

基于MODIS的2006-2016年西藏生态质量 综合评价及其时空变化

吴宜进^{1,2}, 赵行双^{1,2}, 奚悦^{1,2}, 刘慧^{3,4}, 李畅^{1,2}

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对缺少基于遥感数据产品的西藏地区植被生态参数筛选及综合评价的研究现状, 以2006年和2016年西藏地区MODIS卫星遥感产品反演得到的植被覆盖度、叶面积指数、植被总初级生产力、区域湿度与改进的湿度5项指标为基础, 提出了基于主成分分析法的西藏植被生态环境质量评价方法, 并探索了其时空变化规律及机理。结果表明: ① 西藏地区植被生态质量整体较为脆弱, 且区域差异明显, 呈现东南优、西北差的分布格局。② 2006-2016年间西藏地区植被生态质量总体呈现变好的趋势。在时间序列上, 2006-2016年间改善、退化的区域占比分别为31.88%和4.13%; 在空间分布上, 变好的区域分布在西北、中部和东部, 变差的区域集中在东南部。③ 水热状况改善特别是降水量的增加和人为保护政策使得研究区西部和中部地区生态质量有所提高。社会经济活动加强是研究区东南部生态质量变差的主要原因。

关键词: 西藏地区; MODIS产品; 植被生态质量; 主成分分析; 时空变化

DOI: 10.11821/dlxb201907012

1 引言

近年来, 随着国家生态文明建设的大力推进, 部分地区尤其是环境脆弱区的生态受到了高度重视, 资源环境承载力评价和生态质量综合评价成为了国家研究的热点问题。2012年, “十八大”报告首次将生态文明建设制定为国家重大战略方针。2015年, 增强生态文明建设被写入国家五年规划。生态文明建设越来越受到国家的重视。因此, 建立生态方面的评价模型及量化表达方式, 并在此基础上提出生态综合评价的技术标准和规范就显得尤为重要。生态环境是指生物和非生物构成的环境的总称^[1-2]。生态环境质量评价即基于选择的多重指标, 综合运用评价方法量化区域生态环境质量的优劣^[3]。在生态系统中, 植被作为重要组成部分, 承担着调节气候、涵养水源、提供生境等多种作用, 特别对于西藏这样氧气稀薄的高寒地区, 植被对气候的影响更为显著和重要, 而动物和微生物因子数据缺乏且量化难度大。因此本文以生态环境质量中的植被作为评价对象, 借助遥感产品, 以表征植被长势和影响其生长的主要非生物因子为评价指标, 建立评价模型, 对西部生态脆弱的西藏地区的植被生态环境质量(简称生态质量)进行综合评价。

收稿日期: 2018-07-17; 修订日期: 2019-03-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503506); 国家自然科学基金项目(41771493, 41101407) [Foundation: National Key Research and Development Program, No.2016YFC0503506; National Natural Science Foundation of China, No.41771493, No.41101407]

作者简介: 吴宜进(1963-), 男, 江西九江人, 教授, 博士生导师, 主要从事气候变化、区域生态与水土保持等方面的研究。
E-mail: wuyijin@mail.ccnu.edu.cn

通讯作者: 李畅(1982-), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 主要从事遥感与地理信息科学研究。E-mail: lcshaka@126.com
1438-1449 页

所用的研究方法和结果可以为后期量化可持续发展状态提供一种方案, 并为管理决策提供科学依据。

在生态环境评价的方法上, 学者们利用生态足迹^[1, 5]、PSR (Pressure-State-Response) 模型^[6-7]、地理信息技术 (Geographic Information System, GIS) ^[8]等方法筛选生态指标反映生态环境, 采用层次分析法^[9-10]、指数评价法^[11]等确定权重对生态做出有效评价。但以上方法受人为主观因素的影响较大, 且数据多来源于社会经济等人文方面, 对于评估类似西藏这样的无人区而言, 这些方法受到了限制。随着RS (Remote Sensing) 和GIS的发展, 遥感凭借其时间序列完整、空间跨度大、具有客观性等优点, 被广泛用于生态环境研究中^[12-14]。国家环境保护部颁发的《生态环境状况技术规划》, 推出基于遥感的生态环境指数 (Ecological Index, EI), 在生态评价领域应用广泛^[15-17]。EI指标数据包括: 植被覆盖指数、水网密度指数、生物丰度指数、土地退化指数和污染负荷指数, 其中前3项指数可以通过遥感直接获取, 土壤退化指数需要借助遥感数据与地面监测数据获取, 而污染负荷指数一般通过县级及以上地区的年度统计数据获取, 但统计指标数据受地域、尺度、时间的限制较大, 往往无法获得完整的数据, 本文中西藏的统计数据更为缺乏, 故不适宜西藏等大范围地区的生态状况研究。此外, 当前研究多侧重在东部沿海地区或中部人类活动较频繁的区域, 对西藏等高寒生态脆弱区的研究报道较少^[18]。所以基于卫星产品研究西藏地区生态参数评价有助于促进遥感与生态的学科交叉与融合, 丰富生态评价的理论与方法体系。

针对当前研究的不足, 本文引入改进的遥感生态环境状况指数 (Remote Sensing Ecological Index, RSEI) ^[13], 选取陆地表面温度 (Land Surface Temperature, LST)、总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP)、叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI)、植被覆盖度 (Fractional Vegetation Cover, FVC) 以及地面湿度 (Wet) 5项指标, 用以代表生态环境绿度、植被总生产力、植被质量、区域热度与湿度。与已有相关研究相比, ① 提出了基于遥感数据的西藏生态质量综合评价方法; ② 基于NDVI进一步提取了FVC, 并加入LAI和GPP指标补充和完善了该指数; ③ 在湿度方面, 由于西藏地区生态环境的特殊性, 使得部分湿度或干度指标如TVDI具有不稳定性, 不适于衡量其湿度。经比较后发现, MODIS缨帽变换的湿度分量能够较好地反映西藏土壤、植被的综合湿度, 故本文用其作为湿度指数。指标数据均直接或间接来源于MODIS产品, 打破了时空限制。同时为了避免人为设定权重, 提出了基于主成分分析的评价方法, 对上述5项生态指标进行筛选和去相关, 从而构建生态质量综合评价指数 P , 对西藏地区2006-2016年的生态质量进行定量、客观的评价与时空变化分析, 并结合自然、人文、社会经济等因素分析其变化的原因, 探索驱动机理。本文有助于丰富生态评价的理论与方法体系、补充特殊生态区的案例研究、改进西藏综合湿度的遥感反演参数 (如湿度分量)、探索了基于遥感数据的西藏生态质量时空变化规律及机理, 可为西藏地区生态评价提供一种新的客观的评价视角。

2 研究地区与数据

2.1 研究区概况

西藏自治区位于26°50'N~36°53'N、78°25'E~99°06'E, 东西横跨2000 km, 总面积达120万km², 面积约占青藏高原的1/2, 绝大部分区域 (92%以上) 位于海拔4000 m以上的高寒生态区。由于海拔和坡度巨大的区域分异, 致使西藏的地貌结构较为复杂。主要

地貌分区为西北部藏北高原、南部藏南山原湖盆谷地、藏东高山深谷和喜马拉雅高山区(图1)。西藏由于海拔高、气温低、降水总体偏少等特点,因而生态系统较为脆弱,易受到外界的干扰。但西藏是众多大江大河(长江、澜沧江、雅鲁藏布江)的发源地,而且对于保护高原生态系统,调节东亚乃至全球气候都起到了重要的作用。但随着全球气候变暖和人类不合理开发,西藏的脆弱性程度加大,主要表现为水土流失、土壤退化、生物多样性减少等。作为东亚重要的生态屏障,研究西藏的生态环境状况及其变化,对于国家生态保护对策具有一定意义。

2.2 数据源与预处理

搭载在terra和aqua卫星上的中分辨率成像光谱仪MODIS,扫描宽度可达到2330 km,每1~2 d获取一次全球观测数据。由于其覆盖范围广、回访周期短的优点,被广泛应用于大尺度的生态研究^[19]。所有指标数据源于EOS/MODIS 遥感产品(<https://search.earthdata.nasa.gov/>),具体数据如表1所示。

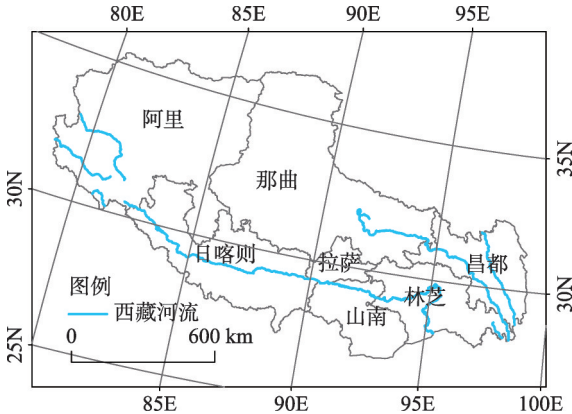


图1 研究区地理位置
Fig. 1 Location of the study area (Tibet)

表1 研究指标及其数据产品

Tab. 1 Research indicators and data products

指标	产品	时间分辨率(d)	空间分辨率(m)	等级
FVC	MOD13A2 (归一化植被指数)	16	1000	L3
LAI	MOD15A2H	8	500	L4
GPP	MOD17A2H	8	500	L4
LST	MOD11A2	8	1000	L3
Wet	MOD09A1 (地表反射率)	8	500	L3

以上MODIS数据产品等级高,已经经过辐射、大气校正等。获取时间为2006年和2016年的7-9月,该时期为植被生长季,易于区别植被区与裸地雪域区。

本文对各指标栅格数据进行配准、镶嵌和掩膜提取,并完成投影变换,统一分辨率为1 km×1 km,投影为横轴墨卡托投影。在筛选数据时,选择云量少、质量高的数据,计算各项指标7-9月的平均值,计算后的结果作为后续主成分分析的数据基础。水域、裸地和雪域因为部分指标无值,无法有效参与生态评价,故掩膜剔除水域、裸地和雪域部分。

气象数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)西藏地区的23个气象站点,包括温度和降水数据。数据由国家相关部门根据规范标准制作,精度可信。统计数据来源于《西藏统计年鉴》,年份为2006-2016年^[20]。

3 方法及指标

植被是生态系统中重要的组成部分,是陆地生态系统存在的基础。本文的5项指标

均和植被有关。FVC表征植被生长状况和覆盖程度,是直接衡量区域绿度的重要指标。LAI进一步反映植被生长质量。GPP反映植被的生理特征和生长状况。LST和Wet则表征研究区的热度与湿度,是与植被生长最密切的两项因子。本文拟构建的生态综合指数(P),可以表示为如下函数:

$$P=g(FVC, LAI, GPP, LST, Wet) \quad (1)$$

确定权重方法采用客观打分的主成分分析法。通过归一化处理消除指标量纲之间的不一致。其公式可以表达为:

$$F_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (2)$$

式中: F_i 表示某像素归一化后的值; I_i 表示上述5个指标在某一像元 i 的值; I_{\min} 表示该指标在所有像元中的最小值; I_{\max} 表示该指标在所有像元中的最大值。

3.1 植被覆盖度(FVC)

对于中国中高纬度高海拔地区的植被覆盖状况,国内不少学者已经做了研究^[21-23],卫星衍生的NDVI数据产品是在大规模调查研究中不可缺少的选择^[24-26]。基于MODIS产品,本文处理得到西藏地区NDVI,并利用像元二分法对FVC进行估算。该方法是一种基于像元线性分解模型计算植被覆盖度的方法^[27]。其表达式为:

$$NDVI = NDVI_v \times FVC + NDVI_s \times (1 - FVC) \quad (3)$$

式中: $NDVI_v$ 表示植被覆盖像元的归一化植被指数值; $NDVI_s$ 表示裸土覆盖像元的归一化植被指数值。由公式(3)可得:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (4)$$

由于西藏大部分为无人区,实测数据难以获取。因此,本文采用置信区间的方法,提取归一化植被指数的最大及最小值,分别代表植被和土壤的归一化植被指数。即根据95%的置信区间,在置信区间内,得到2006年 $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$, 分别为-0.0496和0.8767; 2016年 $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$, 分别为-0.0491和0.7520。代入公式(4),得到西藏地区植被覆盖度分布情况。

3.2 叶面积指数(LAI)和总初级生产力(GPP)

利用MODIS数据产品反演叶面积指数在众多学者的研究中得到了验证^[28-30]。本文基于MODIS产品,获取西藏地区叶面积指数数据。根据MODIS的LAI和GPP产品说明,DN值为253~255时,表示裸地、雪域或水域。对于非特殊DN值,LAI则表达为:

$$LAI = 0.1 \times DN_A \quad (5)$$

式中: DN_A 表示叶面积指数影像的灰度值。

通过归一化公式,对数据进行无量纲化处理,得到西藏地区叶面积指数分布情况。植被总初级生产力GPP是表征植物光合作用的指标^[31],常用于量化植被生长质量^[32-33],用同样的方法提取得到GPP。

3.3 陆地表面温度(LST)与湿度(Wet)

温度与湿度是影响植被生长的重要生态因子,也是驱动生态环境变化的重要因素^[34-35]。将遥感数据的灰度值转换为常用的摄氏度,提取得到研究区地表温度的分布情况,具体公式如下:

$$LST = 0.02 \times DN_s - 273.15 \quad (6)$$

式中: DN_s 表示陆地表面温度影像的灰度值。

由于西藏地理环境的特殊性,TVDI等湿度或干度指标不适用于反演研究区土壤和植

被的湿度,经比较后发现,MODIS 缨帽变换的湿度分量能较好反映西藏土壤和植被的综合湿度。缨帽变换,又称 K-T 变换,是由 Kauth 等提出的一种能够消除光谱响应相关性的线性变换。缨帽变换的 4 个分量分别代表绿度指数、亮度指数、湿度指数和黄度指数(噪声)。其中第 3 分量湿度指数反映了土壤、植被和水体的湿度。缨帽变换多存在于 Landsat 和 IKONOS 影像中,但近年来有学者发现 MODIS 中也存在缨帽变换^[36],基于改进的 MODIS 缨帽变换公式^[37],利用 MOD09A1 地表反射率产品,计算西藏的湿度指标,公式为:

$$Wet = 0.1147\rho_1 + 0.2489\rho_2 + 0.2408\rho_3 + 0.3132\rho_4 - 0.3122\rho_5 - 0.6416\rho_6 - 0.5087\rho_7 \quad (7)$$

式中: ρ_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) 为 MOD09A1 地表反射率产品各波段的反射率。

3.3 主成分分析

本文拟建的生态指数 P 应综合以上 5 项指标的特性。主成分分析可以在保证信息丢失最少的前提下,将多个具有相关性的指标转换为相互独立的综合指标,从而对指标进行降维。其优点在于简化过多的因素,同时具有客观性,避免了人为带来的误差^[38-39]。

主成分分析法的步骤如下:① 对原始数据进行标准化处理;② 建立各指标的相关系数矩阵 R ;③ 计算 R 的特征值 λ 和对应的特征向量 L ;④ 计算方差贡献率,确定主成分个数 k ;⑤ 对 k 个主成分进行加权求和,从而得到综合生态指数。加权求和公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^k e_i \times pc_i \quad (8)$$

式中: P 为生态综合指数; e_i ($i = 1, 2, \dots, k$) 为某一主成分的方差贡献率; k 为选取的主成分个数, pc_i 表示对应的第 i 个主成分。

4 结果与分析

4.1 生态综合指数构建

依据上述公式,分别得到 2006 年和 2016 年西藏地区的 FVC、LAI、GPP、LST、Wet 5 项指标, LAI、GPP、LST 均是直接源于遥感产品,由于篇幅有限,故不再列出结果。2006 年 2016 年西藏的 FVC 和 Wet 分布结果如图 2、图 3 所示。

利用 SPSS 软件,将归一化后的 5 项指标汇总,并依据主成分分析过程,计算相关系数矩阵及方差贡献率,并以累计贡献率达到 80% 为阈值,选取前 k 项特征根,作为最后进行综合评分的主成分(表 2)。

表 2 说明,在第一主成分(PC1)中,系数较大的指标为 FVC、GPP、LAI,两期均达 0.8 以上。在第二主成分(PC2)中,系数较大的指标为 Wet,两期分别为 0.802 和 0.494。因此,可以归纳出两个主成分:① 由 FVC、GPP、LAI 代表的植被因子;② 由 Wet 代表的湿度因子。

根据式(8)计算得到西藏地区生态综合指数评分 P 。为便于指标间的度量与比较,对结果进行标准化处理,并以 0.2 为间隔,将 P 值划为 5 个等级(优、良、中等、较差、差)。 P 值越高,表示生态质量越好。最终得到西藏地区 2006 年和 2016 年两期的生态综合指数分布(图 4),其像元统计数据如表 3 所示。

4.2 生态质量总体评价

4.2.1 空间分布 从图 4 可以看出,西藏生态质量整体呈“东南优、西北差”的空间格局。其中,2006 年和 2016 年等级在较差及以下的面积占比分别达 84.61% 和 77.53% (表 3),表明研究区大部分属生态脆弱区。

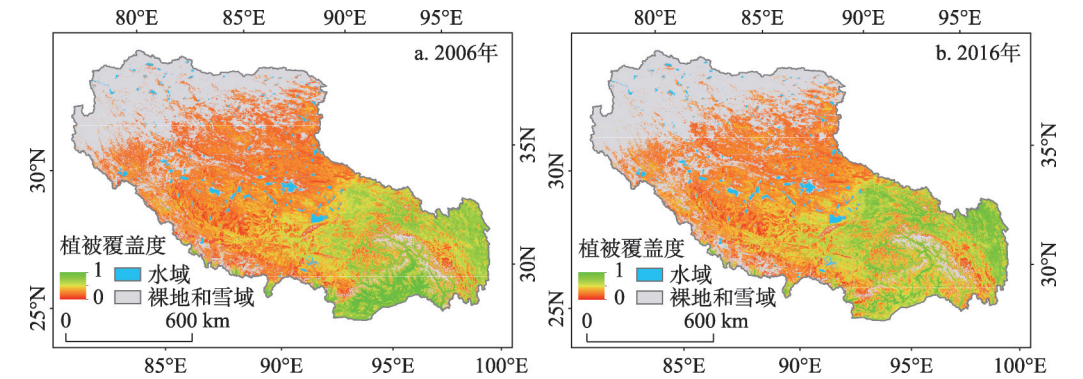


图2 2006和2016年西藏地区植被覆盖度(FVC)分布图
Fig. 2 Distribution of FVC in Tibet in 2006 and 2016

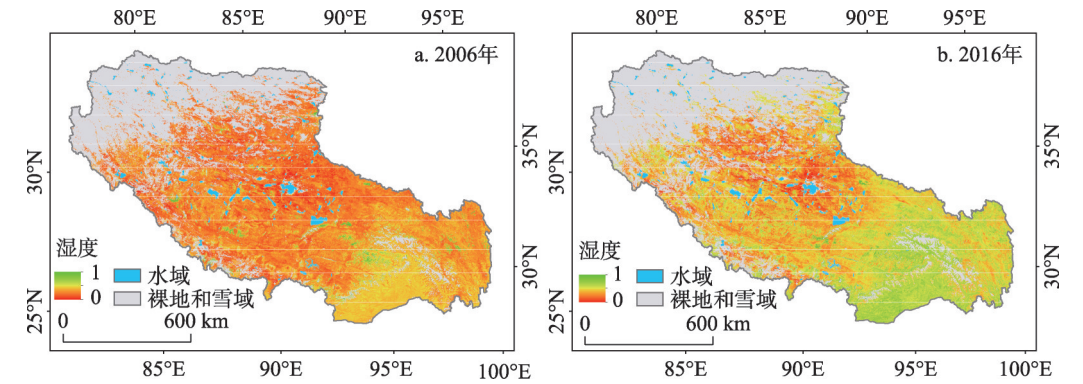


图3 2006和2016年西藏地区湿度(Wet)分布图
Fig. 3 Distribution of wetness in Tibet in 2006 and 2016

表2 各主成分对应的贡献率与特征值

Tab. 2 The contribution rates and characteristic values of principal components

指标	2006年		2016年	
	PC1	PC2	PC1	PC2
FVC	0.932	0.001	0.880	0.051
LAI	0.954	0.028	0.912	0.927
GPP	0.981	0.011	0.924	0.938
LST	0.349	-0.758	0.219	0.154
Wet	0.281	0.802	0.478	0.494
特征值	2.941	1.219	2.782	1.227
方差贡献率(%)	58.822	24.384	55.638	24.528
累计贡献率(%)	58.822	83.206	55.638	80.165

在区域分布上,生态优良区集中在东南部海拔较低的河谷平原,包括藏南谷地、雅鲁藏布江中下游河谷、卡门河谷等,以及东部横断山脉的河谷;生态脆弱区分布于中部和西北部的高原山脉,包括藏北高原、冈底斯山脉等。结合行政区划,发现昌都、林芝、山南、拉萨海拔普遍较低、水热条件优越,故植物生态状况良好;而日喀则、那曲、阿里则相反,海拔较高,气候寒冷干燥,因而植被生态状况脆弱。

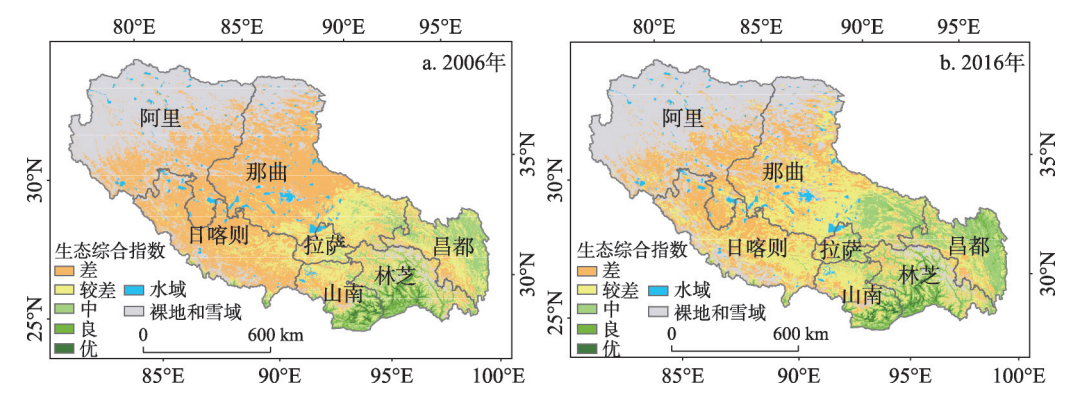


图4 2006和2016年西藏生态综合指数(P)分布图

Fig. 4 Distribution of ecological indexes in Tibet in 2006 and 2016

4.2.2 动态变化 为监测生态质量变化趋势,利用ArcGIS中的栅格计算器,分析了近10年来西藏生态质量的变化(表4),并将结果分为明显变差(−2)、变差(−1)、不变(0)、变好(+1)和明显变好(+2)5类。本文只分析指标有效值的区域,裸岩、雪域和水域不参与统计分析,同时对变化情况做了可视化(图5)。

结果表明,在西藏生态质量改善和退化的面积占比分别为31.88%和4.13%,生态质量总体呈现变好趋势;在空间分布上,变好的区域集中在东部横断山区,西北部藏北高原和中部高原。结合行政区划,主要分布在日喀则、阿里、那曲、拉萨、昌都。生态变差的区域集中在东南部河谷平原,在行政区上处于山南和林芝。

4.3 生态变化驱动力分析

大量研究表明,生态环境变化往往受自然和人文等因素的多重机制驱动^[40-41]。结合研究区,发现西藏地区环境异质性较大,自然因素的变化、人类的生产生活和部分地区人为保护加强导致了该地区生态环境质量的变化。

4.3.1 自然因素 温度和降水是驱动生态质量变化的重要因素。通过统计西藏地区39个气象台站数据,分析研究区2006-2016年的温度和降水情况,指标包括年均温度、年降水量、生长季(7-9月)温度,生长季降水量。结果表明,2006-2016年间西藏地区年降水量和生长季降水量均呈波动上升趋势,年降水量从2006年的412 mm上升到2016年的517 mm,平均每年增加10.5 mm。降水量的增加有利于增大区域湿度,从而助于植被的生长和生态环境的改善。2006-2016年西藏地区温度呈略微下降的特征,但趋势不明显。

表3 2006年和2016年西藏地区各级生态指数面积分布

Tab. 3 Area distribution of each ecological indexes in Tibet between 2006 and 2016

生态综合指数等级	2006年		2016	
	面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)
差(0.0~0.2)	536545	57.63	319410	35.45
较差(0.2~0.4)	251186	26.98	379048	42.07
中等(0.4~0.6)	105307	11.31	161781	17.96
良(0.6~0.8)	30960	3.33	35122	3.90
优(0.8~1.0)	7051	0.76	5567	0.62

表4 2006-2016年间西藏地区生态指数变化检测

Tab. 4 Change detection of ecological indexes in Tibet between 2006 and 2016

类别	类别	面积(km ²)	级别百分比(%)	类别百分比(%)
变差	明显变差(−2)	947	0.11	4.13
	变差(−1)	35939	4.03	
不变	不变(0)	571302	63.99	63.99
变好	变好(+1)	284112	31.82	31.88
	明显变好(+2)	470	0.05	

且相关性分析表明西藏温度LST与 P 值呈显著正相关($R^2 = 0.288$, $p < 0.05$)。故生态状况的改善主要是由降水量的增加驱动的^[42]。此外,统计了东南部生态退化区气象站点的温度和降水数据,发现该区域气候变化与整个西藏地区的变化趋势基本一致。说明东南部生态退化主要是由人文因素驱动的,而非自然因素。

4.3.2 人文因素

(1) 社会经济因素

GDP、人口、土地利用等的变化会对生态环境质量造成压力,是其变化的主要驱动因素。由于西藏地区人口数据部分缺失,土地利用数据缺乏,且某些数据存在明显误差。故本文以GDP(包括一二三产业)和重工业产值代表经济发展程度。以耕地面积和房屋建筑施工面积代表土地利用中人类对生态环境的干扰程度。据西藏统计年鉴显示,2006-2016年间,西藏东南部的山南和林芝经济增速明显(图6),两个地区平均每年增长12.07个百分点,比其他地区均值(11.45)高了0.62个百分点。在产业发展方面,山南第一产业发展较快,增速仅次于拉萨,平均每年增长4.27个百分点,比其他地区均值(4.02)高了0.25个百分点;林芝第三产业发展较快,增速仅次于日喀则,平均每年增长12.54个百分点,比其他地区均值(10.94)高了1.6个百分点。在重工业产值上,山南仅次于拉萨。表明山南和林芝相较于西藏西北地区而言经济发展较快。在耕地面积上,山南和林芝增速明显高于其他区域(图7)。这与其拥有相对平坦的河谷和平原地形有关。在建筑面积上,山南和林芝增长面积仅次于拉萨和日喀则。日喀则面积广阔,基数大,大面积的区域改善抵消了区域退化的面积。拉萨作为省会,规划合理,保护得当,因而生态有所改善。故东南部山南和林芝生态退化主要是由农业开垦、城市扩张、产业发展和社会经济活动增强造成的。

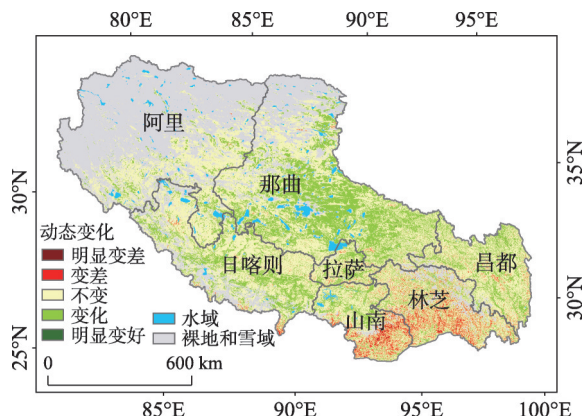


图5 2006-2016年间西藏地区生态指数动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of Tibet's ecological indexes during 2006-2016

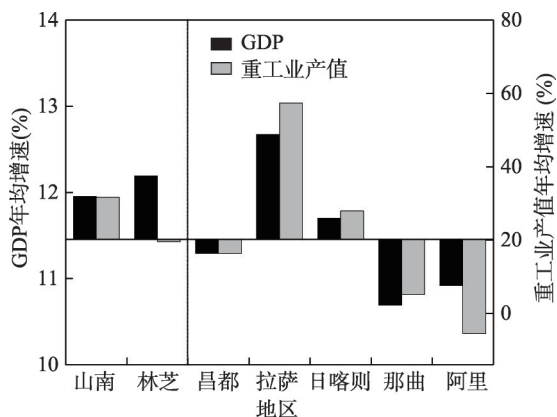


图6 2006-2016年西藏各市GDP和重工业产值增速对比

Fig. 6 Comparison of growth rate of GDP and heavy industry output in various cities at Tibet from 2006 to 2016

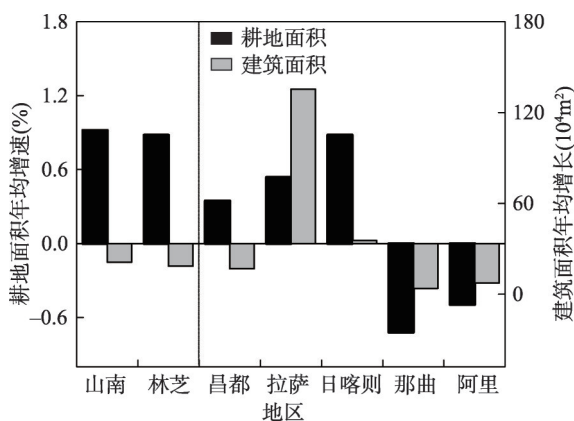


图7 2006-2016年西藏各市耕地和建筑面积增减对比

Fig. 7 Comparison of the increase and decrease at cultivated land and building land area in various cities at Tibet from 2006 to 2016

(2) 政策因素

随着生态文明建设与发展,西藏地区积极响应国家政策,在2009年颁布了《西藏生态安全屏障保护与建设规划(2008-2030年)》,划分了禁止、限制和有条件开发区,规定日喀则、阿里、那曲的部分地区属于禁止或限制开发区,注重生态保护和涵养水源。生态保护政策、较小的人为干扰和水热状况改善是这些地区生态变好的主要原因。昌都地形起伏大,多泥石流等自然灾害,也是国家重点保护区。拉萨虽然经济发展较快,第二产业增长迅速,但作为省会,规划合理,保护措施得当,故生态有所改善。

5 结论

(1) 西藏地区生态质量总体较为脆弱。2006年和2016年生态等级在较差及以下的区域面积占比为84.61%和77.53%。且生态质量区域差异显著,总体呈现东南优,西北差的分布格局。其中,生态较好的地区集中在东部高山深谷和东南部河谷地区,行政区上为山南和拉萨;较差的区域集中在西北部的高原山区,行政区上为日喀则,那曲和阿里。

(2) 2006-2016年间,西藏生态质量整体呈现变好趋势。10年之内,研究区生态变差、不变和变好的面积占比分别为4.13%、63.99%、31.88%,生态改善面积明显大于恶化面积。具体区域差异表现为:东南部趋于退化,行政区上为山南和林芝;西北、中部和东部得到改善,行政区上为日喀则、阿里、那曲、拉萨、昌都。

(3) 自然、社会经济和人为政策共同驱动着西藏的生态质量变化。西北和中部地区生态变好的原因主要是全球气候变化下该地区水热状况得到改善,特别是降水量的增加。同时,人为保护政策加强也是变好的原因之一。东南部生态变差的原因主要是农业开垦、城市扩张、产业发展和社会经济活动增强所致。

参考文献(References)

- [1] Sun Ruyong. Basic Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2002. [孙儒泳. 基础生态学. 北京: 高等教育出版社, 2002.]
- [2] Xu Yan, Zhou Huarong. A preliminary study on advances in assessment of eco-environmental quality in China. *Arid Land Geography*, 2003, 26(2): 166-172. [徐燕, 周华荣. 初论我国生态环境质量评价研究进展. *干旱区地理*, 2003, 26(2): 166-172.]
- [3] Zhou Huarong. Study on ecological environmental quality as assessment index system of Xinjiang. *China Environmental Science*, 2000, 20(2): 150-153. [周华荣. 新疆生态环境质量评价指标体系研究. *中国环境科学*, 2000, 20(2): 150-153.]
- [4] Ren Zhiyuan, Huang Qing, Li Jing. Quantitative analysis of dynamic change and spatial difference of the ecological safety: The case of Shaanxi province. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 597-606. [任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析. *地理学报*, 2005, 60(4): 597-606.]
- [5] Xiao Jianhong, Yu Qingdong, Liu Kang, et al. Evaluation of the ecological security of island tourist destination and island tourist sustainable development: A case study of Zhoushan Islands. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(6): 842-852. [肖建红, 于庆东, 刘康, 等. 海岛旅游地生态安全与可持续发展评估: 以舟山群岛为例. *地理学报*, 2011, 66(6): 842-852.]
- [6] Jiang Weiguang, Pan Yingzi, Hou Peng, et al. Assessment and analysis of wetland ecosystem health in Dongting Lake. *Geographical Research*, 2009, 28(6): 1665-1672. [蒋卫国, 潘英姿, 侯鹏, 等. 洞庭湖区湿地生态系统健康综合评价. *地理研究*, 2009, 28(6): 1665-1672.]
- [7] Wolfslehner B, Vacik H. Evaluating sustainable forest management strategies with the analytic network process in a pressure-state-response framework. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(1): 1-10.
- [8] Yu Feng, Li Xiaobing, Wang Hong, et al. Land use change and eco-security assessment of Huangfuchuan Watershed.

- Acta Geographica Sinica, 2006, 61(6): 645-653. [喻锋, 李晓兵, 王宏, 等. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. 地理学报, 2006, 61(6): 645-653.]
- [9] Ni Xiaojiao, Nan Ying, Zhu Weihong, et al. Study on comprehensive assessment of ecological security in Changbai Mountain region based on multi-hazard natural disasters risk. Geographical Research, 2014, 33(7): 1348-1360. [倪晓娇, 南颖, 朱卫红, 等. 基于多灾种自然灾害风险的长白山地区生态安全综合评价. 地理研究, 2014, 33(7): 1348-1360.]
- [10] Zhang Z, Lu W X, Zhao Y, et al. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process. Ecological Modelling, 2014, 275(10): 9-21.
- [11] Huang Heping, Peng Xiaolin, Kong Fanbin, et al. Evaluation of ecological economy index in the Poyang Lake ecological economic zone. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 3107-3144. [黄和平, 彭小琳, 孔凡斌, 等. 鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价. 生态学报, 2014, 34(11): 3107-3114.]
- [12] Yang Shengtian, Liu Changming, Yang Zhifeng, et al. Natural eco-environmental evaluation of west route area of interbasin water transfer project. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(1): 11-18. [杨胜天, 刘昌明, 杨志峰, 等. 南水北调西线调水工程区的自然生态环境评价. 地理学报, 2002, 57(1): 11-18.]
- [13] Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897. [徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897.]
- [14] De Araujo Barbosa C C, Atkinson P M, et al. Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. Ecological Indicators, 2015, 52: 430-443.
- [15] Zhu Jiawei, Xie Xiaotong, Li Xinhui. A solution to the problem of ecological environmental carrying capacity evaluation: A case study of Henan Province. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7039-7047. [朱嘉伟, 谢晓彤, 李心慧. 生态环境承载力评价研究: 以河南省为例. 生态学报, 2017, 37(21): 7039-7047.]
- [16] Liu Rui, Wang Shixin, Zhou Yi, et al. Ecological environment condition evaluation mode of county region based on remote sensing techniques. China Environmental Science, 2012, 32(1): 181-186. [刘瑞, 王世新, 周艺, 等. 基于遥感技术的县级区域环境质量评价模型研究. 中国环境科学, 2012, 32(1): 181-186.]
- [17] Zhi Yingbiao, Wang Zailan, Ma Zhong, et al. Research on Ningxia's resource and environmental performance and changing trends. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6490-6498. [智颖彪, 王再岚, 马中, 等. 宁夏资源环境绩效及其变动态势. 生态学报, 2009, 29(12): 6490-6498.]
- [18] Gao Jiangbo, Hou Wenjuan, Zhao Dongsheng. Comprehensive assessment of natural ecosystem vulnerability in Tibetan Plateau based on satellite-derived datasets. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(4): 580-587. [高江波, 侯文娟, 赵东升. 基于遥感数据的西藏高原自然生态系统脆弱性评估. 地理科学, 2016, 36(4): 580-587.]
- [19] He Baozhong, Ding Jianli, Zhang Zhe, et al. Experimental analysis of spatial and temporal dynamics of fractional vegetation cover in Xinjiang. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 1948-1966. [何宝忠, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析. 地理学报, 2016, 71(11): 1948-1966.]
- [20] Tibet Autonomous Region Statistics Bureau. Tibet Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2006-2016. [西藏自治区统计局. 西藏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2006-2016.]
- [21] Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255-1268. [穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 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.]
- [22] Zhou Wei, Gang Chengcheng, Li Jianlong, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982-2010. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 15-30. [周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982-2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 15-30.]
- [23] Li Shuangshuang, Yan Junping, Wan Jia. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 960-970. [李双双, 延军平, 万佳. 近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(7): 960-970.]
- [24] Wang Q, Tenhunen J, Dinh N Q, et al. Similarities in ground- and satellite-based NDVI time series and their relationship to physiological activity of a Scots pine forest in Finland. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1/2): 225-237.
- [25] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(11): 4309-4314.
- [26] Shen M G, Piao S L, Jeong S J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(30): 9299-9304.

- [27] Leprieur C, Verstraete M M, Pinty B. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 10(4): 265-284.
- [28] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3): 490-507.
- [29] Jensen J L R, Humes K S, Hudak A T, et al. Evaluation of the MODIS LAI product using independent lidar-derived LAI: A case study in mixed conifer forest. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3625-3639.
- [30] Liao Yanran, Gai Yingying, Yao Yanjuan, et al. Validation methods of LAI products on the basis of scaling effect. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 143-152. [廖嫣然, 盖颖颖, 姚延娟, 等. 尺度效应的叶面积指数产品真实性检验方法. *遥感学报*, 2015, 19(1): 143-152.]
- [31] Wang Xunfeng, Ma Mingguo, Li Xin, et al. Comparison of remote sensing based GPP models at an alpine meadow site. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(4): 751-763. [王旭峰, 马明国, 李新, 等. 遥感 GPP 模型在高寒草甸的应用比较. *遥感学报*, 2012, 16(4): 751-763.]
- [32] Mo Xingguo, Liu Suxia, Lin Zhonghui, et al. Patterns of evapotranspiration and GPP and their responses to climate variations over the North China Plain. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 589-598. [莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应. *地理学报*, 2011, 66(5): 589-598.]
- [33] Li Z, Yu G, Xiao X, et al. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using Modis images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107(3): 510-519.
- [34] Zhao Maosheng, Fu Congbin, Yan Xiaodong, et al. Study on the relationship between different ecosystems and climate in China using NOAA/AVHRR data. *Acta Geographica Sinica*, 2001(3): 287-296. [赵茂盛, 符淙斌, 延晓冬, 等. 应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系. *地理学报*, 2001(3): 287-296.]
- [35] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, et al. Estimating surface temperature changes of lakes in the Tibetan Plateau using MODIS LST data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119: 8552-8567.
- [36] Zhang X Y, Schaaf C B, Friedl M A, et al. MODIS tasseled cap transformation and its utility. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2002, 2: 1149-1151.
- [37] Lobser S E, Cohen W B. MODIS tasseled cap: Land cover characteristics expressed through transformed MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(22): 5079-5101.
- [38] Xu Jianhua. *Quantitative Geography*. Beijing: Higher Education Press, 2006. [徐建华. *计量地理学*. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [39] Zhang Guoping, Zhang Zengxiang, Liu Jiyan. Spatial distribution of aeolian erosion of soil and its driving factors in China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(2): 146-158. [张国平, 张增祥, 刘纪远. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析. *地理学报*, 2001, 56(2): 146-158.]
- [40] Liu Ming, Liu Chun, Wang Kelin. Eco-security in Dongting Lake watershed: Its changes and relevant driving forces. *Chinese Journal of Ecology*, 2007(8): 1271-1276. [刘明, 刘淳, 王克林. 洞庭湖流域生态安全状态变化及其驱动力分析. *生态学杂志*, 2007(8): 1271-1276.]
- [41] Zhou Sha, Huang Yuefei, Wang Guangqian. Changes in the ecological environment and their determining factors in the middle Heihe River Basin. *China Environmental Science*, 2014, 34(3): 766-773. [周沙, 黄跃飞, 王光谦. 黑河流域中游地区生态环境变化特征及驱动力. *中国环境科学*, 2014, 34(3): 766-773.]
- [42] Lin Houbo, You Qinglong, Jiao Yang, et al. Spatial and temporal characteristics of the precipitation over the Tibetan Plateau from 1961 to 2010 based on high resolution grid-observation dataset. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 271-281. [林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 基于高分辨率格点观测数据的青藏高原降水时空变化特征. *自然资源学报*, 2015, 30(2): 271-281.]

Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006-2016

WU Yijin^{1,2}, ZHAO Xingshuang^{1,2}, XI Yue^{1,2}, LIU Hui^{3,4}, LI Chang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Wuhan 430079, China;

2. College of City and Environmental Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

3. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic

Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In view of the lack of research on the screening and comprehensive evaluation of vegetation ecological parameters based on remotely sensed data products, this paper firstly proposes a method to evaluate the vegetation eco-environmental quality in Tibet by PCA (principal component analysis). Based on five indicators, including fractional vegetation coverage (FVC), leaf area index (LAI), gross primary productivity (GPP), land surface temperature (LST) and modified wet (Wet) from MODIS satellite data, the law and mechanism of spatial-temporal changes of eco-environmental quality in Tibet in the last 10 years are explored. The experimental results show that: (1) The comprehensive quality of the eco-environmental quality in Tibet is relatively fragile, and the spatial difference in eco-environmental quality is significant. It is excellent in the southeast but poor in the northwest. (2) During the period from 2006 to 2016, the eco-environmental quality in Tibet shows a trend of improving overall. In terms of time series, the proportion of areas improved and degraded in the past 10 years was 31.88% and 4.13% respectively. In terms of spatial distribution, the improved areas are distributed in the northwest, central and eastern parts, but the degraded areas are distributed in the southeastern parts. (3) Improvements in hydrothermal conditions (especially the increase in precipitation) and human protection policies have led to improvements in the eco-environmental quality in the western and central Tibet. The strengthening of social and economic activities is the main reason for the deterioration of the eco-environmental quality in the southeast of Tibet.

Keywords: Tibet; MODIS data products; eco-environmental quality; principal component analysis; spatial-temporal changes