

doi: 10.12029/gc20210410

周权平, 张澎彬, 薛腾飞, 姜月华, 郭琳, 杨冉冉. 2021. 近 20 年来长江经济带生态环境变化[J]. 中国地质, 48(4): 1127–1141.

Zhou Quanping, Zhang Pengbin, Xue Tengfei, Jiang Yuehua, Guo Lin, Yang Ranran. 2021. Ecological environment changes in Yangtze River Economic Zone in recent 20 years[J]. *Geology in China*, 48(4): 1127–1141(in Chinese with English abstract).

近 20 年来长江经济带生态环境变化

周权平^{1,2}, 张澎彬³, 薛腾飞³, 姜月华^{1,2}, 郭琳^{4,5}, 杨冉冉⁶

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016; 2. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏南京 210016; 3. 浙江环球星云遥感科技有限公司, 浙江湖州 313200; 4. 首都师范大学地面沉降机理与防控教育部重点实验室, 北京 100048; 5. 首都师范大学水资源安全北京实验室, 北京 100048; 6. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:长江经济带发展战略实施以来, 长江上、中、下游地区经济快速发展, 与此同时, 生态系统不可避免受到扰动, 长江经济带生态环境状况面临压力, 亟需开展长江经济带生态环境质量评价。本文选取 2001 年和 2020 年 MODIS 和 Landsat 遥感影像计算湿度、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, 对长江经济带 11 省(市)生态环境现状及变化进行定量分析评价。结果表明长江经济带整体生态环境等级为较优, 2001—2020 年保持总体向好态势。空间分布上, 生态环境优等区域主要分布于武夷山、罗霄山、雪峰山、武陵山、巫山、大巴山、大别山、西双版纳等山地丘陵一带, 生态环境较差及差等区域主要分布于大中小城镇等人类聚集地、川西横断山区。时空变化上, 生态环境等级下降区域主要集中在长三角太湖周边、江汉平原、洞庭湖周边、安徽西北部、湖南南部及四川盆地等人类聚集地周边, 生态环境等级上升区域主要集中在四川盆地大部、重庆山区及三峡库区、贵州大部、云南东南部、安徽中部及北部、江苏北部等地区。

关键词:长江经济带; 遥感生态指数; 生态环境变化; 遥感大数据; 谷歌地球引擎; 地质调查工程
中图分类号: X141 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)04-1127-15

Ecological environment changes in Yangtze River Economic Zone in recent 20 years

ZHOU Quanping^{1,2}, ZHANG Pengbin³, XUE Tengfei³, JIANG Yuehua^{1,2}, GUO Lin^{4,5}, YANG Ranran⁶

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Zhejiang Earthstar Remote Sensing Technology Co., Ltd., Huzhou 313200, Zhejiang, China; 4. Key Laboratory of Mechanism, Prevention and Mitigation of Land Subsidence, MOE, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 5. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 6. Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Since the implementation of the Yangtze River Economic Zone strategy, the economy of provinces and cities along the Yangtze River has developed rapidly. At the same time of economic growth, the ecosystem has been strongly disturbed. The

收稿日期: 2021-03-19; 改回日期: 2021-07-09

基金项目: 中国地质调查局项目“长江经济带地质资源环境综合评价”(DD20190260)资助。

作者简介: 周权平, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事环境地质和水文地质调查研究工作; E-mail: 191614012@qq.com。

ecological environment of the Yangtze River Economic Zone is facing a severe challenge, which seriously restricts the sustainable development of the Yangtze River Economic Zone. The MODIS and Landsat remote sensing images in 2001 and 2020 were selected as the evaluation indexes of humidity, greenness, dryness and heat to calculate the Remote Sensing Ecological Index (*RSEI*) by means of principal component analysis method, and finally to quantitatively analyze and evaluate the ecological environment status and changes of 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Zone. The results show that the overall ecological environment grade of the Yangtze River economic zone is optimal, and especially it maintained the overall stable and slightly better trend from 2001 to 2020. The optima ecological environment regions are mainly distributed in Wuyi Mountain, Luoxiao Mountain, Xuefeng Mountain, Wuling Mountain, Wushan Mountain, Dabie Mountain, Xishuangbanna and other areas, while the poor and poor ecological environment regions are mainly distributed in large, medium and small towns, Hengduan Mountain Area in Western Sichuan. The eco-environment grade declining areas are mainly concentrated in the Yangtze River Delta, Taihu Lake, Jiangnan Plain, Dongting Lake, Northwest Anhui, southern Hunan and Sichuan Basin. While, the eco-environment grade rising areas are mainly concentrated in most of Sichuan Basin, Chongqing mountain area and Three Gorges Reservoir area, most of Guizhou, Southeast Yunnan, central and Northern Anhui and Northern Jiangsu.

Key words: Yangtze River Economic Zone; remote sensing ecological index; ecological environment change; remote sensing big data; google earth engine, geological survey engineering

About the first author: ZHOU Quanping, male, born in 1982, senior engineer, engaged in environmental geology and hydrogeological survey research; E-mail: 191614012@qq.com.

Fund Support: Supported by the project of China Geological Survey "The comprehensive assessment of geological resources and environment of the Yangtze River Economic Zone (No. DD20190260)".

1 引 言

长江经济带发展是中共中央作出的重大决策,是关系国家发展全局的重大战略。新形势下推动长江经济带发展,要把修复长江生态环境摆在压倒性位置,坚持共抓大保护、不搞大开发。2020年12月26日,十三届全国人大常委会第二十四次会议表决通过《长江保护法》,旨在加强长江流域生态环境保护 and 修复,促进资源合理高效利用,保障生态安全,实现人与自然和谐共生、中华民族永续发展,形成一套保护母亲河的硬约束机制。长江流域经济社会发展,应当坚持生态优先、绿色发展的战略导向。因此,查明长江经济带生态环境状况是开展长江流域生态环境保护 and 修复的首要任务。

长江经济带覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、四川、重庆、云南、贵州等11个省(市),面积约204.89万km²,占全国陆地面积的21.33%,人口5.95亿,占全国总人口的43%,国内生产总值总量接近37.38万亿元,占全国经济总量的45.19%(2017年),是中国综合实力最强、战略支持力度最大的区域之一(姜月华,2017)(图1)。长江经济带在中国社会经济发展全局和区域发展总体格局中

具有重要战略地位。当前,生态环境监测和评价的方法比较多,其中遥感技术以其快速高效、现势性强、客观准确和覆盖范围广等优势在生态环境领域得到广泛的应用,用各种遥感指数来对山、水、林、田、湖、草乃至整个流域的生态系统进行监测和评价,成为评价区域生态环境的有效手段之一(Kerr et al., 2003)。国内外许多学者在利用遥感技术进行生态环境评价方面开展了大量的研究工作,多采用各种遥感指数进行动态监测和评估(Crist, 1985; 赵跃龙, 1998; Goward et al., 2002; Huang et al., 2002; 孙延贵, 2003; José et al., 2004; Nichol, 2005; 陈江等, 2007; Xu, 2010; Huang et al., 2012; Gupta et al., 2012; Baig et al., 2014; 滕明君等, 2014; 杨绘婷等, 2020)。Nichol(2005)提出了利用Landsat ETM+和Aster传感器计算地表温度的算法。孙延贵等(2003)通过目视解译地貌、水体、植被、地质灾害四大类型遥感因子,结合非遥感因子特征对青海生态环境进行遥感分区。陈江等(2007)选用遥感数据记录的植被覆盖变形信息,联合气候变化信息,探讨了全球变暖大背景下的青藏高原生态环境变化趋势。Gupta et al.(2012)在绿度指数(Green Index)的基础上,提出了基于光学遥感数据的城市邻近绿

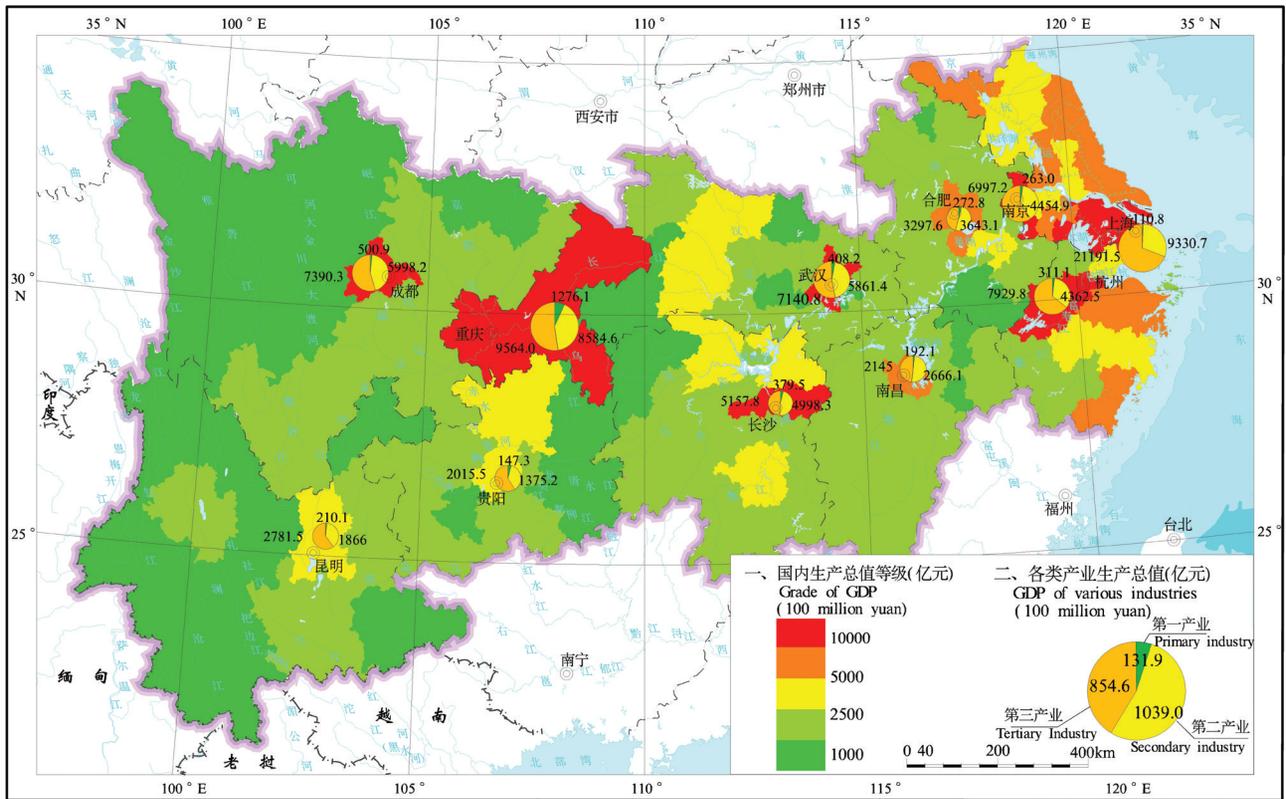


图1 长江经济带国内生产总值分布图
Fig.1 Distribution of GDP of the Yangtze River Economic Zone

度指数 (Urban Neighborhood Green Index, UNGI), 用于评价城市区域绿色空间。

由于生态环境影响因素十分复杂,包含自然因素和人文因素,单一的因子无法客观、全面地反映生态环境变化(满苏尔·沙比提,2008)。2006年,环境保护部颁发了《生态环境状况评价技术规范》,并推出了生态环境状况指数EI,综合了生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地退化和环境质量指数,2015版本在2006版本《规范》基础上增加了一个环境限制指数的约束性指标,这对于大尺度范围的计算可以忽略不计。EI旨在提供一种年度县级以上生态环境综合评价标准(国家环保总局,2006)。但是土地退化和环境质量指标难以用遥感手段获取,限制了EI指数的推广使用。徐涵秋(2013a)提出了新型遥感生态指数(Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI),该指数能够集成多种指标因素,完全基于遥感技术、指标容易获得、没有人为权重设定、且结果能被可视化,将绿色、湿度、干度、和热度4个遥感指数综合起来形成一种新方法,在区域生态环

境监测和评价中具有较好的优势和应用价值(茹克亚·萨吾提,2020)。

本文以长江经济带11省市为研究区,在遥感云计算平台支持下,将遥感生态指数的应用范围拓展到整个长江经济带,利用遥感生态指数RSEI对该区域近20年的生态环境动态变化进行分析,以长江中上游防护林一期工程(1988—2000年)次年2001年为基准年,2020年为现状年这两个有代表性的年份,分析生态环境的时空动态变化,为保障长江经济带新型城镇化建设、产业化转型与生态环境可持续发展提供方法和科学依据。

2 研究区与遥感数据源

2.1 长江经济带区域地质概况

长江是中国独有的亚洲第一大河,发源于唐古拉山北坡,流域横跨中国东中西三大区域。长江经济带由西向东贯穿青藏高原东南缘、云贵高原、江南丘陵以及四川盆地、两湖平原、鄱阳湖平原和长江中下游平原。构造上跨越了川滇藏造山系、扬子

陆块区和武夷—云开—台湾造山系(又称华南造山带或褶皱带),包括多个不同演化历史的次级构造块体。因此,该区不仅具有独特的地貌特征,而且具有复杂的地质构造与断裂体系(吴中海,2016)。

长江经济带地势西高东低,地貌、地层、地质构造、水文地质和工程地质情况复杂且多变,上中下游差异明显,资源环境条件和重大地质问题与地貌及地质背景密切相关(姜月华,2019)。长江经济带地貌概况如图2所示,可划分出东部低山平原、东南低—中山地、西南中高山地和青藏高原四个地貌区,主要呈现以下几个特点(姜月华,2017):

(1)地层发育齐全:长江经济带在大地构造上,主体部分为北北东方向分布的稳定地块,地层自太古宇至新生界第四系均有出露。各陆块和造山系沉积环境、岩浆作用、变质作用和构造作用均各不相同。

(2)地质构造演化历史复杂:太古宙至古元古代为陆块基底形成时期,中元古代—新元古代中期为超大陆裂解—三大洋形成发展—大陆边缘多岛弧盆系形成—转化为造山系,新元古代晚期—中三

叠世为华北和扬子等陆块陆缘增生及其彼此之间聚合时期,晚三叠世以来主要受到西南印度板块与欧亚板块陆陆碰撞造山导致的青藏高原物质向东挤出和东部太平洋板块向西俯冲的双重影响。

(3)水文地质条件复杂且上中下游差异明显:地下水类型较全,包括孔隙水、岩溶水、裂隙水和孔隙裂隙水等。碎屑岩类裂隙—孔隙水主要分布于四川盆地,基岩裂隙水分布于广大丘陵山区,岩溶裂隙溶洞水主要分布于西部的云贵高原,松散岩类孔隙潜水及承压水主要分布于长江三角洲平原、鄱阳湖平原及江汉和洞庭湖平原的第四系含水层中(图3,表1)。

2.2 长江经济带资源环境概况

长江经济带水资源、耕地、生态用地等资源条件十分优越(姜月华,2019):(1)水资源:长江经济带多年平均水资源量约16000亿m³,其中约88.7%为地表水资源,开发利用强度为16.7%,是中国战略水源地,每年向西北、华北地区供水可达200亿m³。(2)耕地资源:长江经济带耕地面积约4500万hm²,占全国耕地总面积的33.4%。耕地环境质量总体

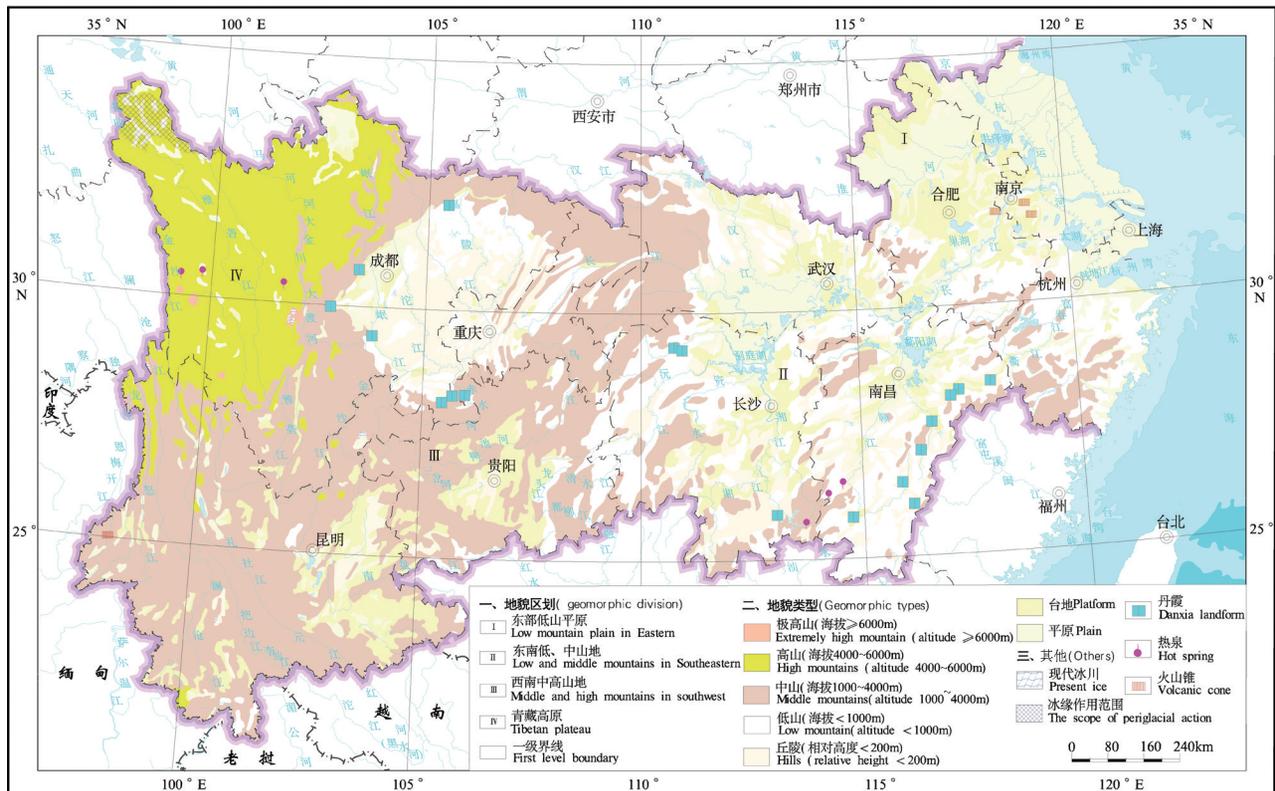


图2 长江经济带地貌图
Fig.2 Geomorph map of the Yangtze River Economic Zone

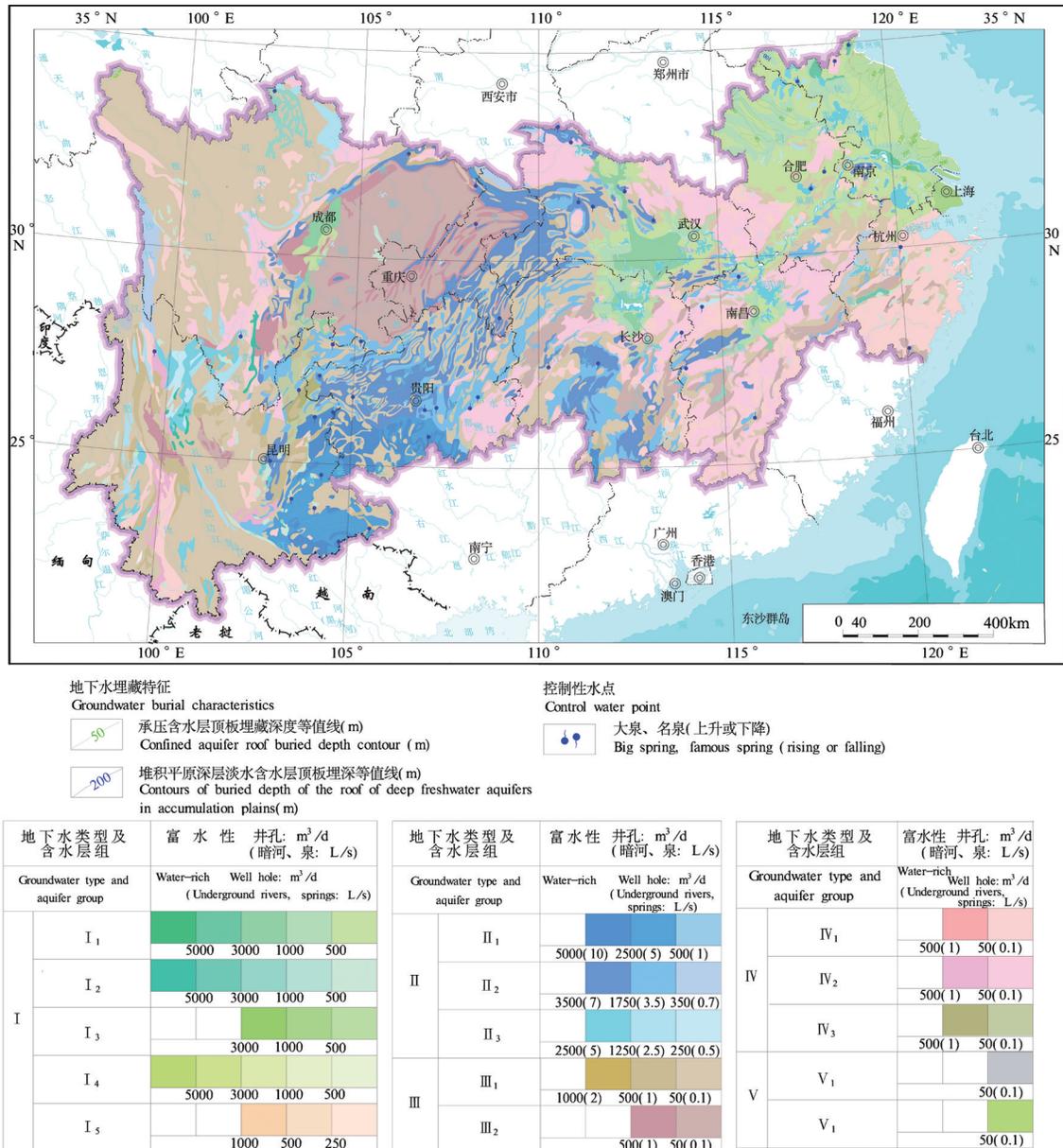


图3 长江经济带水文地质图
Fig.3 Hydrogeological map of the Yangtze River Economic Zone

良好,无重金属污染耕地约3000万hm²,主要分布在四川盆地、江汉平原、鄱阳湖平原、巢湖平原、洞庭湖平原和太湖平原等地区(谢学锦等,2002;汪庆华等,2011;刘应平等,2012;成杭新等,2015)。(3)生态用地:长江经济带林地、草地、湿地、湖泊等分布广泛,生态用地面积约150万km²,有1000余处保护区,包括世界遗产、国家级自然保护区、国家级地质公园等,另有近3000处地质遗迹。

2.3 遥感数据源介绍

随着遥感技术的发展,光学、热红外和微波等

大量不同卫星传感器对地观测的应用,获取的同一地区的多种遥感影像数据(多时相、多光谱、多传感器、多平台和多分辨率)越来越多。

多源遥感影像数据具有如下特点:(1)冗余性:多源遥感数据对环境或目标的表示、描述或解译结果相同;(2)互补性:信息来自不同的自由度且相互独立;(3)合作性:不同传感器在观测和处理信息时对其他信息有依赖关系。

本文监测时间跨度长(2001—2020年)、覆盖范围广(长江经济带9省2市)等特点,需要多源遥感

表1 地下水类型及含水层组
Table 1 Groundwater type and aquifer strata

地下水类型	含水层组
松散沉积物孔隙水(I)	松散沉积物孔隙水(I ₁)
	山间盆地冲积层孔隙水(I ₂)
	滨海平原冲积、海积层孔隙水(I ₃)
	内陆盆地冲积、洪积层孔隙水(I ₄)
碳酸盐岩裂隙溶洞水(II)	黄土高原黄土层孔隙水(I ₅)
	峰丛峰林裂隙溶洞水(II ₁)
	岩溶丘陵裂隙溶洞水(II ₂)
碎屑岩孔隙裂隙水(III)	岩溶山地裂隙溶洞水(II ₃)
	丘陵山地砂砾岩孔隙裂隙水(III ₁)
	丘陵盆地红层孔隙裂隙水(III ₂)
岩浆岩变质岩裂隙水(IV)	山地、丘陵岩浆岩裂隙水(IV ₁)
	山地变质岩裂隙水(IV ₂)
	熔岩孔隙裂隙水(IV ₃)
冻结层水(V)	中低纬度高原基岩冻结层上水(V ₁)
	中低纬度高原松散沉积冻结层上水(V ₂)

协同合作,充分发挥多源遥感数据的互补性、合作性特点。

本文在全面了解工作区的自然地理、地形地貌、社会经济等方面的信息,确定了遥感解译的工作任务、内容和目标,尽可能收集工作区自然地理、地质环境、社会经济等资料,收集工作区地形图和DEM数据,收集与地质环境有关的图件、文字资料和数据表格等。同时,针对本研究的工作内容,尽可能选择时相合适的遥感影像数据,即遥感影像一般应无云覆盖、无云影、无感光处理缺陷,影像清晰、反差适中,影像内部和相邻影像间无明显偏光、偏色现象。所收集的数据包括:(1)Landsat遥感影像数据:2001年采用Landsat-5遥感影像数据,2020年采用Landsat-8遥感影像数据。(2)MODIS遥感影像数据:2001年和2020年。遥感影像数据参数如表2所示。

3 长江经济带生态环境遥感评价方法

3.1 Google Earth 遥感云计算

Google Earth Engine(GEE)是谷歌(Google)公

司开发的地理空间云计算平台,基于Google提供的巨大计算能力,具备全球尺度的地理空间数据分析能力。GEE平台包含了PB级别的公共地理空间数据库、高性能的并行计算服务,提供基于网络的应用程序接口和交互式开发环境,并构建了超过800个函数,囊括了简单的数学运算到强大的地理统计、机器学习、影像处理相关算法,为用户提供了快捷的数据访问、分析计算和结果可视化工具(Gorelick et al.,2017)。

3.2 遥感生态指数计算

《生态环境状况评价技术规范》中定义的生态环境状况指数EI,采用了5个评价指数,即:生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地退化和环境质量,并通过固定权值加权求和构成生态环境状况指数(EI),其计算公式为:

$$EI=0.25 \times \text{生物丰度指数} + 0.2 \times \text{植被覆盖指数} + 0.2 \times \text{水网密度指数} + 0.2 \times (100 - \text{土地退化指数}) + 0.15 \times \text{环境质量指数} \quad (1)$$

其中通过遥感手段可以获得生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数,而土地退化指数可以采用遥感数据和地面监测数据通过土壤侵蚀模型计算得到,但其依据的土壤侵蚀模型计算复杂,而环境质量指数则须通过年度统计数据获得。由于后两个指标较难获取,因而限制了EI指数的计算使用场景。

遥感生态指数(RSEI)(徐涵秋,2013a,b)将度量自然生态环境的绿度分量(Greenness)、湿度分量(Wetness)、热度分量(Thermal)、干度分量(Dryness)4个重要指标作为生态指数的评价指标。这4个因素在反映生态质量的诸多自然因素中,与人类的生存息息相关,也是人类能够直观感觉生态条件优劣的最重要指标,因此常被用于评价生态系统。RSEI定义为:

$$RSEI=f(\text{Greenness}, \text{Wetness}, \text{Heat}, \text{Dryness}) \quad (2)$$

式中:Greenness为绿度;Wetness为湿度;

表2 本文所用遥感影像数据参数
Table 2 Remote sensing image data parameters

数据源	卫星	分辨/m	光谱/波段	数据时相	用途
4波段 遥感数据	MODIS	250	蓝、绿、红、近红外	2001年	计算绿度指标
				2020年	
多光谱 遥感数据	Landsat-5	30	蓝、绿、红、近红外、中红外、热红外	2001年	计算干度、湿度和热度指标
遥感数据	Landsat-8	15	蓝、绿、红、近红外、中红外、热红外	2020年	计算干度、湿度和热度指标

*Thermal*为热度;*Dryness* 为干度。其对应的遥感专题指标/算法计算公式为:

$$RSEI=f(NDVI, Wet, LST, NDBSI) \quad (3)$$

式中:*NDVI*为植被指数;*Wet*为缨帽变换湿度分量;*LST*为地表温度;*NDBSI*为裸土指数。遥感生态指数(*RSEI*)计算流程如图4所示。

图4中, ρ_B 、 ρ_G 、 ρ_R 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别表示 Blue、Green、Red、NIR、SWIR₁、SWIR₂, 对应 Landsat-5TM 影像第 1、2、3、4、5、7 波段以及 Landsat-8 OLI 的 2、3、4、6、7 波段的反射率。

湿度指标计算中,采用缨帽变换中的湿度分量代表植被与土壤湿度。对于 Landsat5 影像, $C_1=0.0315$ 、 $C_2=0.2021$ 、 $C_3=0.3102$ 、 $C_4=0.1594$ 、 $C_5=-0.6806$ 、 $C_6=-0.6109$;对于 Landsat8 影像, $C_1=0.1511$ 、 $C_2=0.1973$ 、 $C_3=0.3283$ 、 $C_4=0.3407$ 、 $C_5=-0.7117$ 、 $C_6=-0.4559$ 。

绿色指标计算中,采用的是归一化差值植被指数(*NDVI*)。*NDVI*是引用最广泛的植被指数,可以反映地表植被覆盖情况,是植被生长状态的最佳指示因子。

干度指标计算中,采用的实际代表建筑指数的 *IBI* 和代表裸土指数的 *SI*。建筑指数表达的是被建筑不透水面“干化”的地表,裸土指示表达被裸土地

表“干化”区域。

地表温度计算中, $L_{6/10}$ 分别为 Landsat-5 和 Landsat-8 热红外波段像元在传感器处的辐射值; *DN* 为像元灰度值; *gain* 和 *bias* 分别为波段增益值和偏置值,可查阅影像头文件获取。Landsat-5 中 *gain* 和 *bias* 分别为 0.055、1.18243;而对于 Landsat-8, *gain* 为 3.342×10^{-4} , *bias* 为 0.1; *T* 为传感器处温度值,对于 Landsat-5,定标参数 $K_1=607.76 \text{ W}/(\text{m}_2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 、定标参数 $K_2=1260.56 \text{ K}$;而对于 Landsat-8 第 10 波段,定标参数 $K_1=774.89 \text{ W}/(\text{m}_2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 、定标参数 $K_2=1321.08 \text{ K}$; *LST* 为地表温度, λ 为热红外波段的中心波长, $\rho=1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, ϵ 为地物的比辐射率,其值可根据模型(Sobrino,2004)通过 *NDVI* 计算得到。

遥感生态指数构建,需要综合以上 4 个指标信息。多元统计方法主成分分析(*PCA*)是一种将多个变量通过正交线性变换来选出少数重要变量的多维数据压缩技术。综合指数 *RSEI* 构建采用主成分分析(*PCA*)方法集成以上 4 个指标,根据各指标对主分量的贡献度来自动客观地确定权重,避免人为主观因素影响,从而实现以单一变量耦合多个指标的目的。

由于计算出的 4 个指标的量纲不统一,在做主成分变换前,必须先对这些指标进行正规化,将它们的数值标准化转换到 [0, 1] 区间,转化成无量纲指标,然后再计算 *PCA*。各指标的正规化公式为:

$$NI_i = \frac{Indicator_i - Indicator_{min}}{Indicator_{max} - Indicator_{min}} \quad (4)$$

式中: NI_i 为正规化后的某一指标值; $Indicator_i$ 为在 *i* 处像元的指标数值; $Indicator_{max}$ 为该指标的最大值; $Indicator_{min}$ 为该指标的最小值。经过正规化后的 4 个指标就可以用来计算主成分。

最终得到的遥感生态指数 *RSEI*, 其值介于 [0, 1] 之间。*RSEI* 值越接近 1, 表示生态环境越好, 反之则生态环境越差。

4 结果分析与讨论

4.1 2020 年长江经济带生态遥感现状遥感评价

基于 2020 年 MODIS、Landsat-8 影像计算得到长江经济带范围内生态环境现状评估结果如图 5 所示。

研究表明, 2020 年长江经济带整体生态环境指数平均值为 0.7444。将生态环境指数等距划分成

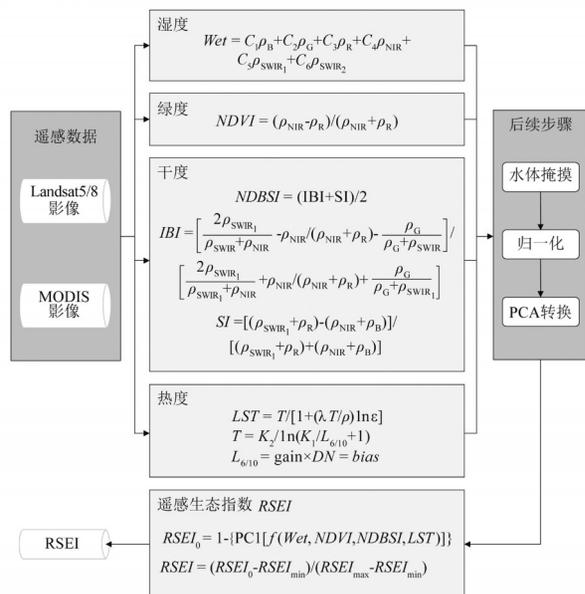


图4 RSEI计算流程
Fig.4 RSEI calculation process

差、较差、中等、良、优 5 个生态等级并进行分级显示:生态环境差(0~0.2)、生态环境较差(0.2~0.4)、生态环境中等(0.4~0.6)、生态环境较优(0.6~0.8)、生态环境优(0.8~1.0)。根据分级结果,长江经济带不同等级生态环境的面积及百分比如表3所示。

由图5和表3可知,长江经济带整体生态环境等级以优、较优、中等为主,生态环境等级中等以上占比均超过90%。生态环境优区域主要分布于武夷山、罗霄山、雪峰山、武陵山、巫山、大巴山、大别山、西双版纳等一带,面积占比48%;较优及中等生态环境区主要分布于黄淮平原、江汉平原、四川盆地、云贵地区、洞庭湖周边及鄱阳湖周边,面积占比43%;较差及差等生态环境区域主要分布于大中小城镇、川西横断山区,面积占比超过8%。

分析2020年长江经济带各省市生态环境不同等级面积及占比(表4)。

结果显示:上海由于土地开发利用程度高,建设用地面积占比大,2020年生态环境差与较差等级面积占比达到44%;其他省市,2020年生态环境差与较差等级面积占比都在20%以内,其中江苏、四川生态环境差与较差等级面积占比超过15%;贵

表3 2020年长江经济带生态环境遥感评估等级表
Table 3 Remote sensing assessment grade table of the ecological environment of the Yangtze River Economic Zone (2020)

生态环境等级	面积/km ²	面积占比/%
差(0~0.2)	62736	3.16
较差(0.2~0.4)	108824	5.48
中(0.4~0.6)	298686	15.05
较优(0.6~0.8)	554611	27.95
优(0.8~1.0)	959581	48.36

州、湖南、重庆、江西、湖北生态环境差与较差等级面积占比都在5%以内。同时11省市中等及以上生态环境等级面积占比以重庆、湖南、贵州、江西、湖北为第一梯队,2020年达到95%以上;其余省市除上海外中等及以上生态环境等级面积占比都超过了80%。2020年生态环境等级为优的面积占比重庆为第一档,达到76%;浙江、湖南、江西、贵州为第二档,生态环境等级为优的面积占比超过65%。

4.2 长江经济带生态环境变化

基于2001年MODIS、Landsat-5影像计算得到2001年长江经济带范围内生态环境评估结果如图6所示,并将结果与2020年生态环境遥感评估进行对

表4 2020年长江经济带各省市生态环境统计表

Table 4 Ecological environment statistics of each province and city in the Yangtze River Economic Zone (2020)

省份		生态环境等级					合计
		差	较差	中	较优	优	
江苏省	面积/km ²	4540	11169	23529	34944	18812	92994
	百分比/%	4.88	12.01	25.30	37.58	20.23	100.00
安徽省	面积/km ²	1822	6264	35881	48908	44509	137384
	百分比/%	1.33	4.56	26.12	35.60	32.40	100.00
四川省	面积/km ²	36924	42104	82651	150320	174223	486222
	百分比/%	7.59	8.66	17.00	30.92	35.83	100.00
湖北省	面积/km ²	1921	6479	33545	39381	100879	182204
	百分比/%	1.05	3.56	18.41	21.61	55.37	100.00
重庆市	面积/km ²	482	1177	2283	15172	61832	80946
	百分比/%	0.60	1.45	2.82	18.74	76.39	100.00
上海市	面积/km ²	842	1846	2255	1036	102	6079
	百分比/%	13.85	30.36	37.09	17.03	1.67	100.00
浙江省	面积/km ²	3491	5903	9218	14110	65589	98312
	百分比/%	3.55	6.00	9.38	14.35	66.72	100.00
湖南省	面积/km ²	1108	3006	14970	49909	133752	202745
	百分比/%	0.55	1.48	7.38	24.62	65.97	100.00
江西省	面积/km ²	1784	3446	12190	35617	105074	158111
	百分比/%	1.13	2.18	7.71	22.53	66.46	100.00
云南省	面积/km ²	8945	25125	71234	118151	143216	366670
	百分比/%	2.44	6.85	19.43	32.22	39.06	100.00
贵州省	面积/km ²	722	2179	10692	46777	110901	171271
	百分比/%	0.42	1.27	6.24	27.31	64.75	100.00

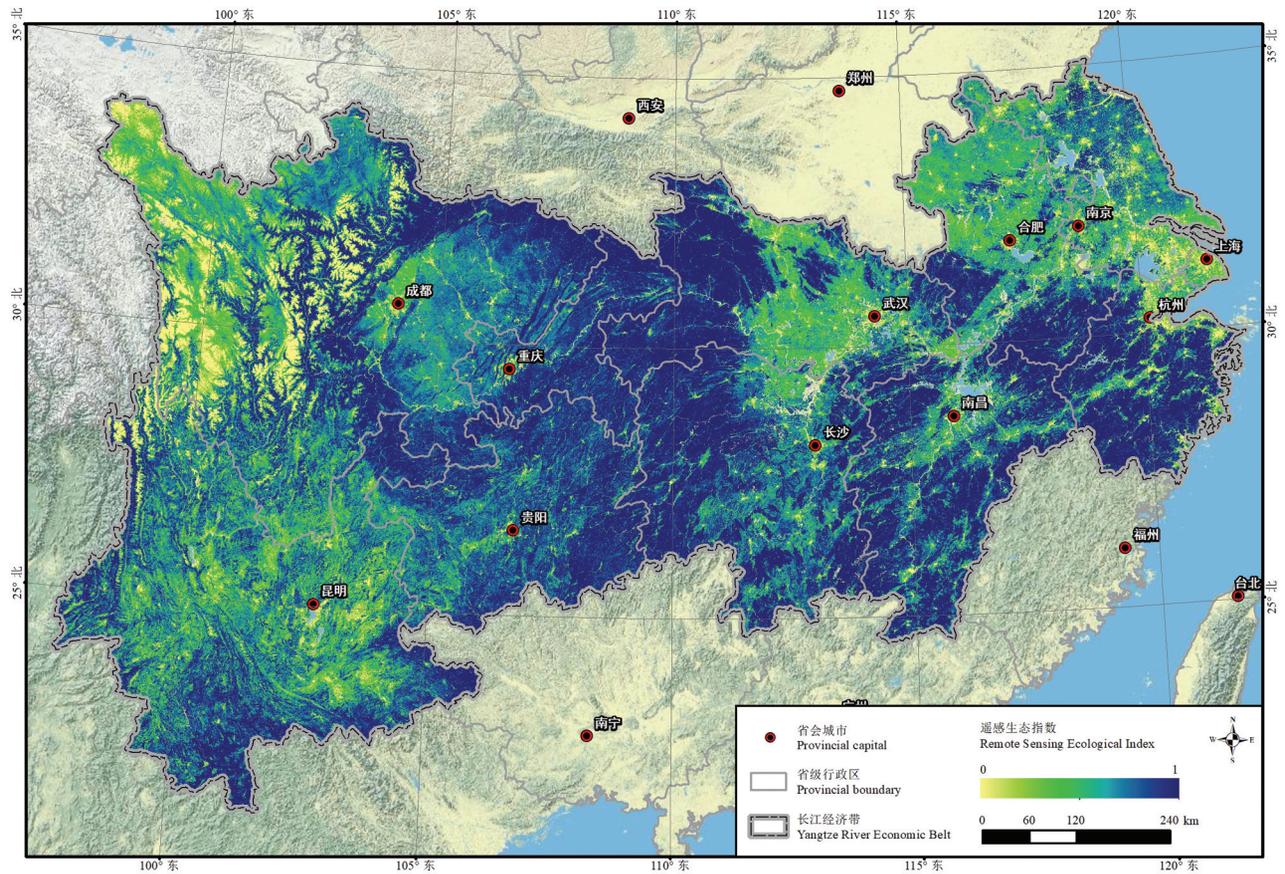


图5 2020年长江经济带生态环境遥感评估图

Fig.5 Remote sensing assessment map of the ecological environment of the Yangtze River Economic Zone (2020)

比,得到长江经济带生态环境遥感评估动态变化图如图7所示。

根据生态环境变化数值分布区间将生态环境变化结果分为11类并进行分级显示:-5(生态环境降低0.4以上)、-4(生态环境降低0.4以内)、-3(生态环境降低0.3以内)、-2(生态环境降低0.2以内)、-1(生态环境降低0.1以内)、0(生态环境保持不变)、1(生态环境增加0.1以内)、2(生态环境增加0.2以内)、3(生态环境增加0.3以内)、4(生态环境增加0.4以内)、5(生态环境增加0.4以上)。根据分级结果,统计出长江经济带不同生态环境变化等级的面积及百分比表。2001—2020年长江经济带不同生态环境变化等级面积如表5和图8所示。

由表5和图8可知,2001年到2020年长江经济带整体生态环境以整体稳定为主,生态环境等级上升区域面积占比41.04%,下降区域面积占比34.11%,保持不变区域面积占比24.85%,整体呈稳中向好态势。其中,生态环境等级下降区域主要集

中在长三角太湖周边及江浙沪沿海城镇地区、江汉平原、洞庭湖周边、安徽西北部、湖南南部地区四川盆地局部地区以及横断山脉局部地区,主要原因人类活动扰动加剧以及自然演变。生态环境保持不变区域主要为武夷山、大别山、罗霄山、大巴山、巫山、武陵山一带生态环境为优的区域。生态环境等级上升区域主要集中在四川盆地大部、重庆山区、三峡库区、贵州大部、云南东南部、安徽中部及北部、江苏北部,其中生态环境等级增长两个级别以内区域占比超过35%。如图9所示,重庆、宜昌等城市周边由于城市扩张,生态环境级别呈下降趋势,三峡库区尤其是长江两岸得益于大规模的退耕还林,生态环境等级上升,而原生态环境等级为优的巫山、大巴山一带,生态环境级别保持高水平稳定状态。

2001年和2020年长江经济带各省市平均生态环境指数统计结果(表6)显示:2001年长江经济带各省市平均生态环境指数范围0.54~0.85,2020年平均生态环境指数范围0.42~0.87,2020年生态环境指

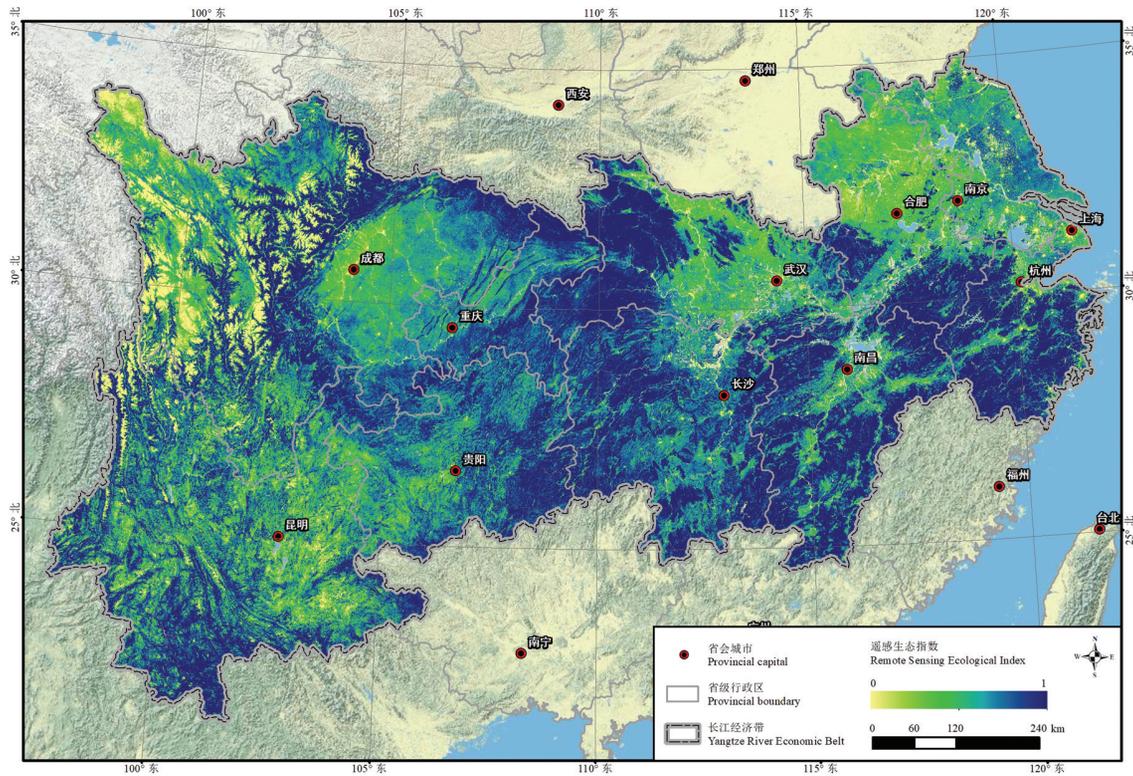


图6 2001年长江经济带生态环境遥感评估图

Fig. 6 The remote sensing assessment map of the ecological environment of the Yangtze River Economic Zone (2001)

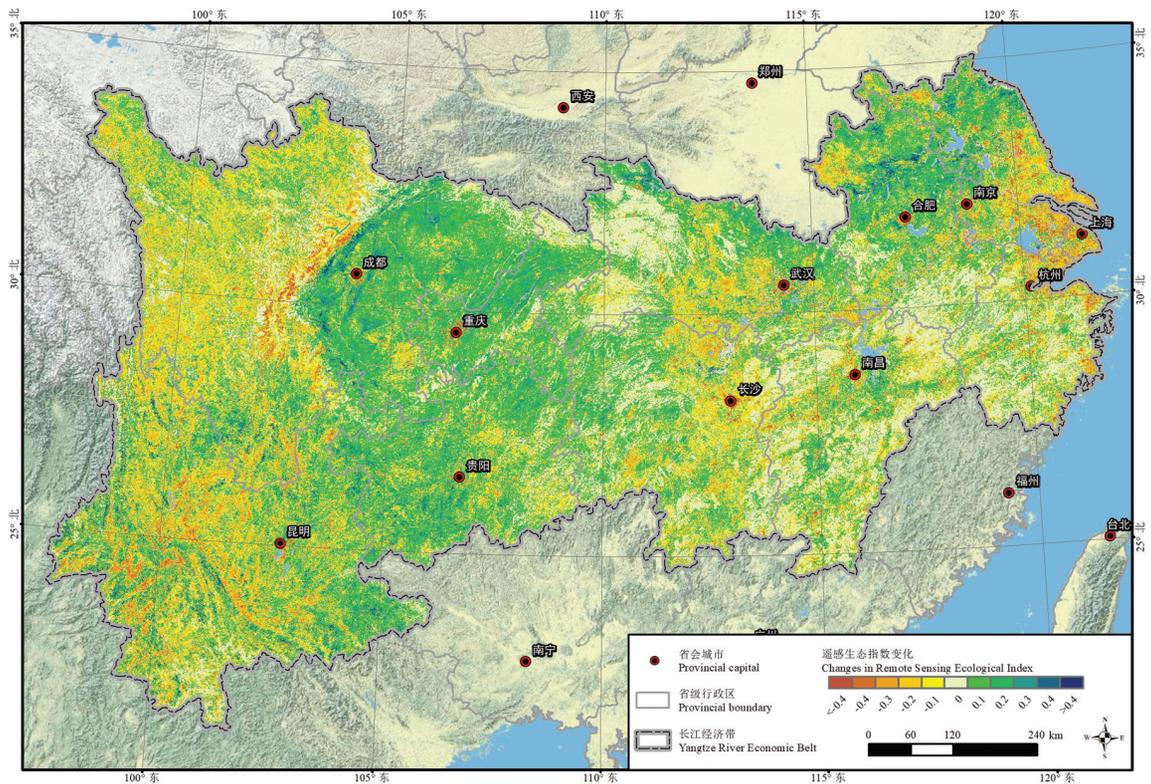


图7 长江经济带生态环境遥感评估动态变化图(2001—2020年)

Fig.7 Ecological environment dynamic changes of the Yangtze River Economic Zone evaluated by remote sensing(2001—2020)

表5 2001—2020年长江经济带生态环境等级变化及面积占比
Table 5 Changes in the ecological environment grade and area proportion of the Yangtze River Economic Zone from 2001 to 2020

类别	生态环境等级变化	面积/km ²	面积占比%
变差	-5	19094	0.96
	-4	26763	1.35
	-3	71781	3.62
	-2	201603	10.16
	-1	357667	18.03
不变	0	493111	24.85
	1	418589	21.10
变好	2	280989	14.16
	3	86634	4.37
	4	20364	1.03
	5	7682	0.39

数分布相比2001年差异扩大。2020年平均生态环境指数,以重庆、江西、湖南、贵州、浙江为第一梯队,平均生态环境指数都超过了0.8,生态环境等级为优;湖北、云南、安徽、四川、江苏处于第二梯队,平均生态环境指数超过0.6,生态环境等级为较优;上海生态环境等级为中等。

从平均生态环境指数变化来看,上海生态环境

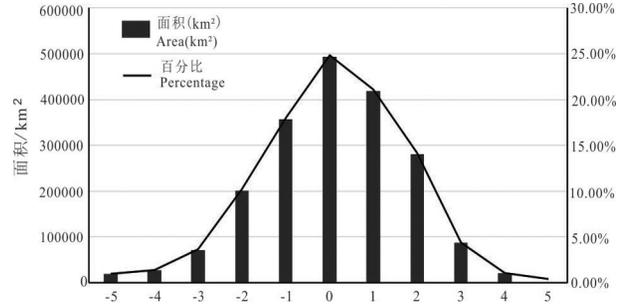


图8 长江经济带生态环境等级变化面积及占比
Fig.8 The area and proportion of changes in the ecological environment of the Yangtze River Economic Zone

指数下降幅度最大,达0.11;浙江、江苏平均生态环境指数分别下降0.04和0.02;另有湖南、江西、云南三省平均生态环境指数稳中略降。其余五省市平均生态环境指数均呈上升态势。在平均生态环境指数上升的省市中,重庆、贵州的平均生态环境指数增长处于第一梯队,分别达到了0.06和0.05;同时安徽平均生态环境指数增长超过0.03;湖北、四川平均生态环境指数稳中略升。

从长江经济带各省市2001—2020年生态环境

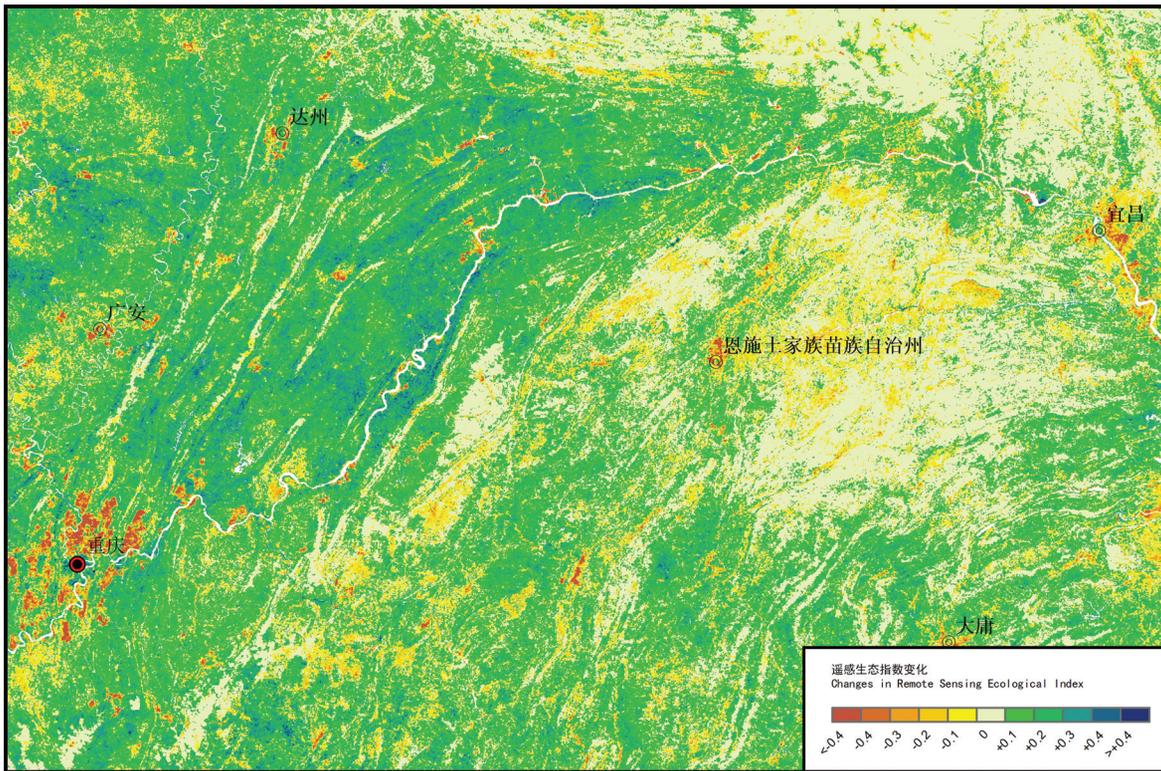


图9 三峡库区及周边生态环境变化状况(2001—2020年)

Fig.9 Changes in the Ecological Environment of the Three Gorges Reservoir Area and surrounding areas (2001–2020)

表6 2001年和2020年长江经济带各省市平均生态环境指数
Table 6 Average ecological environment index of each province and city in the Yangtze River Economic Zone in 2001 and 2020

省份	2001年	2020年
江苏	0.63	0.61
安徽	0.67	0.70
四川	0.66	0.67
湖北	0.78	0.79
重庆	0.81	0.87
上海	0.54	0.42
浙江	0.85	0.81
湖南	0.85	0.84
江西	0.85	0.84
云南	0.71	0.71
贵州	0.78	0.83

等级变化面积及占比统计分析结果(图10)可知:除上海以外,相比2001年,2020年其余十个省市生态环境变化等级 >0 ,占比均超过50%,整体生态环境等级呈上升趋势,其中以重庆为最,生态环境变化等级 >0 面积占比达到64%;贵州、安徽生态环境变化等级 >0 面积占比均超过50%。整体而言,生态环境上升等级和下降等级都处于 ± 2 以内,即生态环境变化区间主要位于 ± 0.2 以内。生态环境等级下降面积占比中,上海以70%面积占比居首,江苏、云南、四川、浙江则超过30%。

4.3 长江经济带生态环境变化分析

综上所述,过去20年间长江经济带整体生态环境质量向好,但同时也存在局部地区生态环境质量

下降。生态环境质量整体向好,主要得益于长江流域防护林体系建设。根据国家林业局和草原局相关数据表明,自工程实施以来累计完成造林1200多万 hm^2 ,例如重庆市森林覆盖率从2002年的27%增长到2020年的50%,贵州省森林覆盖率从2015年的50%提高到2020年的60%。

局部地区生态环境质量下降,主要原因为大规模的城市开发和工业用地建设。上海市不透水面积(主要包括建筑和道路)从2001年 658 km^2 增长到2018年的 2214 km^2 ,占上海市辖区总面积超过三分之一(Gong et al.,2019)。

如图11所示,南京市主城区(图11a、b)范围内,建筑用地表现为较低生态环境指数,而钟山、栖霞山、将军山以及城区公园、城郊耕地、江滩等区域表现为较高的生态环境指数,与实际情况相符。图11c中红圈处莫干山山顶别墅群即为图11d中红圈位置,相对周边表现为较低的生态环境指数;整个莫干山景区植被繁茂,总体生态环境指数较高,而在山谷低地以及新建道路则呈现比较低的生态环境指数(图11c、d),表明人类活动的对生态环境质量影响较大。同时,遥感手段建立的生态环境指数可以有效监测大尺度生态环境质量同时捕捉小区域的差异,监测评价结果客观、准确、可靠。

本文采用了生态遥感指数来评价长江经济带生态环境变化,与其他生态评价指标相比,也有较高的一致性,例如王旭熙(2021)参照现有各种城市

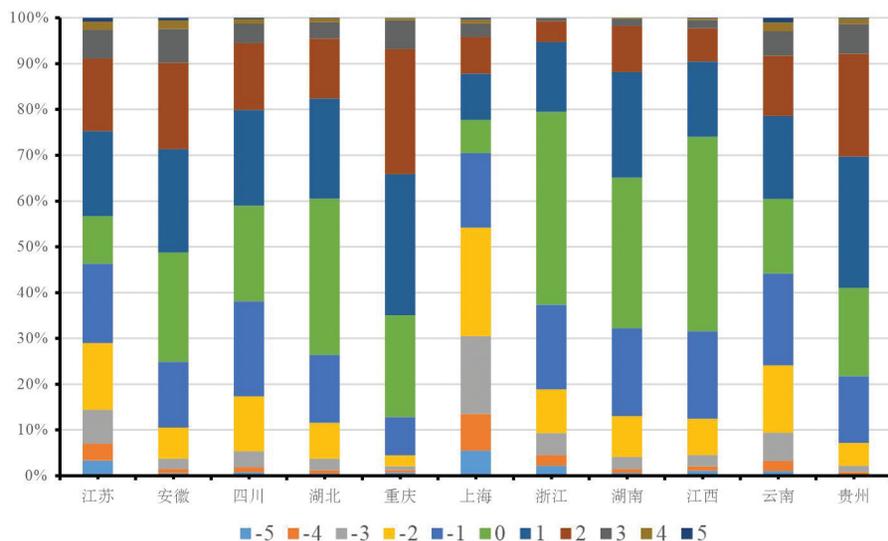


图10 2001—2020年生态环境等级变化面积占比统计图(图例见表5)

Fig.10 The percentage of the area and the grade change of the ecological environment from 2001 to 2020(Symbols are same as Table 5)

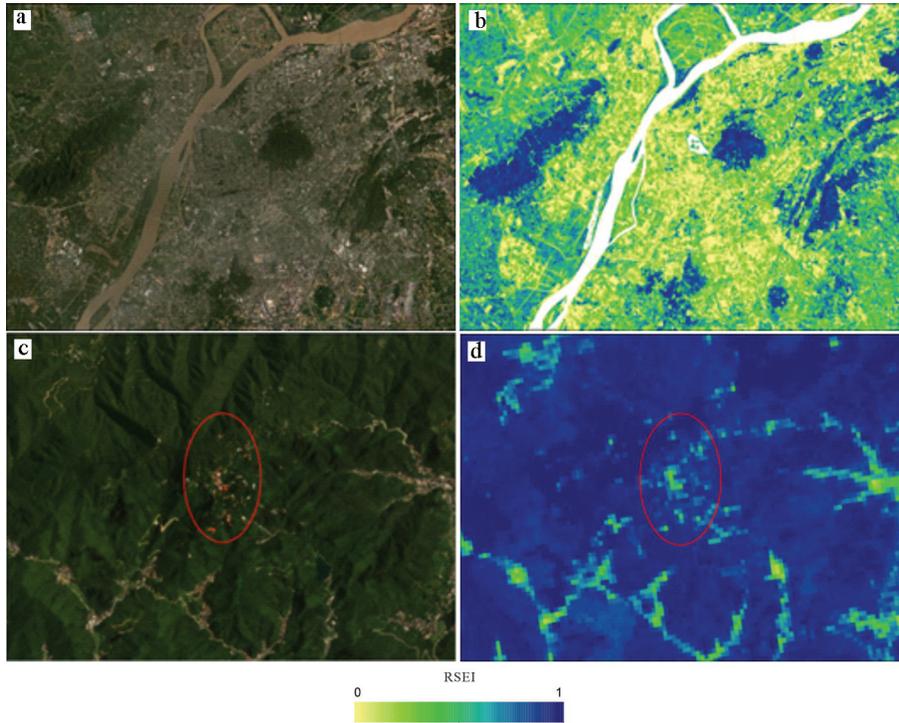


图11 南京市主城区、莫干山核心区卫星影像(a,c)及区域生态环境质量指数分布(b,d)

Fig.11 Satellite image map (a,c) and ecological environmental quality index map (b, d) of the main urban area of Nanjing and the core area of Mogan Mountain

生态系统健康评价指标,并结合研究区实际情况,从活力、组织结构、恢复力、系统服务功能与人群健康状况等5个维度,选取人均GDP、GDP增长率、实际利用外资等17项指标来反映城市生态系统健康状况,得出的结果表明2006—2018年长江经济带城市生态健康状况向健康发展,和生态遥感指数得出的结论基本一致。

4.4 建议

基于遥感手段建立的遥感生态指数RSEI,是生态环境的绿色、湿度、干度、热度指标的综合度量。结合遥感大数据和云计算,融合多源遥感影像信息,能够客观反映长江经济带生态环境的时空分布及变化趋势,为长江经济带生态环境监测评价提供了快速、简洁、客观有效的手段。为使此项工作长期化、系统化,建议如下:

(1)建设长江经济带、重要经济区和城市等不同尺度生态环境动态监测平台,加强对生态环境质量下降显著区的持续性监测。

(2)加强采用遥感生态指数对重大建设项目的生态环境影响进行科学、客观评估,为长江经济带生态环境保护和修复目标完成情况考核提供依据。

(3)通过遥感手段获取生态环境数据,开展区域生态环境质量指数定量评价和生态环境质量动态监测,有助于生态保护补偿制度实施,推进流域生态补偿机制建设。

5 结论

(1)长江经济带整体生态环境等级为较优,在2001—2020年的20年期间,保持总体向好态势。

(2)长江经济带生态环境现状显示区域空间分布差异较大,生态环境等级为优区域主要分布于武夷山、罗霄山、雪峰山、武陵山、巫山、大巴山、大别山、西双版纳等一带,较差及差等生态环境区域主要分布于大中小城镇和川西横断山区。

(3)长江经济带生态环境时空变化显著,生态环境等级下降区域主要集中在长三角太湖周边、江汉平原、洞庭湖周边、安徽西北部、湖南南部及四川盆地等人类聚集地周边;生态环境等级上升区域主要集中在四川盆地大部、重庆山区及三峡库区、贵州大部、云南东南部、安徽中部及北部、江苏北部等。

(4)遥感生态指数评价结果表明,长江经济带生态环境质量上升区域主要由于人类活动影响较

小且近30年以来持续加强了长江防护林的建设;生态环境质量下降区域主要为建设用地扩张速度快造成。加强监测与保护力度,是保障长江经济带生态优美的关键。

References

- Baig M H A, Zhang Lifu, Shuai Tong, Tong Qingxi. 2014. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. *Remote Sensing Letters*, 5(5): 423-431.
- China Geological Survey, Ministry of Natural Resources. 2018. Analysis Report on Resource and Environmental Conditions and Major Issues Supporting the Land and Space Planning of the Yangtze River Economic Zone[R]. Beijing: China Geological Survey.
- Chen Jiang, Wan Li, Liang Sihai, Jin Xiaomei, Chen Li. 2007. A tentative discussion on the trend of ecological environment change in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 28(6): 555(in Chinese with English abstract).
- Cheng Hangxin, Li Kuo, Li Min, Cheng Xiaomeng. 2015. Management target value (MTV) and rectification action value (RAV) of trace metals in urban soil in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(5): 215-225 (in Chinese with English abstract).
- Crist E P. 1985. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 17(3): 301-306.
- Duan Yiren, Yang Zhongfang, Yang Qiong, Zheng Guodong, Zhuo Xiaoxiong, Chen Biao. 2020. The distribution of soil germanium and its influencing factors in Beibu Gulf of Guangxi [J]. *Geology in China*, 47(6):1826-1837(in Chinese with English abstract).
- Gong Peng, Li Xuecao, Zhang Wei. 2019. 40-year (1978-2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(11): 756-763.
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Simonl Y, Thau D, Moore R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 202.
- Goward S N, Xue Yongkang, Czajkowski K P. 2002. 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*, 79(2/3): 225-242.
- Gupta K, Kumar P, Pathan S K, Sharma K P. 2012. Urban Neighborhood Green Index-A measure of green spaces in urban areas[J]. *Landscape and urban planning*, 105(3): 325-335.
- Huang C, Wylie B, Yang L, Homer C, Zylstra G. 2002. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8): 1741-1748.
- Huang Jinliang, Pontius Jr R G, Li Qingsheng, Zhang Yujia. 2012. Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China[J]. *Applied Geography*, 34(3):371-384.
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su Jingwen, Zhou Quanping, Zhang Taili, Li Yun, Liu Hongying, Peng Ke, Wang Hanmei. 2017. Research on conditions of resources and environment and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Geology in China*, 44(6): 1045-1061 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuehua, Zhou Quanping, Chen Lide, Ni Huayong, Lei Mingtang, Cheng Heqin, Shi Bin, Ma Teng, Ge Weiya, Su Jingwen, Li Yun, Tan Jianmin. 2019. Progresses and main achievements of geological environment comprehensive survey project in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Geological Survey of China*, 6(5): 1-20(in Chinese with English abstract).
- José A Sobrino, Juan C. Jiménez-Muoz, Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 90(4):434-440.
- Kerr J T, Ostrovsky M. 2003. From space to species: Ecological applications for remote sensing[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(6):299-305.
- Liu Yingping, Chen Wende, Xu Wei, Hao Pengpei. 2012. Soil quality geochemical evaluation of Chengdu Economic Area[J]. *Geoscience*, 26(5): 865(in Chinese).
- NASA. 2012. Landsat 7 Science Data Users Handbook [EB/OL].<http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>, 2012-09-05.
- Nichol J. 2005. Remote sensing of urban heat islands by day and night[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(5): 613-622.
- Shabiti M, Yusufu D. 2008. Analysis on the Characteristics of Landuse Space-Time Change in the Economic Belt on the Northern Slope of Tianshan Mountain, Xinjiang, China[J]. *Areal Research and Development*, 27(2): 103-108(in Chinese with English abstract).
- Shawuti R, Abuli A, Li H. 2003. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Fukang City based on RSEI model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 27(1): 289-295,303(in Chinese with English abstract).
- State Environmental Protection Administration. 2006. Environmental Protection Industry Standard of the People's Republic of China (Trial) HJ/T192-2006 [S].
- Sun Yangui, Zhang Guowei, Wang Dongqing, Zhang Xianting, Li Dongling. 2003. Application of the remote sensing technique in eco-environmental division in Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 30(2): 214-219(in Chinese with English abstract).
- Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 434-440.
- Teng Mingjun, Zeng Lixiong, Xiao Wenfa, Zhou Zhixiang, Huang Zhilin, Wang Pengcheng, Dian Yuanyong. 2014. Research progress on remote sensing of ecological and environmental changes in the

- Three Gorges Reservoir area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(12):3683-3693(in Chinese with English abstract).
- Wang Qinhu, Dong Yanxiang, Song Mingyi, Liu Junbao, Huang Chunlei. 2011. Research on the integration method of land quality geochemical evaluation and agricultural land classification: Taking Jiashan County and Cixi City in Zhejiang Province as examples[J]. Shanghai Land and Resources, 32(4): 20-25 (in Chinese)
- Wang Xuxi. 2021. Urban ecosystem health comprehensive assessment of cities on Yangtze River economic belt[J]. Journal of Mianyang Teachers'College, 40(2):105-110(in Chinese with English abstract).
- Wu Zhonghai, Zhou Chunjing, Tan Chengxuan, Sun Yujun, Ma Xiaoxue. 2016. The active tectonics and regional crustal stability features in the area of Yangtze River economic belt[J]. Journal of Geomechanics, 22(3): 379-411(in Chinese with English abstract).
- Xie Xuejin, Cheng Hangxin, Xie Yuanru. 2002. Analytical methods and quality in the compilation of 76 elements geochemical atlas of Sichuan, Yunnan, Guizhou, and Guangxi Provinces of China (1): Similarity of geochemical maps compiled from data generated by different laboratories—examples for Ag, Cs, Ga, and Ge analysis[J]. Geological Bulletin of China, 21(6): 277-284(in Chinese with English abstract).
- Xu H. 2010. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISI) [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 76(5): 557-565.
- Xu Hanqiu. 2013a. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 33(5): 889-897(in Chinese with English abstract).
- Xu Hanqiu. 2013b. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(24): 7853-7862(in Chinese with English abstract).
- Yang Huiting, Xu Hanqiu. 2020. Assessing fractional vegetation cover changes and ecological quality of the Wuyi Mountain National Nature Reserve based on remote sensing spatial information[J]. The Journal of Applied Ecology, 31(2): 533-542(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yan, Luan Wenlou, Guo Haiquan, Cai Kui, Ma Zhongshe, Dun Yanran. 2021. Characteristics, causes and ecological environment health evaluation of Selenium-enriched soil in Gaocheng District of Shijiazhuang City, Hebei Province[J]. Geology in China, 48(3): 764-776(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuelong, Zhang Lingjuan. 1999. Study on method of quantitative assessment of fragile environment[J]. Chinese Geographical Science, 9(2): 141-145(in Chinese).
- 成杭新, 李括, 李敏, 成晓梦. 2015. 中国城市土壤微量元素元素的管理目标值和整治行动值[J]. 地学前缘, 22(5): 215-225.
- 段轶仁, 杨忠芳, 杨琼, 郑国东, 卓小雄, 陈彪. 2020. 广西北部湾地区土壤锆分布特征及其影响因素及其生态环境评价[J]. 中国地质, 47(6): 1826-1837.
- 国家环保总局. 2006. 中华人民共和国环境保护行业标准(试行) HJ/T192-2006 [S].
- 姜月华, 林良俊, 陈立德, 倪化勇, 葛伟亚, 成杭新, 翟刚毅, 王贵玲, 班宜忠, 李媛. 2017. 长江经济带资源环境条件与重大地质问题[J]. 中国地质, 44(6): 1045-1061.
- 姜月华, 周权平, 陈立德, 倪化勇, 雷明堂, 程和琴, 施斌, 马腾, 葛伟亚, 苏晶文. 2019. 长江经济带地质环境综合调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 6(5): 1-20.
- 刘应平, 陈文德, 许伟, 彭培好. 2012. 成都经济区土壤质量地球化学评估[J]. 现代地质, (5): 865-872.
- 满苏尔·沙比提, 迪里木拉提·玉苏甫. 2008. 新疆天山北坡经济带土地利用时空变化特征研究[J]. 地域研究与开发, 27(2): 103-108.
- 茹克亚·萨吾提, 阿不都艾尼·阿不里, 李虎, 尼加提·卡斯木, 李晓航. 2020. 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, 27(1): 289-295, 303.
- 孙延贵. 2003. 青海省生态环境分区的遥感应用研究[J]. 中国地质, 30(2): 214-219.
- 滕明君, 曾立雄, 肖文发, 周志翔, 黄志霖, 王鹏程, 佃袁勇. 2014. 长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展[J]. 应用生态学报, (12): 3683-3693.
- 汪庆华, 董岩翔, 宋明义, 刘军保, 黄春雷. 2011. 土地质量地球化学评估与农用地分等成果整合方法研究——以浙江嘉善县和慈溪市为例[J]. 上海国土资源, 32(4): 20-25.
- 王旭熙. 2021. 长江经济带城市生态系统健康评价[J]. 绵阳师范学院学报, 40(2): 105-110.
- 吴中海, 周春景, 谭成轩, 孙玉军, 马晓雪. 2016. 长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性基本特征[J]. 地质力学学报, 22(3): 379-411, 372.
- 谢学锦, 成杭新, 谢渊如. 2002. 川滇黔桂 76 种元素地球化学图编制中分析方法与分析质量研究(一)不同实验室产生地球化学图的相似性——以 Ag, Cs, Ga, Ge 为例[J]. 地质通报, 21(6): 2-9.
- 徐涵秋. 2013a. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 33(5): 889-897.
- 徐涵秋. 2013b. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 33(24): 7853-7862.
- 杨绘婷, 徐涵秋. 2020. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J]. 应用生态学报, 31(2): 187-196.
- 赵燕, 栾文楼, 郭海全, 蔡奎, 马忠社, 敦妍. 2021. 河北省石家庄市藁城区富硒土壤特征、成因与生态环境健康评价[J]. 中国地质, 48(3): 764-776.
- 赵跃龙. 1998. 脆弱生态环境定量评价方法的研究[J]. 地理科学进展, 18(1): 73-79.

附中文参考文献

- 陈江, 万力, 梁四海, 陈立. 2007. 青藏高原生态环境变化趋势的初步探索[J]. 地球学报, 28(6): 555-560.