

引用格式: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. [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. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.190117

# 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

王法漂<sup>1,2,3</sup>, 何晓宇<sup>4</sup>, 方泽兴<sup>4</sup>, 魏显虎<sup>1,3\*</sup>, 叶虎平<sup>1,3</sup>, 施令飞<sup>1,2,3</sup>

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院中-非联合研究中心, 武汉 430074; 4. 浙江省交通规划设计研究院有限公司, 杭州 310013

## Assessment of the Eco-environmental Quality in Aberdare National Park based on Long-term Sequence Remote Sensing Data

WANG Fali<sup>1,2,3</sup>, HE Xiaoyu<sup>4</sup>, FANG Zexing<sup>4</sup>, WEI Xianhu<sup>1,3\*</sup>, YE Huping<sup>1,3</sup>, SHI Lingfei<sup>1,2,3</sup>

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sino-Africa Joint Research Center, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 4. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310013, China

**Abstract:** Aberdare National Park is one of the important landscapes and rare species natural protection zones in Kenya, which is located in the Aberdare mountain area, an important water tower of Kenya. To monitor the dynamics of the eco-environment, evaluate its quality and evolution is essential and important, which will help design government policies for Kenya's water resource protection and sustainable development. In this research, a synthetic Remote Sensing Ecology Index (RSEI) was adopted to analyze the eco-environment quality dynamics in Aberdare National Park during 1987-2018, by using time series Landsat imagery. To calculate RSEI, four remote sensing indexes were extracted from every image, including Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), Wet Index (WET), Land Surface Temperature (LST) and Soil Index (SI). These indexes reflect the spatiotemporal variations in the study area from four aspects: greenness, humidity, heat, and dryness. After deriving the four indexes, the Principal Component Analysis (PCA) was used to generate RSEI. Finally, trend line analysis was used to do spatiotemporal dynamic analysis of the eco-environment condition of Aberdare National Park. The results show that the remote sensing ecological index contains most of the characteristics information of the four remote sensing indexes, which can exactly reflect the eco-environment quality of Aberdare National Park. Specifically, NDVI (Greenness) and WET index (humidity) are positively related to the eco-environment quality, while LST (heat) and SI (dryness) are negatively related. The average RSEI of Aberdare National Park decreased from 0.62 to 0.51 during 1987-2018, and the area of eco-environment quality degradation was 551.52 km<sup>2</sup> which covered the 71.85% of the total national park area. The important deterioration reason of ecological environment was climate change combined with human activities. Further analysis shows that the region experienced severe eco-

收稿日期:2019-03-13;修回日期:2019-05-16.

基金项目:中国科学院境外科教机构建设项目(SAJC201608);浙江省交通运输厅科研计划项目(2018044)。[ **Foundation items:** Overseas Science and Education base Construction Project of Chinese Academy of Sciences, No.SAJC201608; Scientific Research Project of Zhejiang Department of Transportation, No.2018044. ]

作者简介:王法漂(1994-),女,黑龙江佳木斯人,硕士生,研究方向为大型工程环境遥感。E-mail: wangfl@radi.ac.cn

\*通讯作者:魏显虎(1978-),男,山东德州人,博士,副研究员,研究方向为土地资源及环境遥感。E-mail: weixh@radi.ac.cn

environment deterioration mainly located in the sub-alpine vegetation area and low-altitude forest area eastern of the park. The ecosystem of the sub-alpine vegetation area was fragile and had poor stability because of its simple community structure, which made this area more sensitive to climate change and human activities. On the other hand, the eastern region suffered from over-exploitation and illegal deforestation, and had higher tourist development intensity. So, the eco-environment deterioration of this area was closely related to human activities, the pollution and soil erosion caused by tourist infrastructure construction and repeated rolling of tourist guided vehicles were the main reasons for the degradation of the eco-environment quality.

**Key words:** Aberdare National Park; eco-environment quality; remote sensing data; Remote Sensing Ecological Index; Principal Component Analysis; trend line analysis

**\*Corresponding author:** WEI Xianhu, E-mail: weixh@radi.ac.cn

**摘要:**阿伯德尔国家公园位于号称肯尼亚“水塔”的阿伯德尔山脉上,是肯尼亚重要的旅游景区和珍稀动植物保护区,开展该地生态环境质量评价对肯尼亚水资源保护与可持续发展具有重要的意义。本研究基于1987–2018年的Landsat系列遥感数据,通过计算综合遥感生态指数RSEI,结合趋势线分析法对阿伯德尔国家公园近32年间生态环境质量变化进行客观定量分析。研究结果显示:①1987–2018年研究区RSEI均值从0.62下降到0.51,生态环境质量退化的区域面积为551.52 km<sup>2</sup>,占总面积的71.85%,表明在气候变化和人类活动影响下,1987–2018年研究区的环境状况呈恶化趋势;②环境质量显著恶化的区域主要分布于亚高山植被区和东部低海拔森林覆盖区,亚高山地区植被生态系统结构单一,稳定性差,对气候变化和人类活动更为敏感;而东部区域存在过度开发,非法砍伐森林等现象,且旅游开发强度大,环境恶化与人类活动密切相关。

**关键词:**阿伯德尔国家公园;生态环境质量;遥感数据;生态指数RSEI;主成分分析;PCA;趋势线分析

## 1 引言

肯尼亚是中国政府在境外援助的第一个大型综合科教机构—中非联合研究中心的所在地,是我国一带一路在非洲的重要战略支点,有着丰富的自然资源,研究肯尼亚自然生态环境及其变化对开展一带一路非洲合作具有重要意义。阿伯德尔山脉是肯尼亚五大“水塔”之一,是肯尼亚第一大河流塔纳河和第二大河流阿西—加拉纳河的发源地。阿伯德尔国家公园覆盖阿伯德尔山脉的大部分区域,是肯尼亚水源地生态环境保护的重点区域,公园内海拔4000 m的山峰涵盖从高沼地到原始森林、深切溪谷等多种地貌、生态类型复杂,景观独特。近年来,阿伯德尔国家公园接待游客数量逐年增多,在气候变化和人类活动的双重作用下,园内天然生态环境受到了较大影响。因此,对阿伯德尔国家公园生态环境质量进行快速、准确地评价和变化趋势分析,对于制定肯尼亚水源地保护发展规划,实现区域生态环境可持续发展具有重要意义。

传统的生态调查与评价方法耗费大量人力物力,并且缺乏宏观调查与量化指标评估。卫星遥感作为一种先进对地观测技术可快速获取大范围地表生物物理信息,已成为区域生态环境动态监测中重要的手段。国内外专家学者基于遥感技术,提出

了多种方法与模型对不同区域区域生态环境质量进行评价与分析,如Carlson等<sup>[1]</sup>以宾夕法尼亚州切斯特县为例,基于AVHRR和Landsat TM影像,提取植被覆盖度、地表湿度和温度等信息,基于上述信息对快速城镇化的响应,分析了快速城镇化对城镇生态环境的影响;Jaafari等<sup>[2]</sup>基于遥感影像数据监测伊朗Jajroud保护区1986–2010年土地利用类型变化过程,后结合景观分析法对城市化进程中Jajroud保护区的生态环境质量变化进行评估与分析;周文英等<sup>[3]</sup>基于遥感影像提取了归一化植被指数(NDVI)、地表温度、坡度等6个生态因子,建立综合指数评价模型对四川省若尔盖县生态环境质量进行评价与分析;王思梦等<sup>[4]</sup>基于遥感和GIS提取植被覆盖度、裸土指数、坡度、采用专家打分法赋予分量指标权重,建立生态环境质量评价体系对无定河流域生态环境质量监测与评价等。然而上述基于遥感技术建立区域生态环境多指标定量评价体系时,指标的选择和指标权重分配存在很大的主观性和针对性,导致建立的指标体系因人、因地而异。

因此,为解决上述问题,参考2006年国家环境保护部颁布《生态环境状况评价技术规范(试行)》,提出的生态环境指数(EI)<sup>[5]</sup>,徐涵秋<sup>[6–8]</sup>选取绿度、湿度、热度、干度4个分量指标,引入主成分分析法客

观确定权重,提取了定量评价生态环境质量的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI),该指数不仅与EI指数有很好的可比性,还解决了EI指数适用范围受限的问题,如指标不易获取、人为确定权重、不能进行区域生态环境质量实时评价<sup>[9]</sup>,且在水土流失区<sup>[10-11]</sup>、城市<sup>[12-13]</sup>、自然保护区<sup>[14-15]</sup>等不同环境下的研究中表现稳定,得到广泛应用。

此前,国外学者对于阿伯德尔国家公园的研究多倾向生物多样性保护,如Mwangi等<sup>[16]</sup>对生物多样性保护管理条例实施和周边电围栏建立如何影响阿伯德尔国家公园野生动物分布开展研究;Sillero-Zubiri等<sup>[17]</sup>对阿伯德尔国家公园内重点保护动物其食物分布情况进行研究等,而对国家公园长期生态环境质量动态评价的研究较少,国内更是罕有关注。因此,本文采用基于遥感技术提取综合生态指数RSEI,结合趋势线分析法对国家公园1987-2018年间生态环境质量及变化趋势进行评价与分析,以期为中-肯双方联合开展阿伯德尔国家公园的生态环境保护和区域可持续发展提供科学支撑。

## 2 研究区概况、数据来源

### 2.1 研究区概况

肯尼亚阿伯德尔国家公园(Aberdare National Park)成立于1950年5月,涵盖肯尼亚中部高原(中央省)阿伯德尔山脉(Aberdare Range,  $0^{\circ}10'27''\text{S}$ – $0^{\circ}40'38''\text{S}$ ,  $36^{\circ}30'36''\text{E}$ – $36^{\circ}52'28''\text{E}$ )的大部分地区(图1)。阿伯德尔山脉是一座独立的火山山脉,由两座山峰组成,北部海拔高度3999 m的莱萨蒂马山

(Oldonyo Lesatima)和南部海拔高度3906 m的基南戈普山(Kinangop)。公园总面积约为766 km<sup>2</sup>,总体呈T型。海拔高度从2100 m到4300 m;土壤来源于火山灰,因而呈红色,富含有机质。植被种类繁多,表现出明显的垂直地带性:海拔2400 m以下,山脉西部地区因降水较少,植被以橄榄树,罗汉松等木本植物为主,东部则以脆木等高大乔木为主;在海拔2400~3300 m,有一个竹林带,以青篱竹为主,面积大约35 000 hm<sup>2</sup>;海拔高度3000 m以上区域,植被以高山草,半边莲,杜鹃花等低矮草本植物为主。山脉全年温暖湿润,年平均温度8~13℃。降雨最多的月份是3-5月和10-12月,区域年平均降水量在1000 mm左右,并且随地形起伏剧烈变化<sup>[18-20]</sup>。

### 2.2 数据来源与预处理

(1)2月为阿伯德尔国家公园干季和雨季间的窗口期,大气状态稳定,本研究选用的遥感数据为1987年2月25日、1995年1月30日、2010年2月8日的Landsat5 TM影像,2002年2月10日的Landsat7 ETM+影像,2018年1月29日的Landsat8 OLI和TIRS影像,行列号为Path168Row060。所选的5景数据云量低于5%,质量较好,对应的地表时相一致,保证了不同时期观测结果的可比性。上述遥感影像均可通过美国地址勘探局官方网站(<http://glovis.usgs.gov/>)下载得到<sup>[15]</sup>。

遥感影像预处理过程如下:①在ENVI 5.3中使用辐射校正工具对5个时期的影像数据进行辐射定标,将影像原始DN值转换为表观反射率;②使用FLASSH大气校正工具对辐射定标后的遥感影像的可见光、近红外与热红外波段进行大气校正;③对大气校正后的影像根据二次多项式和最邻近像元法进行几何配准,均方根误差在0.5个像元内;④计算评价体系所需要的地表参数,并依照园区边界将配准后的栅格文件裁剪至统一范围。

为检验气候变化对生态环境产生的影响,研究采用全球地表数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)作为气象数据的输入来源。每3 h数据经过质量筛选,计算年平均气温与累积降水。该数据可以通过美国国家宇航局官方网站(<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>)下载<sup>[21]</sup>。

国家公园1987-2018年接待游客数量统计数据来源于每一年肯尼亚国家统计局(<https://www.knbs.or.ke>)发布的经济报告<sup>[22]</sup>。

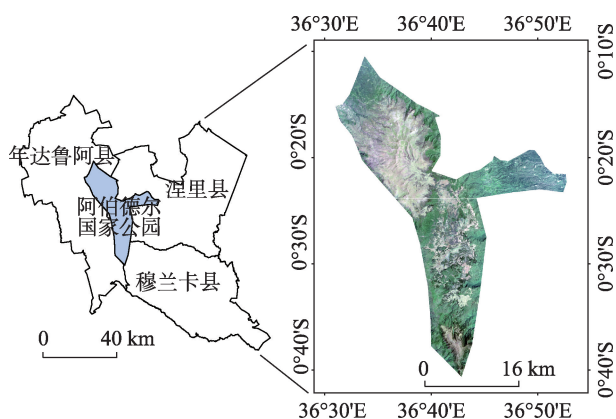


图1 阿伯德尔国家公园 Landsat 8 真彩色影像(2018年1月29日)

Fig. 1 Landsat8 true color image of the Aberdare National Park (Jan 19, 2018)



### 3 研究方法

本研究采用新型遥感生态指数 RSEI 对研究区域内的生态环境质量进行长时间序列评价与分析,该指数综合考量绿度、湿度、热度、干度 4 个能直观反映生态环境优劣的指标来综合评价区域生态环境状况。代表上述 4 个指标的遥感参数包括:归一化植被指数 (Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)、裸土指数 (Soil Index, SI), 湿度分量 (Humidity Index, WET) 和地表温度 (Land Surface Temperature, LST), 均可从遥感影像中获得。遥感生态指数 RSEI 提取通过主成分变换 (Principal Component Analysis, PCA) 实现。

遥感生态指数 RSEI 可以表示为各项指标的函数,即:

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

#### 3.1 分量指标计算

##### 3.1.1 绿度指标

归一化植被指数 NDVI 根据植物叶面在红光波段的吸收特性和近红外波段的反射特性特性构建,它可以综合反应出植物的生长情况、地表植被覆被度和叶面积指数等多种性质<sup>[23]</sup>,且研究区是国家公园,土地利用类型以天然植被区为主,因此,选用 NDVI 来代表绿度指标。其公式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad (2)$$

式中:  $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{Red}$  分别为 Landsat5 TM, Landsat7 ETM+ 和 Landsat8 OLI 的近红外和红波段的反射率。

##### 3.1.2 湿度指标

多波段遥感影像经过缨帽变换所获得的亮度、绿度、湿度等分量已被大量运用于生态环境质量监测与评价。其中表达湿度的分量可以有效的反映地表土壤和植被的含水量,与生态环境紧密相关。因此,本研究采用由缨帽变换得到的湿度分量 WET 作为湿度指标。

##### 3.1.3 热度指标

地表温度与植被的生长与分布、地表水资源蒸发循环等许多自然现象与过程紧密相关,是生态环境变化重要的指示因子<sup>[24]</sup>,因此本研究采用基于辐射传输方程的地表温度反演算法提取地表温度作为热度指标。

卫星传感器所接收到的热红外辐射亮度值的表达式(辐射传输方程)为<sup>[25-26]</sup>:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(LST) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow]\tau + L_\uparrow \quad (3)$$

据此,地表温度 LST 的反演步骤如下:

$$L_\lambda = gain \times DN + bias \quad (4)$$

$$B(LST) = [L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau\varepsilon \quad (5)$$

$$LST = K_2 / \ln(K_1 / B(LST) + 1) \quad (6)$$

式中:  $L_\uparrow$  为大气向上辐射亮度;  $L_\downarrow$  为大气向下辐射亮度;  $\tau$  为大气在热红外波段的透过率;  $\varepsilon$  为地表比辐射率;  $B(LST)$  是与 LST 相同温度下黑体的热辐射亮度;  $LST$  为地表温度;  $gain$  和  $bias$  为热红外波段的增益与偏置值;  $K_1$  和  $K_2$  为定标参数。地表比辐射率  $\varepsilon$  通过 Sobrino 模型<sup>[27]</sup>和由 NDVI 反演的植被覆被度计算获得。

##### 3.1.4 干度指标

土壤干化会严重影响区域生态环境质量,土壤干化情况越严重,对其影响越大。因此本研究选用裸土指数 SI 作为干度指标,其计算公式<sup>[28]</sup>如下:

$$SI = \frac{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})]}{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})]} \quad (7)$$

式中:  $\rho_{Blue}$ ,  $\rho_{Red}$ ,  $\rho_{NIR}$ ,  $\rho_{SWIR1}$  分别为 Landsat5 TM, Landsat 7 ETM+ 和 Landsat8 OLI 蓝,红,近红外,短波红外 1 波段的反射率。

#### 3.2 综合指标构建

利用主成分分析将 4 个分量指标耦合成一个综合的生态环境质量评价指数。但由于各个分量指标在量纲和数值范围上有较大差异,故在主成分变换前,先对其进行归一化处理,使其数值在 [0,1] 之间,归一化公式为:

$$NI = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (8)$$

式中:  $NI$  为归一化后的分量指标值,  $I$  为该分量指标的原始数值,  $I_{max}$  和  $I_{min}$  分别为该分量指标的最大值和最小值。

对归一化后的 4 个分量指标进行主成分分析,得到原始 RSEI<sub>0</sub>:

$$RSEI_0 = 1 - PC1(NI_{NDVI}, NI_{WET}, NI_{LST}, NI_{SI}) \quad (9)$$

为了便于研究区生态环境质量状况的度量和比较,对原始 RSEI<sub>0</sub> 再次进行归一化处理:

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0min}) / (RSEI_{0max} - RSEI_{0min}) \quad (10)$$

式中:  $RSEI$  为经过归一化处理的遥感生态指数;  $RSEI_0$  为原始生态指数,  $RSEI_{0max}$ 、 $RSEI_{0min}$  为原始生态指数的最大和最小值;  $PC1$  为第一主成分。RSEI 取值介于 [0, 1] 之间,其值越接近于 1,代表生态环境



质量越好;反之,则生态状况越差<sup>[10]</sup>。

### 3.3 遥感生态指数变化趋势分析

对于多年研究区生态环境指数RSEI变化趋势,研究采用趋势线法进行分析,在每个像元基础上,模拟1987–2018年RSEI的变化趋势,具体公式为:

$$\theta_{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i c_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n c_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (11)$$

式中:  $\theta_{slope}$  为趋势斜率;  $n$  为监测时间段年数;  $c_i$  为第  $i$  年研究区 RSEI 年值; 趋势斜率  $\theta_{slope}$  为负表示生态环境质量呈下降趋势, 为零表示生态环境质量不变, 为正则表示生态环境指数质量呈上升趋势。

## 4 结果与分析

### 4.1 生态指数提取结果

基于预处理后的 5 期遥感影像数据, 提取绿度、湿度、热度、干度指标后, 进行归一化处理及主成分变换, 得到的分析结果如表 1 所示。由表 1 可知:

(1) 5 个时相第一主成分(PC1)贡献率分别达到 84.71%、92.55%、80.88%、83.55% 和 81.68%, 均大于 80%。且各分量指标对其载荷值的大小和符号都相对稳定, 说明第一主成分已集中了 4 个分量指标的大部分特征信息;

(2) 5 个时相第二主成分(PC2)–第四主成分(PC4)贡献率均小于 15%, 贡献率较低且各分量指标对其载荷值的大小和符号极其不稳定, 表明缺失信息较多, 且难以解释生态现象;

(3) 分析 4 个指标对 PC1 的载荷值, 发现代表绿度指标的 NDVI 和代表湿度指标的 WET 载荷值呈正值, 如 1987 年 NDVI 和 WET 的载荷值分别为 0.58 和 0.57, 说明其对生态环境起到正面影响; 代表热度指标的 LST 和代表干度指标的 SI 载荷值则呈负值, 如 1987 年 LST 和 SI 的载荷值则为 -0.31 和 -0.01 说明其对生态环境起到负面影响; 且 5 个时相的绿度指数 NDVI, 湿度指数 WET, 热度指数 LST, 干度指数 SI 对 PC1 的载荷值绝对值成依次递减的趋势, 如 2018 年 NDVI、WET、LST、SI 的载荷值分别为 0.58、0.57、-0.42、-0.40, 且其他 4 个时相趋势相同, 这表明园区内绿度、湿度、热度、干度变化对生态环境质量的影响程度逐渐减小。

综上, 本研究基于第一主成分(PC1)提取的遥

表 1 4 个分量指标(绿度、湿度、热度、干度)的主成分分析结果

Tab. 1 The principal component analysis result of Four Component Indicators (Greenness, Humidity, Heat and Dryness)

年份	指标	对 PC1 载荷值	对 PC2 载荷值	对 PC3 载荷值	对 PC4 载荷值
1987	NDVI	0.68	0.35	0.64	<0.01
	WET	0.66	0.08	-0.75	<0.01
	LST	-0.31	0.93	-0.17	<0.01
	SI	-0.01	-0.01	<0.01	1.00
	特征值	0.22	0.06	<0.01	<0.01
	贡献率/%	84.71	12.07	3.20	0.02
1995	NDVI	0.60	0.14	0.61	<-0.01
	WET	0.59	-0.80	-0.33	0.11
	LST	-0.57	-0.57	0.52	0.20
	SI	0.26	0.11	0.20	<0.01
	特征值	0.33	0.02	<0.01	<0.01
	贡献率/%	92.55	5.11	1.94	0.40
2002	NDVI	0.64	0.66	0.40	<0.01
	WET	0.56	0.05	-0.82	0.03
	LST	-0.52	0.75	-0.40	0.02
	SI	-0.01	0.02	0.03	1.00
	特征值	0.22	0.04	0.02	<0.01
	贡献率/%	80.88	13.51	5.51	0.10
2010	NDVI	0.60	0.13	-0.61	0.49
	WET	0.53	0.03	0.78	0.31
	LST	-0.51	0.93	0.08	0.20
	SI	-0.29	-0.33	0.05	<0.01
	特征值	0.24	0.03	0.01	<0.01
	贡献率/%	83.55	10.70	5.55	0.20
2018	NDVI	0.58	0.26	-0.77	0.07
	WET	0.57	0.15	-0.42	-0.69
	LST	-0.42	0.91	0.01	-0.14
	SI	-0.40	-0.30	-0.49	-0.70
	特征值	0.29	0.04	<0.01	<0.01
	贡献率/%	81.68	12.50	5.51	0.31

感生态指数 RSEI 能够全面地表现出研究区内生态环境的综合状况, 且绿度、湿度变化和热度、干度变化分别对研究区生态环境质量起正向和反向影响, 影响程度逐渐减小。

### 4.2 环境质量总体分析

图 2 为统计得到的各分量指标与 RSEI 的均值。其中, RSEI 均值分别为 0.62、0.56、0.55、0.53、0.51, 呈明显的下降趋势; 上文提到, 绿度指标和湿

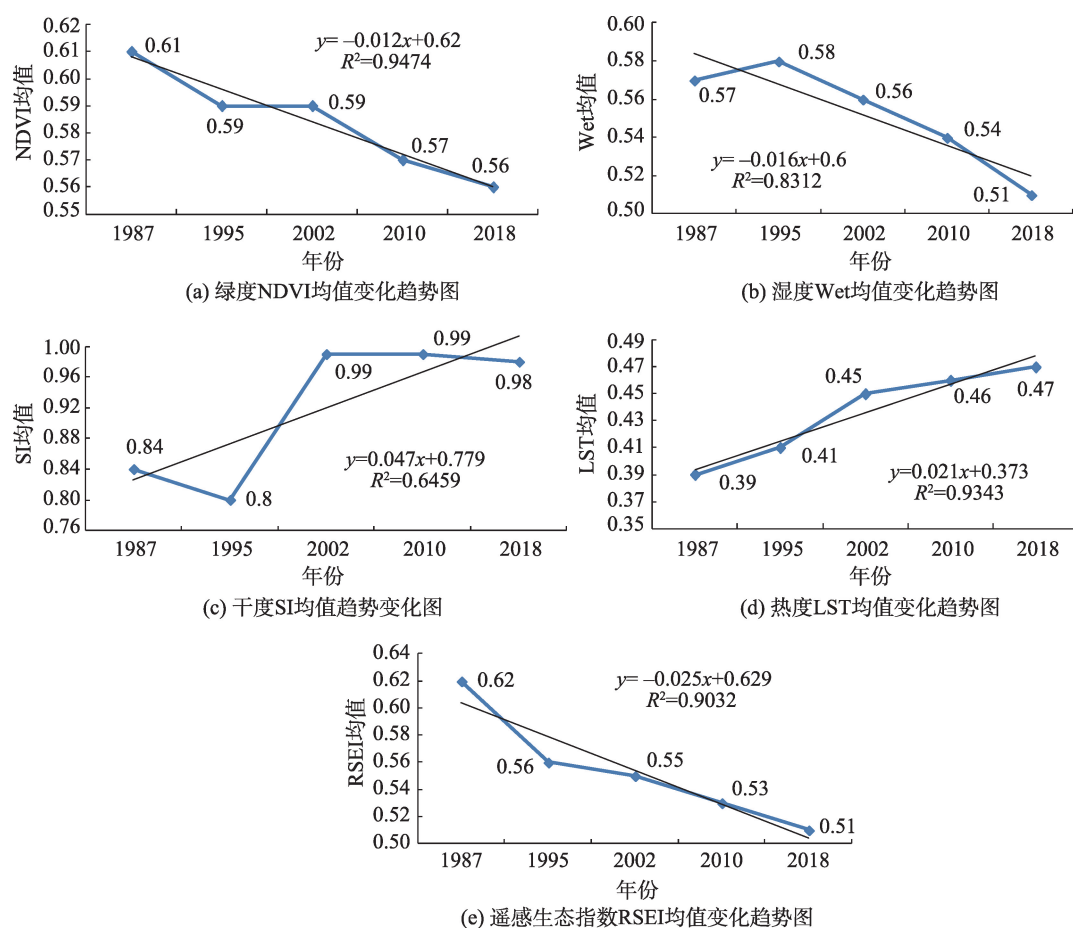


图2 1987–2018年阿伯德尔国家公园绿度、湿度、热度、干度指标与RSEI均值变化趋势

Fig. 2 Change trends of the mean values of the Greenness, Humidity, Heat and Dryness Indicators and RSEI in Aberdare National Park from 1987 to 2018

度指标对生态环境质量起到正面影响,上述因子由1987年的0.61、0.57分别下降至2018年的0.56、0.51,呈明显递减趋势;热度指标和干度指标对生态环境质量起到负面影响,上述因子由1987年的0.84、0.39分别上升至2018年的0.98、0.47,呈明显递增趋势,说明该地区32年间的生态环境质量逐渐变差。

参考已有的分级标准<sup>[15]</sup>,将各年份的RSEI值以0.2为间隔划分为5个等级,[0, 0.2)、[0.2, 0.4)、[0.4, 0.6)、[0.6, 0.8)、[0.8, 1]分别对应生态环境质量差、较差、中等、良、优。各个等级空间分布如图3所示。可以看出,生态环境质量中等及以下的区域集中分布于亚高山植被区。这类地区主要为高沼地,植被多以泥炭藓,高山草等草本植物为主,植被覆盖度、光合作用强度较低;生态环境质量良及以上等级的区域主要分布在海拔较低,以脆木、橄榄树等乔木为优势种群的原始森林区域,生态系统结构复杂,在外界因素的扰动下更为稳定。

经统计,1987–2018年研究区生态环境质量呈现“四增一减”的趋势,即生态环境质量优等级的面积减少,其他生态环境质量等级的面积增加,优等级面积占比总计下降了8.44%,良及中等等级的面积占比总计上升了4.38%,较差及差级别的面积占比总计上升了4.06%,综上,32年研究区整体生态环境质量下降。主要体现为生态质量评价为优的区域面积缩减64.65 km<sup>2</sup>,退化到良及以下级别。表明部分原本发育良好的天然生态区受到人为或自然因素的威胁,产生退化。例如国家公园东部出现生态环境质量中等及以下等级的区域,且区域面积在逐渐扩大,需要引起重视。

### 4.3 环境质量变化分析

研究区作为肯尼亚著名的国家公园和野生动物保护区,多年间地表覆被类型基本稳定不变,4.1节中曾得出绿度指标NDVI变化对研究区生态

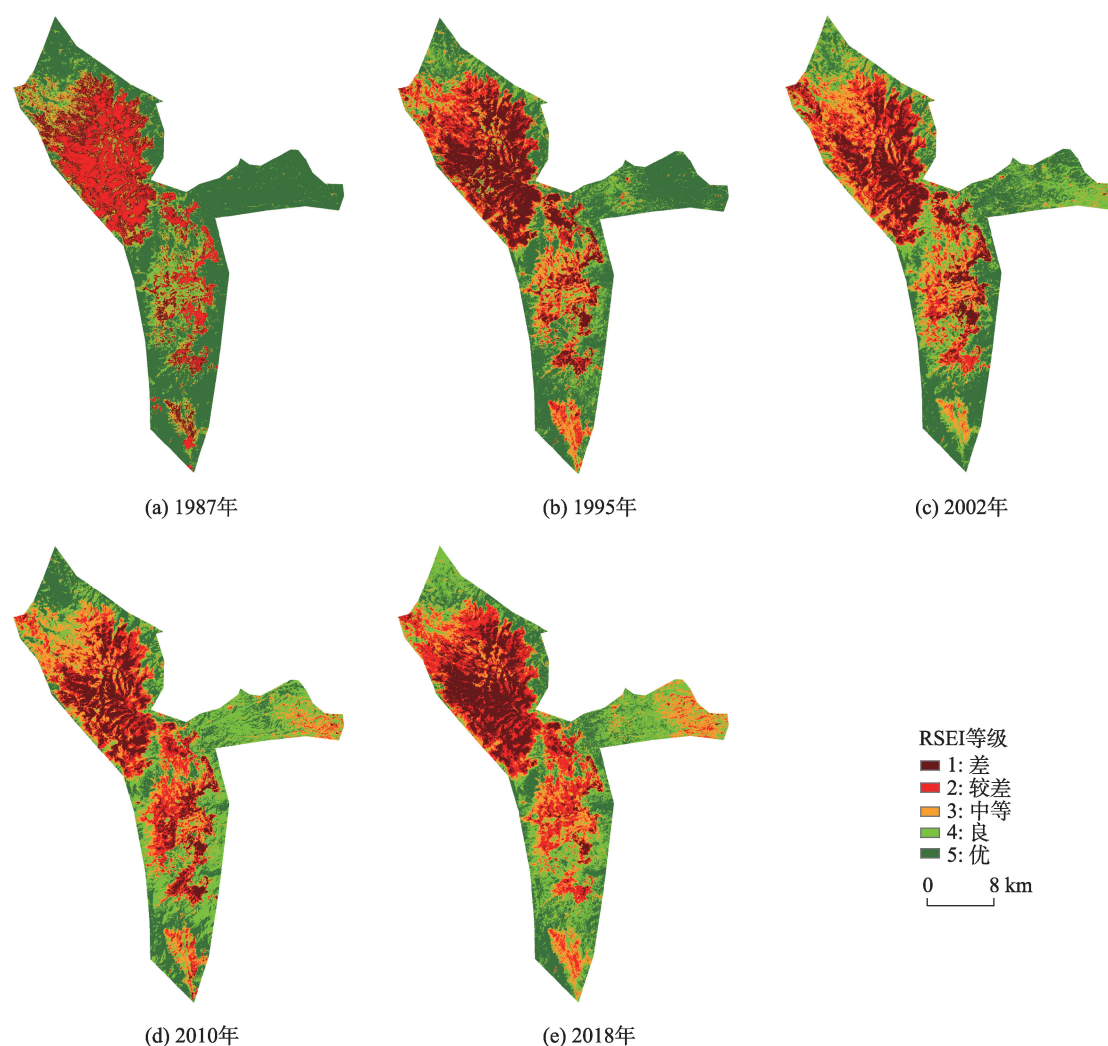


图3 1987–2018年阿伯德尔国家公园遥感生态指数RSEI分布

Fig. 3 Spatial distribution of RSEI in Aberdare National Park from 1987 to 2018

环境指数RSEI变化影响最大,因此在研究阿伯德尔国家公园生态环境质量变化原因时,重点从不同植被区NDVI变化情况进行定性和定量分析。

采用趋势分析 $\theta_{\text{slope}}$ 参数评价32年来每个像元的RSEI变化,得到研究区生态环境质量变化分布图如图4(a)所示。经统计,园区内生态环境质量变好的区域面积为143.79 km<sup>2</sup>,占总面积的28.15%,主要分布在2座山峰中间的低海拔和北部莱萨蒂马山坡部分中等海拔森林植被区,上述区域与图4(b)所示研究区NDVI呈变大趋势的区域一致。该区域植被覆盖度的提高,归功于当地慈善团体犀牛方舟(Rhino)从1989年开始围绕阿伯德尔山建立的电围栏,因此有效的保护了附近自然生态环境。据Rhino的统计资料显示,仅2005–2010年,阿伯德尔

山的这部分区域森林覆盖度就增加了20.6%<sup>[29]</sup>,这对研究区内生态环境质量提升有明显的促进作用。

同时,园区内生态质量退化的区域面积为551.52 km<sup>2</sup>,占总面积的71.85%,较生态环境质量变好的区域面积高284%,主要分布在北部和南部海拔较高的、亚高山植被区域,以及东部部分低海拔森林植被区。上述区域与图4(b)所示研究区NDVI减小的区域一致。亚高山植被区的植被覆盖度下降主要由于该区域植被群落以一年生草本、苔藓等为主,生态系统结构简单,稳定性差,对气候变化和人为活动更为敏感<sup>[30]</sup>。图5(a)–(c)所示为研究区年平均温度,累计年降水量和逐年游客总量变化,可以看到,1987–2018年年平均温度呈显著上升趋势,年降水量呈显著下降趋势,游客人数呈显著上



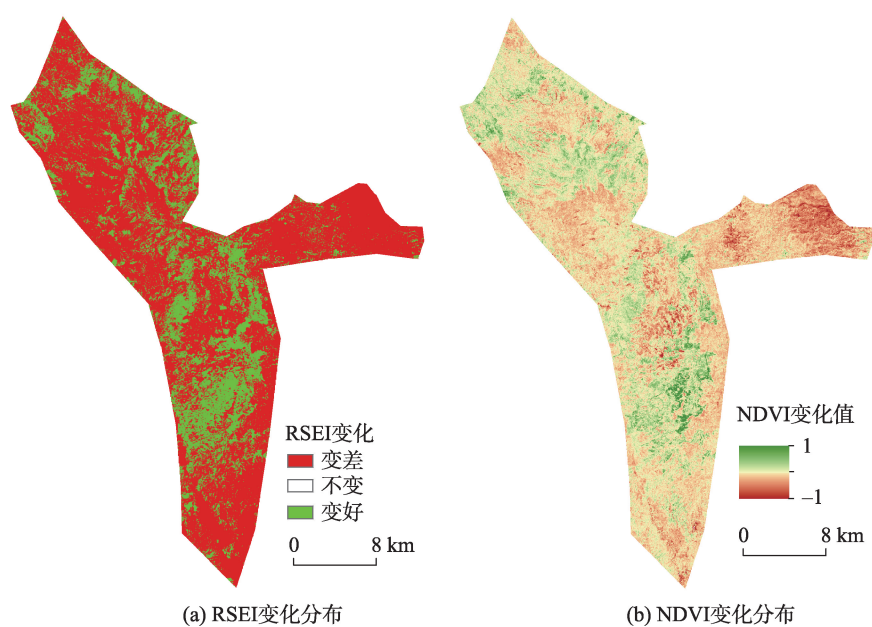


图4 1987–2018年阿伯德尔国家公园遥感生态指数RSEI和NDVI变化分布  
Fig. 4 Distribution maps of RSEI and NDVI changes in Aberdare National Park, from 1987 to 2018

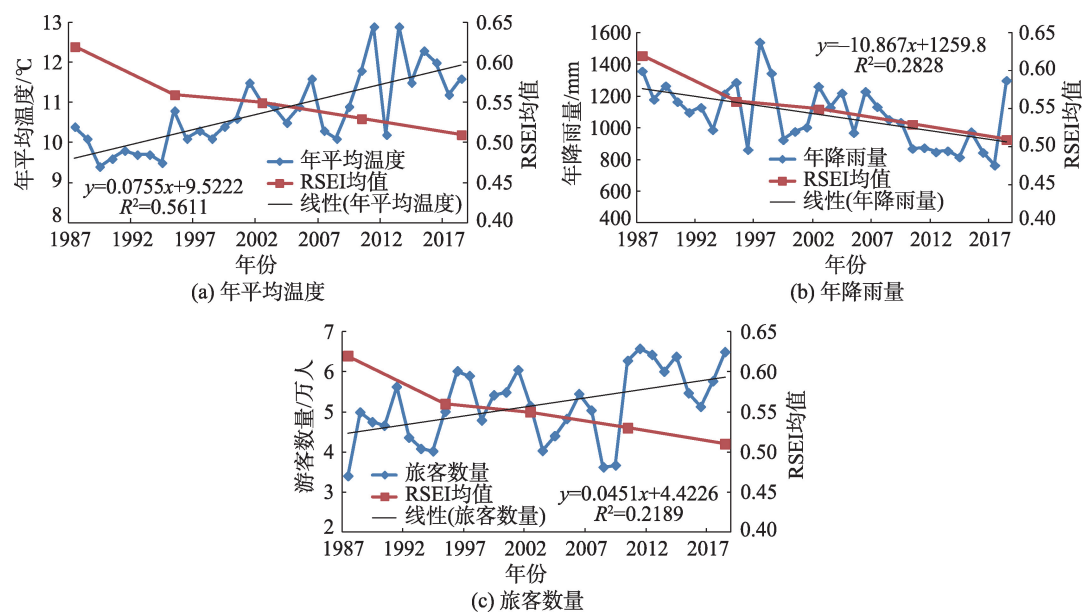


图5 1987–2018年阿伯德尔国家公园年平均温度、降水量和游客数量变化  
Fig. 5 Change maps of the annual average temperature, precipitation and Number of tourists in Aberdare National Park from 1987 to 2018

升趋势。温度升高、降水减少,人类活动加剧抑制植物群落生长,从而引起年际间亚高山植被区植被覆盖度降低,综评生态环境质量下降。

东部低海拔森林区生态环境恶化及植被覆盖度降低不仅由于受到温度升高、降水减少等气候变化的影响,其更主要原因:① 电围栏建成之前,研究

区内存在过度放牧,非法砍伐树木,在原始森林不符合桑巴体系(Shamba-System)规定的林间种植大麻、玉米等非法侵占原始森林等现象,从而导致森林退化,覆盖度降低<sup>[31]</sup>。围栏建成后,此类现象明显减少,但仍存在;② 研究区东部区域因其野生动物较多,是公园的热门地区,该区域游客聚集,导游

车辆较多。导游车辆的多次碾压,对地表植被的生长起到抑制作用,甚至造成该区域出现土壤板结化、生产力下降等土壤生态退化现象,致使该区域生态环境质量下降;③公园内主要酒店都设于国家公园的北部区域(图6),酒店配套基础设施建设引起的污染和水土流失、酒店运营过程中产生的垃圾对周边生态环境的污染,也是导致该区域植被退化、生态环境质量下降的重要原因。

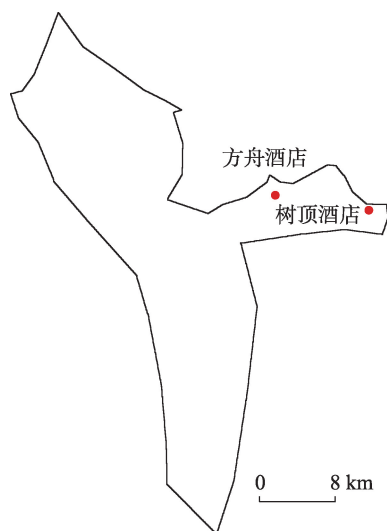


图6 阿伯德尔国家公园主要酒店分布

Fig. 6 Map of major hotels in Aberdare National Park

综上,研究区32年生态环境质量恶化加剧可以归咎于全球气候变暖和人为活动。一方面,气候变暖体现在气温升高及降水量减少,炎热、干旱的气象条件抑制光合作用,引起植被丰度和绿度降低,导致多个生态环境质量监测指标的下行,这种现象在亚高山植被区更为显著;另一方面,来自于旅游业发展带来的开发建设及其他人类活动的增多。旅游活动造成的污染、砍伐等行为极有可能影响植物群落的结构和功能,从而引起生态环境恶化。

## 5 结论

本研究基于长时间序列遥感影像数据,提取绿度指标NDVI、湿度指标WET、热度指标LST、干度指标SI,进而构建遥感生态环境指数(RSEI),对肯尼亚阿伯德尔国家公园1987–2018年的生态环境质量进行评价与变化分析,主要研究结论包括:

(1) 研究区1987、1995、2002、2010、2018年RSEI均值分别为0.62、0.56、0.55、0.53、0.51,呈明显

下降趋势;1987–2018年园区内生态质量退化的区域面积为551.52 km<sup>2</sup>,占总面积的71.85%,较生态环境质量变好的区域面积高284%,上述结果表明该区域近32年的生态环境质量逐渐变差,且趋势明显。

(2) 生态环境恶化的区域主要分布于亚高山植被区和东部低海拔森林植被区。因为亚高山植被区群落结构简单,生态环境脆弱,对气候变化和人类活动敏感;东部区域更是受过度放牧,非法砍伐森林等现象影响,又是游客集中的区域,导游车辆较多,旅游基础设施建设和导游车辆的多次碾压引起的污染和水土流失,也是导致该区域生态环境质量下降的重要原因。

(3) 绿度指标和湿度指标对生态环境起正向作用,热度指标和干度指标对生态环境起负向作用,且研究区绿度、湿度、热度、干度变化对生态环境的影响程度依次减小。

综上所述,利用长时间序列遥感数据提取遥感生态指数RSEI可以较全面、正确地反映肯尼亚水源重点保护区域阿伯德尔国家公园的生态环境质量状况;通过对其时空变化差异定量和定性分析,可以发现近年来在气候变暖和人为活动的双重影响下,虽然存在部分区域在有关组织(如慈善团体犀牛方舟)的保护下森林覆被度提高,生态环境质量上升的现象,但是国家公园整体生态环境质量仍呈下降趋势,采取相关生态环境保护措施迫在眉睫。

## 参考文献(References):

- [1] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use-Land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective[J]. Global and Planetary Change, 2000,25(1):49-65.
- [2] Jaafari S, Sakieh Y, Shabani A A, et al. Landscape change assessment of reservation areas using remote sensing and landscape metrics (case study: Jajroud reservation, Iran) [J]. Environment, Development and Sustainability, 2016, 18(6):1701-1717.
- [3] 周文英,何彬彬.四川省若尔盖县生态环境质量评价[J]. 地球信息科学学报,2014,16(2):314-319. [Zhou W Y, He B B. Eco-environmental quality assessment of ruoergai county in sichuan province based on Multi-sources Remote Sensing Data[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16(2):314-319. ]
- [4] 王思梦,黄昌.基于遥感和GIS的流域自然生态环境质量监测与评价——以无定河流域为例[J].干旱区地理, 2018,44(1):136-143. [Wang S M, Huang C. Ecological en-

- vironment quality monitoring and evaluation based on remote sensing and GIS techniques: A case of Wuding River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2018,41(1):136-143. ]
- [ 5 ] 国家环境保护部.生态环境状况评价技术规范(试行)(HJ/T192-2006)[M].北京:中国环境科学出版社,2006. [ Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical Criterion for eco-environmental Status Evaluation(Trial Implementation) [S]. HJ192-2006. Beijing:China Environmental Press, 2006. ]
- [ 6 ] 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. ]
- [ 7 ] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897. [ Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. *China Environmental Science*, 2013,33(5):889-897. ]
- [ 8 ] 徐涵秋.水土流失区生态变化的遥感评估[J].农业工程学报,2013,29(7):91-97. [ Xu H Q. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013,29(7):91-97. ]
- [ 9 ] 叶有华,梁永贤,沈一青,等.《生态环境状况评价技术规范(试行)》中若干值得商榷的问题[J].热带地理,2009,29(4):404-406. [ Ye Y H, Liang Y X, Shen Y Q, et al. Some Issues Related to "Technical Criterion for eco-environmental Status Evaluation(Trial Implementation)". *Tropical geography*, 2009,29(4):404-406. ]
- [10] 李粉玲,常庆瑞,申健,等.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,2015,26(12):3811-3817. [ Li F L, Chang Q R, Shen J, et al. 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*, 2015,26(12):3811-3817. ]
- [11] 张灿,徐涵秋,张好,等.南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估——以福建省长汀县为例[J].自然资源学报,2015,30(6):917-928. [ Zhang C, Xu H Q, Zhang H, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of southeastern China: Changting county, Fujian province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015,30(6):917-928. ]
- [12] 刘智才,徐涵秋,李乐,等.基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J].应用基础与工程科学学报,2015(4):728-739. [ Liu Z C, Xu H Q, Li L, et al. Ecological change in the Hangzhou area using the remote sensing based ecological index[J]. *Journal of Basic Science And Engineering*, 2015(4):728-739. ]
- [13] 宋慧敏,薛亮.基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J].应用生态学报,2016,27(12):3913-3919. [ Song H M, Xue L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City, Northwest China based on RSEI model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016,27(12):3913-3919. ]
- [14] 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):191-200. [ 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):191-200. ]
- [15] 王士远,张学霞,朱彤,等.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,2016,35(10):1269-1278. [ Wang S Y, Zhang X X, Zhu T, et al. Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology [J]. *Progress in Geography*, 2016,35(10):1269-1278. ]
- [16] Mwangi G P, Muthoni M D, Bario M R, et al. Mapping of human-elephant conflicts for mitigation and biodiversity conservation management in Aberdare National Park[J]. Kabarak University, 2012. URL: <http://library.kabarak.ac.ke/handle/123456789/213>.
- [17] Sillero-Zubiri C, Gottelli D. *Canis simensis*[J]. *Mammalian Species*, 1994,485:1-6.
- [18] Chuah-Petiot M S. Contributions toward a Bryoflora of the Aberdare Range,Kenya[J]. *Tropical Bryology*, 1997:57-64. DOI: <http://dx.doi.org/10.11646/bde.13.1.7>.
- [19] Muiruri W. The Aberdare Ecosystem[J]. *Journal of Eastern African Research & Development*, 1974,4(1):49-66.
- [20] Muiruri W. Bio-economic conflicts in resource use and management:A Kenyan case study[J]. *GeoJournal*, 1978,2(4):321-330.
- [21] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004,85(3):381-394.
- [22] Steinicke E, Neuburger M. The impact of community-based afro-alpine tourism on regional development[J]. *Mountain Research and Development*, 2012,32(4):420-431.
- [23] 姚雄,余坤勇,刘健,等.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J].应用生态学报,2016,27(3):735-745. [ Yao X, Yu K Y, Liu J, et al. Spatial and temporal changes of the ecological vulnerability in a serious soil erosion area, Southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*



- ogy, 2016,27(3):735-745. ]
- [24] 李娅丽,汪小钦,陈芸芝,等.福建省地表温度与植被覆盖度的相关性分析[J].地球信息科学学报,2019,21(3):445-454. [ Li Y L, Wang X Q, Chen Y Z, et al. The correlation analysis of land surface temperature and fractional vegetation coverage in Fujian province[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019,21(3):445-454. ]
- [25] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005,71:613-62.
- [26] Yu X, Guo X, Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. Remote Sensing, 2014,6(10): 9829-9852.
- [27] Sobrino J A, Jimenez-Mumoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,90(5):434-440.
- [28] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping [J]. Tropical Ecology, 2001,43(1):39-47.
- [29] Kiogora M J, Mungai D, Thuita T, et al. Environmental, social and economic assessment of the fencing of the Aberdare Conservation Area[J]. Evolution, 2011,67(3):708-21.
- [30] Britton A J, Hester A J, Hewison R L, et al. Climate, pollution and grazing drive long-term change in moorland habitats[J]. Applied Vegetation Science, 2017,20(2):194-203.
- [31] Lambrechts C, Woodley B, Church C, et al. Aerial survey of the destruction of the Aberdare Range forests[J]. Division of Early Warning and Assessment, UNEP, 2003. URL: [http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8576/Aberdares\\_report\\_english\\_Aerial\\_survey\\_2002.pdf?sequence=3](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8576/Aberdares_report_english_Aerial_survey_2002.pdf?sequence=3).