

DOI: 10.5846/stxb201912042635

邱成, 胡金明, 杨飞龄. 基于 NDVI 的云南省自然保护区保护成效分析. 生态学报, 2020, 40(20): 7312-7322.

Qiu C., Hu J.M., Yang F.L. Analysis of conservation effectiveness of nature reserves based on NDVI in Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7312-7322.

## 基于 NDVI 的云南省自然保护区保护成效分析

邱 成<sup>1,2,3</sup>, 胡金明<sup>1,3,\*</sup>, 杨飞龄<sup>1,3</sup>

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091

2 玉溪师范学院地理与国土工程学院, 玉溪 653100

3 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091

**摘要:** 保护成效评估是自然保护区管理和优化的重要基础。选取云南省国家级和省级自然保护区, 以 SPOT\_Vegetation 提供的归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, 简写 NDVI), 基于 NDVI 变化趋势 (采用一元线性趋势法) 和 NDVI 变化稳定性 (采用变异系数法), 比较分析了自然保护区内外的植被生长状况, 评估了自然保护区的保护成效。结果表明: (1) 1998—2015 年, 云南省国家级和省级自然保护区内、外部 NDVI 总体呈显著增长, 内、外部 NDVI 呈显著增长的自然保护区分别占总数的 64.81%、79.63%, 体现自然保护区总体具有较好的保护成效, 其集中分布于滇中、滇东北及滇东南。(2) 云南省国家级和省级自然保护区内、外部 NDVI 变异系数无显著性差异, 51.85% 的自然保护区内部植被长势比其外部稳定, 具有较好的保护成效, 其主要分布在滇西、滇西南、滇东南和滇东北, 但未能反映出自然保护区带来的保护成效的内外部明显的分异。(3) 云南省国家级自然保护区的保护成效总体上要好于省级自然保护区。(4) 就不同类型的自然保护区而言, 森林生态类自然保护区保护成效较好, 野生植物类和野生动物类保护成效一般, 湿地生态类较差。该研究能为区域自然保护区保护成效评价方法的探索提供参考, 研究结果可以为云南省自然保护区优化和完善提供支撑。

**关键词:** NDVI; 自然保护区; 保护成效; 变异系数; 云南

## Analysis of conservation effectiveness of nature reserves based on NDVI in Yunnan Province

QIU Cheng<sup>1,2,3</sup>, HU Jinming<sup>1,3,\*</sup>, YANG Feiling<sup>1,3</sup>

1 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 School of Geography and Land Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China

3 Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Ecoscience, Yunnan University, Kunming 650091, China

**Abstract:** Assessment of the conservation effectiveness of nature reserves (NRs) is an important basis for the management and optimization of NRs. National NRs (NNRs) and provincial NRs (PNRs) in Yunnan Province were chosen for this study and the normalized difference vegetation index (NDVI) was provided by SPOT\_Vegetation. Based on the trend of NDVI change (the method of single linear trend) and the stability of NDVI change (the method of coefficient of variation), the study compared and analyzed the differences of plant production between internal and external NRs to evaluate the conservation effectiveness of the NRs. The results showed that: (1) the whole conservation effectiveness of NNRs and PNRs in Yunnan Province was good from 1998 to 2015. The NDVI of internal and external NRs increased significantly, and the proportion of the number of internal and external NRs with significant NDVI growth was 64.81% and 79.63% respectively. In terms of spatial distribution, NRs with significant NDVI growth were concentrated on the central, northeast and southeast

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505206); 国家自然科学基金青年基金项目 (41701110); 国家自然科学基金地区基金项目 (41461018)

**收稿日期:** 2019-12-04; **网络出版日期:** 2020-08-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hujm@ynu.edu.cn

of Yunnan Province. (2) There was no significant difference in the NDVI coefficient of variation between internal and external NRs in Yunnan Province. 51.85% of NRs had better conservation effectiveness because the internal vegetation growth was more stable than the external vegetation growth of these NRs. They were mainly distributed in the west, southwest, southeast and northeast of Yunnan Province. It failed to reflect the significant difference between the internal and external protection effectiveness of the NRs. (3) The protection effectiveness of NNRs was generally better than that of PNRs in Yunnan Province. (4) In terms of the type of NRs, the protection effectiveness of forest ecosystem NRs was good, while wild plant NRs and wild animal NRs had moderate conservation effectiveness, and the conservation effectiveness of wetland ecosystem NRs worsened in effectiveness. This research can provide a reference for exploring the assessment methods of conservation effectiveness of the protected areas network on the regional scale, and support the optimization and perfection of NRs in Yunnan Province.

**Key Words:** NDVI; nature reserves; protection efficacy; coefficient of variation; Yunnan Province

设立自然保护区的首要目标是就地保护好生物多样性<sup>[1]</sup>,保持与改善生态系统和物种的保护效果<sup>[2]</sup>,因此,自然保护区生态有效性评估是保护成效评估的重要内容。区域自然保护区体系建成后,由于在相同时间进程没有受到保护的“空白对照样本”非常难以获得,通常不能直接度量自然保护区体系的保护成效及其与影响因子的关系<sup>[3]</sup>。因此,已有研究多是通过分析自然保护区体系建设前后或建设以来自然保护区体系内部相关特征的变化态势、内部和外部相关特征变化的差异,来评价自然保护区体系的保护成效<sup>[4-6]</sup>。宏观区域尺度上的保护区体系生态有效性评估主要集中在生态系统尺度上,特别是森林和湿地生态类的保护区体系的研究较多<sup>[7-9]</sup>。

植被是大多数自然保护区的主要保护对象之一,或者为主要保护对象(如动物)的生存和保护提供重要庇护或觅食等场所<sup>[10-12]</sup>。一般认为,在自然保护区(特别是严格的自然保护区或荒野地自然保护区)建立后,其内部植被生产(植被覆盖)相对较少地受到人类活动干扰<sup>[13]</sup>,其内部植被(覆盖面积)应当保持一定的增长,且内部植被长势(覆盖面积)变化也应当比外部植被长势(覆盖面积)变化相对稳定,那么自然保护区的保护是有效的<sup>[14-16]</sup>。与植被生态系统相关的指标多被用来开展宏观区域尺度的保护区保护成效评估,基于遥感影像解译获取保护区及所在区域植被生态系统相关特征指标,如特定保护生态系统覆盖(面积)、景观破碎度、植被指数(如 NDVI)、植被生产力(如 NPP)等,反映宏观尺度保护区体系的保护成效<sup>[7,17-18]</sup>。

云南是全球生物多样性最丰富的区域之一<sup>[19-20]</sup>。自然保护区是生物多样性保护最直接和最有效的模式<sup>[21-23]</sup>。截至 2019 年底,云南省已建立各级自然保护区 164 个,总面积 286.71 万  $\text{hm}^2$ ,占全省国土总面积的 7.3%<sup>[24]</sup>;相关研究表明,云南省以自然保护区为主的保护区体系空间格局需进一步优化<sup>[25-27]</sup>,已建保护区(特别是国家级和省级自然保护区)需进一步提升其保护成效,但保护区(体系)保护成效评估仅有少量研究报道<sup>[28-30]</sup>。这些研究或侧重于自然保护区管理成效评估,或是对特定自然保护区进行保护成效评价,缺乏对云南省自然保护区整体保护成效的综合认识,迫切需要对云南省自然保护区保护成效开展评估,特别是开展优先区域内现有自然保护区的保护效果评估<sup>[31]</sup>。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)及其时间序列数据因能较好的反映植被覆盖度和生物量等生物学特征而被广泛地用于自然保护区(自然保护区)、重点生态功能区等对植被生产力的保护成效评价中<sup>[32-34]</sup>。因此,本研究利用 NDVI(采用 1998—2015 年的 SPOT\_Vegetation-NDVI 数据、分辨率 1 km)分析云南省自然保护区内、外的植被生态特征及其变化,开展云南省自然保护区的保护成效分析,揭示该时段各自然保护区内部和外部 NDVI 的变化趋势和变化稳定性,以判识云南省自然保护区的保护成效。

## 1 数据与方法

### 1.1 内外部 NDVI 计算

本研究从中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)获取云南省 1998—2015 年的 SPOT\_

Vegetation NDVI 数据<sup>[35]</sup>, 该数据空间分辨率为 1km, 时间分辨率为年。

本研究采用缓冲区分析法确定每个自然保护区的内、外对比空间。基于云南省国家级和省级自然保护区边界, 利用 ArcGIS 缓冲区分析功能, 各自向外围设定 2km 缓冲的环形区域, 该区域简称为自然保护区外部或外部, 而自然保护区边界内部区域简称为自然保护区内部或内部。设定 2 km 主要是基于自然保护区边界外围 2 km 毗邻环形区域与保护区内部的自然环境和生态系统具有相对一致性, 分析自然保护区建立后其内部和外部(边界外部毗邻 2 km 环形区域)生态系统的“变化差异性”, 可反映自然保护区建立产生的保护成效。

利用自然保护区内外部矢量数据以及 SPOT\_Vegetation NDVI 栅格数据, 运用 ArcGIS 10.2 的 Zonal statistics 法计算 1998—2015 年时段,  $i$  (1—54) 自然保护区第  $j$  年(1—18)的内部 NDVI (Internal NDVI, 记为  $INDVI_{ij}$  表示)和外部 NDVI (External NDVI, 记为  $ENDVI_{ij}$ ) 平均值, 进而计算得到第  $j$  年云南省 54 个自然保护区内部、外部 NDVI 平均值, 分别记为  $\overline{INDVI_j}$ 、 $\overline{ENDVI_j}$ 。在此基础上, 分别利用一元线性趋势法和显著性检验, 揭示上述 4 个变量的年际变化趋势(增加? 减少? 无显著性变化?)。再计算  $i$  自然保护区在 1998—2015 时段内部( $INDVI_{ij}$ )、外部( $ENDVI_{ij}$ )的变异系数(Coefficient of Variation, 用  $CV_i$  表示), 表征内部、外部植被变化的相对稳定性。

本研究包括云南省 20 个国家级(剔除无明确边界的长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区-云南段)和 34 个省级自然保护区(剔除面积小于 1km<sup>2</sup>保护区或地质遗迹类保护区), 森林生态类、主要保护对象包括森林生态系统(如丽江玉龙雪山、沾益海峰等省级自然保护区)、主要保护对象的生境为森林生态系统(如建水燕子洞白腰雨燕、墨江西岐桫欏等省级自然保护区)的自然保护区占 47 个, 以湖泊/水库、沼泽/湿草甸、草甸生态系统为组合的湿地生态系统类自然保护区占 7 个, 这些自然保护区都适合用 NDVI 这个指标来评估其保护成效(生态有效性)。这些自然保护区总面积约占全省自然保护区总面积的 75%, 是云南省保护地体系中最具有保护成效的类型, 也是云南省自然保护区建设与管理、保护地体系优化的重点。另外, 这些自然保护区建立时间有所不同, 其中, 云南省在 1999—2002 年和 2003—2011 年间分别新建了 10 个和 3 个省级自然保护区, 这 13 个自然保护区总面积只占本研究自然保护区总面积的 21.20%。因此, 为计算上的简化, 本研究在计算 NDVI 时序变化、变异系数时, 这 13 个自然保护区也同样从 1998 年开始计算, 不会影响研究结果的总体趋势。这 54 个自然保护区面积不同, 46 个自然保护区的面积均大于 50km<sup>2</sup>, 7 个自然保护区的面积均在 10—50km<sup>2</sup>, 1 个自然保护区面积约为 6km<sup>2</sup>, 这些自然保护区适合采用 1km 空间分辨率的 NDVI 数据来评估其保护成效。

## 1.2 基于 NDVI 变化趋势的保护成效分析

一元线性趋势法广泛用于 NDVI 的时间变化趋势分析<sup>[36-38]</sup>, 本研究也采用这一方法, 具体计算公式如下<sup>[39]</sup>:

针对单一保护区  $INDVI_{ij}$  时间变化趋势分析

$$INDVI_{ij} = a_i \times j + b_i \quad (1)$$

$$a_i = \frac{n \times \sum_{j=1}^n j \times INDVI_{ij} - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n INDVI_{ij}}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - \left(\sum_{j=1}^n j\right)^2} \quad (2)$$

式中:  $i$  表示自然保护区(1—54),  $j$  表示年序号(1—18),  $INDVI_{ij}$  表示  $i$  自然保护区第  $j$  年内部 NDVI;  $a_i$  为对应  $i$  自然保护区的系数,  $b_i$  为对应  $i$  自然保护区的常数(计算公式未列出)。 $a_i$  的正负反映 1998—2015 年  $i$  自然保护区内部 NDVI 年际线性变化趋势(增或减), 并加以显著性检验。同样, 1998—2015 年  $i$  自然保护区  $ENDVI_{ij}$  的年际线性变化趋势计算采用同样的方法。

针对 58 个自然保护区总体  $\overline{INDVI_j}$  的时间变化趋势分析

$$\overline{INDVI_j} = a \times j + b \quad (3)$$

$$a = \frac{n \times \sum_{j=1}^n j \times \overline{\text{INDVI}}_j - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n \overline{\text{INDVI}}_j}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - \left(\sum_{j=1}^n j\right)^2} \quad (4)$$

式中:  $j$  表示年序号(1—18),  $\overline{\text{INDVI}}_j$  表示第  $j$  年云南省 54 个自然保护区内部 NDVI 平均值;  $a$  为系数,  $b$  为常数(计算公式未列出)。  $a$  值的正负反映 1998—2015 年云南省 54 个自然保护区总体内部 NDVI 平均值的年际线性变化趋势(增或减), 并加以显著性检验。同样, 1998—2015 年云南省 54 个自然保护区总体  $\overline{\text{ENDVI}}_j$  的年际线性变化趋势计算采用同样的方法。

采用自然断点分级法(natural breaks classification)分别将 1998—2015 年的自然保护区内部 NDVI 年际线性变化率( $\text{INDVI}_j$ )和外部 NDVI 年际线性变化率( $\text{ENDVI}_j$ )分为 5 个等级进行相应分析。

根据前述的评估理论假设(引言第二段):(1)当自然保护区内部  $a_i > 0$  且通过显著性检验, 表明该自然保护区的保护成效好;(2)当自然保护区内部  $a_i < 0$  且通过显著性检验, 表明该自然保护区的保护成效差;(3)自然保护区内部  $a_i > 0$  或  $a_i < 0$ , 但没有通过显著性检验, 表明该自然保护区的保护成效介于上述两类之间。当然, 这一假设也存在一定的缺陷, 自然保护区内部 NDVI 的下降不一定是保护成效差导致, 有可能是极端自然灾害(极端干旱、自然森林雷火等)导致 NDVI 下降, 这种自然生态过程导致的 NDVI 变差不能简单的评价为保护成效差。

### 1.3 基于内外部 NDVI 变化稳定性的保护成效分析

变异系数(Coefficient of Variation, 简称为 CV)法被较多地用于分析植被覆盖度的波动情况<sup>[40-42]</sup>, 本研究采用计算  $i$  自然保护区在 1998—2015 年时段内部 NDVI( $\text{INDVI}_i$ )、外部 NDVI( $\text{ENDVI}_i$ )的变异系数, 分别记为  $\text{ICV}_i$ 、 $\text{ECV}_i$ , 表征  $i$  自然保护区在 1998—2015 年时段内部、外部植被变化的相对稳定性。

计算公式如下:

$$\text{ICV}_i = \frac{\sigma_i}{\overline{\text{INDVI}}_i} \quad (5)$$

式中:  $i$  表示自然保护区(1—54),  $\text{ICV}_i$  为云南省  $i$  自然保护区内部 NDVI 值的变异系数,  $\sigma_i$  表示 1998—2015 年  $i$  自然保护区内部 NDVI 值的标准差,  $\overline{\text{INDVI}}_i$  为云南省  $i$  自然保护区 1998—2015 年内部 NDVI 的平均值。同样, 计算  $i$  自然保护区在 1998—2015 年时段外部 NDVI 的变异系数  $\text{ECV}_i$ 。

$\text{ICV}_i$  越大表示  $i$  自然保护区内部 NDVI 在 1998—2015 年时段的时间序列波动性越大, 则这一时段  $i$  自然保护区内部植被生态稳定性越低;  $\text{ICV}_i$  值越小表示  $i$  自然保护区内部 NDVI 在 1998—2015 年时段的时间序列波动性越小, 则这一时段  $i$  自然保护区内部植被生态的稳定性越高。 $\text{ECV}_i$  的大小对  $i$  自然保护区外部 NDVI 变化的解释是一致的。

根据前述的评估理论假设(引言第二段):(1)当  $\text{ICV}_i \leq \text{ECV}_i$ , 表明  $i$  自然保护区保护有效(或有保护成效);(2)当  $\text{ICV}_i > \text{ECV}_i$ , 表明  $i$  自然保护区保护有效性差(或保护成效差)。需要说明的按照  $\text{ICV}_i$ 、 $\text{ECV}_i$  大小关系界定的“有效”和“有效性差”是相对的。

### 1.4 均值比较和检验

运用 SPSS 22.0, 分别计算 1998—2015 年云南省 54 个自然保护区内(外)部、不同级别和不同类型自然保护区的 NDVI 年际线性变化率均值和 NDVI 值的变异系数均值, 比较分析其差异; 并根据自然保护区分级和分类, 分别对自然保护区内(外)部、国家级(省级)自然保护区两组 NDVI 年际线性变化率以及 NDVI 值的变异系数数据进行两独立样本检验(Mann-Whitney U 检验法), 检验两者是否差异显著; 对不同类型自然保护区的 NDVI 年际线性变化率以及 NDVI 值的变异系数数据进行多独立样本检验(Kruskal-Wallis 检验法), 检验它们是否差异显著。

2 结果分析

2.1 不同时段 NDVI 变化特征与保护成效

如图 1、表 1 所示,1998—2015 年云南省国家级和省级自然保护区总体(54 个自然保护区平均)的内部、外部 NDVI 年际变化总趋势相一致,都表现为显著增长 ( $P < 0.001$ ),表明在 1998—2015 年这一时段云南省自然保护区总体具有较好的保护成效。

这一时段云南省自然保护区总体的内、外部 NDVI 最低值都出现在 2002 年,最高值都出现在 2015 年(图 1),不同时段内、外部 NDVI 年际变化均值差异不显著,大致可分为 1998—2002 年持续且显著下降期,2003—2010 年内部波动增长期(不显著,  $P > 0.05$ )、外部波动且显著增长期,2011—2015 年持续且显著增长期,但 1998—2015 年时段变为波动但极显著增长(表 1)。

从不同时段 NDVI 变化特征来看,图 1 和表 1 表明云南省国家级和省级自然保护区总体的保护成效在 1998—2002 年时段较差、2003—2010 年时段一般、2011—2015 年时段较好,而在 1998—2015 年这一时段具有较好的保护成效。

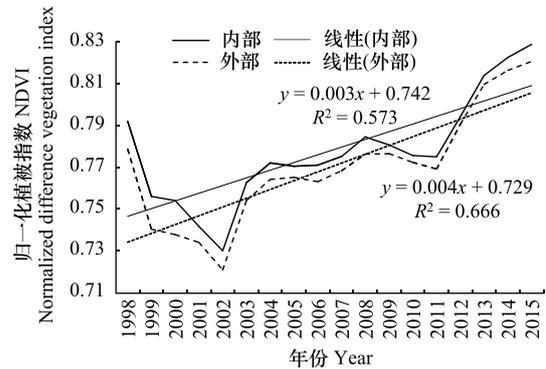


图 1 1998—2015 年云南省国家级和省级自然保护区总体内外部 NDVI 变化趋势

Fig.1 The trend of NDVI change of National Nature Reserves (NNRs) and Provincial Nature Reserves (PNRs) in Yunnan Province during 1998—2015

NDVI 为归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; 内部指自然保护区内部、外部指自然保护区外部

表 1 云南省国家级和省级自然保护区总体内、外部 NDVI 变化特征  
Table 1 The profile of NDVI change of NNRs and PNRs in Yunnan Province

自然保护区 Nature reserves	不同时期 NDVI 年际变化趋势 The trend of NDVI annual change in different periods				1998—2015 变异系数 Coefficient of variation
	1998—2002	2003—2010	2011—2015	1998—2015	
内部 Internal	-0.0138 $P < 0.01$	0.0021 $P > 0.05$	0.0136 $P < 0.01$	0.0037 $P < 0.001$	0.0445
外部 External	-0.0122 $P < 0.05$	0.0027 $P < 0.05$	0.0129 $P < 0.05$	0.0042 $P < 0.001$	
均值差异显著性 Significance of mean difference	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$

2.2 1998—2015 年 NDVI 变化特征与保护成效

图 1 和表 1 表明 1998—2015 年时段云南省国家级和省级自然保护区内部 NDVI 年际线性变化率低于其外部 NDVI 年际线性变化率,但不显著 ( $P > 0.05$ ),表明自然保护区内部和外部植被长势总体无明显差异。表 2 显示了 1998—2015 年时段内、外部 NDVI 不同增长态势的云南省国家级和省级自然保护区的数量,内部和外部 NDVI 增长(显著、极显著)的自然保护区数量分别为 35 个(占 64.81%)、43 个(占 79.63%),表明该时段云南省大部分国家级和省级自然保护区的保护成效较好。

表 2 1998—2015 年时段不同 NDVI 增长态势的云南省自然保护区数量

Table 2 The number of NNRs and PNRs in Yunnan Province according to different NDVI increase during 1998—2015

自然保护区 Nature reserves	无显著变化 ( $P > 0.05$ ) No significant change	显著增长 ( $0.01 < P < 0.05$ ) Significant increase	极显著增长 ( $P < 0.01$ ) Extreme significant increase
内部 Internal	19	7	28
外部 External	11	8	35

从 1998—2015 年时段云南省每个自然保护区内部、外部 NDVI 年际线性变化率的空间分布来看(图 2,采用自然断点法分级,公式(2)的  $a_i$ ),滇西北的自然保护区内、外部 NDVI 年际线性变化率以较低的为主,滇西及滇西南的自然保护区以较低和中等的为主,而滇中、滇东北及滇东南的自然保护区内、外部以较高的为主。而内、外部 NDVI 年际线性变化率较高的自然保护区集中分布在昭通市(大山包、药山和乌蒙山)、曲靖市(会泽黑颈鹤、驾车、珠江源、沾益海峰和十八连山)和文山州(文山、丘北普者黑和驮娘江)三个市(州)。

表 1 还显示了 1998—2015 年时段云南省国家级和省级自然保护区内部 NDVI 变异系数略高于外部 NDVI 变异系数,但不显著( $P>0.05$ ),表明自然保护区总体的内部和外部植被长势的稳定性无明显差异。而图 3 是云南省国家级和省级自然保护区内部 NDVI 和外部 NDVI 变异系数的对应关系空间分布图,有保护成效的自然保护区(即  $ICV_i \leq ECV_i$  的自然保护区有 28 个,占总数的 51.85%)主要分布在滇西、滇西南、滇东南和滇东北,保护成效差的自然保护区(即  $ICV_i > ECV_i$  的自然保护区有 26 个,占总数的 48.15%)主要分布在滇中和滇西北,两类自然保护区的数量较为接近。

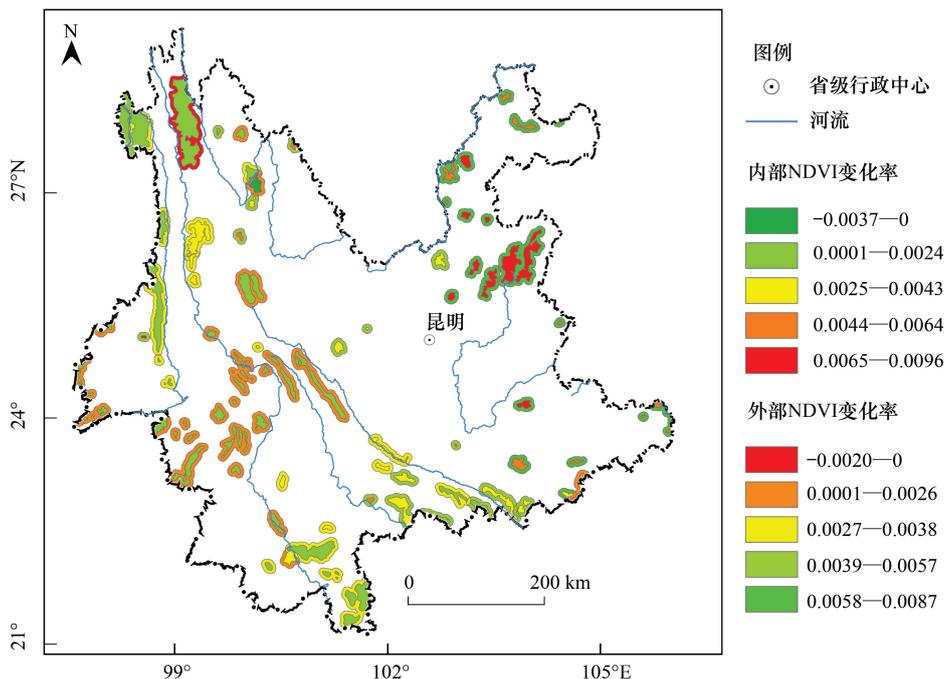


图 2 1998—2015 年不同 NDVI 年际变化率的云南省国家级和省级自然保护区分布图

Fig.2 Maps of NNRs and PNRs in Yunnan Province according to annual NDVI variation during 1998—2015

从图 1、图 2、表 1、表 2 等综合来看,1998—2015 年时段云南省大多数国家级和省级自然保护区 NDVI 呈显著和极显著增长,体现自然保护区的植被长势变好和较好的保护成效。但从表 1(变异系数对比)和图 3 来看,1998—2015 年时段云南省国家级和省级自然保护区的内部和外部植被长势的稳定性无明显差异,反映出这一时段自然保护区的保护成效未带来内外部明显的分异。

### 2.3 1998—2015 年不同级别自然保护区 NDVI 变化与保护成效

图 4 和表 3 表明,1998—2015 年云南省国家级、省级自然保护区的内、外部 NDVI 年际变化基本趋势与总体趋势(图 1)基本一致,呈现出波动上升的趋势。国家级自然保护区内、外部 NDVI 年际变化率均低于省级自然保护区内、外部 NDVI 年际变化率,但都不显著( $P>0.05$ ),表明国家级自然保护区内、外部植被长势要比省级自然保护区内、外部要差。国家级自然保护区内、外部 NDVI 的变异系数均低于省级自然保护区内、外部 NDVI 的变异系数(表 3),但都不显著( $P>0.05$ ),表明国家级自然保护区内、外部植被长势比省级自然保护区内、外部要稳定,受到的干扰较小。总体来看,国家级自然保护区的保护成效要好于省级自然保护区。

### 2.4 1998—2015 年不同类型自然保护区 NDVI 变化与保护成效

图 5 和表 4 表明,1998—2015 年云南省不同类型自然保护区内、外部 NDVI 年平均值变化总体趋势相一致,呈现出波动上升的趋势,但不同类型自然保护区在内、外部 NDVI 年平均值变化趋势上也存在差异,但不显著。

内外部 NDVI 年际变化率:不同类型自然保护区内部 NDVI 年际变化率最高的是湿地生态类,野生植物类和野生动物类次之,最小的是森林生态类。相应地,外部 NDVI 年际变化率最高的是野生植物类,湿地生态类和森林生态类次之,野生动物类最小,反映了湿地生态类和野生植物类自然保护区植被长势较好,野生动物类居中,森林生态类较差。

内外部 NDVI 变异系数:表 4 反映了不同类型自然保护区内部 NDVI 变异系数均值差异极为显著,而外部 NDVI 变异系数均值差异不显著,两者最高的均是湿地生态类,最低的则都是森林生态类,表明湿地生态类自然保护区植被长势最不稳定,受到的干扰也最高,而森林生态类植被长势最稳定,受到的干扰也最低。湿地生态类自然保护区内部 NDVI 的变异系数均值高于其外部,表明其内部植被长势受到的干扰比外部高,自然保护区内部保护效果比外部差,而森林生态类、野生植物类和野生动物类自然保护区内部 NDVI 的变异系数则低于其外部,表明森林生态类、野生植物类和野生动物类自然保护区内部植被长势受到的干扰比其外部低,自然保护区内部保护成效好于其外部。

总体而言,不同类型自然保护区中,森林生态类自然保护区保护成效较好,野生植物类和野生动物类保护成效一般,湿地生态类较差。

## 3 讨论

### 3.1 NDVI 动态变化与云南省自然保护区保护成效

1998—2015 年云南省大多数国家级和省级自然保护区内、外部 NDVI 都呈极显著增长(图 1 和图 2、表 1 和表 2),但内部和外部植被长势的稳定性(以变异系数表征)无明显差异(表 1 和图 3)。相关研究都表明,过去 20 年不同时段中,云南省大部分区域 NDVI 年均值都呈增加趋势<sup>[43-45]</sup>,这是本时段云南省国家级和省级自然保护区内、外 NDVI 年均值都同步变化且具有相对一致稳定性的基本原因。

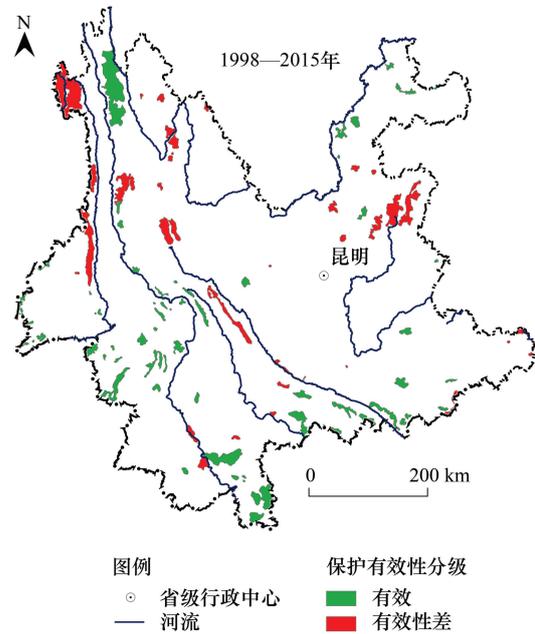


图 3 基于内外 NDVI 变化评估的云南省自然保护区保护成效分布示意图

Fig.3 Maps of conservation effectiveness of NNRs and PNRs in Yunnan Province according to NDVI assessment

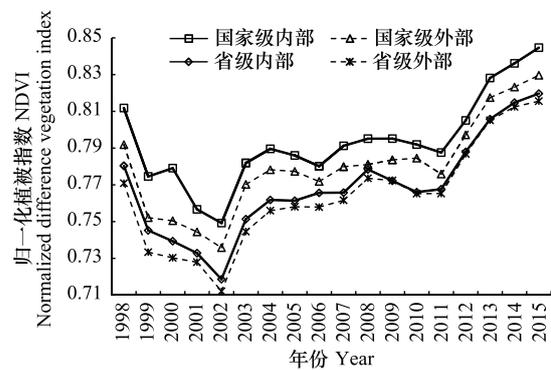


图 4 1998—2015 年云南省不同级别自然保护区内外部 NDVI 年际变化

Fig.4 The trend of NDVI change between NNRs and PNRs in Yunnan Province during 1998—2015

国家级内部指国家级自然保护区内部、国家级外部指国家级自然保护区外部、省级内部指省级自然保护区内部、省级外部指省级自然保护区外部

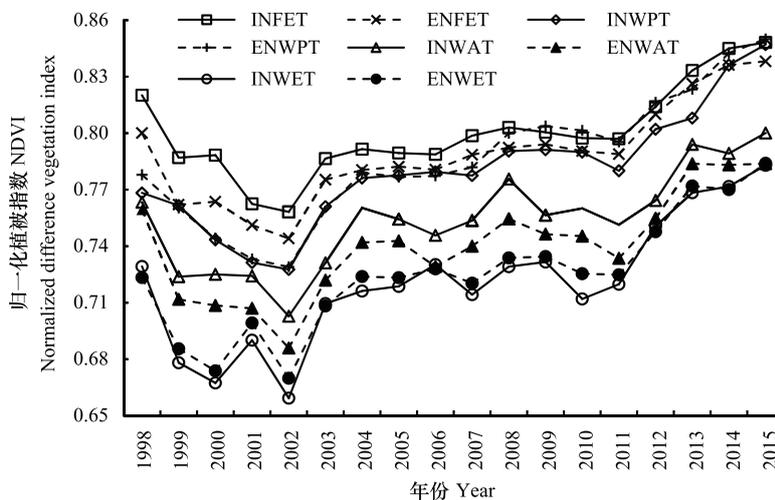


图 5 1998—2015 年云南省不同类型自然保护区内、外部 NDVI 年均值变化

Fig.5 The trend of NDVI change of different types of NNRs and PNRs in Yunnan Province during 1998—2015

INFET:森林生态类自然保护区内部(internal NRs of forest ecosystem type), ENFET:森林生态类自然保护区外部(external NRs of forest ecosystem type), INWPT:野生植物类自然保护区内部(internal NRs of wild plant type), ENWPT:野生植物类自然保护区外部(external NRs of wild plant type), INWAT:野生动物类自然保护区内部(internal NRs of wild animal type), ENWAT:野生动物类自然保护区外部(external NRs of wild animal type), INWET:湿地生态类自然保护区内部(internal NRs of wetland ecosystem type), ENWET:湿地生态类自然保护区外部(external NRs of wetland ecosystem type)

表 3 1998—2015 年云南省不同级别自然保护区内、外部 NDVI 变化特征值

Table 3 The profile of NDVI change between NNRs and PNRs in Yunnan Province during 1998—2015

内、外部 Internal or external	级别 Grade	NDVI 年际变化率 The rate of NDVI annual change	变异系数均值 Mean value of coefficient of variation
内部 Internal	国家级	0.0032	0.0389
	省级	0.0040	0.0478
	均值差异显著性	$P>0.05$	$P>0.05$
外部 External	国家级	0.0038	0.0397
	省级	0.0045	0.0456
	均值差异显著性	$P>0.05$	$P>0.05$

表 4 1998—2015 年不同类型自然保护区内、外部 NDVI 变化特征值

Table 4 The profile of NDVI change of different types of nature reserves in Yunnan Province during 1998—2015

内、外部 Internal or external	自然保护区类型(数量) Type of nature reserves (number)	NDVI 年际变化率 The rate of NDVI annual change	变异系数均值 Mean value of coefficient of variation
内部 Internal	野生植物类(3 个)	0.0050	0.0466
	野生动物类(8 个)	0.0038	0.0474
	湿地生态类(10 个)	0.0051	0.0598
	森林生态类(33 个)	0.0031	0.0390
	均值差异显著性	$P>0.05$	$P<0.01^{**}$
外部 External	野生植物类(3 个)	0.0057	0.0474
	野生动物类(8 个)	0.0038	0.0481
	湿地生态类(10 个)	0.0050	0.0512
	森林生态类(33 个)	0.0040	0.0395
	均值差异显著性	$P>0.05$	$P>0.05$

\*\* 表示 0.01 水平上的显著性

从 NDVI 年际变化来看(图 1 和表 1),云南省国家级和省级自然保护区 NDVI 年均值在 2002 和 2011 年出现了拐点,其变化趋势大致可分为 1998—2002 年持续下降期、2003—2010 年波动增长期和 2011—2015 年持续增长期。这一变化特征既反映了云南省 NDVI(植被生长)受气候变化(如气温和降水)的影响<sup>[43-44]</sup>和自然保护区的植被生态保护成效,例如,2010—2012 年云南省干旱等级为中度干旱甚至达到严重干旱,且干旱持续时间较长,出现数年连旱的现象,这会对 2010—2012 年云南省国家级和省级自然保护区 NDVI(植被生长)产生一定的负面影响<sup>[43]</sup>,也反映了云南省宏观层面的生态环境保护政策和植被恢复工程实施的效应,例如,在 2002 年,云南省全面启动、实施第一轮退耕还林还草政策,在 2007 年发布《贯彻国务院关于完善退耕还林政策文件的实施意见》以巩固退耕还林成果,在 2014 年,又启动实施新一轮退耕还林还草工程;在 2011 年,云南省人民政府颁布《关于进一步加强自然保护区建设和管理的意见》,这类政策的出台和实施对云南省(不仅仅是自然保护区内部)的植被生态都会产生正面影响<sup>[46-47]</sup>。另外,自 2011 年以来,一方面云南省自然保护区数量、面积保持相对稳定,基本实现了自然保护区建设从重数量向重质量的转变<sup>[48]</sup>;另一方面,国家对云南省国家级和省级自然保护区内部生态建设工程投入不断增加(表 5),植被覆盖不断增长,这些自然原因和人为原因综合作用的结果可能是引起云南省国家级和省级自然保护区 NDVI 年均值在 2002 和 2011 年出现拐点的重要驱动因素,自然保护区内部系列生态保护与建设工程的实施也可能是导致其内部植被生态稳定性比外部略低的重要原因。

表 5 近年来云南省国家级和省级自然保护区生态建设情况

Table 5 The ecological construction of NNRs and PNRs in Yunnan Province in recent years

名称 Name	面积/资金 Area/Fund	2011	2012	2013	2014	2015
天保工程 Natural forest protection project	纳入面积/万 hm <sup>2</sup> 投入资金/万元	81.97 324.63	40.88 718.35	42.33 1121.85	42.62 1150.38	46.32 1416.93
退耕还林工程 Conversion of cropland to forest project	纳入面积/万 hm <sup>2</sup> 投入资金/万元	261.13 204.1	0.07 441.06	0.07 421.06	0.09 129.08	0.08 1418.5
生态公益林补偿 Public ecological forest compensation	补偿面积/万 hm <sup>2</sup> 投入资金/万元	52.11 2900.58	58.25 3669.65	71.38 3787.3	103.91 6402.015	141.56 4844.33
湿地保护与恢复工程 Wetland protection and restoration project	投入资金/万元	DD	4388	DD	5602	4900

DD((Data deficiency)为数据缺乏;资料来源:云南省林业和草原局;云南省自然保护区年报(2011、2012、2013、2014、2015年)

### 3.2 不同类型自然保护区保护成效

本研究发现,就不同类型的自然保护区保护成效而言,森林生态类自然保护区保护成效较好,野生植物类和野生动物类保护成效一般,湿地生态类较差(表 4)。祝萍等<sup>[49]</sup>研究也表明,森林生态类国家级自然保护区减少农业活动干扰的保护成效较好,而湿地生态类国家级自然保护区受农业活动的干扰最大,保护成效较差。Zheng<sup>[8]</sup>等研究也发现云南省湿地生态类自然保护区的保护成效较差。张建亮等<sup>[50]</sup>分析了国家级自然保护区生态系统格局动态变化,结果表明,森林生态、野生植物类自然保护区生态系统改善的数量多于退化的自然保护区数量,其保护效果较好,而湿地生态类生态系统退化的自然保护区数量多于改善的保护区数量,其保护成效较差。从上述不同视角的相关研究来看,基于自然保护区内、外部 NDVI 时序变化和变异系数(CV)差异性的分析,也可以较好地反映自然保护区的保护成效。

## 4 结论

云南省国家级和省级自然保护区 1998—2015 年内、外部 NDVI 变化可分为 1998—2002 年显著下降期、2003—2010 年波动增长期、2011—2015 年显著增长期,总体上表现为极显著增长,体现自然保护区总体具有较好的保护成效。

云南省国家级和省级自然保护区 1998—2015 年内、外部 NDVI 变异系数无显著性差异,表明这一时期以

NDVI 表征的自然保护区内、外植被生态特征的稳定性无明显差异,未能反映出自然保护区带来的保护成效的内外部明显的分异。

云南省国家级、省级自然保护区在 1998—2015 年的内、外部 NDVI 年际变化趋势与总体趋势基本一致,呈波动上升,国家级自然保护区的保护成效总体上要好于省级自然保护区。

就不同类型的自然保护区而言,森林生态类自然保护区保护成效较好,野生植物类和野生动物类保护成效一般,湿地生态类较差。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Dudley N. Guidelines for Applying Protected Area Management Categories. Gland, Switzerland: IUCN, 2008.
- [ 2 ] Timko J A, Innes J L. Evaluating ecological integrity in national parks: case studies from Canada and South Africa. *Biological Conservation*, 2009, 142(3): 676-688.
- [ 3 ] 王伟, 辛利娟, 杜金鸿, 陈冰, 刘方正, 张立博, 李俊生. 自然保护区保护成效评估: 进展与展望. *生物多样性*, 2016, 24(10): 1177-1188.
- [ 4 ] Bruner A G, Gullison R E, Rice R E, da Fonseca G A B. Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. *Science*, 2001, 291(5501): 125-128.
- [ 5 ] Soares-Filho B S, Nepstad D C, Curran L M, Cerqueira G C, Garcia R A, Ramos C A, Voll E, McDonald A, Lefebvre P, Schlesinger P. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 2006, 440(7083): 520-523.
- [ 6 ] Radeloff V C, Stewart S I, Hawbaker T J, Gimmi U, Pidgeon A M, Flather C H, Hammer R B, Helmers D P. Housing growth in and near United States protected areas limits their conservation value. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(2): 940-945.
- [ 7 ] Nagendra H. Do parks work? Impact of protected areas on land cover clearing. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2008, 37(5): 330-337.
- [ 8 ] Zheng Y M, Zhang H Y, Niu Z G, Gong P. Protection efficacy of national wetland reserves in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(10): 1116-134.
- [ 9 ] Gibbes C, Southworth J, Keys E. Wetland conservation: change and fragmentation in Trinidad's protected areas. *Geoforum*, 2009, 40(1): 91-104.
- [ 10 ] 周睿, 王辉, 葛剑平, 熊友才, 吴记贵. 松山自然保护区各功能区植被动态及变化格局. *生物多样性*, 2006, 14(6): 470-478.
- [ 11 ] Nagendra H, Pareeth S, Ghatge R. People within parks-forest villages, land-cover change and landscape fragmentation in the Tadoba Andhari tiger reserve, India. *Applied Geography*, 2006, 26(2): 96-112.
- [ 12 ] Watson J E M, Dudley N, Segan D B, Hockings M. The performance and potential of protected areas. *Nature*, 2014, 515(7525): 67-73.
- [ 13 ] Pettorelli N, Chauvenet A L M, Duffy J P, Cornforth W A, Meillere A, Baillie J E M. Tracking the effect of climate change on ecosystem functioning using protected areas: Africa as a case study. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 269-276.
- [ 14 ] Wang W, Pechacek P, Zhang M X, Xiao N W, Zhu J G, Li J S. Effectiveness of nature reserve system for conserving tropical forests: a statistical evaluation of Hainan Island, China. *PLoS One*, 2013, 8(2): e57561.
- [ 15 ] 刘方正, 张建亮, 王亮, 杨增武, 崔国发. 甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区南片植被长势与保护成效. *生态学报*, 2016, 36(6): 1582-1590.
- [ 16 ] 侯鹏, 翟俊, 曹巍, 杨旻, 蔡明勇, 李静. 国家重点生态功能区生态状况变化与保护成效评估——以海南岛中部山区国家重点生态功能区为例. *地理学报*, 2018, 73(3): 429-441.
- [ 17 ] Tang Z Y, Fang J Y, Sun J Y, Gaston K J. Effectiveness of protected areas in maintaining plant production. *PLoS One*, 2011, 6(4): e19116.
- [ 18 ] 张懿铨, 胡忠俊, 祁威, 吴雪, 摆万奇, 李兰晖, 丁明军, 刘林山, 王兆锋, 郑度. 基于 NPP 数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析. *地理学报*, 2015, 70(7): 1027-1040.
- [ 19 ] Olson D M, Dinerstein E. The Global 200: a representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology*, 1998, 12(3): 502-515.
- [ 20 ] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [ 21 ] Rodrigues A S L, Andelman S J, Bakarr M I, Boitani L, Brooks T M, Cowling R M, Fishpool L D C, da Fonseca G A B, Gaston K J, Hoffmann M, Long J S, Marquet P A, Pilgrim J D, Pressey R L, Schipper J, Sechrest W, Stuart S N, Underhill L G, Waller R W, Watts M E J, Xie Y. Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. *Nature*, 2004, 428(6983): 640-643.
- [ 22 ] Naughton-Treves L, Holland M B, Brandon K. The role of protected areas in conserving biodiversity and sustaining local livelihoods. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30: 219-252.
- [ 23 ] 马建章, 戎可, 程鲲. 中国生物多样性就地保护的研究与实践. *生物多样性*, 2012, 20(5): 551-558.
- [ 24 ] 云南省生态环境厅. 云南省 2019 年环境状况公报. (2020-06-03) [2020-06-26]. [http://sthjt.yn.gov.cn/hjzl/hjzkgb/202006/t20200603\\_](http://sthjt.yn.gov.cn/hjzl/hjzkgb/202006/t20200603_)

206112.html.

- [25] Ma C L, Robert K M, Chen W Y, Zhou Z K. Plant diversity and priority conservation areas of northwestern Yunnan, China. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16(3): 757-774.
- [26] Zhang M G, Zhou Z K, Chen W Y, Ferry Slik J W, Cannon C H, Raes N. Using species distribution modeling to improve conservation and land use planning of Yunnan, China. *Biological Conservation*, 2012, 153: 257-264.
- [27] Yang F L, Hu J M, Wu R D. Combining endangered plants and animals as surrogates to identify priority conservation areas in Yunnan, China. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 30753.
- [28] Cao H M, Tang M F, Deng H B, Dong R C. Analysis of management effectiveness of natural reserves in Yunnan Province, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2014, 21(1): 77-84.
- [29] 陈冰, 刘方正, 张玉波, 杜金鸿, 王伟, 李俊生. 基于倾向评分分配比法评估苍山自然保护区的森林保护成效. *生物多样性*, 2017, 25(9): 999-1007.
- [30] 郑晓喆, 王智, 张建亮, 董良, 张志勇, 叶江霞, 周汝良. 拉市海高原湿地省级自然保护区保护成效评估研究. *林业资源管理*, 2018, (1): 80-89.
- [31] 云南省环境保护厅. 云南省环境保护“十三五”规划纲要. (2016-11-25) [2020-02-02]. <http://sthjt.yn.gov.cn/ghsj/hjgh/201711/W020171130376573335896.pdf>.
- [32] Pelkey N W, Stoner C J, Caro T M. Vegetation in Tanzania: assessing long term trends and effects of protection using satellite imagery. *Biological Conservation*, 2000, 94(3): 297-309.
- [33] Hughes K A, Ireland L C, Convey P, Fleming A H. Assessing the effectiveness of specially protected areas for conservation of Antarctica's botanical diversity. *Conservation Biology*, 2016, 30(1): 113-120.
- [34] 夏会娟, 孔维静, 孙建新, 侯利萍. 基于 MODIS NDVI 的辽河保护区成立前后植被覆盖时空动态研究. *生态学报*, 2018, 38(15): 5434-5442.
- [35] 徐新良. 中国年度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>). 2018, doi: 10.12078/2018060601.
- [36] Stow D, Daeschner S, Hope A, Douglas D, Petersen A, Myneni R, Zhou L, Oechel W. Variability of the seasonally integrated Normalized Difference Vegetation Index across the North Slope of Alaska in the 1990s. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5): 1111-1117.
- [37] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [38] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.
- [39] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002: 37-70.
- [40] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 235-260.
- [41] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 邓兴耀. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化. *生态学报*, 2016, 36(19): 6198-6208.
- [42] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. *生态学报*, 2017, 37(22): 7418-7426.
- [43] 刘世梁, 田韞钰, 尹艺洁, 安南南, 董世魁. 云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应. *生态学报*, 2016, 36(15): 4699-4707.
- [44] 何云玲, 李同艳, 熊巧利, 余岚. 2000—2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(24): 8813-8821.
- [45] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [46] 祁威, 摆万奇, 张德铨, 吴雪, 李兰晖, 丁明军, 周才平. 生态工程实施对羌塘和三江源国家级自然保护区植被净初级生产力的影响. *生物多样性*, 2016, 24(2): 127-135.
- [47] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 刘璐璐. 基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 35-44.
- [48] 蒋柱檀. 云南省自然保护区建设转向质量型发展. (2014-07-17) [2020-02-02]. [http://www.gov.cn/xinwen/2014-07/23/content\\_2722704.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2014-07/23/content_2722704.htm).
- [49] 祝萍, 黄麟, 肖桐, 王军邦. 中国典型自然保护区生境状况时空变化特征. *地理学报*, 2018, 73(1): 92-103.
- [50] 张建亮, 钱者东, 徐网谷, 张慧, 王智. 国家级自然保护区生态系统格局十年变化 (2000-2010 年) 评估. *生态学报*, 2017, 37(23): 8067-8076.