

南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价

刘盼^{1,2} 任春颖^{*} 王宗明¹ 张柏¹ 陈琳^{1,2}

(¹中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 运用遥感技术,科学、快速地评价区域生态环境质量,能够为区域生态环境的保护、治理和规划等提供科学依据。本研究以1990、2000和2015年的Landsat TM/OLI/TIRS为数据源,使用主成分分析方法确定湿度分量、归一化植被指数、地表温度和干度指数4个指标的权重,运用遥感生态指数(RSEI)评价模型,对南瓮河自然保护区1990—2015年的生态环境进行评价。结果表明:遥感生态指数能够较好地反映研究区生态环境质量状况及其时空分异;1990—2015年,保护区RSEI均值由0.55上升至0.83,生态环境质量优良以上区域面积所占百分比逐年增加,这与该等级中森林所占比例增加有关;保护区生态环境质量变好的区域所占比例高达91.4%,这与保护区的建立及相关工程与非工程防护措施的实施密切相关;核心区、缓冲区北部生态环境质量下降的主要原因是火灾的发生导致森林植被遭到破坏,而道路附近和试验区的东南部生态环境质量的下降与人类活动的干扰密不可分。

关键词 生态环境质量; 遥感生态指数; 主成分分析; 南瓮河自然保护区

Assessment of the eco-environmental quality in the Nanweng River Nature Reserve, North-east China by remote sensing. LIU Pan^{1,2}, REN Chun-ying^{1*}, WANG Zong-ming¹, ZHANG Bai¹, CHEN Lin^{1,2} (¹Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Scientific and rapid assessment of the ecological environment quality based on remote sensing can provide basis for regional protection, management and planning. In this study, using Landsat TM/OLI/TIRS in 1990, 2000 and 2015 as data sources, four indices including the wetness component of the tasseled cap transformation (WET), normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference built-up and soil index (NDSI), and land surface temperature (LST) were derived, with the weights being determined by principal components analysis (PCA). Remote sensing ecological index (RSEI) was used to evaluate the eco-environmental quality of Nanweng River Nature Reserve from 1990 to 2015. Results showed that RSEI was an effective indicator for evaluating spatio-temporal dynamics of eco-environmental quality. From 1990 to 2015, the mean value of RSEI of Nanweng River Nature Reserve increased from 0.55 to 0.83, the proportion of area with excellent and good levels of RSEI trended to increase, probably due to the increase of forests at those levels. Meanwhile, 91.4% of the total land area in the reserve had an improved eco-environmental quality. Such improvement was attributed to the establishment of the reserve and implement of a series of engineering and non-engineering protection measures. In the north of core area and buffer area, decrease of eco-environmental quality was due to forest fires which destroyed a large area of forest vegetation. In the road side and southeast of the experimental area, intensified human activities led to the decrease of regional eco-environmental quality.

Key words: eco-environmental quality; remote sensing ecological index; principal component analysis; Nanweng River Nature Reserve.

本文由国家重点研发计划项目(2016YFC0500301)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Project (2016YFC0500301).

2018-02-01 Received, 2018-07-13 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: renchy@iga.ac.cn

生态环境是人类赖以生存的物质基础,生态环境质量指生态环境的优劣程度,它以生态学理论为基础,在特定的时空范围内,从生态系统层次上反映生态环境对人类生存及社会经济可持续发展的适宜程度^[1]。当前在自然条件变化和人类活动的双重影响下,区域范围内出现了荒漠化、水资源短缺和重金属污染等各种生态环境问题,导致区域生态环境质量下降,阻碍了人类社会的可持续发展。因此,科学、快速评价区域的生态环境质量,并掌握其变化趋势,对国家环境保护部门相关政策的制定具有重要的科学指导意义。

生态环境质量的评价方法很多,包括基于生态系统的服务价值^[2]、PSR模型和层次分析法构建的综合指数法^[3-4]、模糊评价法^[5]等,但方法中指标的选择和指标权重分配存在很大的主观性和随意性,而主成分分析法^[6]、人工神经网络法^[7]则克服了人为确定权重的问题,但这些方法没有统一的评价体系且结果较难实现空间可视化。2006年国家环境保护部颁发了《生态环境状况评价技术规范(试行)》^[8],提出了生态环境状况指数(EI)并得到广泛应用^[9-12]。但EI指数法也存在许多问题^[13],如提取的水网密度指数忽略了人工湿地的影响,部分指标代表性不强以及适用范围受限等,且评价结果也很难达到空间可视化效果。徐涵秋^[14-15]创建了多指标集成的遥感生态指数,该指数的各指标完全基于遥感影像获取,且各指标的权重根据指标对各主成分的贡献率来确定。该指数提出后,在城市^[16-17]和水土流失区^[18-19]的生态环境质量评价中得到广泛应用,表明该指数能够有效快速地监测生态环境质量的变化。

南瓮河自然保护区位于大兴安岭林区,是我国唯一的以寒温带森林湿地生态系统为保护对象的自然保护区,又是我国高纬度冻土分布区和嫩江水系的发源地^[20]。保护区内野生动植物种类丰富,其优良的生态环境在寒温带野生动植物的保护、维护生态平衡起着重要作用,同时其独特的区位和自然条件使其具有较强的科研价值^[21]。2003、2006年保护区内发生了2起严重森林火灾,破坏面积达29591 hm²,占保护区总面积的12.9%^[22];此外,砍伐、道路修建等人类活动和气候变暖都对该区域的生态环境产生了重要影响。在自然和人为活动综合作用下的自然保护区生态环境质量如何,长时间以来生态环境质量究竟发生了怎样的变化,保护区是否发挥了应有的保护作用,对于保护区管理部门来说都是亟

需回答的问题。

以往基于遥感技术在南瓮河自然保护区开展的研究主要集中于森林、湿地等典型生态系统类型的景观格局动态演变及驱动力分析^[23-24]、土壤碳储量^[25]和地上生物量^[26]的估算、水源涵养能力的评估与优化等方面^[27],而基于遥感技术面向保护区长期的综合性生态环境质量评价的研究鲜少报道。因此,本研究基于多时相遥感影像数据,运用生态环境评价指数模型,对南瓮河自然保护区的生态环境质量进行评价及动态分析,揭示保护区建立前后和保护区内外生态环境质量的时空变化特征和规律,为保护区生态环境的治理与保护及相关政策法规的制定提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

南瓮河自然保护区成立于1999年12月,2003年6月晋升为国家级自然保护区,其位于大兴安岭东部林区东南部、大兴安岭支脉伊勒呼里山南麓(51°05′07″—51°39′24″N,125°07′55″—125°50′05″E),总面积2295.23 km²,其中核心区面积为747.85 km²,试验区面积为909.09 km²,缓冲区面积为638.29 km²(图1)。地势北高南低,西高东低,海拔一般在500~800 m,最低海拔为370 m,最高为1044 m。保护区内河网密布,主要河流有南瓮河、南阳河、砍都河。研究区属寒温带大陆性季风气候,年均气温-3℃,≥10℃年积温1400~1600℃,年均降水500 mm,80%的降水集中于7—8月,5—6月有明显的旱象,森林火灾较多。保护区内的乔木以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)等为主,灌木植被主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、越桔(*Vaccinium vitis-idaea*)和丛桦(*Betula dahurica*)等,沼泽草本植物以杜香(*Ledum palustre*)、苔藓等为主。

1.2 数据来源与预处理

本研究选用的遥感数据为1990年5月24日、2000年6月20日的Landsat5 TM影像和2015年6月14日的Landsat8 OLI和TIRS影像,3个时期影像的时相基本一致,从而保证了数据的一致性和结果的可比性。遥感影像通过美国地质勘探局官方网站(<http://glovis.usgs.gov/>)免费获取。

在ENVI 5.1软件中首先用Radiometric Calibration工具对3个时期的遥感影像进行辐射定标,其参数可自动从元文件获取,该操作将像元的灰度值

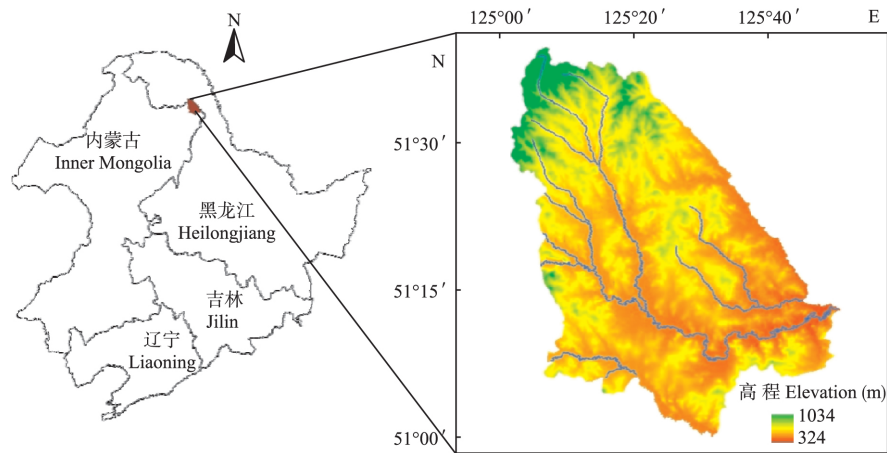


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of the study area.

转换成辐亮度值,这对不同类别影像(TM和OLI)的RSEI对比尤为重要;其次使用FLASH大气校正工具对经过辐射定标的遥感影像的可见光和近红外波段进行大气校正,其中传感器类型根据影像选择,影像区域平均高程设置为0.47 km,成像时间从影像元文件获取,大气模型根据成像时间和纬度选择亚极地夏季(Sub-Arctic Summer,SAS)标准大气模型,气溶胶模式选择乡村模式,K-T反演采用默认设置,其他参数采用缺省值,该步骤可以消除大气对植被指数提取的影响,有助于对不同时相的RSEI进行对比;对于TM6波段和TIRS10波段使用gain和offset手动定标;然后对不同时相的影像进行配准,配准使用二次多项式和最近邻元法且将均方根误差控制在0.5个像元内;最后使用南瓮河自然保护区的矢量边界进行裁剪,得到研究区的影像数据。

辅助数据包括空间分辨率为30 m的数字高程模型(DEM)数据、保护区内外的土地利用数据,其中DEM数据通过地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)下载;土地利用数据是以3期遥感影像为数据源,在面向对象的eCognition软件平台支持下,通过多尺度分割、特征提取与分类规则集建立、自动分类等步骤来获取到的。

1.3 遥感生态指数评价方法

1.3.1 指标选取 徐涵秋^[15]提出的遥感生态指数(remote sensing ecological index,RSEI)选取了绿度、湿度、干度和热度4个综合反映生态环境质量的指标,分别用归一化植被指数、湿度分量、干度指数和地表温度来代替。本研究各指标的计算与徐涵秋^[15]基本一致,但计算热度指标时,地表比辐射率的取值与已有研究不同^[17-19]通过对几种比辐射率取值的

对比研究^[28],本研究采用Valor等^[29]提出的方法进行比辐射率的运算。

1) 湿度指标。土壤湿度是研究土壤退化等生态环境的重要指标。缨帽变换是一种有效的数据压缩和消除波段光谱相关性的方法。通过缨帽变化获取的湿度分量能够较好地反映地表植被、水体和土壤的湿度状况。基于Landsat 5 TM和Landsat8 OLI数据的湿度分量(WET)计算公式如下^[30-31]:

$$WET_{1990/2000} = 0.0315\rho_{\text{blue}} + 0.2021\rho_{\text{green}} + 0.3102\rho_{\text{red}} + 0.1594\rho_{\text{NIR}} - 0.6806\rho_{\text{SWIR1}} - 0.6109\rho_{\text{SWIR2}} \quad (1)$$

$$WET_{2015} = 0.1511\rho_{\text{blue}} + 0.1972\rho_{\text{green}} + 0.3283\rho_{\text{red}} + 0.3407\rho_{\text{NIR}} - 0.7117\rho_{\text{SWIR1}} - 0.4559\rho_{\text{SWIR2}} \quad (2)$$

式中: ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别为对应于各影像的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外1波段和短波红外2波段的反射率。

2) 绿度指标。归一化植被指数(NDVI)作为反映植被状况的重要遥感参数,其利用植物叶面在红光波段强吸收和近红外波段强反射特性组合而成,计算公式如下:

$$NDVI = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}}) \quad (3)$$

3) 干度指标。地表的“干化”通常由裸土和建筑用地造成,因此选择建筑指数(IBI)和裸土指数(SI)来合成干度指数(NDSI),计算公式如下为^[15]:

$$NDSI = (SI + IBI) / 2 \quad (4)$$

$$SI = [(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{red}}) - (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{NIR}})] / [(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{red}}) + (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{NIR}})] \quad (5)$$

$$IBI = \{ 2\rho_{\text{SWIR1}} / (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) - [(\rho_{\text{NIR}} / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}}) + \rho_{\text{green}} / (\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{SWIR1}}))] \} / \{ 2\rho_{\text{SWIR1}} / (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) + [(\rho_{\text{NIR}} / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}}) + \rho_{\text{green}} / (\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{SWIR1}}))] \} \quad (6)$$

4) 热度指标。热度指标(LST)使用地表温度来代替。Landsat8 含有 10 波段和 11 波段两个热红外波段而 10 波段反演地表温度效果比 11 波段更精确^[32], 计算公式如下:

$$L_{6/10} = gain \times DN + offset \quad (7)$$

$$T_{6/10} = K_2 / \ln(K_1 / L_{6/10} + 1) \quad (8)$$

$$LST = T_{6/10} / [1 + (\lambda_{6/10} \times T_{6/10} / \rho) \ln \varepsilon_{6/10}] \quad (9)$$

式中: $gain$ 和 $offset$ 为波段的增益和偏置; K_1 和 K_2 为定标参数; λ 为波段的中心波长, 这些参数可以从影像的头文件中获取。

根据 Valor 等^[29]提出的植被指数混合模型, 当 NDVI 值在 0.1~0.72 之间时 ε 的计算公式如下:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d_\varepsilon \quad (10)$$

$$P_v = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (11)$$

式中: P_v 为植被覆盖度; d_ε 为地形几何形状, 对于粗糙表面 d_ε 可取均值 0.015; 当 $NDVI \leq 0$, 被认为是水体 ε 取值 0.995; $0 < NDVI \leq 0.1$ 时, 被认为是纯裸土像元 $\varepsilon_s = 0.96$; $NDVI > 0.72$ 时, 被认为是纯植被像元; $\varepsilon_v = 0.985$ ^[28, 33]。

1.3.2 遥感生态指数的构建 RSEI 模型采用主成分分析方法耦合 4 个指标。由于各个指标的量纲不同, 进行主成分变换前, 对各个指标进行标准化处理, 使其数值在 [0, 1] 之间, 标准化的公式为:

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

式中: NI 为指标归一化后的值; I 为该指标的值; I_{max} 和 I_{min} 分别代表该指标的最大值和最小值。

对标准化后的 4 个指标波段合成并进行主成分分析, 然后通过 1 减去第一主成分构建原始 RSEI₀。

$$RSEI_0 = 1 - \{PC_1 [(NDVI, WET, LST, NDSI)]\} \quad (13)$$

对 RSEI₀ 使用式(12)进行标准化, RSEI 取值在 [0, 1], RSEI 值越大代表生态环境越好。RSEI 指数不适宜水域面积较大的区域, 而本研究区的水域面积所占比例不足 1%, 因此不需要对水体进行独立提取与掩膜。

2 结果与分析

2.1 遥感生态指数的主成分变换

由表 1 可以看出, 在 1990、2000 和 2015 年 4 个指标在第一主成分的贡献率分别为 97.0%、78.6% 和 94.7%, 表明第一主成分已经集成了 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 指标都为正值, 说明二者与生态环境质量呈正相关关系; 代表干度的 NDSI 和代表热

表 1 4 个指标的主成分分析

Table 1 Principal component analysis of four factors

年份 Year	指标 Indicator	第一 主成分 PC1	第二 主成分 PC2	第三 主成分 PC3	第四 主成分 PC4
1990	归一化植被指数 NDVI	0.7276	0.6847	0.0161	0.0393
	湿度分量 WET	0.6849	-0.7283	-0.0170	0.0140
	干度指数 NDSI	-0.0382	0.0167	-0.0040	0.9991
	地表温度 LST	-0.0002	-0.0235	0.9997	0.0036
	特征值 Eigenvalue	0.0075	0.0002	0	0
	特征值贡献率 Percent of Eigenvalue(%)	97.0	2.8	0.2	0.0
2000	归一化植被指数 NDVI	0.5160	0.8543	0.0625	-0.0002
	湿度分量 WET	0.3288	-0.2649	0.9065	0.0017
	干度指数 NDSI	-0.7909	-0.472	0.4176	0.0004
	地表温度 LST	-0.0002	-0.0002	0.0012	-0.9990
	特征值 Eigenvalue	0.0090	0.0024	0.0001	0
	特征值贡献率 Percent of Eigenvalue(%)	78.6	21.1	0.3	0.0
2015	归一化植被指数 NDVI	0.8053	0.5921	-0.0092	0.0279
	湿度分量 WET	0.5894	-0.8046	0.0153	0.0707
	干度指数 NDSI	-0.0644	0.0411	0.0382	0.9964
2015	地表温度 LST	-0.0008	-0.0162	-0.9991	0.0389
	特征值 Eigenvalue	0.0021	0.0001	0	0
	特征值贡献率 Percent of Eigenvalue(%)	94.7	5.0	0.3	0.0

度的 LST 指标都为负值, 它们与生态环境质量呈负相关关系。4 个指标在其他几个主成分中, 取值大小和符号都不稳定, 从而丢失某些信息。3 个时期的 NDVI 值均为正且最大, 说明绿度是构建遥感生态指数、对生态环境质量评价贡献率最大的指标, 也反映出植被的生长状况和植被的分布密度直接影响整个研究区的生态环境质量; 干度的贡献率大于热度, 说明干度指标更能反映生态环境质量的下降。

2.2 生态环境质量分级与变化检测

通过主成分分析, 分别运用 3 个时期的第一主成分分析结果确定各指标的权重并生成 RSEI, 得到研究区 3 个时期的 RSEI 影像, 并对 RSEI 的均值进行统计。1990、2000、2015 年研究区的 RSEI 均值分别为 0.55、0.70、0.83, 呈逐渐上升趋势, 表明研究区的生态环境质量整体趋于好转。

2.2.1 生态环境质量分级 参考已有分级标准^[15], 将各年份的 RSEI 值以 0.2 等间隔划分为 5 个等级, RSEI 分级对应为 [0, 0.2)、[0.2, 0.4)、[0.4, 0.6)、[0.6, 0.8)、[0.8, 1.0], 分别对应生态环境质量差、较差、中等、良、优, 统计各个等级对应面积及百分比(表 2)并分析变化。

1990 年生态环境质量以良为主, 所占比例超过一半, 而生态环境质量中等和较差所占比例很大, 约 43%, 说明 1990 年保护区整体生态环境质量并不理

表 2 1990—2015 年间 RSEI 各等级面积及百分比
Table 2 Area and proportion of RSEI classes during 1990—2015

RSEI 等级 RSEI Level	1990		2000		2015	
	面积 Area(km ²)	百分比 Percentage	面积 Area(km ²)	百分比 Percentage	面积 Area(km ²)	百分比 Percentage
差 Poor	21.58	0.9	0.02	0	0	0
较差 Inferior	666.47	29.0	44.28	1.9	0	0
中等 Medium	319.47	13.9	466.77	20.3	19.89	0.9
良 Good	1232.19	53.7	1220.18	53.2	632.72	27.6
优 Excellent	55.52	2.5	563.98	24.6	1642.62	71.5

想.2000 年 ,生态环境质量集中于中等及以上分布 , 优、良所占比例超过四分之三 较差所占比例下降了 27.1% ,保护区生态环境质量有所改善.2015 年 ,生态环境质量得到极大改善 ,差、较差所占比例接近于零 ,几乎整个保护区的生态环境质量都处于优、良等级.

1990—2015 年 ,保护区生态环境质量呈现“一增四减”的趋势 ,即优等级的面积增加 ,其他等级所占面积都在减少.优等级的面积增加 1587.10 km² ,所占比例从 2.5% 上升到 71.6%; 面积减少的以较差和良等级为主 ,分别减少 666.47 和 599.47 km² ,所占比例分别下降了 29% 和 26.1%.

研究区的森林分为落叶阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶灌丛和稀疏灌丛 4 类.1990—2015 年 ,各类型分布比例为落叶阔叶林>落叶针叶林>落叶阔叶灌丛>稀疏灌丛 ,落叶阔叶林和落叶针叶林所占比例较大 ,其面积略有减少 ,落叶阔叶灌丛和稀疏灌丛的面积略有增加(表 3) .

1990 年 ,生态环境质量优等级零散分布于整个保护区内 ,北部有一部分区域生态状况很好; 生态环境差、较差和中等等级主要分布于河道及其附近.2000 年 ,生态环境优等级主要分布在保护区的南部、西部和西北地区 ,良等级分布在保护区的东南和北部地区.2015 年 ,优等级遍布于整个保护区 ,良等级主要是在河道及其附近和北部的小部分区域(图 2) .1990—2015 年 ,河道及其附近区域的生态环境质量比其他区域略差 ,一方面因为河道及其附近区域容易受到流水的侵蚀作用 ,使其附近生长的植被多是草本沼泽; 另一方面影像的获取时间为 5—6 月 ,此时积雪融化且整个区域的温度较低 ,植被的生长状况较差.

2.2.2 生态环境质量变化检测 在生态环境质量指数 5 个等级基础上 ,对保护区的生态环境变化进行差值检测 ,从而分析保护区内生态环境质量的变化.根据差值结果 ,将负值、0、正值依次划分为生态环境

变差、不变和变好 3 个等级(表 4) .在研究的 3 个时间段内 ,无论是核心区、缓冲区还是试验区 ,生态环境质量变化趋势一致 ,即生态变好>不变>变差.1990—2000 年 ,生态环境变差趋势为核心区>试验区>缓冲区 ,2000—2015 和 1990—2015 年生态环境变差趋势为缓冲区>核心区>试验区.1990—2015 年间 ,整个研究区生态环境质量变好的面积为 2094.74 km² ,所占比例为 91.4%; 生态环境质量不变的面积为 180.48 km² ,所占比例为 7.8%; 而生态环境质量变差的面积所占比例不足 1%. 其中 ,核心区、缓冲区、试验区的生态环境在局部区域有变差 ,所占比例依次为 0.2%、0.5%、0.1%.

1990—2000 年 ,核心区、缓冲区的北部及道路附近的生态环境变差; 2000—2015 年 ,核心区生态

表 3 1990—2015 年间 RSEI 各等级森林类型
Table 3 Vegetation type of RSEI classes during 1990—2015

等级 Level	树林种类 Vegetation type	百分比 Percentage		
		1990	2000	2015
差 Poor	落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	0.0	0.0	0.0
	落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	0.0	0.0	0.0
	落叶阔叶灌丛 Deciduous broadleaf shrub	0.0	0.0	0.0
	稀疏灌丛 Sparse shrub	0.0	0.0	0.0
	落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	5.4	0.2	0.0
较差 Inferior	落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	2.3	0.1	0.0
	落叶阔叶灌丛 Deciduous broadleaf shrub	0.0	0.0	0.0
	稀疏灌丛 Sparse shrub	0.0	0.0	0.0
	落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	9.5	3.7	0.1
	落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	4.5	1.6	0.1
中等 Medium	落叶阔叶灌丛 Deciduous broadleaf shrub	0.1	0.4	0.0
	稀疏灌丛 Sparse shrub	0.0	0.1	0.0
	落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	39.7	33.4	7.4
良 Good	落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	31.5	23.1	2.3
	落叶阔叶灌丛 Deciduous broadleaf shrub	3.2	1.9	2.1
	稀疏灌丛 Sparse shrub	0.6	0.5	0.7
	落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	1.8	18.7	48.4
	落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	1.3	14.7	37.1
优 Excellent	落叶阔叶灌丛 Deciduous broadleaf shrub	0.1	1.4	1.6
	稀疏灌丛 Sparse shrub	0.0	0.2	0.2

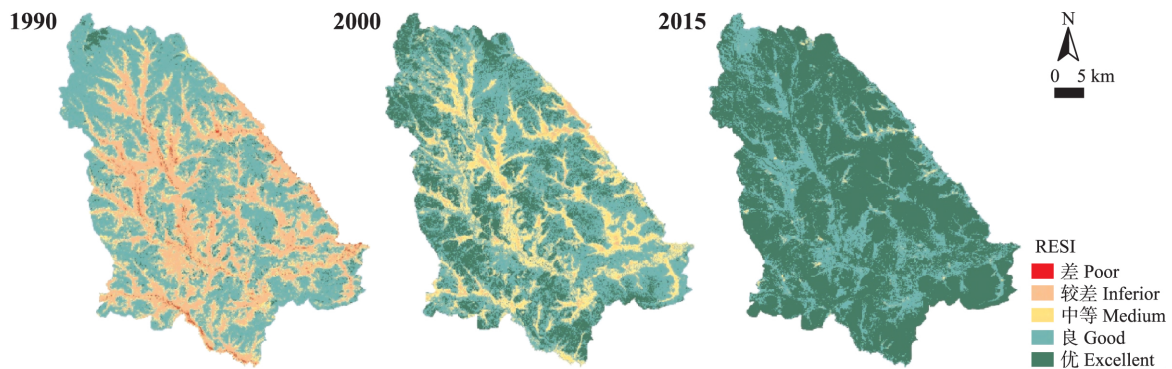


图2 1990、2000、2015年南瓮河自然保护区 RSEI 分级

Fig.2 RSEI class distribution of the Nanweng River Nature Reserve in 1990, 2000, 2015.

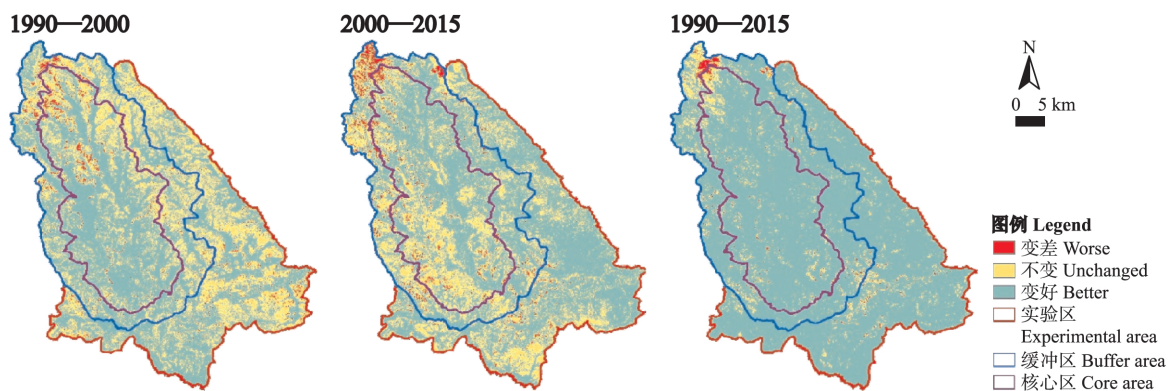


图3 1990—2015 南瓮河自然保护区 RSEI 变化

Fig.3 RSEI change of the Nanweng River Nature Reserve during 1990–2015.

变差区域零散分布在其西部和东南部,缓冲区生态环境变差区域集中在其北部且较 1990—2000 年有扩张趋势(图 3)。1990—2015 年,整个保护区的生态环境质量趋于好转,最主要原因是保护区的建立,人为设定了不同保护和管理措施的区域,减少了人类干扰;其次与保护区的保护制度(《黑龙江南瓮河国家级自然保护区保护条例》^[34])等的制定、分区管理,以及森林抚育、人工造林、补植补造等生态保护工程措施和非工程防护措施的实施密切相关。1990—2015 年,核心区、缓冲区的生态环境变差分布区域类似,集中分布在区域北部,零星分布在东南部和部分道路附近,试验区生态变差区域位于其东南部。核心区、缓冲区的土壤类型为暗棕壤和棕色针叶林土,土质较细、土层较薄,容易发生侵蚀^[35],且该地区海拔集中在 700 m 以上,属于中低山、丘陵地区,坡度大多为 15°以上,土壤侵蚀较低海拔平坦地区严重^[36],生态环境较脆弱;其次核心区和缓冲区的北部地区发生过严重火灾,而火灾后的土地利用类型(图 4)发生了较大改变,从 1990 年的落叶阔叶林转变为 2015 年的落叶阔叶灌丛和稀疏灌丛,植被

类型的变化改变了植被的分布密度,从而影响区域生态环境质量。缓冲区、试验区的东南部,主要是因为人类活动相对频繁,体现在交通用地面积增加,且道路两旁集中分布着人工建设用地,地表的进一步干化导致生态环境质量退化。

2.3 保护区内外生态环境质量的对比

现以保护区的边界为基准,向外 10 km 的距离生成 10 km 缓冲带,得到保护区外 10 km 缓冲带面积为 2541.24 km²,然后对保护区外 10 km 缓冲带的 RSEI 进行分级并做变化检测,对比分析 1990—2015 年保护区内外生态环境质量变化情况。由于保护区内外面积不一样,这里只分析类变化所占的百分比。

1990—2015 年,保护区内的生态环境质量以变好为主,所占比例高达 91.4%,变差所占比例不到 1%。保护区外 10 km 缓冲带的生态环境质量以不变占主导地位,所占比例为 58.4%,变好的次之,约占三分之一;变差的比例为 3.6%,比保护区内高出了将近 3.5 倍,说明保护区的建立对生态环境质量的提高有很大帮助。保护区内外生态环境质量变化分布区域不一致(图 5)。保护区外 10 km 缓冲带生态

表 4 1990—2015 南瓮河自然保护区 RSEI 等级变化检测
Table 4 RSEI classes change detection of the Nanweng River Nature Reserve during 1990–2015

年份 Year	功能分区 Function division	类别 Class	类面积 Class area (km ²)	类比例 Class ratio (%)
1990—	核心区 Core area	变差 Worse	19.68	0.9
2000		不变 Unchanged	215.89	9.4
		变好 Better	512.22	22.3
	缓冲区 Buffer area	变差 Worse	16.50	0.7
		不变 Unchanged	249.91	10.9
		变好 Better	371.90	16.2
	试验区 Experimental area	变差 Worse	17.12	0.7
		不变 Unchanged	363.02	15.8
		变好 Better	529.00	23.1
2000—	核心区 Core area	变差 Worse	21.48	0.9
2015		不变 Unchanged	262.51	11.5
	缓冲区 Buffer area	变差 Worse	39.60	1.7
		不变 Unchanged	238.52	10.4
	试验区 Experimental area	变好 Better	360.18	15.7
		变差 Worse	10.06	0.4
	核心区 Core area	不变 Unchanged	252.12	11.0
		变好 Better	646.96	28.2
1990—	核心区 Core area	变差 Worse	4.60	0.2
2015		不变 Unchanged	56.69	2.4
	缓冲区 Buffer area	变好 Better	686.50	30.0
		变差 Worse	12.34	0.5
	试验区 Experimental area	不变 Unchanged	75.68	3.3
		变好 Better	550.29	24.0
	核心区 Core area	变差 Worse	3.08	0.1
		不变 Unchanged	48.11	2.1
	缓冲区 Buffer area	变好 Better	857.95	37.4
		变差 Worse		

环境质量不变的区域主要在北部、西部和西南部;变好的区域主要在保护区外 10 km 缓冲带的南部地区和一些河道附近,南部地区和河道附近的海拔低,生态环境相对稳定,且这里的土地利用类型(图 4)由 1990 年的草本湿地转变成 2015 年的落叶阔叶林和落叶阔叶灌丛,这种转变有利于生态环境质量的改善;生态环境变差的区域主要集中于保护区外 10 km 缓冲带的东南部和北部,东南部较其他区域而言,交通用地和耕地所占面积较大,同时采矿场的面积也在增加,说明人类更容易进入该地区并进行生产、开采等活动,因此,人类活动干扰直接影响该区域的植被生长以及环境状况;北部地区生态环境质量变差的情况与保护区内北部变差的原因类似,火灾的发生导致森林植被被毁,且火灾迹地的植被处于未完全恢复状态,区域生态环境质量变差。

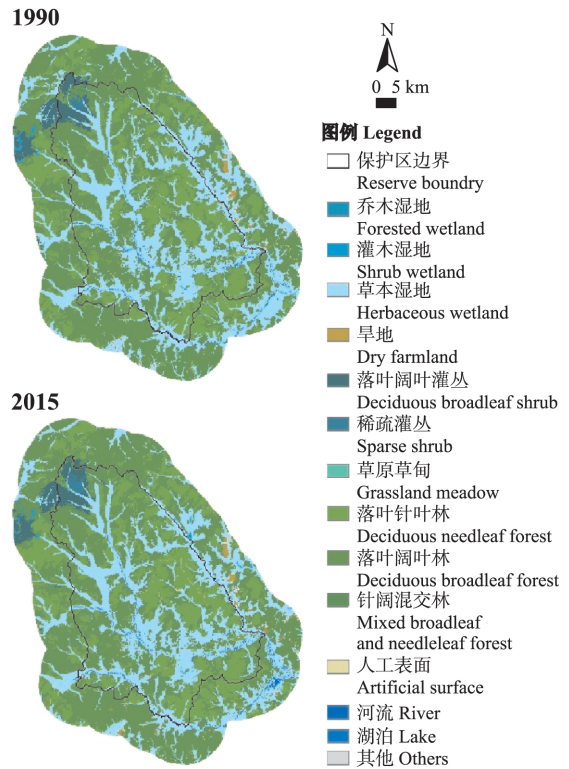


图 4 1990—2015 南瓮河自然保护区内外土地利用的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of land use of the inside and outside of Nanweng River Nature Reserve during 1990–2015.

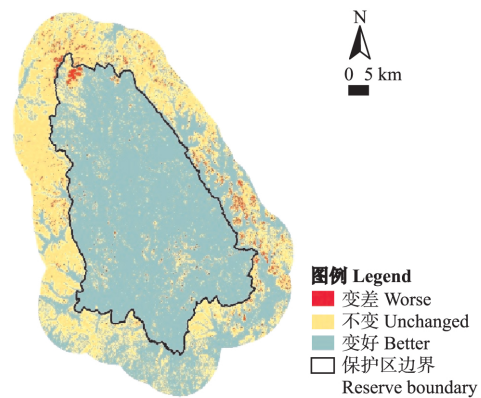


图 5 南瓮河自然保护区内外 RSEI 变化
Fig.5 RSEI change inside and outside of the Nanweng River Nature Reserve during 1990–2015.

3 结 论

本研究基于多期遥感影像数据,运用遥感生态指数评价模型,对南瓮河自然保护区 1990—2015 年的生态环境质量进行评价和变化分析,主要结论包括:

1) 由归一化植被指数、湿度分量、地表温度和干度指数构建的 RSEI 能够较好地反映保护区的生态环境质量状况及其时空差异。其中,归一化植被指

数和湿度分量与生态环境质量呈正相关关系;地表温度和干度指数与生态环境质量呈负相关关系,而归一化植被指数对生态环境质量评价贡献率最大。

2) 保护区 1990、2000、2015 年的 RSEI 均值分别为 0.55、0.70 和 0.83,呈增加趋势;各时期生态环境质量优良以上所占比例逐年增加,优良等级中森林所占比例也增加。无论是核心区、缓冲区还是试验区,RSEI 在 1990—2015 年变化趋势为变好>不变>变差,整个保护区生态变好所占比例高达 91.4%,这与保护区的建立、管理以及相关工程措施和非工程防护措施的实施密切相关。核心区、缓冲区生态环境质量变差的区域主要位于其北部、零星分布在东南部及部分道路附近,试验区生态环境变差区域主要在其东南部。核心区、缓冲区的北部海拔高、坡度大等造成该区域生态环境较脆弱;其次,北部地区发生过火灾,森林植被被严重破坏且未恢复至原始状况。道路附近及试验区东南部生态环境变差与人类干扰强度的增加密不可分。

3) 保护区外 10 km 缓冲带生态环境质量变化趋势为不变>变好>变差。通过缓冲距离确定的 10 km 缓冲带地处偏远,人类破坏少,但管理部门未对这些区域实施任何保护措施,所以生态环境质量以不变为主;生态变好的区域主要位于保护区外 10 km 缓冲带的南部低海拔地区及河道附近;生态环境质量变差的区域面积最小,主要位于保护区外 10 km 缓冲带的东南部人类活动密集区和北部森林火灾区。

1990—2015 年,南瓮河自然保护区内外的生态环境都趋于好转。在设立保护区之前,南瓮河的生态环境质量处于中等、良状态,因为保护区的位置比较偏远,人类活动对整个区域的影响不是很剧烈,但人类进入的区域生态环境质量明显下降,因此,完善保护区的管理制度、严禁人为干扰和破坏保护区将有利于生态环境质量的进一步改善。其次,保护区内火灾的频繁发生使得保护区的森林生态系统遭受破坏,而系统的恢复需要漫长的时间,因此可以充分应用遥感技术对保护区进行实时全面的动态监测,找出容易失火地区并加强防火保护措施以减少火灾导致的区域生态环境质量的下降。

RSEI 的各指标提取完全基于遥感影像数据,指标获取容易且计算简单,人为影响小,但遥感影像数据的质量直接影响指标获取的精度。本研究所选的 3 期遥感影像数据的时间跨度大,使用了 TM 和 OLI 两种传感器获得数据源,传感器系统设置的差异对

结果存在一定影响;其次,3 期影像数据时相基本一致,但 1990 和 2015 年的获取时差达到 26 d,植被的生长状况不一致,这在一定程度上影响了结果的可比性;2000 年的遥感影像上有 0.04% 的薄云,尽管对本研究结果趋势影响不大,但会影响单期遥感影像数据生态环境质量评价结果的准确性。本研究生态环境质量评价完全基于生态环境特征,在今后的研究中,能够将社会经济因子、人类活动因子等加入该评价体系并对生态环境质量进行综合评价。

参考文献

- [1] China National Environmental Monitoring Centre (中国环境监测总站). Research on Quality Evaluation of Eco-environment in China. Beijing: China Environmental Science Press, 2004 (in Chinese)
- [2] Song W-B (宋文彬), Zhang Y-R (张翼然), Zhang L (张玲), et al. Evaluation of service valuation of marsh ecosystem in Honghe Nation Nature Reserve. *Wetland Science (湿地科学)*, 2014, **12**(1): 81-88 (in Chinese)
- [3] Chen Q (陈强), Chen Y-Q (陈云强), Wang M-J (王萌杰), et al. Ecosystem quality comprehensive evaluation and change analysis of Dongting Lake in 2001—2010 based on remote sensing. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2015, **35**(13): 4347-4356 (in Chinese)
- [4] Zhu W-H (朱卫红), Miao C-Y (苗承玉), Zheng X-J (郑小军), et al. Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2014, **34**(6): 1379-1390 (in Chinese)
- [5] Xu X-Q (许雪青), Liu Z-B (刘忠波), Zhang J (张晋), et al. Assessment of the marine ecological environment in Bohai Sea based on A Variable Fuzzy Sets Method. *Transactions of Oceanology and Limnology (海洋湖沼通报)*, 2014(3): 51-57 (in Chinese)
- [6] Zhu L (朱蕾). The Study on evaluation of Yangzhou Urban Ecological Environmental Quality based on Principal Component Analysis. Master Thesis. Yangzhou: Yangzhou University, 2013 (in Chinese)
- [7] Li L (李丽), Zhang H-T (张海涛). Assessment model of townlet eco-environmental quality based on BP-artificial neural network. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2008, **19**(12): 2693-2698 (in Chinese)
- [8] State Environmental Protection Administration (国家环保总局). Technical Criterion for Eco-environmental Status Evaluation (HJ/T 192-2006). Beijing: China Envi-

- ronmental Science Press, 2006 (in Chinese)
- [9] Dong S-Y (董思宜), Yang X (杨 熙), Wang X-L (王秀兰), *et al.* Assessment of the eco-environmental quality in the Yongding River basin. *China Population, Resources and Environment* (中国人口·资源与环境), 2013, **23**(11): 348-351 (in Chinese)
- [10] Li N-Y (李妮娅), Tang Y (唐 瑶), Yang L (杨 丽), *et al.* Ecological environment quality of Baishui River basin based on remote sensing technology. *Journal of Central China Normal University* (Natural Sciences) (华中师范大学学报: 自然科学版), 2013, **47**(1): 103-107 (in Chinese)
- [11] Chen N (陈 楠), Wang Z-F (望志方). Evaluation and analysis of Hubei Province eco-environmental status from 2005 to 2009. *Environmental Monitoring in China* (中国环境监测), 2012, **28**(4): 21-24 (in Chinese)
- [12] Zhang P (张 沛), Xu H-L (徐海量), Du Q (杜 清), *et al.* Change of ecological conditions in the mainstream area of the Tarim River based on RS and GIS during the period of 1990-2010. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2017, **34**(2): 416-422 (in Chinese)
- [13] Ye Y-H (叶有华), Liang Y-X (梁永贤), Shen Y-Q (沈一青), *et al.* Some issues related to "Technical Criterion for Eco-environmental Status Evaluation (Trial Implementation)". *Tropical Geography* (热带地理), 2009, **29**(4): 404-406 (in Chinese)
- [14] Xu H-Q (徐涵秋). A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(24): 7853-7862 (in Chinese)
- [15] Xu H-Q (徐涵秋). A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2013, **33**(5): 889-897 (in Chinese)
- [16] Liu Z-C (刘智才), Xu H-Q (徐涵秋), Li Y (李 乐), *et al.* Ecological change in the Hangzhou area using the remote sensing based ecological index. *Journal of Basic Science and Engineering* (应用基础与工程科学学报), 2015, **23**(4): 728-739 (in Chinese)
- [17] Song H-M (宋慧敏), Xue L (薛 亮). Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City, Northwest China based on RSEI model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(12): 3913-3919 (in Chinese)
- [18] Li F-L (李粉玲), Chang Q-R (常庆瑞), Shen J (申 健), *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 Shanxi Province, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(12): 3811-3817 (in Chinese)
- [19] Zhang C (张 灿), Xu H-Q (徐涵秋), Zhang H (张 好), *et al.* Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of Southeastern China: Changting County, Fujian Province. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2015, **30**(6): 917-928 (in Chinese)
- [20] Zhang Y-M (张玉民), Sun T-H (孙天洪). Nenjiang fountainhead: Comprehensive benefit evaluation of the forest wetland on Nanweng River Nature Reserve. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design* (内蒙古林业调查设计), 2002, **25**(1): 22-23 (in Chinese)
- [21] Ren J-T (任健滔), Wang H-Y (王宏燕). Comprehensive assessment of Nanwenghe Nature Reserve. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2012, **40**(18): 9840-9842 (in Chinese)
- [22] Lin J-J (林建军), Zhou H (周 宏). Forest fires in Nanwonghe National Nature Reserve. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design* (内蒙古林业调查设计), 2009, **32**(4): 74-77 (in Chinese)
- [23] Hu L-L (胡林林), Wang L-Z (王立中), Li H-R (李慧仁), *et al.* Landscape pattern in Nanwenghe Nature Reserve and its driving forces. *Protection Forest Science and Technology* (防护林科技), 2015(7): 18-21 (in Chinese)
- [24] Wang L-Z (王立中), Hu L-L (胡林林), Li H-R (李慧仁). Driving forces of landscape changes in Nanwenghe Nature Reserve based on RS and GIS. *Protection Forest Science and Technology* (防护林科技), 2014(6): 36-38 (in Chinese)
- [25] Liu S-Z (刘三章), Wang L-Z (王立中), Li H-R (李慧仁), *et al.* Estimation on carbon storage in Nanwenghe Nature Reserve of Heilongjiang Province. *Protection Forest Science and Technology* (防护林科技), 2014(4): 8-9 (in Chinese)
- [26] Li H-R (李慧仁), Wang L-Z (王立中), Liu X-S (刘学爽), *et al.* Aboveground biomass in Nanwenghe National Nature Reserve based on 3S technology. *Protection Forest Science and Technology* (防护林科技), 2016(4): 64-66 (in Chinese)
- [27] Liu F-R (刘芳蕊). Study on Optimal Disposition of Vegetation of Water Conservation Capacity in Nenjiang Fountainhead. Master Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2015 (in Chinese)
- [28] Liu F (柳 菲). Researching of Remote Sensing Inversion Method on Land Surface Emissivity. Master Thesis. Wuhan: Hubei University, 2012 (in Chinese)
- [29] Valor E, Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **57**: 167-184

- [30] Baig MHA , Zhang LF , Shuai T , *et al.* Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters* , 2014 , **5**: 423–431
- [31] Crist EP. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment* , 1985 , **17**: 301–306
- [32] Yu XL , Guo XL , Wu ZC. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-Comparison between radiative transfer equation-based method , split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing* , 2014 , **6**: 9829–9852
- [33] Qin Z-H (覃志豪) , Li W-J (李文娟) , Xu B (徐斌) , *et al.* The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6. *Remote Sensing for Land & Resources* (国土资源遥感) , 2004(3) : 28–32 (in Chinese)
- [34] The Standing Committee of Heilongjiang Provincial People's Congress (黑龙江人民代表大会常务委员会) . Regulations on the Protection of Nanweng River National Nature Reserve in Heilongjiang Province [EB/OL]. (2009-06-01) [2018-02-01]. <http://www.hljrd.gov.cn/detail.jsp?urltype=news.NewsContentUrl&wbtreeid=1193&wbnewsid=4718> (in Chinese)
- [35] The Inner Mongolia Autonomous Region Census Office (内蒙古自治区普查办公室) , The Inner Mongolia Autonomous Region Soil and Fertilizer Workstation (内蒙古自治区土壤肥料工作站) . Inner Mongolia Soil. Beijing: Science Press , 1994 (in Chinese)
- [36] Zhao M-S (赵明松) , Li D-C (李德成) , Cheng X-F (程先富) , *et al.* Spatial characteristics of soil erosion and its relationship to topography in Dabie Mountains of west Anhui. *Journal of Anhui Normal University* (Natural Science) (安徽师范大学学报: 自然科学版) , 2017 , **40**(3) : 265–270 (in Chinese)

作者简介 刘盼,女,1993年生,硕士研究生.主要从事生态环境遥感研究. E-mail: liupan_xhsfdx2012@163.com

责任编辑 杨弘

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. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3347–3356

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. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2018 , **29**(10) : 3347–3356 (in Chinese)