DOI: 10.5846/stxb201602030248

王强,张廷斌,易桂花,陈田田,别小娟,何奕萱.横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子分析.生态学报,2017,37(9): - . Wang Q, Zhang T B, Yi G H, Chen T T, Bie X J, He Y X. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): - .

横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动 因子分析

王 强1,张廷斌^{1,2,3,*},易桂花^{1,4},陈田田⁴,别小娟¹,何奕萱¹

1 成都理工大学地球科学学院,成都 610059

2 地学空间信息技术国土资源部重点实验室,成都 610059

3 成都理工大学工程技术学院,乐山 614000

4 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041

摘要:横断山区是我国长江上游重要的生态屏障区,对周边区域乃至我国中西部地区气候和生态环境有着深刻的影响。NPP 作为碳收支和气候变化研究的核心内容,是判定生态系统健康状况和可持续发展水平的重要指标。基于 MODIS C6 的 NPP 数据、1:100 万植被类型图、气象数据和地形数据,采用趋势线分析法和相关分析法对横断地区 2004—2014 年植被 NPP 时空格局、变化规律以及驱动因子进行了研究。结果表明:①2004—2014 年横断山区植被年 NPP 总量的介于 183.768—223.239 TgC 之间,多年平均为 208.498 TgC,单位面积下的植被年 NPP 均值为 463 gC m⁻² a⁻¹。整体上,植被 NPP 呈增加趋势,但局部差异明显。②植被 NPP 平均值的年际变化率在-53—97 gC m⁻² a⁻¹之间,NPP 呈增加趋势的区域分布在北部与中部的东侧以及南部的东、西两侧地区,而减少趋势的区域主要集中在西北部、中部的汶川-映秀一带以及南部攀枝花地区。③横断山区植被 NPP 变化受气候因子驱动影响的区域占比 8.42%,主要集中在中部的大雪山-沙鲁里山地区,而非气候因子占比 91.58%,分布在北部的阿坝地区以及南部的低海拔广大地区。该研究将对横断山区生态环境建设和可持续发展起到指导作用。 关键词:NPP;气候变化;驱动因子;MODIS C6;横断山区

Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014

WANG Qiang¹, ZHANG Tingbin^{1,2,3,*}, YI Guihua^{1,4}, CHEN Tiantian⁴, BIE Xiaojuan¹, HE Yixuan¹

1 Chengdu University of Technology, College of Earth Sciences, Chengdu 610059, China

2 Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology, Ministry of Land and Resources of the P.R.China, Chengdu 610059, China

3 The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China

4 Institude of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract: The Hengduan mountain area is acting as the essential ecological barrier for the upper reaches of the Yangtze River, which exerts profound influences to the climate and ecological environment of its surrounding areas as well as the Middle West part of our country. As the core of carbon budget climate changes, NPP functions as the crucial indicator in measuring the health status and sustainable development of the ecological system. Therefore, based on the NPP statistics of MODIS C6, vegetation map (1:1000000), meteorological data as well as topographic data, this paper is intended to utilize trend line analytical method and other related analysis methods to perform study on the spatial pattern, variation rules and

收稿日期:2016-02-03; 网络出版日期:2016-00-00

基金项目:国家科技支撑项目(2012BAC19B05):重点领域气候变化影响与风险评估技术研发与应用

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangtb@cdut.edu.cn

the driving factors to NPP in Hengduan mountain area during year 2004—2014. Detailed research results indicate that: ① total NPP for Hengduan mountain area during 2004—2014 falls between 183.768—223.239 TgC with average of annual NPP total value as 208.498 TgC and annual NPP mean value per unit area as 463 gC m⁻² a⁻¹. On the whole, overall NPP is showing an increasing trend with distinct local disparity. ②average annual NPP change rate is within -53—97 gC m⁻² a⁻¹. And regions with a rising NPP tendency are mainly distributed at the north part, east of middle part as well as east and west of the south part; whereas regions with a decreasing tendency mainly concentrates on Wenchuan-Yingxiu areas which belong to the northwest and middle part. ③The regions with NPP changes resulted from climate factors take up 8.42 % of the total coverage of the Hengduan mountain area. These regions mainly sit at the mountainous areas at Daxue Mountain-Shaluli Mountain. By contrast, those subject to non-climate factors occupy 91.58% of the Hengduan mountain area. And they are mainly located at Aba areas in the north and broad regions in the south part with lower altitude. As far as the significance of this paper is concerned, it will provide instructions to the ecological environment construction and the sustainable growth for Hengduan mountain area.

Key Words: NPP; climate change; driving factors; MODIS C6; Hengduan mountain area

陆地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指绿色植物在单位时间、单位面积上所累积的 有机物数量,是由光合作用所产生的有机质总量(Gross Primary Productivity, GPP)中扣除自养呼吸 (Autotrophic respiration, RA)后的剩余部分^[1]。NPP 作为碳收支和气候变化研究的核心内容,是判定生态系 统健康状况和可持续发展水平的重要指标^[24]。Lieth 等建立了第一个全球 NPP 回归模型(Miami 模型),认为 NPP 是年平均气温和年降雨的函数^[5]。随着遥感技术的发展,利用遥感模型估算地表植被净初级生产力成 为可能(如 CASA 模型^[6]、GLO-PEM 模型^[7])。近年来,国内研究表明我国陆地植被 NPP 由东南到西北递减, 其变化受气候、人类活动等因素影响,全国总量在 3.38—4.35 PgC/a 之间^[8-11]。在区域尺度上,学者分别对东 北亚地区^[12]、内蒙古草原^[13]、三江源区^[14]、青藏高原^[15]、西南地区^[16-17]等地区进行了综合研究,包括区内植 被 NPP 的时空格局、变化规律以及其与气候的相关性等内容。

横断山区位于青藏高原东南缘,横跨我国西南一、二、三级地形阶梯,拥有世界唯一满足4个条件的"三 江并流"自然遗产,不仅是我国长江上游重要的生态屏障区(青藏高原生态屏障和黄土高原-川滇生态屏障), 还是我国珍惜濒危动植物的避难所和世界生物物种最丰富的地区之一,对周边区域乃至我国中西部地区气候 和生态环境有着深刻的影响^[18-21]。目前针对横断山区植被 NPP 的相关研究还相对较少,作为表征气候变化 和植被活动、判定生态系统健康状况和可持续发展水平的关键因子之一,植被 NPP 时空分布、变化规律及其 驱动因子的研究,对该区生态环境评价和保护具有重要的指导意义。

1 研究区概况

本文选取了横断山区核心区内 98 个区县为研究区,包括四川西部、云南西北大部以及西藏东南部小部分 地区(图1),总面积约 450000 km²,海拔在 294—7049 m 之间。根据前人的分区研究将研究区划分为横断山 区北部、中部和南部^[19-27]。整体上,研究区地势由西北向东南倾斜,以高山峡谷为主,山脉与河流南北纵贯, 相间并列,地形起伏较大。横断山区北部和中部地形急剧上升,大部分海拔超过 4000 m,而南部地区多在 3000 m 以下。区内植被种类繁多^[21-25],植被类型包括针叶林、针阔叶混交林、阔叶林、灌丛、草原、草丛、草甸、 沼泽、高山植被和栽培植被等,其中,灌丛、针叶林、草甸占大部分(面积占比达 76%)。该地区主要受西风环 流和季风系统(印度洋的西南季风和西太平洋的东南季风)控制,气候垂向分带明显,从山脚到山顶往往具有 热带、亚热带、温带与高山寒带等气候类型^[25-29],且由于纵向岭-谷形成的南北通道-东西阻隔的作用,在同一 纬度垂直带谱上,该地区的山体东、西坡又具有不同的基带和带谱结构特征^[26-28]。另外加上局部山地效 应^[28-30],使得对该区气候、生态环境的相关研究变得异常复杂。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 NPP 数据

本文 NPP 数据来源于美国陆地过程分布式数据档 案中心 (Land Processes Distributed Active Archive Center, LPDAAC) 最新的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) C6 的 MOD17A3 数据产品 (https://lpdaac.usgs.gov/)。该数据相对于 MODIS C5 数据,不仅将空间分辨率提高到了 500 m,还在一定程 度上消除了因卫星传感器老化而造成的数据衰减和失 真的问题^[31]。有关研究表明,由 Terra MODIS 数据衰 减而引起的 NDVI 负趋势率达到了-0.004 a⁻¹。面对某 些大范围、长时间、连续变化的科学研究工作,使用 Terra MODIS 蓝波段(Band3)及其衍生产品时应值得特 别注意[32]。本文数据时间跨度为 2004—2014 年,空间 分辨率为 500 m,时间分辨率为年。该数据产品包含一 个数据质量控制文件(NPP_QC),其表示了不同地区 NPP 产品的质量可靠性^[33-34]。本文根据 2004—2014 年的 NPP_QC 数据进行统计分析,结果表明,2004— 2014年横断山区 NPP 数据质量中、高等级多年平均可 信度达到了 98.63 % (反演失败的地区主要集中在贡嘎 山、洱海等冰川和水域等非陆地生态区)。这对于地势 横跨三级阶梯、地形复杂、起伏大的横断山区来说,数据 整体上质量较好。本文舍弃了那些可信度低及反演失 败的像元点,以突出该地区 11a 来植被 NPP 变化特征





与规律,最后利用 MODIS 重投影工具(MODIS Reprojection Tool, MRT) 对数据进行镶嵌、格式转换和重投影等 预处理。

2.1.2 气象数据

本文选取了研究区及附近 73 个地面气象站的 2004—2014 年逐月平均气温和降水量资料(图1)。该气 象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://ede.ema.gov.cn).参考季节划分相关研究^[26-29],将 5—10 月划分为雨季(季风期),11 月—翌年 4 月为干季(非季风期)。由于横断山区雨季降水量占全年降水的绝大 多数^[25-26],本文选取雨季的平均气温和降水量作为气候因子,采用样条函数法对该区域内气象数据进行空间 插值处理^[26]。

2.1.3 植被类型数据

植被类型数据采用全国 1:100 万植被类型图,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。以植被大类为分类基准进行归并处理,然后将数据进行投影、矢栅转换等处理,最后重采样为空间分辨率为 500m 栅格数据。

2.1.4 地形数据

地形数据采用 SRTM90m DEM 产品,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心科学数据中心的"地理 空间数据云平台"(http://www.gscloud.cn)。同样,对高程数据进行了投影转换、重采样等处理,最后统一为

500m 空间分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析

基于像元对多年 NPP 数据计算其平均值,得到研究区多年平均 NPP 的空间分布图,其计算公式(1) 如下:

$$\overline{npp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} npp_i}{n}$$
(1)

式中, n 为年数(时间序列为 2004—2014, 即 n = 11); npp_i为某一像元点第 i 年的 NPP 值; npp 为某像元多年 NPP 平均值。

针对时间序列的 NPP 数据,其绝对年际变化率采用基于像元的一元线性回归分析方法,其计算公式(2):

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} (i \times npp_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} npp_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2}$$
(2)

其中 n 为年数(时间序列为 2004—2014,即 n=11); npp_i 为某一像元点第 i 年的 NPP 值; θ_{slope} 则为该像元在该时间段内 NPP 年际变化的一元线性回归方程的斜率,反映的是某一时间段内总的变化趋势。 $\theta_{slope}>0$ 表明变化趋势是增加,反之则是减少,当 $|\theta_{slope}|\approx0$ 时说明 NPP 没有变化。该公式已广泛用于植被指数和 NPP 的时间序列分析,具有很好的稳定性和置信度^[35-36]。

2.2.2 相关性分析

偏相关分析是在消除其他变量影响的前提下计算某两个变量之间的相关性^[37]。本文利用基于像元的偏相关分析法分别研究了气温和降水量对植被 NPP 变化的影响,线性相关系数的计算公式(3):

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[(x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$
(3)

式中, R_{xy} 为x,y两变量的线性相关系数; x_i 与 y_i 分别为x,y两变量第i年的值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示两变量n年的 平均值;n为样本数。基于线性相关系数的计算结果,偏相关系数计算公式(4):

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^{2})} \sqrt{(1 - R_{yz}^{2})}}$$
(4)

式中, $R_{xy,z}$ 为自变量 z 固定后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数。偏相关系数的显著性检验采用 t 检验法完成。其统计量计算公式(5):

$$t = \frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1 - R_{xy,z}^{2}}} \sqrt{n - m - 1}$$
(5)

式中,n为样本数(时间序列为2004—2014,即n=11);m为自变量个数。

实际上,一个要素的变化往往受多个因子的综合作用影响,而要素间又是相互影响、相互联系的,上述的 单相关分析和偏相关分析都不能反映各要素的综合影响,所谓的某个变量固定条件是不成立的,这就需要采 用复相关分析方法来解决。复相关的计算公式(6)如下:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^2)(1 - R_{xz,y}^2)}$$
(6)

式中, $R_{x,yz}$ 表示因变量 x 和自变量 y,z 的复相关系数; R_{xy} 表示 x 与 y 的线性相关系数, $R_{xz,y}$ 表示固定自变量 y 之后因变量 x 与自变量 z 的偏相关系数。

本文采用 F 检验法对复相关系数进行显著性检验,其统计量计算公式(7)如下:

$$F = \frac{R_{x,yz}^2}{1 - R_{x,yz}^2} \times \frac{n - k - 1}{k}$$
(7)

式中,n为样本数(时间序列为2004—2014,即n=11);k为自变量个数。

3 结果与分析

3.1 横断山区植被 NPP 基本情况

横断山区 2004—2014 年的植被 NPP 在整体上呈波动增加趋势(图 2)。植被年 NPP 总量在 183.768—223.239 TgC 之间,多年平均为 208.498 TgC;全区年 NPP 均值在 408—496 gC m⁻² a⁻¹之间,多年平均为 463 gC m⁻² a⁻¹。从 2004 年 183.768 TgC 到 2014 年的 202.834 TgC,平均增速达 2.0 TgC/a。有关研究表明^[11],1961—2008 期间我国年 NPP 总量的均值为 3.8 PgC/a,本研究区面积占大陆面积 4.7%,而 NPP 总量却占到了全国的 5.5%,这反映了同时期横断山区生态系统植被 NPP 高于全国平均水平。





由橫断山区 2004—2014 植被 NPP 的多年平均空间分布(图 3a)可知,整体上植被 NPP 呈北西向的减少 趋势,具体表现为:①横断山区北部地区,植被 NPP 由东向西逐渐减小(在 250—400 gC m⁻² a⁻¹之间),其低值 区在江达、松潘等地;而高值分布在九寨沟县,介于 400—950 gC m⁻² a⁻¹之间。②横断山区中部地区,NPP 平 均值由东南向西北逐渐减小,低值区在藏东察雅县、贡觉县,川西的炉霍县、稻城县以及沙鲁里山 4000 m 以上 高海拔地区,其 NPP 值在 250—400 gC m⁻² a⁻¹之间;高值在川西石棉县、冕宁县等地,其 NPP 值在 400—950 gC m⁻² a⁻¹之间。③横断山区南部地区,植被 NPP 平均值整体上相对较高,NPP 平均值在 700 gC m⁻² a⁻¹以上, 但局部差异明显,高值在西南部,其 NPP 值大部分在 800 gC m⁻² a⁻¹以上,云南漾濞、大理等地区超过 950 gC m⁻² a⁻¹;低值在贡山等高海拔地区,介于 250—550 gC m⁻² a⁻¹之间;而在西昌、攀枝花和云南东川、会泽、永仁、 元谋等地区,其 NPP 值在 400—700 gC m⁻² a⁻¹之间。此外,在横断山区南部的高山峡谷地区,NPP 明显呈南 北向带状分布,同时分布带之间又有差异。在西面独龙江、怒江、澜沧江峡谷及山脉地区,峡谷地区高于山脉 顶部,且在由东向西、由南向北方向上呈现明显减少趋势;局部上从谷底到山岭呈现先增加后减少趋势,在中 部金沙江流域河流谷底的 NPP 比较低,向河岸山脉先增加后减小,而在东部大渡河峡谷、雅砻江峡谷地区则 河流谷底高,逐渐向山岭减小。

3.2 横断山区植被 NPP 动态变化

横断山区 2004—2014 年植被 NPP 平均值年际变化值 θ_{slope}介于-53—97 gC m⁻² a⁻¹之间(图 3b), NPP 增



图 3 横断山区 2004—2014 年 NPP 平均空间分布(a) 和年际变化斜率分布格局(b)

Fig.3 The spatial distribution of mean NPP and spatial pattern of NPP absolute annual variability in Hengduan mountain area during 2004-2014

加趋势(即 $\theta_{slope}>0$)区域集中在北部、中部的东侧地区以及南部的东西两侧地区,其中在云南西北部的怒江峡谷-福贡-泸水一带,香格里拉县以及绍觉-巧家-会泽等地区增加幅度最大,其增速在9—40 gC m⁻² a⁻¹之间。另外,金沙江峡谷、雅砻江峡谷地区的 NPP 增速介于 3—9 gC m⁻² a⁻¹之间。而 NPP 呈减少趋势(即 $\theta_{slope}>0$)的区域主要集中在汶川–映秀等地区,其变化在-3—-9 gC m⁻² a⁻¹之间,攀枝花等局部区域的 NPP 变化在-9—-53 gC m⁻² a⁻¹之间。

研究区涉及针叶林、针阔叶混交林、阔叶林、灌丛等 10 个植被大类。不同植被类型的 NPP 年总量差异明显:针叶林>灌丛>草甸>栽培植被>阔叶林>草丛>高山植被>其他类型,其占比分别为 30%、29%、12%、10%、 9%、8%、1%和 1%。另外,不同植被类型的 NPP 均值表现为:草丛(703 gC m⁻² a⁻¹)>栽培植被(694 gC m⁻² a⁻¹)>针阔叶混交林(590 gC m⁻² a⁻¹)>阔叶林(569 gC m⁻² a⁻¹)>针叶林(564 gC m⁻² a⁻¹)>灌丛(419 gC m⁻² a⁻¹)>沿泽(347 gC m⁻² a⁻¹)>草原(331 gC m⁻² a⁻¹)>草甸(301 gC m⁻² a⁻¹)>高山植被(111 gC m⁻² a⁻¹)。由此可见,在单位时间、单位面积下,该地区的草丛和栽培植被的固碳能力是最强的,其次是阔叶林类,最弱的为高山植被,这与谷小平^[17]和周长海^[38]对该地区的研究结论基本一致。

通过横断山区 2004—2014 年不同植被类型 NPP 平均值变化曲线(图 4)进一步分析可知:①整体上,区域内绝大多数植被类型 NPP 变化相近,呈波动增加趋势,平均上升率为 4.07 gC m⁻² a⁻¹;但草原植被类型呈略

微下降趋势,平均下降率为-0.46 gC m⁻² a⁻¹。②不同植被生态系统的年 NPP 平均值梯度分异明显,大致分为 5 个区间:最高是草丛和栽培植被生态系统(>640 gC m⁻² a⁻¹),其次是乔木生态系统(490—630 gC m⁻² a⁻¹), 再次是灌木生态系统(360—460 gC m⁻² a⁻¹),再次是草原草甸类生态系统(250—390 gC m⁻² a⁻¹),最低是高 山植被生态系统(80—130 gC m⁻² a⁻¹)。③该地区不同植被类型 NPP 年际变化幅度不同,其中阔叶林、针阔混 交林和草原变化幅度相对较大。



图 4 横断山区 2004—2014 年不同植被类型 NPP 平均值动态变化

Fig.4 Dynamic Change of different vegetation types mean NPP in Hengduan mountain area during 2004-2014

①:草丛 Brushwood; ②:栽培植被 Cultivated vegetation; ③:阔叶林 Broad-leaved forests; ④:针阔混交林 Needle-leaf and broad-leaf mixed forests; ⑤:针叶林 Needle-leaf forests; ⑥:灌丛 Shrubs; ⑦:沼泽 Swamp; ⑧:草原 Grassland; ⑨:草甸 Meadow; ⑩:高山植被 Alpine vegetation

3.3 NPP 与气温、降水量相关分析

横断山区降水量存在明显的季节性分配,雨季(5—10月)降水量占绝大部分(80%—90%以上)^[21,23,26]。 近 50a来,气温呈上升趋势,2000—2008时段年均气温比多年均值(1960—2008)高 0.46℃,雨季(5—10月) 气温和降水量的变化倾向率分别为 0.117 ℃/(10a)和 6.01 mm/(10a),而最明显的是雨季降水在 2000 年以 后明显降低^[26]。横断山区(北部、中部、南部)及附近 73 个地面气象站雨季的平均气温和累积降水量统计分 析,结果表明:①横断山区 2004—2014 年平均气温在 15.03—16.21 ℃之间,多年平均为 15.87 ℃;累积降水量 在 580.13—744.22 mm 之间,多年平均为 691.31 mm。整体上,研究区中部、南部气温呈上升趋势,北部气温呈 下降趋势,而整区降水量变化不明显。②该地区因纬度跨度、海拔等因素,南北气候变化差异大。由横断山区 雨季的气温和降水量变化趋势曲线(图 5)所示,南部气温逐渐上升,但降水量有所减少,趋势变化率分别为 0.051 ℃/a、-4.344 mm/a;中部气温变化不明显,降水量增加明显,趋势变化率分别为-0.059 ℃/a 与 5.280 mm/a。

由植被 NPP 与气温偏相关性的空间分布特征(图 6a)可知,植被 NPP 年均值与雨季气温的相关系数介于 -0.91—0.98 之间,正、负相关的区域分别占研究区面积的 78.39%、21.61%。呈正相关区域主要集中在北部的 红原县、中部的沙鲁里山周围以及南部澜沧江德钦-迪庆、贡山-维西一带;负相关主要分布在北部的松潘地 区、中南部的沙鲁里山和贡嘎山附近以及南部的攀枝花地区。由 t 检验可知,有 2.98%的区域通过了 P<0.01 水平的显著性检验(在中部的沙鲁里山和大雪山地区)。

植被 NPP 与降水量的偏相关性分析(图 6b)显示,植被年 NPP 均值与雨季降水量在-0.98-0.93 之间,

37 卷





Fig.5 Dynamic change of the rainy season's mean temperatures (a) and accumulated precipitation (b) in Hengduan mountain area's different part during 2004-2014

(i):横断山区南部 south part of Hengduan mountain area; (ii):横断山区中部 middle part of Hengduan mountain area; (iii):横断山区北部 north part of Hengduan mountain area

正、负相关的区域分别占研究区面积的 27.06%、72.94%,正相关区域主要集中在北部的阿坝县、中部东缘(茂县至泸定一带)以及南部的东西两侧;而负相关区域主要分布在中部的沙鲁里山和大雪山等地。研究区有4.68%的区域通过了 P<0.01 水平的 t 显著性检验,分布在中部的炉霍-道孚至沙鲁里山地区。另外,NPP 与 气温、降水的偏关系数在东北部(特别是阿坝、红原地区)存在正负相关性互补现象,而中部的云岭-沙鲁里山 以及南部大部分地区的 NPP 分别与气温、降水的偏关系数一致。整体而言,横断山区 2004—2014 年植被 NPP 与气温、降水的偏相关系数的平均值分别为 0.230、-0.225,植被 NPP 与气温呈正相关性、与降水量呈负 相关性的特征明显。

由植被年 NPP 均值与平均气温和降水量的复相关分析可知(图 7a),NPP 与雨季气候因子(平均气温、累 积降水)的复相关系数在 0—0.98 之间。整体而言,植被 NPP 与气候因子的复相关性较强的区域主要集中在 横断山区中部,特别是中部的云岭-沙鲁里山-大雪山一带。复相关性较弱的区域分布在北部的阿坝县、黑水 县,中部东缘的得荣县、泸定县、石棉县以及东南部广大地区。通过分析,植被 NPP 与气候因子复相关性的地 区差异很可能与海拔、植被类型有关。横断山区南北海拔差异大,中部、北部处于高海拔地区(>4000 m),南 部大部分地区海拔在 3000 m 以下,根据有关研究,同纬度不同海拔气温变化敏感性有差异,高海拔地区对气 温变化敏感度高于同纬度的低海拔地区^[26]。另外,横断山区中部、北部植被类型以草甸和高山植被,南部地 区植被以针叶林、灌丛以及栽培植被为主,草甸和高山植被对气温、降水的敏感性要高于其他森林植被^[39]。 **3.4** NPP 变化驱动分区

植被 NPP 的动态变化主要受气候和人类活动影响^[4041]。其中,气候变化特别是降水和温度的变化,对陆 地植被的生长具有重要的影响^[4243]。本文参考国内外众多学者研究^[4446],参照植被覆盖变化驱动分区的原 则^[47]并进行适当修正(表 2),对横断山区植被 NPP 变化进行驱动分区研究。

由横断山区 NPP 变化驱动分区图(图 7b)可得出:①2004—2014 年植被 NPP 变化受气温、降雨强驱动的 区域主要集中在横断山区中部的炉霍县、道孚县,面积约占研究区面积的 0.82%;②以气温为主要驱动因素的



图 6 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 与气温(a)、降水(b)的偏相关系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of partial correlations between annual NPP and temperature (a), as well as precipitation (b) in Hengduan mountain area during 2004-2014

Table 2 The regionalization rules the driving factors for dynamic change of NPP				
NPP 变化驱动因子 NPP changes driving factors		分区准则 Rules		
		<i>R</i> 1	<i>R</i> 2	R3
气候因子 Climate factors	[T+P] +	$ t > t_{\alpha=0.01}$	$ t > t_{\alpha=0.01}$	F>F _{a=0.05}
	Т	$ t > t_{\alpha=0.01}$		$F > F_{\alpha=0.05}$
	Р		$ t > t_{\alpha=0.01}$	$F > F_{\alpha=0.05}$
	[T+P] ⁻	$ t \leq t_{a=0.01}$	$ t \leq t_{a=0.01}$	$F > F_{\alpha=0.05}$
非气候因子 Non-climate factors	NC			$F \leq F_{a=0.05}$

R1: NPP 与气温偏相关的 t 显著性检验 T-Test significance of the partial correlations between NPP and temperature; R2: NPP 与降水偏相关的 t 显著性检验 T-Test significance of the partial correlations between NPP and precipitation; R3: NPP 与气温、降水复相关的 F 显著性检验 F-Test significance of the multiple correlations between NPP and temperature-precipitation; [T+P]⁺: 气温、降水强驱动 Change driven by temperature and precipitation strongly; T: 气温为主驱动 Change driven by temperature mainly; P: 降水为主驱动 Change driven by precipitation mainly; [T+P]⁻: 气温 降水弱驱动 Change driven by temperature and precipitation weakly; NC: 非气候驱动 Change driven by non-climate

区域约占研究区面积的2.29%,分布在中部的炉霍-道孚-雅江-康定一带;③有3.20%区域以降雨为主要驱动因素,主要集中在中部的沙鲁里山地区;④以气温、降雨为弱驱动因素的区域面积占研究区面积的2.11%,大致分布在中部的巴塘、丹巴、金川以及南部的泸水-云龙地区;⑤剩余地区(除去冰川/积雪、湖泊)属于非气候



图 7 横断山区 2004—2014 年 NPP 与气温-降水的复相关分布(a)和 NPP 变化驱动力分区(b)

Fig.7 Spatial distribution of multiple correlation between annual NPP and temperature-precipitation(a) and NPP change regions driven by different factors(b) from 2004—2014 in Hengduan mountain area

[T+P]⁺: 气温、降水强驱动 Change driven by temperature and precipitation strongly; T: 气温为主驱动 Change driven by temperature mainly; P: 降水为主驱动 Change driven by precipitation mainly; [T+P]⁻: 气温降水弱驱动 Change driven by temperature and precipitation weakly; NC: 非 气候驱动 Change driven by non-climate

因素驱动的区域,包括北部的阿坝县以及东缘、南部地势较平缓的地区。整体上,横断山区植被 NPP 大部分 地区受非气候因素的影响。

4 讨论与结论

4.1 讨论

刘思瑶^[48]等利用 CASA 模型对四川地区 2000—2011 年植被 NPP 进行了模拟估算,得到多年平均为 303. 27 gC m⁻² a⁻¹,变化范围在 285—340 gC m⁻² a⁻¹之间,与本文所得四川地区部分的 NPP 整体接近。董丹^[49]等 对西南喀斯特地区植被 NPP 进行了模拟,结果与本文相同地区的 NPP 空间分布基本一致。

2003 年 Terra 卫星因设备故障问题引成了 MODIS 蓝波段(Band3)数据较大失真,这给直接采用这一波段数据及其衍生产品的相关研究带来一定程度的影响,而 LPDAAC 于 2014 年 4 月陆续发布了一套经过系列纠正处理的 MODIS C6 数据产品,在质量上得到了提高^[31-32,34]。本文分别对横断山区 2004—2014 年不同来源 MODDIS C5 与 C6 产品的 NPP 数据进行了比较(图 8)。结果表明,C5 与 C6 数据之间存在明显差异,主要表现在:①数据质量统计结果存在差异,C6 数据的数据质量中、高等级(NPP_QC<64)累积百分比高于 C5 数据;

②两种数据同一研究区内 NPP 年总量存在着差异,整体上,相比 C6 数据产品,C5 结果偏大,但空间格局基本一致。

4.2 结论

本文基于 MODIS C6 的 NPP 数据、植被类型数据、 气象数据以及地形数据,对 2004—2014 年横断山区植 被 NPP 的时空格局、变化规律及其驱动因子进行了分 析研究,得到如下结论:

①横断山区 2004—2014 年植被 NPP 在整体上呈 波动增加趋势,全区年 NPP 总量在 183.768—223.239 TgC 之间,多年均值为 208.498 TgC;年 NPP 均值介于 408—496 gC m⁻² a⁻¹之间,多年均值为 463 gC m⁻² a⁻¹; 北部、中部、南部植被 NPP 总量(均值)的多年平均值分 别为 27.562 TgC (306 gC m⁻² a⁻¹),64.448 TgC (353 gC m⁻² a⁻¹),116.486 TgC (671 gC m⁻² a⁻¹)。

②不同植被生态系统的年 NPP 均值梯度明显:最 高梯度为草丛和栽培植被生态系统(>640 gC m⁻² a⁻¹), 其次是乔木生态系统(490—630 gC m⁻² a⁻¹),再次是灌 木生态系统(360—460 gC m⁻² a⁻¹),再次为草原草甸生 态系统(250—390 gC m⁻² a⁻¹),最低为高山植被生态系统(80 — 130 gC m⁻² a⁻¹)。



图 8 横断山区 2004—2014 年不同数据来源和数据集年 NPP 总 量曲线对比

Fig. 8 The curve' compairation of total annual NPP with different data source and collection in Hengduan mountain area during 2004—2014

Terra-C5-NTSG: Terra 卫星的 MODIS C5 数据,经过美国蒙大拿大 学 NTSG 矫正后发布 MODIS C5 data of the Terra satellite, it was recalibrated and distributed by NTSG; Terra-C5-LPDAAC: Terra 卫星 的 MODIS C5 数据,由 LPDAAC 发布 MODIS C5 data of the Terra satellite, it was calibrated and distributed by LPDAAC; Terra-C6-LPDAAC: Terra 卫星的 MODIS C6 数据,由 LPDAAC 发布 MODIS C6 data of the Terra satellite, it was calibrated and distributed by LPDAAC

③横断山区植被 NPP 年际变化值 θ_{slope} 在-53—97 gC m⁻² a⁻¹之间,局部差异明显。NPP 增加趋势(即 $\theta_{slope}>0$)的区域集中在北部、中部的东侧以及南部的东西两侧地区。而 NPP 呈减少趋势(即 $\theta_{slope}<0$)的区域 主要集中在北部的西北部,中部的汶川-映秀以及南部的攀枝花等地。

④横断山区植被 NPP 变化受气候因子影响的区域占比 8.42%(气温和降水叠加影响 0.82%、气温为主 2.29%、降水为主 3.20%、气温和降水共同影响 2.11%),主要分布在中部大雪山-沙鲁里山地区;非气候因子 (包括人类活动、自然灾害等)占比 91.58%,主要位于北部的阿坝地区以及南部低海拔的广大地区。

致谢:成都理工大学彭培好教授在成文过程中给予指导,两位匿名审稿专家对本文提出了宝贵、中肯的 修改意见和建议,责任编辑作了大量仔细的校对工作,在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer, 1975.
- [2] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [3] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic complements. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [4] 何云玲, 张一平. 云南省自然植被净初级生产力的时空分布特征.山地学报, 2006, 24(2): 193-201.
- [5] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world. Nature and Resources, 1972, 8(2): 5-10.
- [6] Bonan G B. Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(D20): 2817-2831.
- [7] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycle, 1993, 7(4): 811-841.
- [8] 孙睿,朱启疆.中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究.地理学报,2000,55(1):36-45.
- [9] 朴世龙,方精云,郭庆华.利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力.植物生态学报,2001,25(5):603-608.

- [10] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算.植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [11] 陈福军, 沈彦俊, 李倩, 郭英, 徐丽梅. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究. 地理科学, 2011, 31(11): 1410-1414.
- [12] 毛德华,王宗明,韩佶兴,任春颖. 1982-2010年中国东北地区植被 NPP 时空格局及驱动因子分析. 地理科学, 2012, 32(9): 1106-1111.
- [13] 穆少杰,李建龙,周伟,杨红飞,章超斌,居为民. 2001-2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. 生态学报, 2013, 33(12): 3753-3764.
- [14] 徐浩杰,杨太保.黄河源区植被净初级生产力时空变化特征及其对气候要素的响应.资源科学, 2013, 35(10): 2024-2031.
- [15] 陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 王军邦. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(3): 402-410.
- [16] 卢玲, 李新, Veroustraete F. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. 生态学报, 2005, 25(5): 1026-1032.
- [17] 谷小平,黄玫,季劲钧,吴战平.近20年气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响.自然资源学报,2007,22(2):251-259.
- [18] 姚永慧, 张百平, 韩芳, 庞宇. 横断山区垂直带谱的分布模式与坡向效应. 山地学报, 2010, 28(1): 11-20.
- [19] 李吉均. 青藏高原的地貌轮廓及形成机制. 山地研究, 1983, 1(1): 7-15.
- [20] 严德一. 横断山脉. 地理知识, 1956, (3): 103-103.
- [21] 郑度,杨勤业. 横断山区自然区划若干问题. 山地研究, 1987, 5(1): 7-13.
- [22] 李炳元. 横断山脉范围探讨.山地研究, 1987, 5(2): 74-82.
- [23] 杨勤业,郑度. 横断山区综合自然区划纲要. 山地研究, 1989, 7(1): 56-64.
- [24] 刘伦辉, 余有德, 张建华. 横断山地区植被分布规律的探讨. 云南植物研究, 1985, 7(3): 323-335.
- [25] 李鼎甲. 横断山区植物区系的基本特点. 山地研究, 1988, 6(3): 148-152.
- [26] 李宗省,何元庆,辛惠娟,王春凤,贾文雄,张蔚,刘婧.我国横断山区 1960-2008 年气温和降水时空变化特征. 地理学报, 2010, 65 (5): 563-579.
- [27] 姚永慧, 张百平, 韩芳. 基于 Modis 地表温度的横断山区气温估算及其时空规律分析. 地理学报, 2011, 66(7): 917-927.
- [28] 朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 张涛, 杜建括, 辛惠娟, 牛贺文. 横断山区土壤相对湿度时空分异. 地理科学, 2012, 32(7): 872-877.
- [29] 张涛,李宝林,何元庆,杜建括,牛贺文,辛惠娟. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征. 自然资源学报, 2015, 30(2): 260-270.
- [30] 文传甲. 横断山区地形对水热条件的影响. 山地研究, 1989, 7(1): 65-73.
- [31] Lyapustin A, Wang Y, Xiong X, Meister G, Platnick S, Levy R, Franz B, Korkin S, Hilker T, Tucker J, Hall F, Sellers P, Wu A, Angal A. Scientific impact of MODIS C5 calibration degradation and C6+ improvements. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(12): 4353-4365.
- [32] Wang D D, Morton D, Masek J, Wu A S, Nagol J, Xiong X X, Levy R, Vermote E, Wolfe R. Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 55-61.
- [33] Heinsch F A, Reeves M, Votava P, Kang S, Milesi C, Zhao M, Glassy J, Jolly W M, Loehman R, Bowker C F, Kimball J S, Nemani R R, Running S W. User's Guide: GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm, Version 2.0. Missoula: The University of Montana, 2003: 31-33.
- [34] Running S W, Zhao M S. User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm Version 3.0. South Dakota : Land Processes Distributed Active Archive Center, 2015: 9-14.
- [35] 孙庆龄,冯险峰,肖潇.武陵山区植被净第一性生产力的时空格局及其与地形因子的关系.地球信息科学学报,2014,16(6):915-924.
- [36] 孟丹, 李小娟, 宫辉力, 屈益挺. 京津冀地区 NDVI 变化及气候因子驱动分析. 地球信息科学学报, 2015, 17(8): 1001-1008.
- [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] 周长海,吴绍洪,戴尔阜,郝成元,潘韬.纵向岭谷区水汽通道作用及植被生产力响应.科学通报,2006,51(增刊):81-89.
- [39] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379-382.
- [40] Gao Q Z, Li Y, Wan Y F, Qin X B, Jiangcun W Z, Liu Y H. Dynamics of alpine grassland NPP and its response to climate change in Northern Tibet. Climate Change, 2009, 97(3/4): 515-528.
- [41] 李传华, 赵军. 2000-2010 年石羊河流域 NPP 时空变化及驱动因子. 生态学杂志, 2013, 32(3): 712-718.
- [42] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学(C辑), 2003, 33(6): 554-565.
- [43] 李月臣,宫鹏,刘春霞,陈晋,于德永.北方13省1982年—1999年植被变化及其与气候因子的关系.资源科学,2006,28(2):109-117.
- [44] 高志强,刘纪远,曹明奎,李克让,陶波.土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响.地理学报,2004,59(4):581-591.
- [45] Mohamed M A A, Babiker I S, Chen Z M, Ikeda K, Ohta K, Kato K. The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (NPP). Science of the Total Environment, 2004, 332(1/3): 123-137.
- [46] 刘军会,高吉喜. 气候和土地利用变化对北方农牧交错带植被 NPP 变化的影响. 资源科学, 2009, 31(3): 493-500.
- [47] 陈云浩,李晓兵,史培军. 1983—1992年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.
- [48] 刘思瑶,卢涛,唐斌,吴彦,吴宁.基于 CASA 模型的四川植被净初级生产力及其时空格局分析.四川农业大学学报,2013,31(3):269-

http://www.ecologica.cn

276, 282-282.

[49] 董丹, 倪建. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力. 生态学报, 2011, 31(7): 1855-1866.