

# 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价

王士远, 张学霞\*, 朱 彤, 杨 维, 赵静瑶

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘 要:**人类的生存质量与生态环境密切相关,利用遥感技术可快速地进行生态环境质量评价,为区域生态环境的治理、改善以及发展规划提供重要参考。本文以长白山自然保护区为例,选取1995、2007年Landsat5 TM影像和2015年Landsat8 OLI影像,反演得到能反映生态环境的绿色、湿度、热度和干度等指标,利用主成分分析法,依据新型遥感生态指数RSEI对长白山自然保护区1995-2015年的生态环境进行评价,结果表明:①绿色、湿度指标对区域生态环境起正向作用,热度、干度指标对区域生态环境起负向作用,且湿度对生态环境影响较大;②该区域1995、2007、2015年生态指数优良等级所占比例依次为49.520%、66.508%、76.189%,同时RSEI等级变差、不变、变好的比例分别为3.945%、55.598%、40.457%。生态环境质量整体不断改善,说明长白山自然保护区的天然林资源保护工程以及一系列生态保育措施起到了一定作用;而天池周边生态环境质量有所下降可能与旅游活动的快速发展有关;③逐步回归分析的结果表明,所选的各指标均为指示生态环境质量的关键指标;而裸露、干化地表的治理则是改善生态环境质量的关键。

**关 键 词:**生态环境质量;遥感生态指数;主成分分析;长白山自然保护区

## 1 引言

长白山自然保护区不仅是东北地区的天然生态屏障,也是中国乃至整个东北亚地区生态气候调节的主区域、全球稀有的地质地理环境监测地以及物种基因储存库。长白山自然保护区自然资源丰富,其自然森林生态系统的山地垂直景观带保存完好,具有极高的科研、保护和开发价值,发展前景和潜力非常巨大(南颖等, 2011)。1986年8月28日,长白山自然保护区西坡曾遭受台风的破坏,受灾面积超过10000 hm<sup>2</sup>,目前正处于恢复状态(赵晓飞等, 2004)。近年来,生态旅游的兴起为长白山自然保护区带来了巨大经济效益,同时也增加了该区域生态环境保护的压力。因此,对长白山自然保护区生

态环境质量进行快速评价并掌握其变化趋势,对于制定区域发展规划、生态环境保护措施,保证森林生态系统资源的可持续利用具有重要的意义。

随着遥感技术的发展,区域生态环境质量评价的指标和方法也不断地改进和发展(Foody, 2007; 吴丹丹等, 2009; Ju et al, 2010; Malekmohammadi et al, 2014; 傅伯杰等, 2014)。2006年国家环境保护部颁发的《生态环境状况评价技术规范(试行)》,提出运用生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地退化指数和环境质量指数5个指标定量地评价区域生态环境。该方法在国内县级以上的生态环境评价中得到了广泛应用,但是也存在着无法空间可视化及人为设定指标权重的问题(姚尧等, 2012)。《生态环境状况评价技术规范(试行)》中的环

收稿日期:2016-05;修订日期:2016-08。

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAD07B03);国家重点研究基础发展计划973项目(2012CB955403);国家自然科学基金项目(41571154) [Foundation: National Science and Technology Support Program of China, No.2015BAD07B03; National Basic Research Program of China (973 Program), No.2012CB955403; National Natural Science Foundation of China, No.41571154]。

作者简介:王士远(1990-),男,河南驻马店人,硕士生,研究方向为3S技术集成开发与应用,E-mail: wangyuanhpu@163.com。

通讯作者:张学霞(1975-),女,山东临沂人,副教授,博士,研究方向为生态环境遥感,E-mail: xuexiazhang@yeah.net。

引用格式:王士远, 张学霞, 朱彤, 等. 2016. 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价[J]. 地理科学进展, 35(10): 1269-1278. [Wang S Y, Zhang X X, Zhu T, et al. 2016. Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology[J]. Progress in Geography, 35(10): 1269-1278.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.10.010

境质量指数来源于环境年报,不适用于县级以下的地区,且每年只能评价一次,不能进行区域生态环境质量的实时评价。周文英等(2014)选取植被指数、地表温度、坡度、坡向、土地利用、湿度指标,利用主成分分析法构建了生态环境指数,对四川若尔盖县的生态环境质量作了定量评价。戚涛(2007)基于植被、水热条件、土壤、地形构建了评价模型,并对清江流域的生态环境质量进行了评价。以上研究所选取的评价指标均便于空间可视化,且用主成分分析法来确定指标的权重。徐涵秋(2013a, 2013b)选取了绿度、湿度、热度、干度等完全基于遥感的指标,利用主成分分析法构建了遥感生态指数RSEI,该指数在水土流失区及城市的生态环境评价中得到了广泛应用。RSEI评价方法所需的指标均从遥感影像获得,现时性较好,便于进行生态环境质量时空变化的快速评价。

通过对比可得,利用遥感反演得出的现时性好、便于空间可视化的指标广泛应用于生态环境质量评价,同时采用了主成分分析法确定指标权重,可减少人为因素带来的不确定性。

针对长白山自然保护区的生态环境也有不同方面的研究,如赵晓飞等(2004)、南颖等(2011)、牛丽君等(2013)分别对长白山自然保护区的风灾区开展了识别、生态恢复评价及预测等研究;刘志锋(2010)、张建亮等(2016)对长白山地区的植被变化情况以及与气象因素的关系进行了研究,发现该地区的植被总体呈增加趋势;高科(2012)分析了长白山自然保护区发展旅游业所带来的一些生态环境效益并提出了相应的建议。

以往对长白山自然保护区的研究,或是只针对风灾区的生态恢复评价,或是针对某一方面如植被状况、旅游活动的研究,而面向整个长白山自然保护区长期的综合性生态环境评价的研究还不多。长白山自然保护区以植被为主体,人为干扰较少、自然状况良好,完全基于遥感的RSEI,指标易于获取,适合该区域的生态环境评价。因此,本文基于1995、2007、2015年3期遥感数据反演出各期生态环境指标(绿度、湿度、热度、干度),运用主成分分析法构建遥感生态指数(RSEI),对整个长白山自然保护区1995-2015年间的生态环境质量的时空变化进行评价,以期为区域的生态环境保护 and 综合治理以及实施区域的可持续发展提供科学支撑。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区概况

长白山自然保护区成立于1960年4月,是中国成立最早的自然保护区之一。长白山自然保护区位于吉林省东南部,介于 $127^{\circ}42'5''E \sim 128^{\circ}16'48''E$ 、 $41^{\circ}41'49''N \sim 42^{\circ}25'18''N$ ,地跨延边朝鲜族自治州的安图县和白山市的抚松县、长白朝鲜族自治县,东南与朝鲜民主主义人民共和国毗邻(图1)。南北最长达80 km,东西最宽达48 km,总面积约1964.65 km<sup>2</sup>。该地区自然条件复杂,垂直地带性极为明显,具有典型的山地垂直自然景观特征,可分为以下4个垂直自然景观带:①海拔1000 m以下的针阔混交林带;②海拔1000~1800 m的针叶林带;③海拔1800~2000 m的岳桦林带;④海拔2000 m以上的高山苔原带。区内年均温在 $-7^{\circ}C \sim 3^{\circ}C$ 之间,云雾多、风力大,年日照时数约2300 h,无霜期100 d左右(山顶只有60 d左右);年降水量700~1400 mm,6-9月降水占全年降水量的60%~70%。

### 2.2 数据来源与预处理

遥感数据为美国地质调查局(USGS)网站<sup>①</sup>提供的1995年10月17日、2007年10月2日的Landsat5 TM影像和2015年9月22日的Landsat8 OLI和TIRS影像,不同时期的影像时相一致,可保证研究结果的可比性。在ENVI 5.1下分别对各时期的遥感影像进行辐射定标,将影像的灰度值(DN)转换为传感器的反射率,使用FLAASH大气校正工具对各



图1 长白山自然保护区位置示意图

Fig.1 Location of the Changbai Mountain Nature Reserve

①<http://glovis.usgs.gov/>。

期影像的可见光、近红外波段进行大气校正(Goward et al, 2002; 宋军伟等, 2016)。不同时期的影像之间采用二次多项式和最邻近像元法配准,均方根误差在0.5个像元内,最后使用长白山自然保护区边界对所有数据进行裁剪。长白山自然保护区1995、2007、2015年的影像经过辐射校正后的TM5、TM4、TM3波段假彩色图像如图2所示。

气温和降水数据来源于中国气象数据网<sup>②</sup>的中国地面气温月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0)和中国地面降水月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0),分别统计长白山自然保护区的年平均气温和年累积降水量。部分统计数据来源于吉林省长白山保护开发区管理委员会官方网站<sup>③</sup>的年度统计公报和区划规划资料。

### 3 研究方法

遥感生态指数运用绿度、湿度、热度、干度等4个能直观反映生态条件优劣的指标来评价生态系统状况,4个指标均可从遥感影像中获得。采用植被指数、裸土指数、湿度分量、地表温度分别代表绿度、干度、湿度和热度。通过对各项指标的标准化、主成分变换处理可将遥感生态指数(RSEI)表示为各项指标的函数(徐涵秋, 2013a, 2013b),即:

$$RSEI = f(NDVI, WET, LST, NDSI) \quad (1)$$

式中:NDVI为绿度;WET为湿度;LST为热度;NDSI为干度。

#### 3.1 分量指标计算

##### 3.1.1 湿度指标(WET)

遥感缨帽变换的亮度、绿度、湿度分量已被大

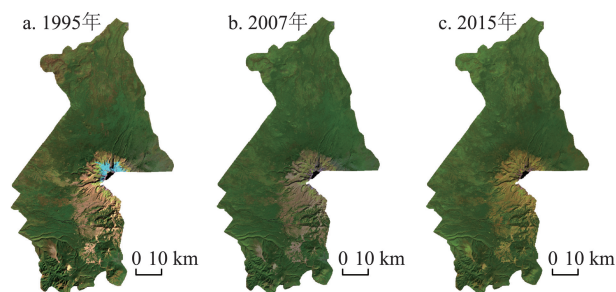


图2 1995、2007、2015年长白山自然保护区遥感监测图  
Fig.2 Landsat images of the Changbai Mountain Nature Reserve in 1995, 2007, and 2015

量运用于生态环境评价,其中湿度分量反映了土壤和植被的湿度状况。Landsat5 TM和Landsat8 OLI反射率数据的湿度计算公式(Crist, 1985; Baig et al, 2014)分别为:

$$WET_{TM} = 0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2} \quad (2)$$

式中: $\rho_{Blue}$ 、 $\rho_{Green}$ 、 $\rho_{Red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$ 、 $\rho_{SWIR2}$ 分别为TM蓝、绿、红、近红外、短波红外1、短波红外2波段的反射率。

$$WET_{OLI} = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1972\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} \quad (3)$$

式中: $\rho_{Blue}$ 、 $\rho_{Green}$ 、 $\rho_{Red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$ 、 $\rho_{SWIR2}$ 分别为OLI蓝、绿、红、近红外、短波红外1、短波红外2波段的反射率。

##### 3.1.2 绿度指标(NDVI)

植被是指示区域生态环境质量的最敏感因子。归一化植被指数(NDVI)是根据植物叶面在红光波段的吸收和近红外波段的反射特性构建的,能反映植物生物量、叶面积指数以及植被覆盖度,是使用最广泛的植被指数。因此选用NDVI来代表绿度指标,其公式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad (4)$$

式中: $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{Red}$ 分别为TM和OLI近红外和红波段的反射率。

##### 3.1.3 热度指标(LST)

热度指标使用地表温度代替(李粉玲等, 2015)。但很多研究使用Landsat5影像反演地表温度(Sobrino et al, 2004; 覃志豪等, 2004)。对于Landsat8影像,先对其热红外10波段进行辐射定标,得到热红外波段的辐射亮度值( $L_{10}$ ),通常由3部分组成:大气向上辐射亮度、地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量、大气向下辐射到达地面后反射的能量(Yu et al, 2014; NASA, 2016)。卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值的表达式(辐射传输方程)为:

$$L_{10} = \tau_{10} [\epsilon_{10} B_{10}(T_s) + (1 - \epsilon_{10}) I_{10}^{\downarrow}] + I_{10}^{\uparrow} \quad (5)$$

$$B_{10}(T_s) = [L_{10} - I_{10}^{\uparrow} - \tau_{10}(1 - \epsilon_{10}) I_{10}^{\downarrow}] / \tau_{10} \epsilon_{10} \quad (6)$$

式中: $I_{10}^{\uparrow}$ 为大气向上辐射亮度; $I_{10}^{\downarrow}$ 为大气向下辐射亮度; $\tau_{10}$ 为大气在热红外波段的透过率; $\epsilon_{10}$ 为地表比辐射率; $B_{10}(T_s)$ 是与 $T_s$ 相同温度下的黑体的热辐射亮度; $T_s$ 为地表温度。

②<http://data.cma.cn/site/index.html>。

③<http://www.changbaishan.gov.cn/web/main.aspx>。



根据普朗克公式的反函数,求得地表真实温度  $LST$ :

$$LST = K2 / \ln(K1/B_{10}(T_s) + 1) \quad (7)$$

式中: $K1$ 和 $K2$ 为定标系数,其值可在影像的元数据中获取到(NASA, 2016)。

根据 van de Griend 等(1993)的经验公式计算地表比辐射率,当地表的  $NDVI$  值在 0.157~0.727 之间时,地面比辐射率  $\varepsilon$  与  $NDVI$  的经验关系为:

$$\varepsilon = 1.009 + 0.047 \ln NDVI \quad (8)$$

当  $NDVI < 0$  时,  $\varepsilon$  取 1(水体的发射率接近于 1); 当  $NDVI$  为 0~0.157 时,植被覆盖度很低,  $\varepsilon$  取 0.92; 当  $NDVI > 0.727$  时,  $\varepsilon$  取 1(覃志豪等, 2004; 柳菲, 2012)。

### 3.1.4 干度指标( $NDSI$ )

干度指标由裸土指数( $SI$ )和建筑指数( $IBI$ )合成,记为  $NDSI$ (Rikimaru et al, 2002; Xu, 2008, 2010; 徐涵秋, 2013b),计算公式为:

$$NDSI = (SI + IBI) / 2 \quad (9)$$

$$SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})] \quad (10)$$

$$IBI = \{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green}/(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\} / \{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green}/(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\} \quad (11)$$

式中: $\rho_{Blue}$ 、 $\rho_{Green}$ 、 $\rho_{Red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$  分别为 TM 和 OLI 蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 波段的反射率。

### 3.2 综合指数的构建

空间主成分分析法一般是在地理信息系统软件的支持下,对特征光谱空间坐标轴旋转,去掉各项指标间的相关性,把生态环境相关的信息集中到较少的主成分上,指标的权重值不需要人为设定。由于各项指标的单位 and 数值范围存在差异,各项指标需进行标准化处理,公式如下:

$$NI = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (12)$$

式中: $NI$  为标准化后的指标值; $I$  为该指标的数值大小; $I_{max}$  和  $I_{min}$  分别为该指标的最大值和最小值。

将归一化处理后的各项指标组合成 1 个 4 个波段的文件进行主成分变换,最后通过主成分变换的结果构建原始的生态指数  $RSEI_0$ (李粉玲等, 2015) 公式为:

$$RSEI_0 = PCA[f(NDVI, WET, LST, NDSI)] \quad (13)$$

式中: $PCA$  表示主成分分析。为便于指标的度量和比较,可使用式(12)对  $RSEI_0$  进行归一化处理,最终

得到的  $RSEI$  值介于 [0, 1] 之间。 $RSEI$  越接近于 1, 代表生态越好; 反之, 代表生态越差(徐涵秋, 2013a)。

## 4 结果与分析

### 4.1 $RSEI$ 的构建

生态环境质量评价的关键是将各评价指标转化为一个可量化的综合指数。因此,先对标准化后的各期绿度、湿度、热度、干度指标进行波段合成,然后对合成后的新图像进行主成分变换,得到主成分分析的结果(表 1)。

从表 1 可以得出:①3 个时期各指标的第一主成分贡献率分别达到 81.495%、82.795% 和 84.684%,且各指标相对稳定,说明第一主成分已集中了 4 个指标的大部分特征;在第一主成分中,代表绿度的  $NDVI$  和代表湿度的  $WET$  呈正值,说明它们共同对生态环境质量起到正面作用;代表热度的  $LST$  和代表干度的  $NDSI$  呈负值,说明二者协同对生态环境起到负面影响。3 个时期湿度的系数均最大,说明湿度对生态环境质量的影响最大;③其他主成分的符号和大小不稳定,难以解释生态现象。因此使用第一主成分构建  $RSEI$ 。

### 4.2 生态环境质量整体分析

为便于生态环境质量的度量与比较,对第一主成分进行标准化,构建  $RSEI$ (图 3)。为便于从整体

表 1 主成分分析结果

Tab.1 Result of Principal Component Analysis

年份	指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
1995 年	绿度	0.21394	0.48829	0.77272	-0.34453
	湿度	0.88674	-0.24886	0.08159	0.38092
	热度	-0.19831	0.55139	0.06656	0.8076
	干度	-0.35860	-0.62898	0.62595	0.28979
	特征值	0.00200	0.00020	0.00015	0.00010
	贡献率/%	81.495	8.037	6.247	4.221
2007 年	绿度	0.28814	0.27695	0.86125	0.31389
	湿度	0.82363	-0.13306	-0.37876	0.40059
	热度	-0.27079	0.75659	-0.33260	0.49358
	干度	-0.40656	-0.57720	0.06459	0.70525
	特征值	0.00130	0.00016	0.00007	0.00005
	贡献率/%	82.795	9.922	4.203	3.080
2015 年	绿度	0.30949	0.32266	-0.77488	0.44684
	湿度	0.79965	-0.15642	0.45870	0.35454
	热度	-0.17019	0.86353	0.41960	0.22198
	干度	-0.48561	-0.35459	0.11442	0.79080
	特征值	0.01343	0.00153	0.00064	0.00026
	贡献率/%	84.684	9.674	4.018	1.624

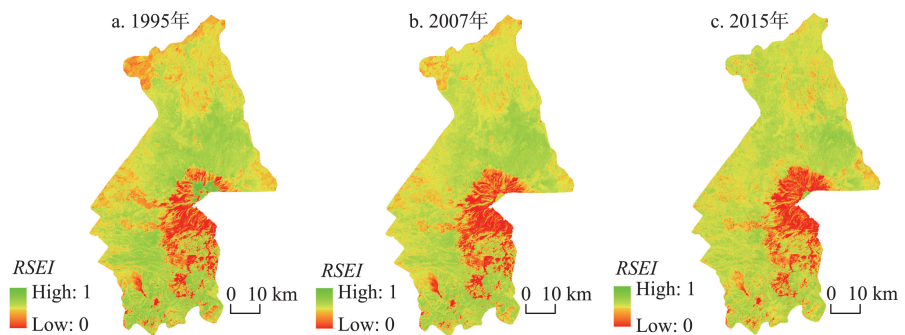


图3 1995、2007、2015年长白山自然保护区RSEI分布图

Fig.3 Remote sensing ecological index (RSEI) values of the Changbai Mountain Nature Reserve in 1995, 2007, and 2015

上分析近21年来长白山自然保护区的生态环境质量,本文统计了3个时期反映生态环境质量的各项指标以及构建的遥感生态指数RSEI的均值(表2)。

从表2中可以得出,长白山自然保护区1995、2007、2015年RSEI均值分别为0.571、0.610、0.648,呈逐渐上升趋势,说明该地区生态环境质量逐渐变好。其中,代表生态变好的绿度和湿度在1995-2015年均值均呈递增趋势;代表生态差的热度指标逐渐下降趋势,而干度指标呈先降低后上升的趋势,但21年间仍呈下降趋势。

分1995-2007年与2008-2015年2个时段,求取年平均气温、年降水量的均值(图4),年平均气温均值由前期的3.28℃降低为后期的3.02℃;年降水量

均值由前期的770 mm增加为后期的785 mm。年平均气温和年降水量的均值可间接地反映地表温度和湿度的变化情况(郑勇, 2014),这与本文计算的热度和湿度指标的变化情况相一致。

4.3 分级和变化检测

为更好地分析RSEI的代表性,按照已有的分级标准,将各年份的RSEI指数以0.2为间隔分成5个等级(徐涵秋, 2013a, 2013b),分别代表差、较差、中等、良、优,对应的RSEI指数范围为[0, 0.2)、[0.2, 0.4)、[0.4, 0.6)、[0.6, 0.8)、[0.8, 1.0](表3)。

从表3可看出,RSEI中等以下等级所占比例之和1995年为50.480%,2007年为33.492%,2015年为23.811%,呈逐渐下降趋势;良以上等级所占比例1995年为49.520%,2007年为66.508%,2015年为76.189%,呈逐渐上升趋势,说明1995-2015年期间长白山自然保护区的生态环境质量总体上逐渐得到改善。

从图5可以看出,2015年长白山自然保护区除天池周边外,RSEI以良等级为主,生态环境质量整体处于良水平,说明长期以来的保护与恢复取得了良好的效果。生态环境处于中等水平的地区分布

表2 各项指标与RSEI均值

Tab.2 The mean values of the indicators and remote sensing ecological index (RSEI)

年份	指标				RSEI
	绿度	湿度	热度	干度	
1995年	0.564	0.672	0.641	0.439	0.571
2007年	0.570	0.740	0.488	0.316	0.610
2015年	0.600	0.770	0.485	0.409	0.648

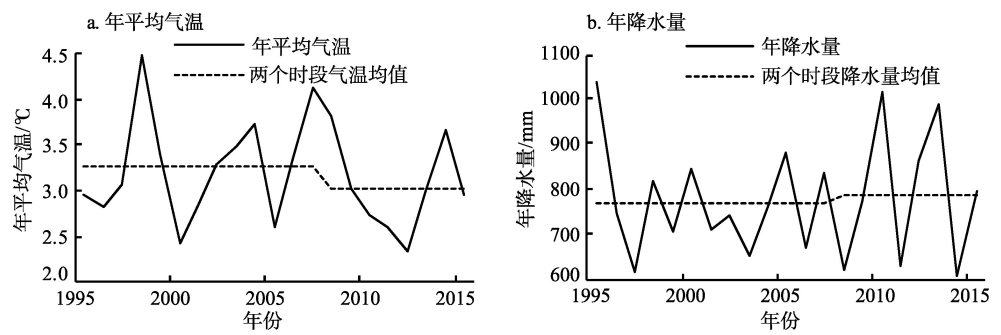


图4 1995-2015年长白山自然保护区年平均气温和年降水量的变化

Fig.4 Change of the annual mean temperature and annual accumulated precipitation in the study area, 1995-2015

表3 1995-2015年间各RSEI等级面积及其百分比

Tab.3 Area and proportion of remote sensing ecological index (RSEI) classes, 1995-2015

等级	1995年		2007年		2015年	
	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
差	121.218	6.226	23.355	1.200	16.099	0.827
较差	172.697	8.870	152.280	7.821	129.089	6.630
中等	688.908	35.384	476.441	24.471	318.410	16.354
良	917.577	47.129	1289.472	66.230	1455.216	74.744
优	46.549	2.391	5.402	0.278	28.137	1.445

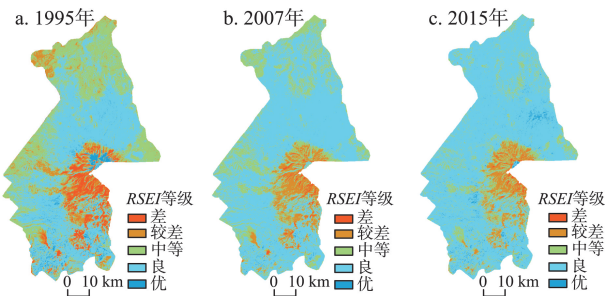


图5 1995、2007、2015年长白山自然保护区  
RSEI等级分布图

Fig.5 Remote sensing ecological index (RSEI) class  
distribution of the Changbai Mountain Nature Reserve in  
1995, 2007, and 2015

在东南部分以及山顶的周边地区,靠近山顶天池部分生态环境较差。其原因一方面可能由于山顶火山锥体上土质较差、坡度大以及高海拔极端气候所致(丁雨霖等, 2016),该区域为高山苔原带,属于生态脆弱区(徐一中, 2014),年均气温较低(图4a)可能导致该区域植被的退化;另一方面也可能与自然保护区内旅游开发活动引起的水土流失、植被退化而导致生态环境质量下降有关,如基础设施建设、游人踩踏等(张建亮等, 2016)。

在遥感生态指数分级的基础上,对各年份的RSEI进行差值变化检测,进而分析长白山自然保护区生态环境质量的时空变化,按照级差符号为负、0、正依次分为变差、不变和变好3类(表4)。从时间上看,1995-2015年间生态等级变差的面积为76.819 km<sup>2</sup>(约占总面积的3.945%),不变的面积为1082.462 km<sup>2</sup>(约占总面积的55.598%),变好的面积为787.670 km<sup>2</sup>(约占总面积的40.457%),总体上生态环境质量向好的方向发展。

从图6看,生态环境质量变好的区域主要有2个部分:一部分分布在长白山自然保护区的北部;另一部分分布在长白山自然保护区的西坡、西南坡,与长白山自然保护区的风灾区位置相一致(南颖等, 2011),说明中国20世纪末开始实施的天然林

表4 1995-2015年间RSEI等级变化检测

Tab.4 Change detection of remote sensing ecological index (RSEI) classes, 1995-2015

类别	级差	级面积/km <sup>2</sup>	类面积/km <sup>2</sup>	类比例/%
变差	-4	0.949	76.819	3.945
	-3	7.665		
	-2	8.724		
	-1	59.480		
不变	0	1082.462	1082.462	55.598
	1	717.931		
	2	68.811		
	3	0.921		
	4	0.007		

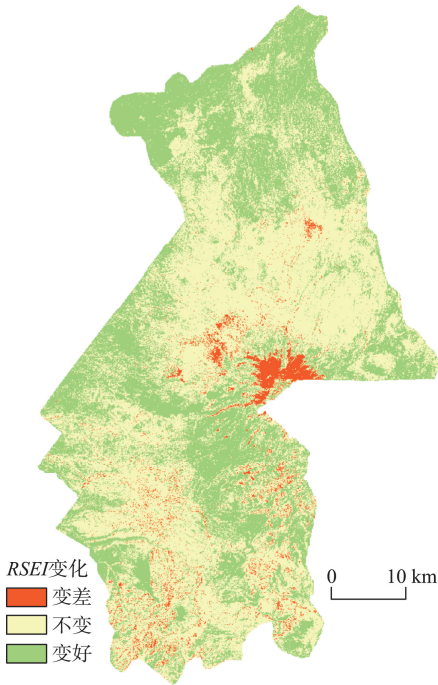


图6 1995-2015年长白山自然保护区RSEI变化检测图

Fig.6 Remote sensing ecological index (RSEI) change  
detection of the Changbai Mountain Nature Reserve,  
1995-2015

资源保护工程以及长白山自然保护区(特别是风灾区)等一系列的生态保育政策起到了积极作用(侯光



雷等, 2012; 李秀民, 2014; 李国伟等, 2015)。生态环境质量变差的区域集中在天池以北及西北的高山苔原区,一方面该区域海拔高、土质较差,生态环境脆弱,对气候的变化较为敏感,气温的微弱下降即有可能导致高山苔原植被的退化;另一方面,根据统计资料,长白山自然保护区2005、2010、2015年所接待的旅游总人数分别为57.0万、114.6万和184.6万人次,旅游活动造成的人为干扰有可能超过环境容量,进而影响了植物群落的结构和功能,引起生态环境退化(张建亮等, 2016)。

#### 4.4 建模与预测

为进一步描述和刻画长白山自然保护区的生态环境质量,可建立该区域的生态环境质量模型,用来模拟和预测该区域的生态环境变化。利用1 km×1 km的格网对各期的NDVI、WET、LST、NDSI和RSEI专题影像进行全图采样,每幅影像共采集1951个样点。

首先考察各项指标与RSEI的关系,将代表正向指标(NDVI、WET)、负向指标(LST、NDSI)的样点分别与RSEI的样点投影到在三维空间(图7)。散点图的顶端代表较好的生态环境条件,集中了湿度大、高植被覆盖区域的样点;散点图的底端代表较差的生态环境条件,集中了热度高、地表裸露、干化区域的样点。

然后以RSEI为因变量,NDVI、WET、LST和NDSI为自变量进行逐步回归分析,得到回归方程( $R^2=0.977$ )如下:

$$RSEI = 0.237NDVI + 0.591WET - 0.146LST - 0.216NDSI \quad (14)$$

从所获得的模型可以看出,4个评价指标都被保留下来,说明所选指标均为生态环境的关键指标,评价结果较为可靠。其中NDVI、WET指标的系

数为正值,说明对生态环境变化起促进作用;而LST、NDSI为负值,说明对生态环境变化起抑制作用;这与主成分分析结果中各指标对第一主成分的贡献情况相一致,而且正向指标中的WET和负向指标中的NDSI作用较大。在对长白山自然保护区的实地调研中发现,低海拔区域分布有沼泽地,湿度较大,草本、灌木以及乔木都极为茂盛,生态环境状况良好。随海拔的升高植被高度逐渐降低;至高山苔原带,坡度大、火山灰土质疏松水分少,只有稀疏的草本植被,地表有裸露、侵蚀的现象,生态环境状况极为脆弱。从侧面印证了模型结果。

应用构建的模型对RSEI进行预测,假定其他指标不发生变化的情况下,研究区内RSEI每提高1个单位,相应的需要WET提高1.69个单位或NDSI降低4.63个单位。在实际情况中,地表的裸露、干化现象与植被存在互为消长的关系(徐涵秋, 2013a, 2013b)。研究区内的高山苔原带,自然环境恶劣、植被覆盖少,大部分为裸岩,游人的活动进一步加重地表的干化,造成植被退化、水土流失(侯光雷等, 2012; 张建亮等, 2016)。实地的调研也发现,在通往天池的栈道两侧和天池周边的围栏外侧有多个宽度约为几米的裸露带,属于游客扰动造成的生态退化。因此,对裸露、干化地表的治理是改善长白山自然保护区生态环境质量的关键。

## 5 结论与讨论

由于遥感信息的RSEI指数具有指标易获取且权重由主成分分析客观确定的特点,RSEI能客观定量地揭示区域生态环境质量的空间分布与变化情况,对于区域的生态环境保护和发展规划有一定指

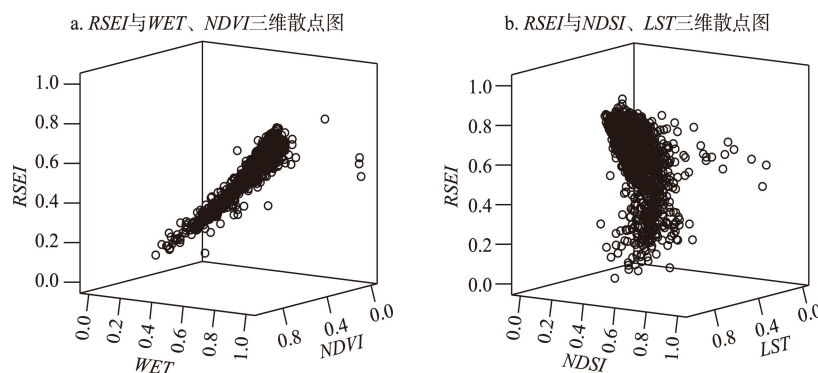


图7 三维散点特征图

Fig.7 3D scatterplots of indicators

导意义。本文利用 *RSEI* 对 1995-2015 年长白山自然保护区生态环境质量进行评价、变化分析及建模预测,主要结论为:

(1) 绿度、湿度指标对区域生态环境起正向作用,热度、干度指标对区生态环境起负向作用,且湿度对生态环境影响较大。

(2) 长白山自然保护区 1995、2007、2015 年 *RSEI* 均值分别为 0.571、0.610、0.648,呈逐渐上升趋势;生态环境质量优良以上等级所占比例分别为 49.520%、66.508%、76.189%;*RSEI* 等级变差、不变、变好的比例分别为 3.945%、55.598%、40.457%,总体上生态环境质量逐渐好转。其中生态环境质量好转的区域主要分布在长白山自然保护区的北部和风灾区,说明长白山自然保护区的天然林资源保护工程以及风灾区的一系列生态保育措施起到了一定作用;生态环境质量退化的区域主要分布在天池北部及西北部的高山苔原区,这一区域生态较为脆弱,又是游客集中的区域,生态环境质量退化可能与旅游活动快速发展有关。

(3) 通过对各期 *NDVI*、*WET*、*LST*、*NDSI* 和 *RSEI* 样点的逐步回归分析,构建出了用于评价和预测生态环境质量的模型。逐步回归分析的结果表明,所选的各指标均为指示生态环境质量的关键指标;通过模型预测发现对裸露、干化地表的治理是改善生态环境质量的关键。

本文基于遥感方法对长白山自然保护区的生态环境质量进行评价,通过逐步回归分析并结合实地调研检验了评价结果的有效性。生态环境的变化具有区域特征,如高山苔原带海拔高、气候恶劣、火山灰土质疏松等自然条件决定了该区域植被、湿度状况较差,加之旅游活动的干扰促进了该区域的生态退化;长白山的西坡、西南坡曾受台风的破坏,但经过长期的恢复和重建工作已使得该区域的生态环境状况得到了明显改善。下一步的研究中,应针对不同区域找出影响生态环境变化的关键因素,以对生态恢复提供更精准的建议。

## 参考文献(References)

丁雨霖,冯长春,王利伟. 2016. 山地区域土地生态红线划定方法与实证研究:以重庆市涪陵区义和镇为例[J]. 地理科学进展, 35(7): 851-859. [Ding Y C, Feng C C, Wang L W. 2016. Determination of ecological red line of mountainous areas: A case study of Yihe Town in Chongqing Municipality[J]. Progress in Geography, 35(7): 851-859.]

傅伯杰,刘宇. 2014. 国际生态系统观测研究计划及启示[J]. 地理科学进展, 33(7): 893-902. [Fu B J, Liu Y. 2014. Global ecosystem observation and research programs: Evolution and insights for future development[J]. Progress in Geography, 33(7): 893-902.]

高科. 2012. 自然保护区旅游活动生态负效应研究:以吉林长白山自然保护区为例[J]. 西北农林科技大学学报:社会科学版, 12(4): 86-91. [Gao K. 2012. On ecologically negative impacts of tourism activities in nature reserve: A case study of Jilin Changbai Mountain Nature Reserve[J]. Journal of Northwest A & F University: Social Science Edition, 12(4): 86-91.]

侯光雷,张洪岩,郭聘,等. 2012. 长白山区植被生长季 *NDVI* 时空变化及其对气候因子敏感性[J]. 地理科学进展, 31(3): 285-292. [Hou G L, Zhang H Y, Guo D, et al. 2012. Spatial-temporal variation of *NDVI* in the growing season and its sensitivity to climatic factors in Changbai Mountains[J]. Progress in Geography, 31(3): 285-292.]

李粉玲,常庆瑞,申健,等. 2015. 黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例[J]. 应用生态学报, 26(12): 3811-3817. [Li F L, Chang Q R, Shen J, et al. 2015. Dynamic monitoring of ecological environment in loess hilly and gully region of Loess Plateau based on remote sensing: A case study on Fuxian County in Shaanxi Province, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(12): 3811-3817.]

李国伟,赵伟,魏亚伟,等. 2015. 天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响[J]. 生态学报, 35(4): 984-992. [Li G W, Zhao W, Wei Y W, et al. 2015. Evaluation on the influence of natural forest protection program on forest ecosystem service function in Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(4): 984-992.]

李秀民. 2014. 延边林区天保工程实施效果评价体系的构建与实证研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学. [Li X M. 2014. Study on demonstration and construction of NFPP effect evaluation system in Yanbian forest region[D]. Harbin, China: Northeast Forestry University.]

刘志锋. 2010. 基于多源遥感数据的长白山地区植被动态变化研究[D]. 延吉:延边大学. [Liu Z F. 2010. Study on the dynamic Change of vegetation in the Changbai Mountain area based on multi-source remote sensing data[D]. Yanji, China: Yanbian University.]

柳菲. 2012. 地表比辐射率遥感反演方法研究[D]. 武汉:湖北大学. [Liu F. 2012. Researching of remote sensing inversion method on land surface emissivity[D]. Wuhan, China: Hubei University.]

南颖,刘志锋,朱卫红,等. 2011. 长白山的台风灾区范围及植被恢复动态:基于遥感技术的研究[J]. 自然灾害学报, 20(6): 131-139. [Nan Y, Liu Z F, Zhu W H, et al. 2011.



- Range of typhoon-stricken area and trend of vegetation restoration in Changbai Mountain: RS-based research[J]. *Journal of Natural Disasters*, 20(6): 131-139.]
- 牛丽君, 梁宇, 王绍先, 等. 2013. 长白山自然保护区风灾区植被恢复评价[J]. *生态学杂志*, 32(9): 2375-2381. [Niu L J, Liang Y, Wang S X, et al. 2013. Evaluation of vegetation restoration in wind disaster area in Changbai Mountains Nature Reserve, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 32(9): 2375-2381.]
- 戚涛. 2007. 基于遥感的区域植被生态环境质量综合评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学. [Qi T. 2007. The study of regional vegetation ecological environment quality integrative evaluation based-on remote sensing[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology.]
- 宋军伟, 张友静, 李鑫川, 等. 2016. 基于GF-1与Landsat-8影像的土地覆盖分类比较[J]. *地理科学进展*, 35(2): 255-263. [Song J W, Zhang Y J, Li X C, et al. 2016. Comparison between GF-1 and Landsat-8 images in land cover classification[J]. *Progress in Geography*, 35(2): 255-263.]
- 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 2004. 利用Landsat TM6反演地表温度所需地表辐射率参数的估计方法[J]. *海洋科学进展*, 22(S1): 129-137. [Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. 2004. Estimation method of land surface emissivity for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. *Advances in Marine Science*, 22(S1): 129-137.]
- 吴丹丹, 蔡运龙. 2009. 中国生态恢复效果评价研究综述[J]. *地理科学进展*, 28(4): 622-628. [Wu D D, Cai Y L. 2009. Evaluation of ecological restoration effects in China: A review[J]. *Progress in Geography*, 28(4): 622-628.]
- 徐涵秋. 2013a. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 33(24): 7853-7862. [Xu H Q. 2013a. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(24): 7853-7862.]
- 徐涵秋. 2013b. 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. [Xu H Q. 2013b. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. *China Environmental Science*, 33(5): 889-897.]
- 徐一中. 2014. 长白山西坡苔原带退化土地的生态管理[D]. 长春: 东北师范大学. [Xu Y Z. 2014. Ecological management of degraded land in the tundra of Changbai Mountain western slope[D]. Changchun, China: Northeast Normal University.]
- 姚尧, 王世新, 周艺, 等. 2012. 生态环境状况指数模型在全国生态环境质量评价中的应用[J]. *遥感信息*, 27(3): 93-98. [Yao Y, Wang S X, Zhou Y, et al. 2012. The application of ecological environment index model on the national evaluation of ecological environment quality[J]. *Remote Sensing Information*, 27(3): 93-98.]
- 张建亮, 刘方正, 崔国发. 2016. 长白山国家级自然保护区植被时空变化及其驱动因子[J]. *生态学报*, 36(12): 3525-3536. [Zhang J L, Liu F Z, Cui G F. 2016. Spatio-temporal variation of vegetation and analysis of its driving factors in Changbai Mountain National Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(12): 3525-3536.]
- 赵晓飞, 牛丽君, 陈庆红, 等. 2004. 长白山自然保护区风灾干扰区生态系统的恢复与重建[J]. *东北林业大学学报*, 32(4): 38-40. [Zhao X F, Niu L J, Chen Q H, et al. 2004. Restoration and rebuilding of the wind disturbed ecosystems at the wind disaster region in the National Nature Reserve of Changbai Mountain[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 32(4): 38-40.]
- 郑勇. 2014. 基于TM数据的生态环境指数提取及变化分析[D]. 南京: 南京林业大学. [Zheng Y. 2014. Eco-environment index extraction and change analysis based on the TM data[D]. Nanjing, China: Nanjing Forestry University.]
- 周文英, 何彬彬. 2014. 四川省若尔盖县生态环境质量评价[J]. *地球信息科学学报*, 16(2): 314-319. [Zhou W Y, He B B. 2014. Eco-environmental quality assessment of Ruergai County in Sichuan Province based on multi-sources remote sensing data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 16(2): 314-319.]
- Baig M H A, Zhang L F, Shuai T, et al. 2014. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat8 at-satellite reflectance[J]. *Remote Sensing Letters*, 5(5): 423-431.
- Crist E P. 1985. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 17(3): 301-306.
- Foody G M. 2007. Editorial: Ecological applications of remote sensing and GIS[J]. *Ecological Informatics*, 2(2): 71-72.
- Goward S N, Xue Y K, 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.
- Ju W M, Gao P, Wang J, et al. 2010. Combining an ecological model with remote sensing and GIS techniques to monitor soil water content of croplands with a monsoon climate[J]. *Agricultural Water Management*, 97(8): 1221-1231.
- Malekmohammadi B, Blouchi L R. 2014. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system[J]. *Ecological Indicators*, 41: 133-144.
- NASA. 2016. Landsat8(L8) data users handbook[EB/OL]. 2016- 03- 29[2016- 04- 20]. <http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>.
- Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. 2002. Tropical forest cover density mapping[J]. *Tropical Ecology*, 43(1): 39-47.
- Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 434-440.

- van de Griend A A, Owe M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6): 1119-1131.
- Xu H Q. 2008. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14): 4269-4276.
- Xu H Q. 2010. 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*, 76(5): 557-565.
- Yu X L, Guo X L, Wu Z C. 2014. Land surface temperature retrieval from Landsat8 TIRS: Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. *Remote Sensing*, 6(10): 9829-9852.

## Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology

WANG Shiyuan, ZHANG Xuexia\*, ZHU Tong, YANG Wei, ZHAO Jingyao  
(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The well-being of the human race is closely related to the ecological environment. In the past few decades, indicators retrieved from remote sensing data have been increasingly more widely applied to ecological environment evaluation for their advantages of spatial visualization, and remote sensing technology offers important reference to regional ecological environment management, improvement, and development planning by quickly assessing regional ecological environment quality. Remote sensing ecological index (*RSEI*), constructed by four indicators including green degree, humidity degree, heat degree, and dry degree retrieved from remote sensing images, can reflect ecological environment status. *RSEI* is based on real-time remote sensing images and accordingly more capable of quick evaluation of temporal and spatial changes of ecological environment quality. In this article, Landsat5 TM images from 1995 and 2007 and Landsat8 OLI images from 2015 were used as data source to retrieve values of the four indicators to construct the *RSEI* by the principal component analysis method, and Changbai Mountain Nature Reserve ecological environment quality from 1995 to 2015 was evaluated using the *RSEI*. The result shows: (1) The green degree and humidity degree have an positive effect on promoting the ecological environment quality of the region while the heat degree and dry degree have a restraining effect on the regional ecological environment quality, and the humidity degree is more significant than the other three indicators. (2) In this region, the proportion of excellent and good *RSEI* classes accounted for 49.5%, 66.5%, and 76.2% of the total area in 1995, 2007, and 2015. Meanwhile, the degenerated, unchanged, and improved *RSEI* classes were 3.9%, 55.6%, and 40.5% of the total area respectively, indicating that the overall ecological environment quality has gradually improved. To some extent this is attributed to the Natural Forest Resources Protection Project and a series of ecological conservation measures taken in the Changbai Mountain Nature Reserve area. Although the overall ecological environment quality of the study area has gradually improved, the ecological environment quality around Tianchi has declined. This area has a relatively fragile ecological environment and suffers from high intensity of tourism activities. The decline in ecological environment quality may be attributed to the increasingly intense tourism activities. (3) The stepwise regression analysis results show that each of the selected indicators is key to indicating the ecological environment quality, and the model prediction result reveals that the control of barren and dry surfaces is a critical step for improving the ecological environment quality.

**Key words:** ecological environment quality; remote sensing ecological index; principal component analysis; Changbai Mountain Nature Reserve