

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.02.008

# 基于多时相遥感影像的天津市中心城区 生态环境质量评价

胡洋, 高伟\*, 杨杰

(天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300380)

**摘要:** 针对城市扩张使得城市生态环境质量下降的现象, 基于2014、2016、2018年三个时相的Landsat8 OLI\_TIRS卫星数字产品影像数据, 运用遥感生态指数(RSEI)对天津市中心城区生态环境质量变化进行了评价与分析。研究结果表明RSEI对于城市化程度高、城市房屋集中且紧凑的天津市中心城区有较好的适用性, 能够对环境质量进行监测, 也对空间变化的研究起到了重要的作用。具体表现为: 2014、2016、2018年天津市中心城区的RSEI均值分别为0.547、0.463、0.478; RSEI地理位置上从北至南、从西至东呈现出低-高-低的倒U型趋势。天津中心城区的各指数相关性分析表明, 干度指标(NDBSI)是影响研究区生态环境质量最大的指数, 有很大的消极影响, 是天津市中心城区未来改善生态环境的重要参考。在天津市中心城区的成功示范, 表明RSEI在生态环境质量评估上的应用可为掌握城市生态环境质量、监测治理区域环境和规划建设城市提供积极的参考。

**关键词:** 遥感; 天津市中心城区; 生态指数; 主成分分析; 趋势分析; 相关性分析

中图分类号: TP753; X821

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)02-168-013

## Evaluation of eco-environmental quality in central urban areas of Tianjin City based on multi-temporal remote sensing images

HU Yang, GAO Wei\*, YANG Jie

(School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300380, China)

**Abstract:** In view of the decline of urban ecological environment quality caused by urban expansion, based on the Landsat8 OLI\_TIRS satellite digital product image data of three time phases in 2014, 2016 and 2018, the changes of ecological environment quality in the central city of Tianjin, China, were evaluated and analyzed using remote sensing ecological index (RSEI). The results show that the RSEI has good applicability to the central urban area of Tianjin, which is characterized by high urbanisation, concentrated and compact urban housing, and can monitor environmental quality and also play an important role in the study of spatial changes. It is shown that the average values of the RSEI in the central urban area of Tianjin in 2014, 2016 and 2018 were 0.547, 0.463 and 0.478 respectively, and the RSEI geographically shows an inverted U-shaped trend of low-high-low from north to south and west to east. The correlation analysis of

作者简介: 胡洋(1997-), 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事资源环境与遥感方面的研究。E-mail: huyang9775@163.com

导师简介: 高伟(1968-), 天津人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事3S技术的集成与应用方面的研究。E-mail: gaoweichina@163.com

收稿日期: 2021-05-21; 修改日期: 2022-11-10

\*通信作者。

each index from the central urban area of Tianjin city shows that the normalized difference built-up and soil index (NDBSI) is the index that affects the quality of the ecological environment in the study area the most, with a high negative correlation with the eco-environmental quality, and is an important reference for the future improvement of the ecological environment in the central urban area of Tianjin. The successful demonstration in the central urban area of Tianjin shows that the application of RSEI remote sensing ecological index in the assessment of ecological environment quality can provide a positive reference for learning the urban ecological environment quality, monitoring and controlling the regional environment, and planning and constructing the city.

**Key words:** remote sensing; central urban area of Tianjin; ecological index; principal component analysis; trend analysis; correlation analysis

## 0 引言

生态环境的评价是以科学的方法按照一定的评价标准来实现的对某一区域生态环境质量进行的评定及预测。针对天津中心城区城市化的迅速壮大引发的一系列生态环境问题,如自然环境破坏、生态功能丧失、居民城镇环境的质量正在逐步受到影响等,对其进行生态环境的评价是中心城市生态环境改善和优化过程的重要工作之一<sup>[1]</sup>。

20世纪80年代末,研究人员开始利用地理信息系统与遥感技术进行环境评价<sup>[2]</sup>。Hu和Xu<sup>[3]</sup>以中国福州市为研究区域,结合遥感生态指数(RSEI)和压力-状态-响应模型(PSR)对中国福州市的城市生态质量进行了评估;Saleh等<sup>[4]</sup>利用Landsat遥感影像数据,综合使用RSEI、莫兰指数并结合PSR模型等对伊朗中部城市伊斯法罕进行了城市生态质量评价;2021年,Xiong等<sup>[5]</sup>将RSEI与Google Earth Engine平台相结合,探索洱海流域生态环境变化规律;Yue等<sup>[6]</sup>基于RSEI将研究范围从某一个城市或某一地区扩展到面向中国35个主要城市进行了生态环境质量评价。

政府的主导使得我国在生态环境质量方面的初期研究以符合我国实际国情的污染防治与灾害评价为主<sup>[6]</sup>。胡翔等<sup>[7]</sup>利用四川省九寨沟2017年8月8日地震前后的Landsat8遥感影像通过主成分分析得到了RSEI,并对指数进行了分级和评价;王丽春等<sup>[8]</sup>利用RSEI对玛纳斯湖湿地进行生态环境评价,分析影响湿地退化的具体原因;王美雅和徐涵秋<sup>[9]</sup>在城市扩展中着眼于不透水面取代植被问题,利用RSEI指数对比分析了上海和纽约两种不透水面空间分布格局对城市生态质量的影响。

已有的研究大多将生态环境质量稳定性较低或城市区划边界明显的区域作为研究区,而忽略了在发展完善的城市中心城区中依旧存在着城市扩张对生态环境造成的消极影响,这类城市存在着生态环境质量稳定性较高、人为因素对生态环境影响大、城市区划在扩张中表现较模糊的特点,其存在的生态环境问题值得深入研究,鉴于RSEI具有数据指标获取容易、计算简单、人为影响小、适合做城区生态环境评价<sup>[10]</sup>等优势,本文采用新型的城市遥感生态指数RSEI作为评价指标<sup>[10]</sup>,以期探究影响天津中心城区生态环境的要素。

## 1 研究区概况

由和平区、河西区、南开区、河东区、河北区、红桥区六区组成的天津市中心城区地理位置处于39°12' N

~39°15' N, 117°15' E~117°22' E, 年平均气温约为14°C。根据历年天津市生态环境公报可以得知,天津中心城区生态情况并不乐观,其生态环境质量指数(EI)在全市中排名第11位,生态环境较为脆弱。

本工作采用的3幅该地区场景陆地卫星图像(Landsat8 OLI)来自地理空间数据云网站,为了尽量减小因季节差异、植被生长状态不同而造成的误差,获取日期分别为2014年4月13日、2016年4月18日、2018年4月17日。

## 2 研究方法

本研究组织框架主要由数据处理与数据分析两部分构成。在数据处理中,通过遥感影像预处理、四种生态因子计算与整合,最终构建RSEI影像,为数据分析做铺垫,而后通过四种针对性的分析方法,得出主要结论,为天津市中心城区生态质量提供有价值的参考。本研究流程如图1所示。

基于RSEI模型的天津市中心城区绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)、热度(即地表温度LST)四种生态因子均来自遥感影像,具有数据获取与计算简单、科研认可度高、综合研究区属性强等优点。

### 2.1 生态因子的构建

四种生态因子计算方式如下:

#### 1) 湿度指标 $I_{Wet}$

湿度分量反映了水土和植被的湿度,与生态环境密切相关<sup>[12]</sup>。本研究采用Index DataBase网站公布的Tasselles Cap-wetness公式计算遥感影像的 $I_{Wet}$

$$I_{Wet} = 0.1509\rho_2 + 0.1973\rho_3 + 0.3279\rho_4 + 0.3406\rho_8 - 0.7112\rho_{11} - 0.4572\rho_{12}, \quad (1)$$

式中 $\rho_2$ 、 $\rho_3$ 、 $\rho_4$ 、 $\rho_8$ 、 $\rho_{11}$ 、 $\rho_{12}$ 分别对应Landsat遥感影像里的第2波段Blue、第3波段Green、第4波段Red、第8波段NIR、第11波段SWIR1、第12波段SWIR2波段的反射率。

#### 2) 绿度指标 $I_{NDV}$

用归一化差值绿度指数 $I_{NDV}$ 来表示绿度指标, $I_{NDV}$ 是近红外区(NIR)和红光区(Red)的反射率差值的比值,是最常用的植被指数<sup>[12]</sup>,其表达式为

$$I_{NDV} = \frac{\rho_8 - \rho_4}{\rho_8 + \rho_4}. \quad (2)$$

#### 3) 干度指标 $I_{NDBS}$

裸土指数 $I_S$ 通常被用来表示 $I_{NDBS}$ ,但在中国区域环境中,建筑建设用地的因素是不可忽视的,这些建筑用地同样对我国地表干化产生巨大的负面影响。因此本工作中, $I_{NDBS}$ 由 $I_S$ 和建筑指数 $I_{IB}$ 二者的平均值<sup>[13]</sup>来表示:

$$I_{NDBS} = \frac{I_S + I_{IB}}{2}, \quad (3)$$

$$I_S = \frac{(\rho_{11} + \rho_4) - (\rho_8 + \rho_2)}{(\rho_{11} + \rho_4) + (\rho_8 + \rho_2)}, \quad (4)$$

$$I_{IB} = \frac{\frac{2\rho_8}{\rho_{11} + \rho_8} - (\frac{\rho_8}{\rho_8 + \rho_4} + \frac{\rho_3}{\rho_3 + \rho_{11}})}{(\rho_{11} + \rho_4) + (\rho_8 + \rho_2)}. \quad (5)$$

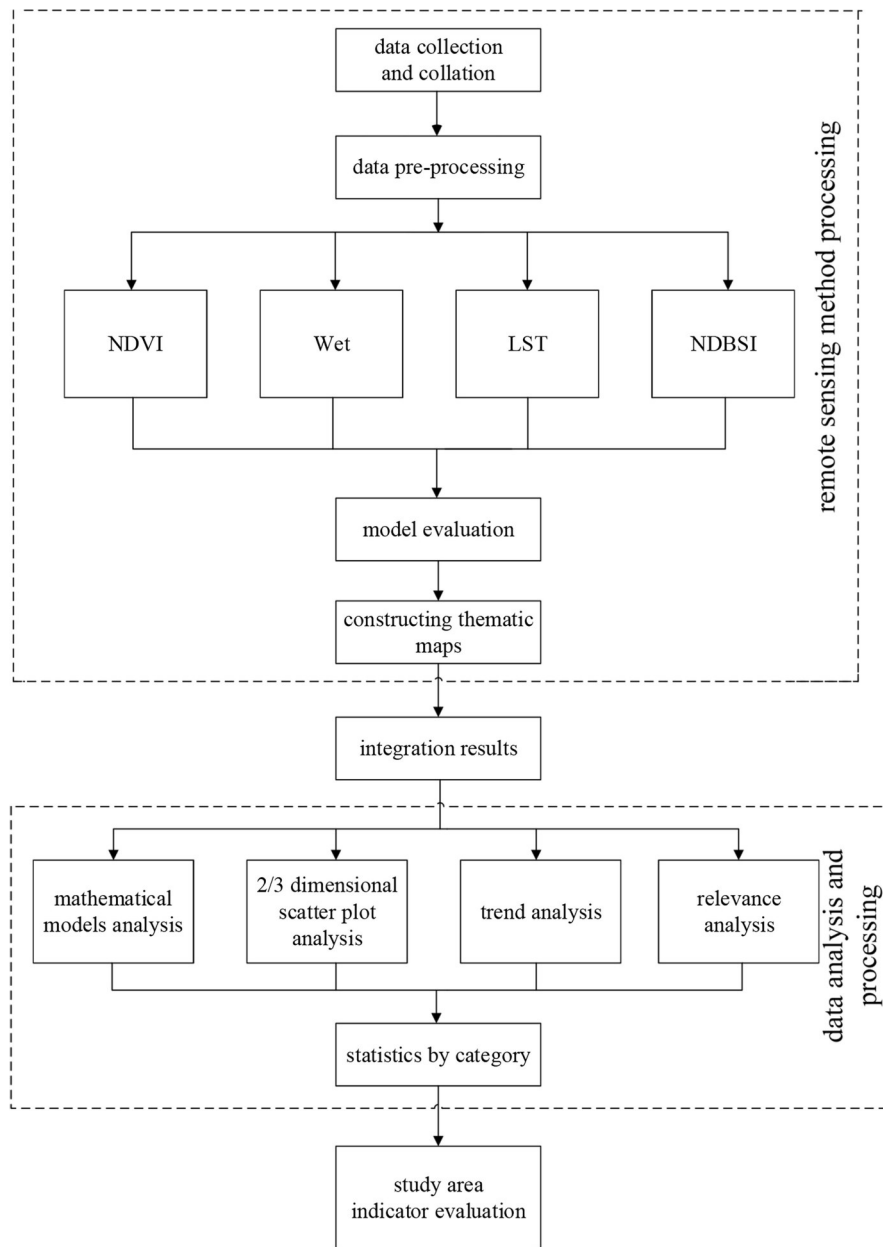


图 1 研究流程图

Fig. 1 Flow chart of the study

4) 热度指标  $I_{LST}$

热度指标的计算公式为

$$I_{LST} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1\right)}, \tag{6}$$

$$B(T_s) = \frac{[L_\lambda - L_u - \tau(1 - \varepsilon)L_D]}{\tau\varepsilon}, \tag{7}$$

式中  $B(T_s)$  是与 LST 相同温度下黑体的热辐射亮度,  $L_\lambda$  为卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值,  $L_u$  为大气上行辐射亮度,  $L_D$  为大气下行辐射亮度,  $\tau$  为热红外波段的大气透过率,  $\varepsilon$  为地表辐射率<sup>[4]</sup>;  $K_1$  和  $K_2$  为定标参

数<sup>[15]</sup>。基于完整的遥感图像处理平台 ENVI5.5 软件,再利用与 Landsat8 相匹配的程序 Landsat8 TIRS 向 NASA 网站 (<http://atm.corr.gsfc.nasa.gov>) 申请,即可获取与影像相匹配的大气透过度、大气上行和下行辐射亮度等参数,最终得到热度指标的影像。

由于组成 RSEI 中的各指标项的量纲不同,其可比性差,为了确保各指标间具有可比性,需要对这些因子进行归一化。归一化公式为

$$NI_i = \frac{(I_i - I_{\min})}{(I_{\max} - I_{\min})}, \quad (8)$$

式中  $NI_i$  为归一化之后的某一指标值,  $I_i$  为该指标在像元  $i$  的值,  $I_{\min}$ 、 $I_{\max}$  是该指标的最小值和最大值。

## 2.2 主成分分析

主成分分析 (PCA)、聚类分析、因子分析是最常见的三种分析方法。考虑到聚类分析模型存在处理大量样本时会出现无法识别的错误,而因子分析计算所用的最小二乘法有时会失效,本研究选取主成分分析法作为自然环境评价方法。原因在于,一方面主成分分析法中的每个指标的权重是由数据自身的性质以及各个指标对于各主成分量的贡献度来客观自动决定的,能够排除人为主观性、因人而异的影响<sup>[16]</sup>,这是主成分分析法最重要的优点;另一方面,主成分分析法中的多个变量线性变换压缩成少数具有代表性变量的多维压缩技术,通过去中心化、计算协方差矩阵、对协方差矩阵进行特征值分解得到特征矩阵、投影原属数据到特征矩阵坐标系,能够对遥感影像的特征光谱进行去相关性转化来达到集中特征信息到 1~2 种主成分以及降噪、去除冗余信息等目的,这与基于遥感影像分析生态质量十分契合<sup>[16,17]</sup>。

## 2.3 遥感生态指数的构建

遥感生态指数 (RSEI,  $I_{RSE}$ ) 的计算公式为

$$I_{RSE} = N[f(I_{NDVI}, I_{Wet}, I_{LST}, I_{NDBSI})], \quad (9)$$

式中  $N$  代表指数归一化,  $f$  代表经过主成分分析法处理。  $I_{RSE}$  经过归一化的值介于 [0,1] 之间,取值越接近于 1,说明生态环境质量越好,取值越接近 0,说明生态环境质量越差<sup>[10]</sup>。

## 3 数据的提取和统计

主成分分析历年第一主成分贡献度大小由高到低分别是 2014 年的 85.49%、2016 年的 77.88%、2018 年的 75.31%,每年的值均大于 75%,这说明用第一主成分综合四个评价因子效果较好。第一主成分中绿度、湿度为正值,热度、干度为负值,符号的正负表示对研究区域生态环境有着积极或消极作用,这与城市生态系统的实际情况一致。而主成分分析法中的第 2 至第 4 主成分 (PC2、PC3、PC4) 取值和符号都不稳定,从而丢失某些信息。三个时期的四个指标的 PC1 大小会略有改变, NDVI、Wet、NDBSI、LST 四个指标值的平均数分别为 0.472、0.508、-0.609、-0.390,说明 2014—2018 年期间,湿度是对生态环境质量正向评价贡献度最大的指标,也证明了城市生态中的生态环境与湿度紧密相关。干度的贡献度绝对值最大,且大于同为负向评价指标的热度,说明了干度指标更能反应生态环境质量的下降。通过主成分分析,得出 2014、2016、2018 年 RSEI 均值分别为 0.547、0.463、0.478。

为了更好进行下一步分析,将 RSEI 计算结果利用 ArcGIS 软件数据处理功能以等间距分为 5 级<sup>[18]</sup>,如表 1 所示。数值区间分别为 [0, 0.2]、(0.2, 0.4]、(0.4, 0.6]、(0.6, 0.8]、(0.8, 1.0], 分别代表着一级到五级的研究区的

生态环境质量, 以差、较差、中等、良、优五种作为区分, 以便进行进一步数据处理与分析。根据这种划分处理, 最终得到三年的RSEI分布图, 如图2所示。

表 1 生态环境状况分级表<sup>[18]</sup>

Table 1 Grading scale for ecological status<sup>[18]</sup>

Classification of levels	Range of values	Description
Fail	$0 \leq I_{RSE} \leq 0.2$	The poor ecological environment of the city has greatly restricted the normal life of its people
Poor	$0.2 < I_{RSE} \leq 0.4$	The poor ecology of the city, the arid climate, the low vegetation cover of the city and the significant constraints on the normal life of the urban population
Average	$0.4 < I_{RSE} \leq 0.6$	The ecological environment of the city is suitable, the city has a medium level of vegetation cover, suitable for the normal life activities of the people of the city, with few constraints
Good	$0.6 < I_{RSE} \leq 0.8$	The urban ecological environment meets the conditions of people's living activities and has a high level of vegetation cover
Excellent	$0.8 < I_{RSE} \leq 1.0$	An urban ecology that maximises the conditions for people's living activities, with a stable urban ecology and high vegetation cover

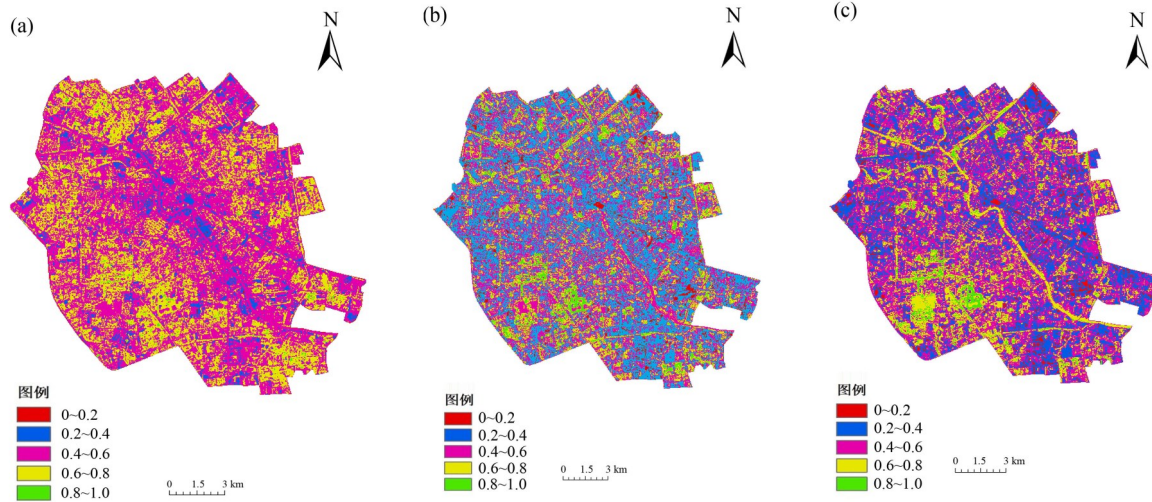


图 2 2014年 (a)、2016年 (b)、2018年 (c) RSEI分布图

Fig. 2 Distribution of RSEIs in 2014 (a)、2016 (b)、2018 (c)

根据图2对三个年份不同类型RSEI指标像元数及百分比进行统计, 结果如表2所示。

利用 ArcGIS 平台重分类工具可以很直观地看到各年份指标与遥感生态指数分类后的各类型像元数量与所占比例, 进而达到判断其生态状况的目的。

为了预测与判断天津市中心城区的环境变化趋势, 参考天津市环境保护政策实施情况与天津环境质量年度年报, 根据差值原理和《生态环境状况评价规范》(HJ192-2015) 生态环境状况变化度分级表<sup>[18]</sup>, 运用

ENVI软件得出天津市中心城区2016—2018年RSEI的变化分布图,使其生态环境质量变化更具有直观性,如图3所示。

通过表2、图3可以得知,中心城区的中心及南部环境变化较好,面积约占整个天津市中心城区的1/4,绿色部分聚集明显。表3为2016—2018年RSEI变化分布所占百分比表。由表可知,2016—2018年天津市中心城区环境明显变差所占比例最少,占有面积的11.6%,而RSEI值略微变好的面积所占比例最大,占31.3%,可见其生态环境质量变化正在缓慢上升。

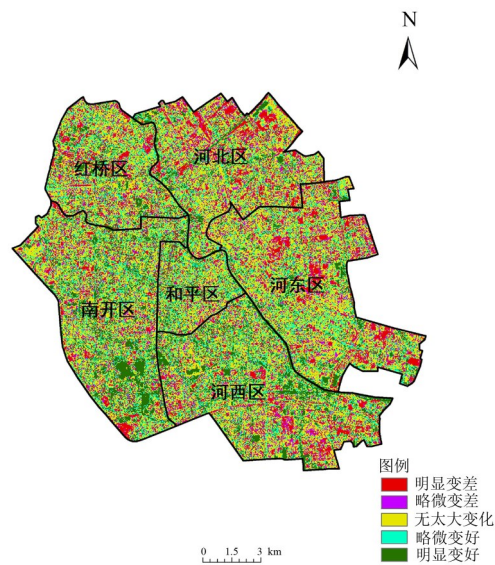


图3 天津市中心城区2016—2018年RSEI变化分布图

Fig. 3 Distribution of changes in RSEI from 2016 to 2018 in the central city of Tianjin

表2 RSEI指标像元数及其百分比统计表

Table 2 Statistical table of the pixel number of RSEI indicators and their percentage

Grade of RSEI	2014		2016		2018	
	Number of pixels	Percentage/%	Number of pixels	Percentage/%	Number of pixels	Percentage/%
1: (0~0.2]	203	0.10	7829	3.98	7294	3.69
2: (0.2~0.4]	16612	8.44	71711	36.45	57813	29.24
3: (0.4~0.6]	121905	61.97	75706	38.48	87860	44.44
4: (0.6~0.8]	56287	28.61	31493	16.01	37512	18.97
5: (0.8~1.0]	1709	0.87	10025	5.09	7227	3.66

## 4 数据的分析

综合分析可以得到以下结论: 1) 天津市中心城区向周边扩张趋势集中在北部、东部与东南部, 与天津滨海新区的相向发展以及城市的顺势扩张、经济积极发展的趋势相同, 也说明在整个天津市中心城区其环境保护的活动主要集中在西南方向以及沿河方向, 而在偏离中心城区西南部, 绝大部分无明显的规律性, 这与每个地区的发展情况和出台政策的不同有着密切的联系, 存在差异性; 2) 在天津中心城区中, 越靠近中心区域

表3 天津市中心城区2016—2018年RSEI变化分布所占百分比表

Table 3 Table of percentage distribution of changes in RSEI in the central city of Tianjin from 2016 to 2018

Level of change	Percentage/%
Significantly worse	11.6
Slightly worse	22.1
No significant change	17.1
Slightly better	31.3
Significantly better	17.9

的生态环境改善情况越集中,根据地方发布的年度人均GDP综合分析,当经济发展到一定阶段后,其生态环境的保护会在经济发展的推动下得到改善,从而促使中心区域生态得到改善,这与外围发展的趋势正好相反。

利用 ArcGIS 软件趋势分析模块功能,可以集合三维坐标与指数属性,从空间层面具体分析城市 RSEI 的变化趋势<sup>[19]</sup>。图4分别为2014—2018年中心城区中所包含的各个乡镇、街道的 RSEI 指数趋势分析图,契合中心城区地理走向构造, X 轴为东方向, Y 轴为北方向, Z 轴为 RSEI 指数,坐标原点为中心城区西南方位能够将所有乡镇、街道的区域划分到二维正北、正东第一数学坐标系的某坐标点。由图4可知,2014、2016、2018年中心城区 RSEI 指数地理位置上从北至南、从西至东呈现出低-高-低的倒 U 型趋势,且从北至南趋势略强于从西至东趋势;其中2014年趋势最为明显。

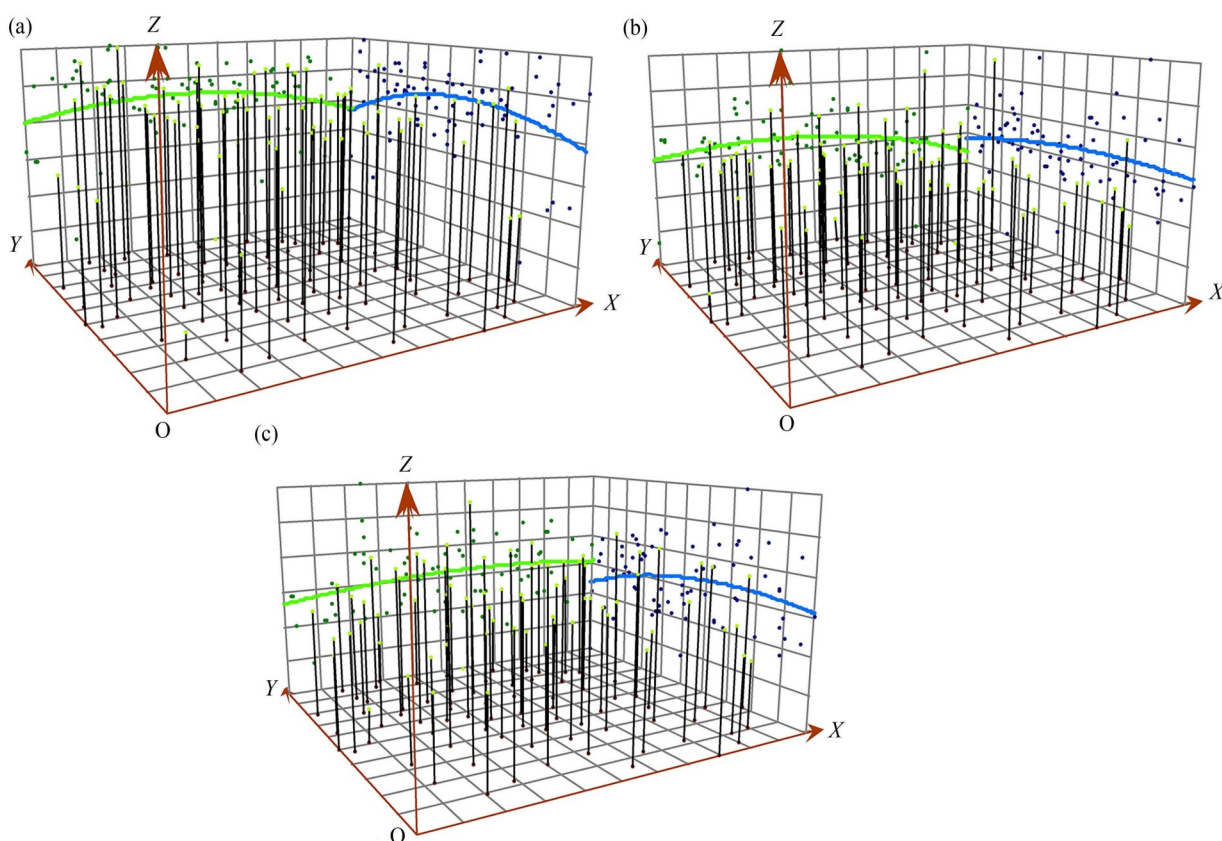


图4 2014年(a)、2016年(b)、2018年(c) RSEI趋势分析图

Fig. 4 Analysis of RSEI trends in 2014 (a)、2016 (b)、2018 (c)



通过统计,可以得出2014、2016、2018年中RSEI指数与其构成因子之间的相关度,计算三年平均相关度,将相关程度定量表示得到4种指标对天津市中心城区影响程度的大小,便于进一步进行分析。取一年中某个指标与其他指标相关度的绝对值之和的平均值作为平均相关度的数值,其现实意义是能够通过指标之间的平均相关度数值大小来判断该指标与其他指标的相关程度大小。4个指标和RSEI的相关矩阵如表4所示。

表4 4个指标和RSEI的相关矩阵

Table 4 Correlation matrix of the 4 indicators and RSEI

	2014					2016					2018				
	Wet	NDVI	LST	NDBSI	RSEI	Wet	NDVI	LST	NDBSI	RSEI	Wet	NDVI	LST	NDBSI	RSEI
Wet	1.000	0.880	-0.602	-0.833	0.932	1.000	0.855	-0.583	-0.908	0.915	1.000	0.855	-0.636	-0.818	0.934
NDVI	0.880	1.000	-0.483	-0.611	0.957	0.855	1.000	-0.485	-0.877	0.841	0.855	1.000	-0.530	-0.765	0.881
LST	-0.602	-0.484	1.000	0.690	-0.609	-0.583	-0.485	1.000	0.560	-0.672	-0.636	-0.530	1.000	0.627	-0.714
NDBSI	-0.833	-0.611	0.690	1.000	-0.625	-0.908	-0.877	0.560	1.000	-0.700	-0.818	-0.765	0.627	1.000	-0.631
Average correlation	0.777	0.658	0.592	0.711	0.781	0.782	0.739	0.543	0.782	0.782	0.770	0.717	0.598	0.737	0.790

从表4分析,三年以来Wet、NDVI、LST、NDBSI平均相关度为0.776、0.705、0.578、0.743;RSEI平均相关度为0.784,RSEI指数在2018年平均相关度最高,在2014年平均相关度最低;在这三年中RSEI平均相关度值均大于或等于四种指标的任意一值,说明具有较好的综合性与代表性。

在2014、2016、2018年这三个时期中,Wet与NDVI整体正相关程度最强,2014年二者间相关系数达到最大值,为0.880;相比较而言,LST与NDBSI在三年来正相关程度较弱,但仍为较显著的正相关;Wet与NDBSI整体负相关程度最大,2016年负相关程度最为显著,相关系数为-0.908;而NDVI与LST的相关系数的绝对值最小,表示二者负相关程度为表中最弱的相关因素。

#### 4.1 二维散点图分析

为了验证相关度正确性,利用2014、2016、2018年所做出的十二幅指数图(每年Wet、NDVI、LST、NDBSI各一幅),建立随机点并提取指数的值,去除水体的掩膜文件。每幅图1500个随机点;每年的随机点重新设置,保证每年的随机点不相同,共计提取18000个随机点,去除其中有异常值的随机点后,可用点数为17980,随机点数较多,保证其客观性、代表性。最后提取属性数据制作二维散点图,如图5所示。

从图5中可以很明显看出2014、2016、2018年三个时相的天津市中心城区的各指数之间的关系,在趋势上证明了对RSEI指数起到正向作用的是Wet指数、NDVI指数,起负作用的是NDBSI指数、LST指数。在正向作用中,Wet所占比重较大,三年系数的平均值为0.5;在反向作用中,NDBSI指数影响较大,三年系数的平均值为-0.618。从随机点的分布以及 $R^2$ 的大小可以分析得出,NDBSI指数的负相关程度最大,散点表现为聚集的一条直线,除了2014年 $R^2$ 值为0.5977外,2016年和2018年的 $R^2$ 值达到0.94左右,可信度高,负相关程度明

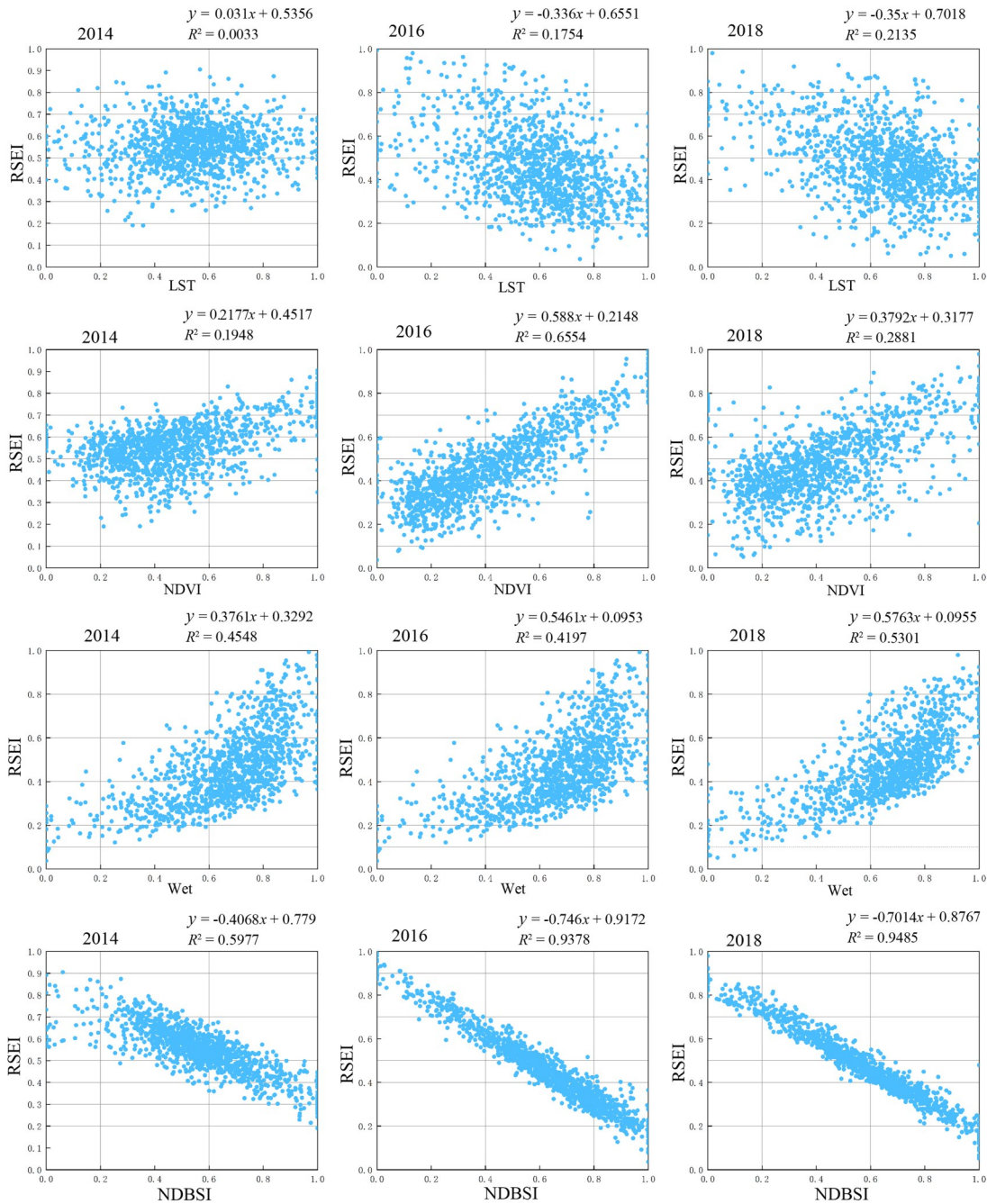


图 5 三个时相二维随机点图

Fig. 5 Two-dimensional random point diagram for three time phases

显,有一定的参考价值;其次为Wet值,再次为NDVI值,而LST指数散点最分散, $R^2$ 值最小,与RSEI指数相关度最小;从 $R^2$ 平均值也可以印证以上的分析,NDSI指数 $R^2$ 平均达到0.83,而LST指数 $R^2$ 平均为0.13,相关性很差。

对天津市中心城区进行定量的建模可以详细直观地反馈出各个因素的变化趋势以及对城市生态环境变化的影响程度。选择逐步回归法保证了多个自变量对因变量因子影响力的控制,对自变量进行筛选,挑选具有显著影响力的因子作为自变量,得到效果好的多元回归模型;同时选择多元线性回归构建模型还满足存在

两个以上自变量的前提条件,对比单自变量构建的预测模型具有更好的有效性、更契合实际、普适性更高的优点。利用SPSS软件建立五种指标的关系模型,具体表达式为

$$I_{RSE,2014} = 0.274 - 0.269I_{NDBS} - 0.161I_{LST} + 0.296I_{NDV} + 0.276I_{Wet}, R^2 = 0.993, \quad (10)$$

$$I_{RSE,2016} = 0.490 - 0.339I_{NDBS} - 0.151I_{LST} + 0.295I_{NDV} + 0.216I_{Wet}, R^2 = 0.999, \quad (11)$$

$$I_{RSE,2018} = 0.565 - 0.391I_{NDBS} - 0.164I_{LST} + 0.293I_{NDV} + 0.239I_{Wet}, R^2 = 0.996. \quad (12)$$

三年的关系模型在通过了1%显著性检验的前提下均保留了4种指标,表明RSEI中的指标可以代表中心城区生态的重要指标。从3个模型中可以总结出3条规律:1) NDBSI系数逐年增大,且在2016年超过NDVI的系数,表明建筑与裸土因素对中心城区生态有最高的影响;NDVI系数逐年减小,表明在生态中NDVI所起的作用正在减弱;2) NDBSI与LST系数符号为负,表明这两个因素抑制生态环境的改善;Wet与NDVI系数为正,表明这两个因素促进生态环境的改善;3) 2014、2016、2018年负系数之和分别为-0.43、-0.49、-0.555,相对应年份的正系数之和为0.572、0.511、0.532,综合三年模型中的常数可以得知在2014—2018年生态环境质量指数抑制作用的因素逐渐超过促进作用的因素,其中NDBSI的系数增强与NDVI系数的减弱是导致这种状况的关键。

#### 4.2 三维散点图分析

图6是综合两种因素(抑制因素、促进因素)趋势,利用SPSS软件做出的三维散点投影图<sup>[10]</sup>;抑制因素(建筑-裸土指数、地表温度)是指对生态环境质量起负影响的因素,而促进因素(湿度、植被指数)是指对生态环境质量起正影响的因素。三维坐标的Z轴均代表遥感生态指数RSEI的数值,X、Y、Z轴均以0.2为一刻度,从原点0刻度到1.0刻度,因此点群的顶端代表RSEI值较高的随机点,即中心城区中生态环境条件好的区域;点群的底端代表RSEI值较低的随机点,即中心城区中生态环境条件较差的区域。

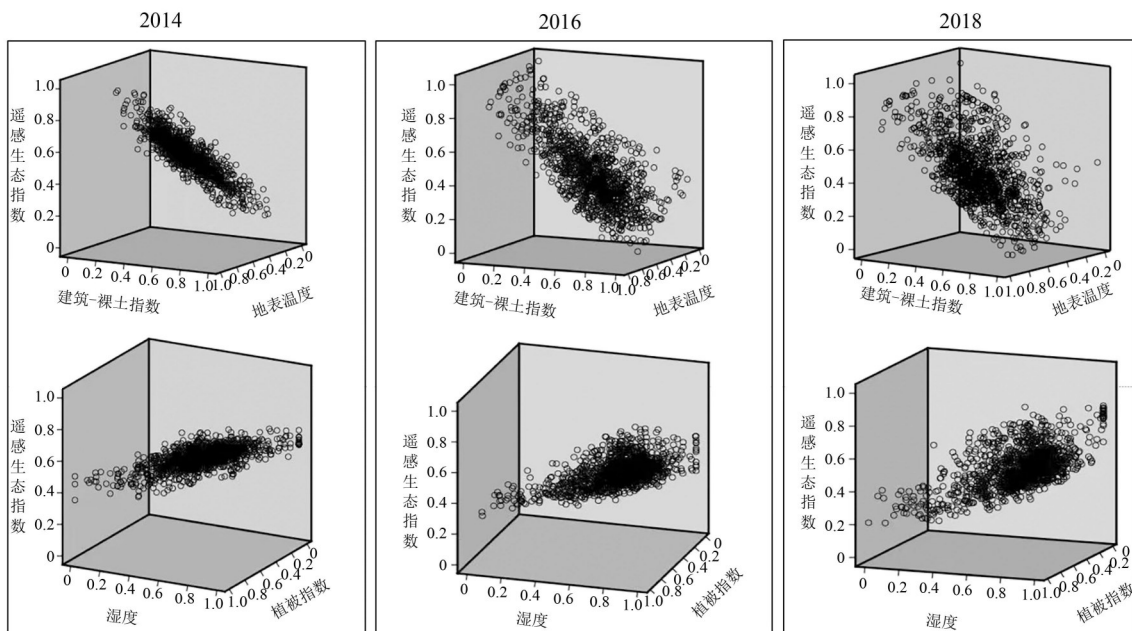


图6 三个时相三维随机点图

Fig. 6 Three-dimensional random point diagram in three time phases

从图6分析可见:1)三年的抑制因素所呈的斜度逐渐大于促进因素,表明在中心城区中,抑制因子在生态环境中负面影响随时间变化逐渐大于促进因子的正面影响,2018年NDSBI与LST的综合影响程度超过Wet与NDVI的综合影响程度;2)三年的散点图整体表现出从聚集到愈加分散的状态,点群表现在3维图中呈现为立体向外扩散趋势,由四个因素共同影响导致,这表明在城区的城市化扩张与生态环境的改善维护两面都进行了一定程度的推进,出现向生态环境质量好与差两个方向的延伸,整体在向影响因素的复杂化方向发展。

## 5 结 论

所研究的2014、2016、2018年天津市中心城区的生态质量的值分别为0.547、0.463、0.478,遥感生态指数均值较前期下降了15.3%后又上升了3.2%。RSEI指数地理位置上从北至南、从西至东呈现出低-高-低的倒U型趋势,三年中2014年趋势最为明显;天津中心城区湿度三年正向平均相关性程度最大,LST三年平均相关性程度最小;从构建的三年的关系模型来看,NDBSI三年平均模型系数的绝对值为四种指数中最大,对生态指数起可信程度高的抑制作用,抑制作用因子系数已经超过促进作用因子系数,中心城区生态环境质量在整体上较为脆弱。相关部门可以通过完善水利设施、兴修河道、植树造林、保护湿地等方法提升中心城区的湿度与植被覆盖度,通过规范建筑用地、裸地的适用范围,使其不越界、不占其他用地等进行生态环境改良。

## 参考文献:

- [1] Ming Z Y, Bi L L. Analysis of ecological quality changes in the central city of Chengdu based on RSEI [C]. *Sustainable Development Rational Planning—Proceedings of the 2017 China Urban Planning Annual Conference (08 Urban Ecological Planning)*. Dongguan, 2017: 383-392.  
明智宇, 毕凌岚. 基于RSEI的成都市中心城区生态质量变化分析 [C]. 持续发展 理性规划—2017中国城市规划年会论文集 (08城市生态规划). 东莞, 2017: 383-392.
- [2] Zhang B W. *Eco-Environmental Quality Assessment and System Design Based on RSEI Model—A Case Study of Zhengzhou* [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.  
张保卫. 基于RSEI模型的生态环境质量评价及系统设计—以郑州市为例 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [3] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 11-21.
- [4] Saleh S K, Amoushahi S, Gholipour M. Spatiotemporal ecological quality assessment of metropolitan cities: A case study of central Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(5): 305.
- [5] Xiong Y, Xu W H, Lu N, et al. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: A case study in Erhai Lake Basin, Yunnan Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107518.
- [6] Yue H, Liu Y, Li Y, et al. Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index [J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 51295-51311.
- [7] Hu X, Bai W K, Dong X. Evaluation of regional eco-environmental quality before and after earthquake in Jiuzhaigou County, Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3): 969-978.  
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.
- [8] Wang L C, Jiao L, Lai F B, et al. Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas

- Lake wetland, Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2963-2972.  
王丽春, 焦黎, 来风兵, 等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价 [J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2963-2972.
- [9] Wang M Y, Xu H Q. Temporal and spatial changes of urban impervious surface and its influence on urban ecological quality: A comparison between Shanghai and New York [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3735-3746.  
王美雅, 徐涵秋. 上海和纽约城市不透水面时空变化及其对生态质量影响的对比 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3735-3746.
- [10] Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.  
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.
- [11] Liu P, Ren C Y, Wang Z M, *et al.*. Assessment of the eco-environmental quality in the Nanweng River Nature Reserve, Northeast China by remote sensing [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3347-3356.  
刘盼, 任春颖, 王宗明, 等. 南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3347-3356.
- [12] Yang F H, Song J J, Zhao Y R, *et al.*. Dynamic monitoring of ecological environment in black soil erosion area of northeast China based on remote sensing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(9): 1580-1587.  
杨凤海, 宋佳佳, 赵焯荣, 等. 东北黑土水土流失区生态环境遥感动态监测 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(9): 1580-1587.
- [13] Yue H, Liu Y, Zhu R. Monitoring ecological environment change based on remote sensing ecological index in Shendong mining area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(2): 101-107, 114.  
岳辉, 刘英, 朱蓉. 基于遥感生态指数的神东矿区生态环境变化监测 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 101-107, 114.
- [14] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(5): 613-621.
- [15] Wang F L, He X Y, Fang Z X, *et al.*. Assessment of the eco-environmental quality in Aberdare National Park based on long-term sequence remote sensing data [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1479-1489.  
王法漂, 何晓宇, 方泽兴, 等. 基于长时间序列遥感数据的阿伯德尔国家公园生态环境质量评价 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1479-1489.
- [16] Wu Y H, Tian X H, Tong Y N, *et al.*. Assessment of integrated soil fertility index based on principal components analysis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 173-180.  
吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 173-180.
- [17] Wang P, Kuang F M, Deng Y W, *et al.*. Assessment of land eco-security of the Hengyang City on the principal component [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(1): 168-172.  
王鹏, 况福民, 邓育武, 等. 基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价 [J]. *经济地理*, 2015, 35(1): 168-172.
- [18] Zhu Z R. *Evaluation of Ecological Environment Quality of Nanchang Based on Remote Sensing Based Ecological Index* [D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2017.  
朱贞榕. 基于遥感生态指数 (RSEI) 的南昌市生态环境质量评价 [D]. 抚州: 东华理工大学, 2017.
- [19] Dong L L, Pan J H, Feng Y Y, *et al.*. Spatial difference pattern of house vacancy in China from nighttime light view [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(9): 62-69, 176.  
董磊磊, 潘竟虎, 冯娅娅, 等. 基于夜间灯光的中国房屋空置的空间分异格局 [J]. *经济地理*, 2017, 37(9): 62-69, 176.