

doi: 10.6046/zrzyg.2021058

引用格式: 张秦瑞, 赵良军, 林国军, 等. 改进遥感生态指数的宜宾市三江汇合区生态环境评价[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 230–237. (Zhang Q R, Zhao L J, Lin G J, et al. Ecological environment assessment of three – river confluence in Yibin City using improved remote sensing ecological index[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 230–237.)

改进遥感生态指数的宜宾市三江汇合区生态环境评价

张秦瑞¹, 赵良军², 林国军¹, 万虹麟³

(1. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 人工智能四川省重点实验室, 宜宾 644000; 2. 四川轻化工大学计算机科学与工程学院, 企业信息化与物联网测控技术四川省高校重点实验室, 自贡 643000; 3. 河北水利电力学院水利工程学院, 沧州市遥感与智慧水利技术创新中心, 沧州 061001)

摘要: 城市扩张是宜宾市近年来的主要特征, 研究其对生态环境的影响, 对城市发展与生态保护具有重要意义。为了更好地评价城市扩张对生态的影响, 基于遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI), 构建归一化不透水面和裸土指数替代原有建筑指数作为干度指标, 建立了改进型遥感生态指数(improved remote sensing ecological index, IRSEI), 耦合对生态具有重要影响的绿色度、湿度、温度及改进后的干度指标信息, 利用主成分分析法及相关性对 IRSEI 进行了分析, 建立基于 IRSEI 的宜宾市三江汇合区生态评价模型, 对该地区 2013—2020 年间生态环境做出分析评价。结果表明: IRSEI 能够更加精准地反映出干度对生态造成的负面影响, 较 RSEI 在第一主成分分量中能够集中更多有用信息, 对城市生态环境质量评测具有更好的适用性。2013 年, 该区域 IRSEI 为 0.54, 生态总体状况一般, 原因在于城区扩张严重, 破坏了原有植被; 2017 年, IRSEI 为 0.67, 退耕还林的持续推进以及城区生态的恢复, 使得绿色度明显上升, 因此生态状况较 2013 年大为好转; 2020 年, IRSEI 为 0.63, 绿色度、湿度以及干度基本与 2013 年持平, 但由于城市扩张带来的热岛效应, 温度较 2017 年有所上升, 因此生态水平轻微下降。

关键词: 改进型遥感生态指数(IRSEI); 主成分分析; 相关性; 宜宾三江汇合区; 生态评价

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0230-08

0 引言

随着人类社会的发展, 城镇化进程的不断加速不可避免地对环境造成了负面影响。客观、准确地评价地区生态水平, 有助于为生态环境改善提出科学的措施。Pauleit 等^[1]在 2005 年通过城市土地利用及覆被变化, 对城市发展进行了评估, 但未对生态质量进行定量测评; Musse 等^[2]在 2018 年结合遥感与普查数据构建城市环境质量指数(urban environmental quality index, UEQI), 对城市环境质量进行了评估, 但由于普查数据不易获得, 该指数运用在城市生态评价时较为困难; 王瑶等^[3]在 2008 年基于生态环境状况指数(ecological index, EI)对北京市生态状况进行评价, 得出 EI 指数虽能够反映区域生态状况, 但仍存在指标不易获得的缺陷。此外, EI 指数仅是一个数值, 生态环境状况的空间分布情

况无法可视化。

徐涵秋^[4]在 2013 年提出了基于遥感技术的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI), 并使用该指数对研究区生态环境进行了客观、定量的评价分析, 该模型被许多学者广泛应用于生态环境的快速评测^[5-7], 但传统 RSEI 模型在表征干度时, 由归一化建筑指数(index-based built-up index, IBI)来对城市建设用地进行表征^[8-9], 由于该指数是通过短波红外、近红外波段寻找最强、最弱反射波段进行构建, 所以在对房顶、道路、玻璃、水泥面以及塑料等众多地物进行计算时会产生误差, 出现裸土区域 IBI 值明显大于城区的情况。因此, 本文结合不透水面指数(normalized difference impervious index, NDISI)^[10]与裸土指数(soil index, SI)^[11]构成新型干度指标归一化不透水面和裸土指数(normalized difference impervious and soil index, NDISI), 以表征土地的利用程度。通过主成分分析法

收稿日期: 2021-03-05; 修订日期: 2021-05-21

基金项目: 五粮液基金项目“基于宏观视角的五粮液核心区农业资源环境演变特征研究”(编号: CXY2020R001)和四川轻化工大学人才引进项目“基于国产高分卫星影像的岷溪河流域滑坡易发性研究”(编号: 2018RCL21)共同资助。

第一作者: 张秦瑞(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字图像处理、卫星遥感。Email: 1029765315@qq.com。

通信作者: 赵良军(1980-), 男, 博士, 研究方向为地理信息、卫星遥感。Email: 149189602@qq.com。

(principal component analysis, PCA) 耦合绿色、湿度、温度以及新型干度指标,从而构建改进型遥感生态指数(improved remote sensing ecological index, IRSEI),并对宜宾市三江汇合区的生态情况进行评价,以验证模型的普遍适用性,为城区扩张之后的环境综合治理提供依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

本文以宜宾市三江汇合区作为研究区,宜宾有“万里长江第一城”“中国酒都”“中国竹都”之称,地处云贵川三省结合部,金沙江、岷江、长江三江交汇处,是中央重点实施的“三大战略”之一:长江经济带的首城。宜宾市近些年大刀阔斧地进行行政区划调整,依托无比优越的地理位置,通过建设大学城吸引人才、创办国家级临港经济技术开发区进行招商引资,大力推动了现代化基础设施建设,这使得城区扩张明显加速,难以避免地对当地生态环境造成了负面影响。作为宜宾城市核心的三江汇合区拥有三江六岸景观资源,被定位为中央商务区,以此为源点的城区发展尤为迅猛。为保持生态优先、绿色发展,研究区的生态评估工作已显得刻不容缓,研究区地理位置在 $N28^{\circ}41'24.23'' \sim 28^{\circ}50'48.20''$, $E104^{\circ}30'48.64'' \sim 104^{\circ}46'27.13''$ 之间,面积约为 420 km^2 。

1.2 数据源及其预处理

本文选择 2013 年、2017 年、2020 年 3 景 Landsat8 卫星影像作为实验数据,研究区域时相不超过 15 d,云量低于 1%,最大程度上保证不同观测时间植被生长规模的一致性,从而确保实验数据具有可比性。使用 ENVI5.3 软件对可见光及热红外波段影像进行辐射定标,将图像的像元亮度值转化为辐

$$WET = 0.1511Blue + 0.1973Green + 0.3283Red + 0.3407NIR - 0.7117SWIR1 - 0.4559SWIR2, \quad (3)$$

式中 $Blue$ 和 $SWIR2$ 分别为影像的蓝光和短波红外 2 波段。

2.3 温度指标

地表温度(land surface temperature, LST)与植被生长、水资源循环息息相关,是生态环境分析的重要指标,采用大气校正法对 LST 进行反演计算,植被覆盖度 F_v 公式为:

$$F_v = \begin{cases} 0 & NDVI < 0 \\ \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{vegetation} - NDVI_{soil}} & 0 \leq NDVI \leq 0.7 \\ 1 & NDVI > 0.7 \end{cases}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{surface} = 0.9625 + 0.0614F_v - 0.0461F_v^2, \quad (5)$$

射亮度值,对结果进行大气校正,获得真实的地表反射率。为避免河流湖泊对后续湿度指标反演时造成干扰,还需对校正后的图像进行水域掩模,使用改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)^[12] 对水域进行提取,其公式为:

$$MNDWI = (Green - SWIR1)/(Green + SWIR1), \quad (1)$$

式中 $Green$ 和 $SWIR1$ 分别为影像的绿光和短波红外 1 波段。

2 IRSEI 的指标与构建

单一指标无法准确地对生态环境进行客观评价与全面反映,因此本研究选取绿色、湿度、温度以及干度这 4 个指标,利用 PCA 进行降维,综合构建 IRSEI,从而对生态质量进行评估。

2.1 绿度指标

绿度指标表示地表植被覆盖和生长情况,是反映区域生态环境质量的敏感因素。采用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)进行表示,该指数对绿色植物敏感,与植物分布密度呈线性关系,是植物生长状况和空间分布密度的最佳指标^[13]。其公式为:

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red), \quad (2)$$

式中 NIR 和 Red 分别为影像的近红外和红光波段。

2.2 湿度指标

缨帽变换(K-T 变换)是一种特殊的 PCA 分析,经缨帽变换的前 3 个分量主要反映土壤亮度、绿色、湿度特征,取变换结果的第三分量作为湿度特征 WET ^[14],其公式为:

$$\varepsilon_{building} = 0.9589 + 0.086F_v - 0.0671F_v^2, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_{surface} & 0.57 \leq NDVI \\ \varepsilon_{building} & 0.1 < NDVI < 0.57 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{vegetation}$ 分别为土壤地区和植被地区的 NDVI 值,取值设为 0 和 0.7; $\varepsilon_{surface}$ 为自然表面辐射率; $\varepsilon_{building}$ 为城区表面辐射率; ε 为地表比辐射率^[15]。

$$L_{10} = gain DN + bias, \quad (8)$$

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

式中: L_{10} 为 Landsat8 影像辐射定标之后第 10 波段

的反射率; $gain$ 和 $bias$ 为该波段的增益与偏置; DN 为影像像元的灰度值; K_1 和 K_2 分别为定标参数, $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1\,321.08 \text{ K}$; T 为热红外传感器处温度。

由式(4)—(9)可算得温度指标 $LST^{[16]}$, 即

$$LST = \frac{T}{1 + (\lambda T / \xi) \ln \varepsilon} - 273, \quad (10)$$

式中: λ 为该波段的中心波长, $\lambda = 10.9 \mu\text{m}$; ξ 为 $1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; LST 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.4 干度指标

不透水面是指人类作用于自然地表形成的诸如建筑物、道路等具有不透水性的城市人工地表, 是反映城市扩张和变化的重要指标。建筑物、道路和房顶一类的不透水物质, 普遍存在热红外波段辐射率高、近红外波段反射率低的特征, $IBI^{[17]}$ 构建原理为使用热红外与近红外波段比值来增强这些地类的信息。但砂土、水体也具有相似的光谱特征, 所以仅依据这 2 个波段对地物特征进行提取, 势必会混杂有水体和砂土的信息。为了更好地地区分出建设用地, $NDISI^{[18]}$ 在此基础上加入了中红外波段和 $MNDWI$ 指数, 用以区分不透水面和水体及砂土, 采用 $NDISI$ 对城区地类进行提取, 其总体精度能够从 IBI 的 73% 左右提升至 90% 以上^[19]。因此, 本文使用 $NDISI$ 和 SI 共同构建干度指标 $NDISSI$, 该指标能够综合建设用地与裸土信息, 其公式为:

$$NDISI = \frac{TIRS1 - (MNDWI + NIR + SWIR1)/3}{TIRS1 + (MNDWI + NIR + SWIR1)/3}, \quad (11)$$

$$SI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)}, \quad (12)$$

$$NDISSI = \frac{NDISI + SI}{2}, \quad (13)$$

式中 $TIRS1$ 为热红外第 10 波段影像。在计算 $NDISI$ 指数时, 需先将 $MNDWI$ 与 $TIRS1$ 进行 0 ~ 255 的线性拉伸, 以统一各波段的量化级别。

2.5 IRSEI 的构建

PCA 是一种除去波段之间多余信息, 将多波段的图像信息压缩到比原波段更有效的少数几个相互独立波段的转换方法, 它能够将高维的数据映射到低维的空间中进行表示, 用较少的数据维度, 保留住较多的原始数据点的特性。想要以单一的指数反映生态环境质量, 需要给构建遥感生态指数的每个指标赋予不同的权值, 主观经验赋权值的方法, 容易造成结果的偏差。利用 PCA 方法, 根据不同指标对主成分的贡献率, 可自动、客观地确定权值。取第一主成分分量 $PCA1$ 贡献度作为权重, 再将结果归一化处理到 $[0, 1]$, 接近 1 的值代表生态状况好, 接近 0 的值代表生态状况差, 构建 $IRSEI$, 即

$$IRSEI = (PCA1 - PCA1_{\min}) / (PCA1_{\max} - PCA1_{\min}), \quad (14)$$

式中 $PCA1_{\min}$ 与 $PCA1_{\max}$ 分别为 $PCA1$ 中的最小值与最大值。

3 结果与分析

3.1 IRSEI 代表性验证

表 1 是宜宾市三江汇合区 3 个年份 4 个指标的 PCA 分析结果。从表中可以看出 $PCA1$ 具有以下特征: ①在各年份中, $PCA1$ 的特征值所占的比例都大于 88%, 表明已集中了 4 个指标的绝大部分信息; ②各个指标对 $PCA1$ 中都有一定的贡献度, 而不会像在其他特征分量 ($PCA2$ — $PCA4$) 中出现大小不定、正负没有规律的现象; ③在 $PCA1$ 中, 代表绿度的 $NDVI$ 和代表湿度的 WET 指标呈正值, 说明它们对良好的生态系统起着积极的作用, 而代表温度和干度的 LST 和 $NDISSI$ 则呈负值, 说明它们对良好的生态系统起着消极的作用, 符合生活实际。同时, 这与回归方程中各指标的系数正负保持一致, 同样证明了模型构建的正确性。而在 $PCA2$ — $PCA4$ 中, 这些指标正负不定, 难以解释。因此, 较之于其他分量, $PCA1$ 有明显的优势, 它不仅能够解释绝大多数的数据, 还能够很好地综合 4 个指标的信息, 并对其

表 1 主成分分析结果
Tab. 1 Results of principal component analysis

指标	2013 年				2017 年				2020 年			
	$PCA1$	$PCA2$	$PCA3$	$PCA4$	$PCA1$	$PCA2$	$PCA3$	$PCA4$	$PCA1$	$PCA2$	$PCA3$	$PCA4$
$NDVI$	0.79	0.37	-0.38	0.31	0.74	0.31	-0.48	0.36	0.76	0.32	-0.44	0.36
WET	0.04	-0.16	0.59	0.79	0.06	-0.13	0.60	0.78	0.07	-0.13	0.64	0.76
LST	-0.32	0.92	0.25	0.02	-0.29	0.94	0.17	0.04	-0.22	0.94	0.26	-0.04
$NDISSI$	-0.52	-0.01	-0.67	0.52	-0.60	-0.10	-0.61	0.50	-0.60	0.04	-0.58	0.55
特征值	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00
特征值贡献率/%	88.18	9.39	2.24	0.19	89.25	8.28	2.02	0.45	88.75	8.60	2.27	0.39

合理解释,因此,可使用 PCA1 创建 IRSEI。据统计,采用改进之后的 IRSEI 指数 PCA1 的百分比较 RSEI 有所提升,以研究区 3 期影像为例,分别从 85%,86% 和 85%,提升到了 88%,89% 和 89%。此外,在新构建 IRSEI 指数的 PCA1 中,干度指标对应系数的绝对值与 RSEI 中对应的值相比有显著提升。在其他 3 个指标对应的系数基本不变的情况下,该系数的绝对值在这 3 期影像中分别从 RSEI 指数的 0.34,0.40 和 0.39 提升至 IRSEI 的 0.52,0.60 和 0.60,平均提升超过 52%。PCA1 和对应干度系数绝对值的提升说明,模型改进之后能够提取更多的信息进行生态评估,IRSEI 能够更加精准地反映出干度对生态环境造成的负面影响。

新构建的 IRSEI 指数综合代表性可由它和各生

态指标的相关性进行表示,从表 2 可以看出:就单一指标而言,各指标相互之间的平均相关度最高的为 NDISSI,在 2017 年达到了 0.79,3 期平均相关度为 0.78。而新构建的 IRSEI 指数与各指标的相关度在这 3 期中均大于 0.75,平均相关度达 0.78,比这 4 个指标的均值 0.64 高出 22%。由此可见,新构建的 IRSEI 指数能够很好地集成各指标的信息,并且比任意的单一指标更具有代表性,能够较好地综合代表城市生态水平。相较于 RSEI 指数,新构建的 IRSEI 指数各指标与模型的平均相关度也有所提升。据统计,改进前后的各指标与模型的平均相关度在这 3 期影像中分别从 0.73,0.75 和 0.74 提升至 0.76,0.79 和 0.77,表明 IRSEI 指数相比 RSEI 指数能够更好地代表各个指标的综合信息。

表 2 各指标与 IRSEI 指数的相关性统计

Tab. 2 Statistic of correlation between each index and IRSEI index

指标	2013 年					2017 年					2020 年				
	NDVI	WET	LST	NDISSI	IRSEI	NDVI	WET	LST	NDISSI	IRSEI	NDVI	WET	LST	NDISSI	IRSEI
NDVI	1.00	0.24	-0.62	-0.95	0.99	1.00	0.37	-0.63	-0.96	0.99	1.00	0.39	-0.51	-0.96	0.98
WET	0.24	1.00	-0.49	-0.49	0.37	0.37	1.00	-0.49	-0.53	0.47	0.39	1.00	-0.45	-0.58	0.50
LST	-0.62	-0.49	1.00	0.69	-0.72	-0.63	-0.49	1.00	0.66	-0.72	-0.51	-0.45	1.00	0.60	-0.62
NDISSI	-0.95	-0.49	0.69	1.00	-0.98	-0.96	-0.53	0.66	1.00	-0.99	-0.96	-0.58	0.60	1.00	-0.99
IRSEI	0.99	0.37	-0.72	-0.98	1.00	0.99	0.47	-0.72	-0.99	1.00	0.98	0.50	-0.62	-0.99	1.00
平均相关度	0.70	0.40	0.63	0.78	0.76	0.74	0.47	0.62	0.79	0.79	0.71	0.48	0.54	0.78	0.77

3.2 IRSEI 模型构建及分析

对各年份 4 个指标及 IRSEI 专题图进行贯穿全影像的随机采样,采样点数为 30 000 个。以 NDVI,

WET,LST,NDISSI 为自变量,IRSEI 为因变量,构建宜宾市三江汇合区多元回归生态指数模型(模型皆通过了 1% 的显著性检验),即

$$IRSEI_{2013} = 0.63NDVI + 0.04WET - 0.25LST - 0.42NDISSI + 0.39,$$
 (15)

$$IRSEI_{2017} = 0.56NDVI + 0.05WET - 0.22LST - 0.45NDISSI + 0.47,$$
 (16)

$$IRSEI_{2020} = 0.64NDVI + 0.11WET - 0.25LST - 0.43NDISSI + 0.39。$$
 (17)

从模型中可看出,4 个指标在逐步回归时都保留了下来,证明构建 IRSEI 的 4 个指标均为生态评估的关键性指标。此外,NDVI 和 WET 的系数为正,说明对生态评价有着积极作用;LST 和 NDISSI 系数

为负,说明对生态评价有着消极作用。

各生态指标与 IRSEI 的关系可由三维散点图直观地进行分析。从图 1 可以看出 IRSEI 的高值区集中在绿度高、湿度大的密集植被覆盖区;而低值区

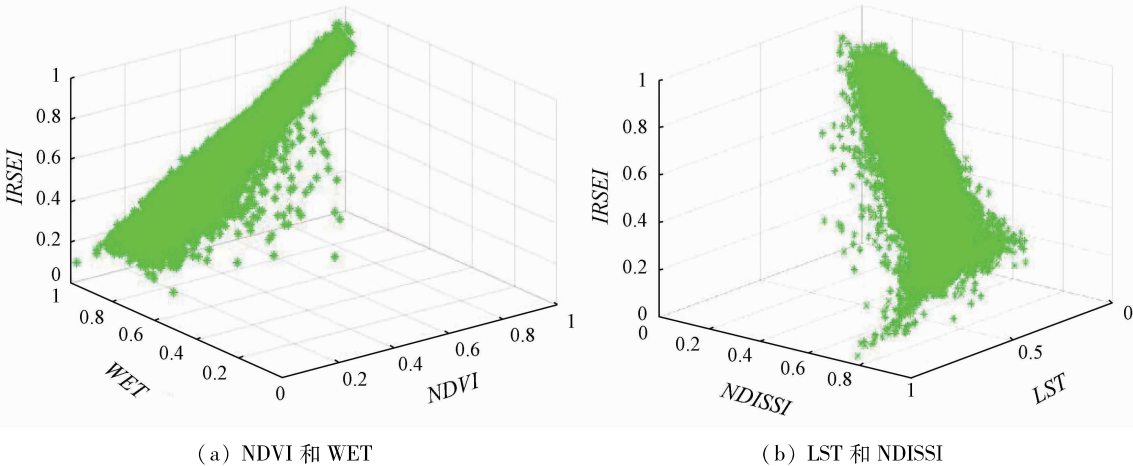


图 1 IRSEI 与各指标的三维散点图

Fig.1 Three dimensional scatter plots of IRSEI and each factor

集中在温度高、干度大的建筑区域。*NDVI* 的回归系数在 3 期均大于 0.56, 反映出 *NDVI* 对生态状况的贡献度最高; *NDISSI* 回归系数绝对值在 3 期中均大于 0.42, 其对生态状况的影响仅次于 *NDVI*; *LST* 回归系数绝对值均大于 0.22, 其对生态的影响相对较弱; *WET* 的回归系数为 0.04 ~ 0.11, 它对生态状况的影响程度在 4 个指标中是最低的。

3.3 城市扩张分析

为更好地分析城市扩张情况, 将 2020 年 *NDIS-*

SI 与 2013 年 *NDISSI* 进行差值计算, 对其结果归一化处理后使用等间距分级法以 0.2 为间距重分为 5 类, 如图 2(c) 所示。通过对比图 2(a) 和 (b), 可发现城市扩张极为明显, 且主要集中在三江汇合处 (图中白色区域) 的北面及南面, 这与图 2(c) 中显著增加区域 (红色图斑) 相吻合, 表明新构建的干度指标 *NDISSI* 能够清晰准确地反映出城市扩张情况。



图 2 研究区 2013—2020 年城市扩张示意图

Fig. 2 Urban expansion of the study area from 2013 to 2020

3.4 环境评价分析

为了更好地分析 *IRSEI* 的代表性, 将各年份 *IRSEI* 值以 0.2 为间隔划分为 5 个等级: $[0, 0.2)$ 为差, $[0.2, 0.4)$ 为较差, $[0.4, 0.6)$ 为中, $[0.6, 0.8)$ 为较好, $[0.8, 1]$ 为好。

从表 3 及图 3 数据的变化情况来看, 2013 年宜宾市三江汇合区的 *IRSEI* 均值为 0.54; 2017 年为 0.67, 较 2013 年上升了 24%。2013—2017 年间, 对生态负面影响最大的 *NDISSI* 从 -0.44 略微加剧到 -0.47, 这是因为自 2013 年临港新区成立后, 城区急速扩大, 导致研究区不透水面增加所致。另一方面, 随着退耕还林政策的不断推进, 以及临港新区建

设过程中的植被恢复, 使得对生态环境正面影响最大的 *NDVI* 平均值从 0.41 猛增到 0.55, 这是研究区即使在 *NDISSI* 略微增大的同时, 环境依然能够大为好转的原因, 直观体现在生态级别为较差和中的面积从 68.84 km² 和 179.80 km² 急剧缩小至

表 3 各年份指标与 *IRSEI* 的统计均值

Tab. 3 Statistical mean value of index and *IRSEI* in each year

年份	<i>NDVI</i>	<i>WET</i>	<i>LST</i> /℃	<i>NDISSI</i>	<i>IRSEI</i>
2013 年	0.41	-0.03	23.64	-0.44	0.54
2017 年	0.55	-0.04	28.77	-0.47	0.67
2020 年	0.55	-0.03	24.07	-0.47	0.63

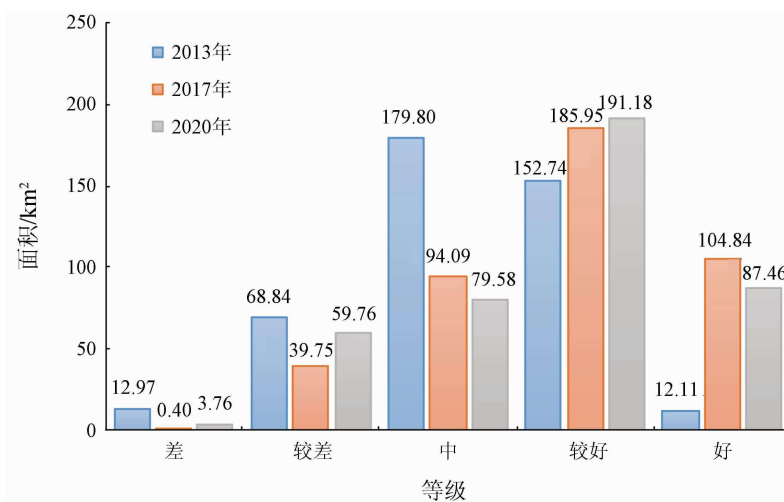


图 3 三江汇合区不同时期生态等级面积

Fig. 3 Ecological area of three rivers confluence area in different periods

39.75 km²和94.09 km²。反之,生态级别为较好和好的面积从152.74 km²和12.11 km²猛增至185.95 km²和104.84 km²;2020年IRSEI均值为0.63,较2017年下滑6%,生态环境有所恶化。截至2020年,NDVI、WET与NDISSI同比2017保持稳定,由于昼夜温差的缘故,仅从LST的均值结果进行分析缺乏说服力,需先对其进行归一化操作,再行比较^[1]。结果显示,归一化后的LST在2017年和2020年分别为0.34和0.37,增长了9%。可见2017—2020年间,随着城区的扩张,城市热岛效应^[20]不断增强,这是生态状况下滑的原因,直观体现在生态级别为好的面积从2017年的104.84 km²减少到2020年的87.46 km²。

研究区2013—2020年生态变化检测情况如图4所示,即将2017年与2013年、2020年与2017年的IRSEI专题图进行差值运算,对其结果归一化之后,同样按照0.2为间隔进行划分,结果从小到大依

次表现为:显著变差、明显变差、基本不变、明显变好、显著变好。如图4(a)所示,从空间变化结果来看,2013—2017年间生态变差的地区主要集中在三江汇合区西北以及东北方向(橙、红色图斑),这部分区域恰巧是新城区的开发地。而生态变好的地区主要分布于的东南部以及中心处(浅绿色、绿色图斑),东南部地区生态状况好转的原因是退耕还林政策的不断推进,使得植被覆盖面得到提升。而三江汇合中心地带生态状况的好转得益于新修湿地公园和景观绿地等老城区的改造项目。如图4(b)所示,2017—2020年间生态恶化的区域主要集中在三江汇合区北面及南面(橙、红色图斑),北面恶化的原因是该区域正破土兴建宜宾大学城,南面恶化原因为老城区扩张。三江汇合区的边缘地带生态不断好转(浅绿色、绿色图斑),得益于退耕还林政策持续影响下的植被覆盖面的提升。

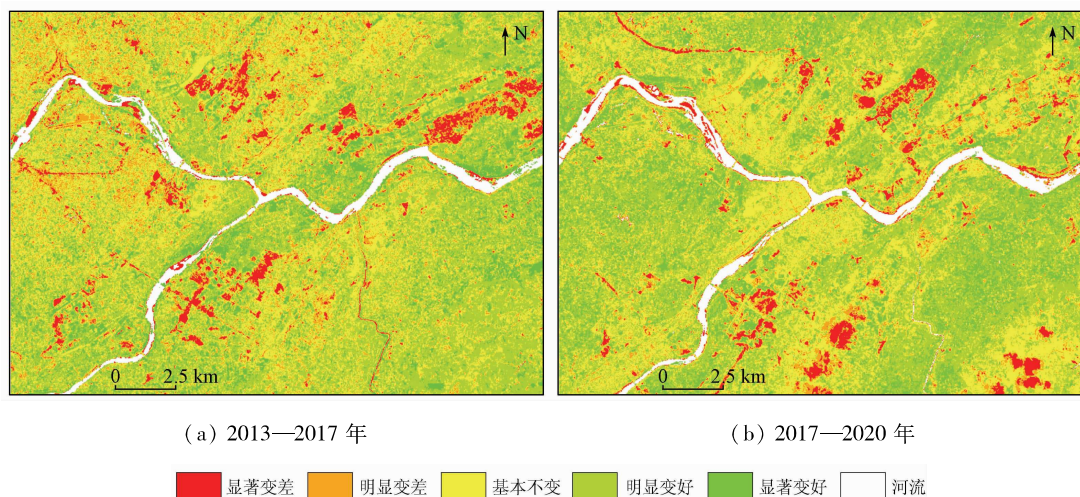


图4 研究区IRSEI变化检测

Fig. 4 Change detection of IRSEI in study area

4 结论

以宜宾市三江汇合区为研究区,基于绿度指标(NDVI)、湿度指标(WET)、温度指标(LST)以及干度指标(NDISSI)建立的改进型遥感生态指数(IRSEI),对该地区2013—2020年生态状况及变化趋势进行研究,主要结论如下:

1)不透水面指数(NDISI)与裸土指数(SI)构建的NDISSI能够更加准确地反映出干度对生态环境造成的负面影响,这使得IRSEI抑制噪声信息能力更强,相较于RSEI能够增加4%有用数据用于生态质量分析。此外,IRSEI与各指标的平均相关度相比RSEI提升了22%左右,这表明IRSEI能够更好地集成各个指标的信息。

2)宜宾市三江汇合区2013—2020年的生态环境质量,呈现出先好转后轻微恶化的趋势。在2013—2017年间,研究区生态状况明显好转,生态级别为“差”和“好”的面积占比分别从2013年的3.04%和2.84%变为2017年的0.09%和24.67%;在2017—2020年间,研究区生态状况变差,2020年生态级别为“差”和“好”的面积占比分别为0.89%和20.74%。

3)IRSEI指数能够综合4个指标对生态质量进行评估,通过建模分析得出4个指标权重由大到小依次为:NDVI,NDISSI,LST以及WET。这表明植被是城市生态系统中最重要影响因素,但值得注意的是NDISSI与LST的综合作用会抵消植被的影响。

此外,宜宾市位于四川盆地,森林覆盖面广,水

汽充沛,这使得遥感影像受云雾的影响较大,长时间序列数据获取较难,在进一步的研究中,可以将无人机遥感技术应用于生态环境分析,以降低大气云层的影响,从而提高遥感监测精度。

参考文献 (References):

- [1] Pauleit S, Ennos R, Golding Y. Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change: A study in Merseyside, UK[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71(2-4): 295-310.
- [2] Musse M A, Barona D A, Rodriguez L M S. Urban environmental quality assessment using remote sensing and census data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 71(71): 95-108.
- [3] 王 瑶, 宫辉力, 李小娟. 基于 GIS 的北京市生态环境质量监测与分析[J]. *国土资源遥感*, 2008, 20(1): 94-99. doi:10.6046/gtzyyg. 2008.01.21.
Wang Y, Gong H L, Li X J. The monitoring and analysis of ecological environment quality of Beijing based on GIS[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2008, 20(1): 94-99. doi:10.6046/gtzyyg. 2008.01.21.
- [4] 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.
Xu H Q, A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [5] 徐志刚, 郑鸿瑞, 戴晨曦, 等. 永定客家土楼世界遗产地土地覆盖与生态变化遥感评价[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(1): 102-108. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.01.14.
Xu Z G, Zheng H R, Dai C X, et al. Evaluation of land cover and ecological change of Yongding Hakka Tulou World Heritage Protection Area using remote sensing image[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(1): 102-108. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.01.14.
- [6] 木哈代思·艾日肯, 张 飞, 刘 康, 等. 基于天宫二号及 Landsat8 城镇生态环境现状评价[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(4): 209-218. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.04.26.
Muhadasi A, Zhang F, Liu K, et al. Urban ecological environment evaluation based on Tiangong-2 and Landsat8 data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(4): 209-218. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.04.26.
- [7] 罗 春, 刘 辉, 戚陆越. 基于遥感指数的生态变化评估——以常宁市为例[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(4): 145-150. doi:10.6046/gtzyyg. 2014.04.23.
Luo C, Liu H, Qi L Y. Ecological changes assessment based on remote sensing indices: A case study of Changning City[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, 26(4): 145-150. doi:10.6046/gtzyyg. 2014.04.23.
- [8] Xu H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269-4276.
- [9] 徐涵秋. 一种基于指数的新型遥感建筑用地指数及其生态环境意义[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(3): 301-308.
- Xu H Q. A new index - based built-up index (IBI) and its eco-environmental significance[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(3): 301-308.
- [10] Xu H Q. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISI)[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(5): 557-565.
- [11] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping[J]. *Tropical Ecology*, 2002, 43(1): 39-47.
- [12] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(12/14): 3025-3033.
- [13] 程志峰, 何祺胜. 基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(3): 531-539.
Cheng Z F, He Q S. Remote sensing evaluation of the ecological environment of Su-Xi-Chang city group based on remote sensing ecological index (RSEI)[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(3): 531-539.
- [14] Chander G, Markham B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(11): 2674-2677.
- [15] 覃志豪, 李文娟, 徐 斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. *国土资源遥感*, 2004, 16(3): 28-32, 36, 41. doi:10.6046/gtzyyg. 2004.03.07.
Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2004, 16(3): 28-32, 36, 41. doi:10.6046/gtzyyg. 2004.03.07.
- [16] 杨永健. 基于遥感生态指数的生态质量变化分析[D]. 西安: 长安大学, 2019.
Yang Y J. Ecological quality assessment based on remote sensing ecological index: A case study of Fujian Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [17] Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 583-594.
- [18] 徐涵秋, 王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1270-1289.
Xu H Q, Wang M Y. Remote sensing-based retrieval of ground impervious surfaces[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1270-1289.
- [19] 刘 畅, 杨 康, 程 亮, 等. Landsat8 不透水面遥感信息提取方法对比[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(3): 148-156. doi:10.6046/gtzyyg. 2019.03.19.
Liu C, Yang K, Cheng L, et al. Comparison of Landsat8 impervious surface extraction methods[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019, 31(3): 148-156. doi:10.6046/gtzyyg. 2019.03.19.
- [20] 林冬凤, 徐涵秋. 厦门城市不透水面及其热环境效应的遥感分析[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(3): 78-84.
Lin D F, Xu H Q. Urban impervious surface and its effects on thermal environments in Xiamen: An analysis based on remote sensing

technology[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment,

2013,8(3):78–84.

Ecological environment assessment of three – river confluence in Yibin City using improved remote sensing ecological index

ZHANG Qinrui¹, ZHAO Liangjun², LIN Guojun¹, WAN Honglin³

(1. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644000, China; 2. Key Laboratory of Higher Education of Sichuan Province for Enterprise Informationization and Internet of Things, School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China; 3. Department of Water Conservancy, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou Technology Innovation Center of Remote Sensing and Smart Water, Cangzhou 061001, China)

Abstract: Urban expansion is the main characteristic of Yibin City in recent years, and the study of its impacts on ecology is significant for urban development and ecological protection. To assess the impacts of urban expansion on the ecology more accurately, this study established an improved remote sensing ecological index (IRSEI) by using the impervious surface area index as the dryness index to replace the original building index. The IRSEI coupled the improved dryness index and the indices greatly influencing the ecology, such as greenness, humidity, and temperature. This study analyzed the IRSEI using principal component analysis and correlation and established an IRSEI – based ecological assessment model of the three – river (i. e., the Jinsha River, Minjiang River, and Yangtze River) confluence in Yibin City. Then, this study analyzed and assessed the ecological environment of the confluence in 2013—2020. The results are as follows. The IRSEI can more accurately reflect the negative impacts of the dryness index on the ecology of the confluence. It can concentrate more useful information in the first principal component than the RSEI and can better apply to the quality assessment of urban ecological environment. In 2013, the IRSEI of the confluence was 0.54, indicating the moderate ecological status overall. The reason is that the original vegetation was destroyed by serious urban expansion. In 2017, the IRSEI was 0.67. The greenness was significantly improved by the continuous advancement of returning farmland to forests and the restoration of urban ecology, which is the reason that the ecology has greatly improved in 2017 compared to 2013. In 2020, the IRSEI was 0.63. The greenness, humidity, and dryness in 2020 were roughly the same as those in 2013, while the temperature rose in 2020 compared to 2017 due to the heat island effect induced by urban expansion. This is the reason for the slight decline in the ecological level in 2020.

Keywords: improved remote sensing ecological index (IRSEI); principal component analysis; correlation; three – river confluence in Yibin City; ecological assessment

(责任编辑: 张 仙)