显减少，这说明安徽城市化对环境造成压力，生态扩张减缓，未来在城区建设过程中应重视生态治理。

3.4 土地利用与生态环境状况之间的关系

土地利用的演变会造成土地覆盖的变化，进而影响区域内生态环境因子，使得生态环境状况发生根本变化。研究分别对2004年和2020年的土地利用类型数据与遥感生态指数进行相应处理并进行统计，分析土地利用类型变化及与生态环境间的关系。从土地动态转移方向看，研究区土地利用类型主要为耕地，近16 a间减少了13 229 km²，其中大部分转换为建设用地，面积为29 527.67 km²，其次是转换为林地。研究区林地相对集中，草地主要分布在林地周边，两者面积都有所减少，草地主要转化为耕地和林地。2004—2020年间建设用地面积共增加13 249.94 km²，增速为828 km²/a，同时水域和未利用地也都有所增加。

2004—2020年研究区土地利用类型有着不同程度的改变，为了直观地看出空间用地的变化，在土地利用类型基础上再划分为3种生态用地类型，即包含林地、草地、水域、天然未利用土地等类型的生态用地，有着相当重要的生态价值；以耕地为主的半生态用地，有较强食物供给功能，生态调节功能有限；以建设用地主导的弱生态用地，对生态具有负面作用[16]。土地利用类型发生改变的范围占研究区总面积的28.65%，其中“半生态用地→弱生态用地”占比最大，占总变化面积的29.79%，面积为30 046 km²，表明平均每年有1 877.88 km²耕地转变为建设用地，“半生态用地→弱生态用地”主要集中于江苏省和安徽省北部。其次是“半生态用地→生态用地”、“生态用地→半生态用地”和“弱生态用地→半生态用地”，占比分别为22.56%、21.32%和18.11%。江苏省和安徽省土地类型转换的面积较多，上海市转换面积最少，但转换类型都以“半生态用地—弱生态用地”为主，浙江省则是主要在半生态用地与生态用地之间相互转换。半生态用地与弱生态用地类型间转变主要分布在平原地区，即安徽北部，江苏省和上海市大部分，而半生态与生态用地类型间转换主要集中于安徽南部与浙江大部分。

由表3可得，2004年不同土地利用类型下的遥感生态指数均值由大到小排序依次为：林地、草地、耕地、未利用地、水域、建筑用地。2020年各土地利用类型下的遥感生态指数均值由大到小排序依次为林地、草地、耕地、水域、未利用地、建筑用地。通过比较表明，生态环境质量较好的区域主要位于林地、草地，天然未利用地等生态用地，天然未利用地有着原生植被，但会受环境影响改变，因而遥感生态指数会有特殊变动。而生态环境质量差的区域主要处于建设用地等弱生态功能区。

表3 长三角生态等级变化

年份	统计量	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
2004	最小值	0.066	0.016	0.024	0.027	0.132	0.024
	均值	0.554	0.731	0.667	0.489	0.504	0.488
	最大值	0.965	0.996	0.980	0.882	0.925	0.969
2020	最小值	0.094	0.078	0.090	0.071	0.110	0.078
	均值	0.476	0.721	0.651	0.445	0.430	0.373
	最大值	0.984	0.999	0.976	0.941	0.961	0.961

4 结论与讨论

通过分析2004、2012和2020年长三角地区的生态环境质量状况时空特征及其与土地利用信息间的变化关系得出：

1）长三角地区NDVI、LAI和SWCI对RSEI起正相关的作用。其中，SWCI和NDVI对该区域的影响最

大，生态质量的改善表现在地表植被覆盖增加，土壤含水量会影响植被生长，而建成区地表多为不透水面。

2）长三角地区2004—2020年以中等和良好的生态环境状况为主，占比分别为82.85%、68.94%、67.58%，处于主导地位，其中2012—2020年相较于2004—2012年下降比例明显减缓，早期随着城市化水平的提高，长三角地区生态问题日益突出，后续治理使得生态质量有所改善，但总体上生态质量处于下降趋势，仍需加强环境保护。在空间上生态等级好的地区主要集中于长三角西南部，以林地为主。长江三角北部平原主要以耕地为主，生态价值有限，生态环境状况一般。生态等级差的区域主要集中于植被覆盖度较低的城镇地区。

3）2004—2020年长三角整体生态变差的区域占比为28.86%，远高于生态变好的区域（5.00%），但2012—2020年生态变好的区域面积较2004—2012年有所增加，生态变差的区域则有所减少，生态退化有所放缓。

4）从标准差椭圆转变可以发现，3个时段内，各省份生态扩展的主要方向没有发生较大变化，上海市生态质量较好的区域在空间上往黄浦江两岸扩展，浙江省整体生态较好区域呈稳定发展的状态，江苏和安徽省生态扩张方向为东南—西北走向，同时也在增加南部生态的区域，表明江苏南部城市生态将有改善趋势，而安徽生态资源主要集中于南部，也将继续维持该区域的生态可持续性。

5）研究区土地利用类型主要为耕地，2004—2020年间大部分转换为建设用地且持续增多；草地、林地面积有所减少；水域和未利用地呈增加态势。生态空间用地类型变化中，“半生态用地→弱生态用地”占比最大，占总变化面积的29.79%，表明研究阶段建设用地保留度最高，城市的扩张以耕地为主要转化源，其次半生态用地与生态用地之间的相互转换，城市扩张占用耕地同时伴随着少部分其他生态用地转换为耕地。

6）生态环境质量较好的区域主要位于生态用地，而弱生态功能区的生态环境质量偏差，这与实际的对应关系是相一致的。在生态修复与治理的进程中，应合理配置土地资源，尽可能保留原生态用地，在规划城市发展同时兼顾资源的可持续性。未来还可考虑将气候因素、夜间灯光指数等作为影响因子对其地区生态环境做更全面的定量评价研究。

参考文献

[1] 郑子豪，吴志峰，陈颖彪，等. 基于Google Earth Engine的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J]. 生态学报，2021，41(2):717-729

[2] 孟盖，张运，支俊俊，等. 快速城市化背景下生态系统服务价值时空演变:以南京市为例[J]. 水土保持通报，2021，41(3):296-304

[3] Lu D，Song K，Zang S，et al. The Effect of Urban Expansion on Urban Surface Temperature in Shenyang，China: an Analysis with Landsat Imagery[J]. Environmental Modeling & Assessment，2015，20(3):197-210

[4] Ali S，Cheema M，Waqas M M，et al. Hangesin Snow Cover Dynamics Over the Indus Basin: Evidences from 2008 to 2018 Modis Ndsi Trends Analysis[J]. Remote Sensing，2020，12(17):2 782

[5] 吕宝奇，牛瑞卿，张培佩，等. 松宜煤矿区生态环境质量变化监测与评价[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版)，2021，36(4):15-24

[6] 胡翔，白文科，董鑫. 四川省九寨沟县地震前后区域生态环境质量评价[J]. 生态学杂志，2020，39(3):969-978

[7] 王坤. 长江三角洲地区土地利用/覆被变化及其生态效应分析[D]. 徐州:江苏师范大学，2019

[8] 李冠稳，高晓奇，肖能文. 基于关键指标的黄河流域近20年生态系统质量的时空变化[J]. 环境科学研究，2021，34(8):1-12

[9] 乔丹玉，郑进辉，鲁晗，等. 面向不同环境背景的Landsat影像水体提取方法适用性研究[J]. 地球信息科学学报，2021，23(4):710-722

[10] 吴志杰，王猛猛，陈绍杰，等. 基于遥感生态指数的永定矿区生态变化监测与评价[J]. 生态科学，2016，35(5):200-207

[11] 何念鹏，徐丽，何洪林. 生态系统质量评估方法:理想参照系和关键指标[J]. 生态学报，2020，40(6):1 877-1 886

[12] 李冠稳，肖能文，李俊生. 基于理想参照系-关键指标的赤水河流域生态系统质量变化趋势分析[J]. 生态学报，2021，41(18):7 114-7 124

[13] 曹辰，杨国林，锁旭宏，等. 基于遥感生态指数的阜新市生态环境变化分析[J]. 西北林学院学报，2022，37(2):200-207

[14] 杨羽佳，张怡，匡天琪，等. 利用改进城市遥感生态指数的苏州市生态分析[J]. 测绘科学技术学报，2021，38(3):323-330

[15] 高鹏文，阿里木江·卡斯木，图尔荪阿依·如孜，等. 哈密市生态环境效益时空分析[J]. 干旱区研究，2020，37(4):1 057-1 067

[16] 殷嘉迪，董金玮，匡文慧，等. 20世纪90年代以来中国生态空间演化的时空格局和梯度效应[J]. 生态学报，2020，40(17):5 904-5 914