Asia-Pacific Journal of Earth Sciences
亚太地球科学期刊
2020; 2(2): 7-14
http://www.sciencepublishinggroup.com/j/apjes

Temporal Dynamics of Aboveground Net Primary Productivity and Its Response to Climatic Variability in Yibin

Jiao Cuicui*, Yi Xiaobo, Wei Ling, Wen Ting

College of Economics, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong, China

Email address:
jiaocuicui1987@sina.cn (Jiao Cuicui), abobobi@163.com (Yi Xiaobo), 940613192@qq.com (Wei Ling), 342954071@qq.com (Wen Ting)
*Corresponding author

To cite this article:
Jiao Cuicui, Yi Xiaobo, Wei Ling, Wen Ting. Temporal Dynamics of Aboveground Net Primary Productivity and Its Response to Climatic Variability in Yibin. *Asia-Pacific Journal of Earth Sciences*. Vol. 2, No. 2, 2020, pp. 7-14.

Received: October 11, 2020; **Accepted**: October 26, 2020; **Published**: November 4, 2020

Abstract: Exploring temporal dynamics in aboveground net primary productivity (ANPP) and their correlations to climatic variables in grasslands is significant to sustainable development of animal husbandry and ensuring food security and ecological security. Studies on the Inner Mongolian temperate grasslands and the Tibetan Plateau alpine grasslands have been widely reported. However, few researches on subtropical grasslands were reported in the past. It is still unclear how subtropical grasslands response to climate changes. In this study, we discussed the temporal dynamics in ANPP of grasslands in Yibin during 2000-2015 using simple and piecewise linear regressions. Correlations between ANPP and climatic variables were then analyzed using the partial correlation analysis. Our analysis indicated that (1) the multiyear average ANPP was recorded as 129.91g C m^{-2} yr^{-1} in grasslands in Yibin from 2000 -2015. The multiyear average ANPP was 130.48 g C m^{-2} yr^{-1} in temperate steppes and was 116.34 g C m^{-2} yr^{-1} in tropical herbosas, respectively. (2) ANPP exhibited an obvious increasing trend during 2000-2015. However, the increasing trend did not persist. ANPP trends significantly changed in 2007. (3) Temporal variations of ANPP were affected by temperature and precipitation together. Temperature and precipitation all had positive effect on ANPP variations. Temperature performed better than precipitation in explaining ANPP variations in grasslands in Yibin. Our research results were important for understanding mechanisms of ANPP response to climate changes in subtropical grasslands.

Keywords: Grasslands in Yibin, Aboveground Net Primary Productivity (ANPP), Temporal Dynamics, Remote Sensing

---

宜宾市草地生产力的年际变异及其与气候因素之间的关系

焦翠翠*，易小波，韦领，文婷

四川轻化工大学经济学院，自贡，中国

邮箱
jiaocuicui1987@sina.cn（焦翠翠），abobobi@163.com（易小波），940613192@qq.com（韦领），342954071@qq.com（文婷）

摘要：探讨草地生态系统的年际变异规律及其气候影响因素对畜牧业的可持续发展和粮食生态安全的保障具有重要的作用。过去对草地生态系统的研究多关注于内蒙古温带和青藏高原高寒草地生态系统，对亚热带草地生态系统的研究还鲜有报道。本研究以宜宾市草地生态系统为研究对象，借助长时间序列（2000-2015年）的遥感和气象数据，运用简单线性和分段线性回归方法对地上净初级生产力（Aboveground Net Primary Productivity, ANPP）在过去十几年的动态变化规律进行了分析，运用偏相关分析探讨了气候因素对其变化的影响作用。分析结果表明：（1）宜宾市草地ANPP在2000-2015年期间的平均值为129.91g C m^{-2} yr^{-1}，其温性草原和热性草丛的ANPP分别为130.48 g C m^{-2} yr^{-1}和 116.34 g

C m^{-2} yr^{-1}。（2）宜宾市草地的ANPP在2000-2015年期间呈显著增加的变化趋势，但是这种变化趋势并不是持续的，而是在2007年发生了显著的转折。（3）宜宾市草地ANPP的年际变化趋势由降水和温度的变化共同决定，降水和温度对ANPP的变化都是起到正的促进作用，并且温度的作用较降水大。本研究对认识气候变化对亚热带草地的影响机制具有重要的意义。

关键词：宜宾市草地，地上净初级生产力，年际变化，遥感

1. 引言

地上净初级生产力（Aboveground Net primary productivity，ANPP）是生态系统物质循环和能量流动的驱动力，是碳循环过程的一个重要组成部分，是表征陆地生态系统潜在经济生产能力和碳汇功能强度的重要生态学指标[1-2]。近几十年年来，地球经历了显著的气候变化，温度的持续升高 、降水的改变和极端气候事件的频发[3]，都会对陆地生态系统的ANPP产生重要的影响[4-5]。研究ANPP的年际变异不仅是评估陆地生态系统碳循环动态变化过程的迫切需求，也是生态系统与全球变化研究的基础科学问题[6]。

草地是地球上广泛分布的生态系统之一（约占地球表面的30%），是陆地生物圈的一个重要组成部分[7]，具有重要的生态系统服务功能（如，饲料生产，土壤碳储存等）[7-8]。由于草地生态系统主要分布在干旱和半干旱区域，其ANPP较森林及农田等生态系统的年际波动更大[9]。草地ANPP的变化将会对全球的碳收支、生态系统服务功能、畜牧业的经济发展以及草地资源的可持续利用造成很大的影响[10-11]。因此，探讨草地ANPP的年际变异规律及其对气候变化的响应机制对预测未来气候变化对自然生态系统和社会经济的影响具有重要的意义。

草地ANPP的年际变化趋势在已经站点[12]、区域[13]及全球尺度[14] 开展了广泛的研究。研究的方法主要有野外调查、遥感技术监测[15]及模型模拟[16, 17]。在全球尺度，近30年来（1982-2006）草地生态系统的ANPP呈显著增加的变化趋势。但是，该变化趋势在这30年内并不是连续的，在1994年该变化趋势发生了转折，ANPP由1994年之前的显著增加转变为1994年之后的微弱降低趋势[14]。

在北美洲，Lauenroth 和 Sala用站点的多年连续观测数据分析表明，北美洲矮草草原的ANPP在1939-1990年期间没有明显的变化趋势[18]。Brookshire 和 Weaver以单个站点的观测数据为基础，分析表明美国大黄石草地生态系统ANPP在近40年（1969-2012）内呈显著减小的变化趋势[12]。Hufken等的模型预测结果表明，在RCP 8.5（Representative Concentration Pathway 8.5）气候变化的情景下，北美洲草地大部分区域的ANPP在未来一个世纪内（到2100年）将呈显著增加的趋势[17]。

在南美洲，运用野外调查数据和遥感数据相结合的方法分析表明，在近30年（1982-2006年）草地ANPP呈微弱减小的趋势[14]。类似的方法对欧亚大陆草原的分析表明，草地ANPP在1982-2013年近30年来呈波动式增加趋势，但是该增加趋势不是连续的，而是存在1995年和2007年两个拐点年份[19]。在中国地区，北方草地的ANPP在2000-2010年期间变化趋势不显著[13]。内蒙古温带草地的ANPP在1982-2003年期间变化趋势不明显[20]。青藏高原高寒草地的ANPP在1982-2009年期间呈波动式增加的变化趋势[16]。

综合全球范围内的研究来看，因区域环境条件、分析的空间及时间尺度等方面的差异，已有研究结果中报道的草地ANPP年际变化趋势呈现显著增加[17, 21]、显著减小[12, 14]、没有明显变化[13]和存在转折点（一个或者多个）波动式增加变化趋势等多种表现形式[14, 19, 22]。草地ANPP的年际变化趋势依赖于研究的时期，并且具有很大的空间异质性，草地ANPP的变化趋势尚未有统一的结论。

通常情况下，温带草地生态系统ANPP的年际变异主要受到降水变化的影响，降水与ANPP之间为正相关关系；而高寒草地生态系统则主要受到温度变化的影响，温度与ANPP之间也为正相关关系[23]。如，中国内蒙古温带草地ANPP的年际变化主要受到降水波动的影响[20, 24]，而中国青藏高原高寒草地ANPP的年际变化则主要受到温度变化的影响[16, 22]。从全球范围来看，草地生态系统主要分布在干旱—半干旱区域[25]，水分是其主要的限制条件[26]，所以降水对草地ANPP年际变异的影响较温度受到了更加广泛的关注[27-28]。

目前对草地生态系统生产力年际变异的研究多关注于内蒙古温带草地和青藏高原高寒草地生态系统，对位于亚热带草地生态系统的关注比较少。本研究以宜宾市草地为研究对象，主要回答以下2个科学问题：（1）分析过去十几年ANPP的变化趋势、变化幅度及波动情况以揭示ANPP的年际变异规律?（2）分别剖析ANPP的年际变异与不同气候因素之间的关系，以得出ANPP年际变异的主要气候影响因素。

2. 材料和方法

2.1. 研究区域

宜宾市位于四川省南部，东靠长江，西接大小凉山，南接云南，北连川中腹地，是“万里长江第一城”。从地理位置上来看位于北纬27° 50′- 29°16′N，东经103°36-105°20′E之间，海拔范围为295 – 1426 m 之间（图1a）。宜宾市属于亚热带湿润季风气候，低丘、河谷地带有南亚热带的气候属性。具有气候温和、热量丰足、雨量充沛、光照适宜、无霜期长、冬暖春早、四季分明的特点。年平均气温18℃左右，年平均降水量1050～1618mm。草地生态系统类型主要有温性草原和热性草丛两大类（图1b）。

2.2. 数据来源

（1）ANPP数据

2000 – 2015年的ANPP数据是采用Jiao等构建的Integrated $ANPP_{NDVI}$ mode估算得到[19]。Integrated $ANPP_{NDVI}$ model 是以ANPP的地面调查数据和美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）全球监测与模型研究组（Global inventory monitoring and modeling studies, GIMMS）发布的长时间序列的归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）为基础，综合考虑研究区域的空间异质性、NDVI的合成时相等因素构建的区域尺度ANPP估算模型[19]。

（2）气象数据

本研究中使用的气象数据包括温度和降水，这些数据来源于英国东英吉利大学（University of East Anglia）气候研究中心（Climate Research Unit, CRU）发布的气象数据集 CRU TS 4.01（https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.01/cruts.1709081022.v4.01/），时间分辨率为1个月[29]。

（3）空间矢量数据

植被类型分布图采用的是中国科学院中国植被图编辑委员会绘制的1:100万植被类型图[30]，从中国科学院资源环境科学数据中心下载得到(http://www.resdc.cn)。宜宾市的空间范围数据也是从中国科学院资源环境科学数据中心下载得到(http://www.resdc.cn)。

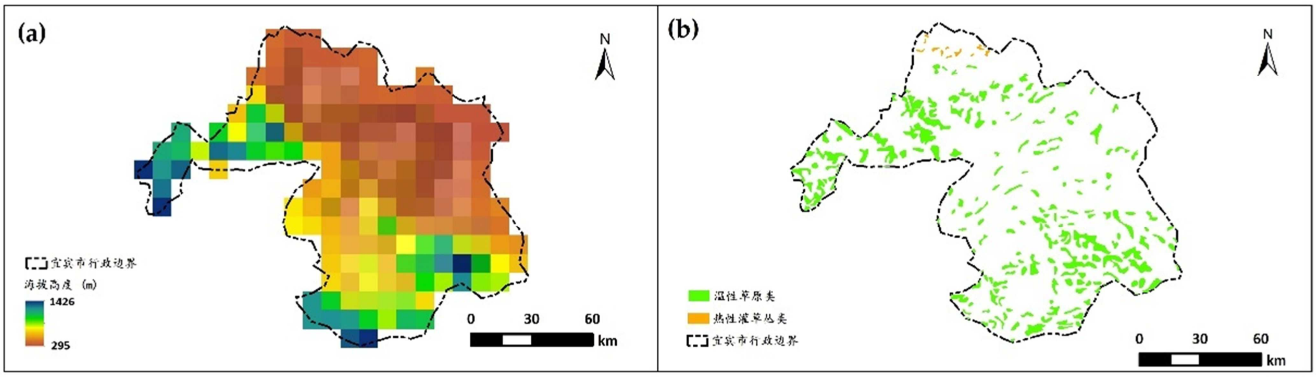


图1 宜宾市的地形（a）以及草地的空间分布范围（b）。

2.3. 研究方法

2.3.1. ANPP年际变异的分析方法

本研究运用简单线性回归方法（公式1）来分析宜宾市草地地上净初级生产力（ANPP）在2000-2015年整个时间区段的动态变化特征。

$$y(t) = \alpha_0 + \beta_0 t + \varepsilon \quad (1)$$

式中，y(t)表示ANPP的区域平均值；t表示对应的年份，取值范围为2000-2015；α_0和β_0分别代表运用最小二乘法拟合的直线截距和斜率；ε为线性拟合的残差。运用t检验方法通过判断β_0是否为0来确定线性回归在p<0.05水平上是否显著。

在本研究中分段线性回归方法（Piecewise linear regression, PLR,公式2）被用来探讨ANPP在2000-2015年期间动态变化趋势发生显著变化的时间转折点。

$$Y(t) = \begin{cases} a_0 + b_1 t + \varepsilon, & t \le T_0 \\ a_0 + b_1 t + b_2(t - T_0) + \varepsilon, & t > T_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中，y(t)表示ANPP的区域平均值；t表示对应的年份，取值范围为2000-2015；T_0表示估算得到的ANPP年际变化趋势发生显著变化的时间转折点。a_0，b_1和b_2为回归系数，ε为拟合的残差。b_1和$b_1 + b_2$分别为时间转折点（T_0）之前和之后ANPP的变化速率。运用最小二乘法来确定3个回归系数的值，运用t检验方法通过检测b_2是否为0来确定分段线性回归在p<0.05水平上是否显著。

2.3.2. 气象因素对ANPP年际变化的影响作用分析

ANPP数据的时间分辨率为年，气象因素（降水和温度）的时间分辨率为月。在探讨气象因素对ANPP动态变化的影响作用之前，首先将气象因素的数据计算到年尺度。为了消除线性趋势，ANPP数据和气象数据都做了z-score标准化处理[31]。通过计算ANPP与不同气象因素之间的偏相关系数（公式（3）-（5））来表示气象因素对ANPP年际变化的影响作用[21, 32, 33]。

$$Par_{AB.C} = \frac{P_{AB} - P_{AC} \times P_{BC}}{\sqrt{(1 - P_{AC}{}^2)(1 - Par_{BC}{}^2)}} \quad (3)$$

式中，A代表ANPP；B和C分别代表降水和温度两种不同的气象因素；$Par_{AB.C}$代表变量A和B之间排除变量C的影响之后计算得到的一阶偏相关系数；P_{AB}，P_{AC}和P_{BC}分别为变量A和B之间，A和C之间，B和C之间的皮尔逊相关系数，计算方法见公式4。

$$P_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中，P_{xy}为ANPP和气象因素之间的皮尔逊相关系数；n为参与ANPP与气象因素之间相关分析的总年份数；x_i和y_i分别为第i年的ANPP值；$\bar{x}$和$\bar{y}$分别为气象因素与ANPP的n年平均值。

偏相关系数的显著性检验可以通过公式（5）来实现：

$$t_{Par_{AB.C}} = \frac{\sqrt{n-k-2} \times Par_{AB.C}}{\sqrt{1-Par_{AB.C}{}^2}} \quad (5)$$

式中，$Par_{AB.C}$为相应的偏相关系数；n为样本观测数；k为可控制变量的个数（在本研究中$k=3$）；$t_{Par_{AB.C}}$为检验$Par_{AB.C}$是否显著的统计量，服从自由度为$n-k-2$的t分布；查t分布表可以得出不同显著水平上的临界值$t_\propto$，若$t_{Par_{AB.C}} \geq t_\propto$则表示相关性达到显著性水平，反之，$t_{Par_{AB.C}} < t_\propto$，则相关性不显著。$Par_{AC.B}$的计算方法类似$Par_{AB.C}$。

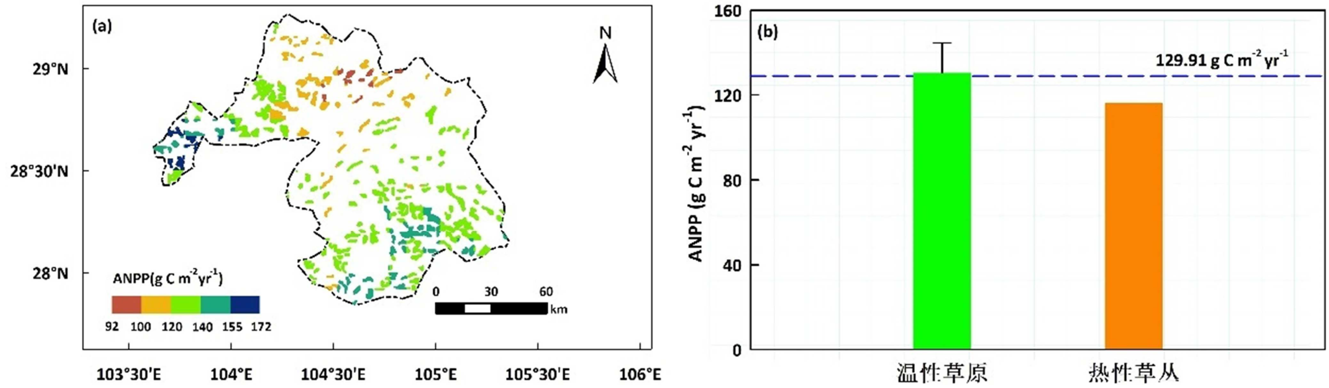
本研究中的数据统计分析在SPSS 20 软件平台下实现，相关统计图的绘制在sigmaplot 10软件平台下实现，空间格局图的绘制在ArcGIS 10.2 软件平台下实现。

3．结果与讨论

3.1．ANPP的大小及其动态变化规律

3.1.1．ANPP的大小

宜宾市草地ANPP在2000-2015年期间的平均值为129.91g C m^{-2} yr^{-1}。在地理空间上，ANPP自北向南逐渐增加（图2a），与草地之植被分布格局相类似（图1b）。宜宾市草地生态系统中有温性草原和热性草丛两种不同的类型，这两种类型的ANPP值分别为130.48 g C m^{-2} yr^{-1}和116.34 g C m^{-2} yr^{-1}（图2b）。温性草原的ANPP值高于整个宜宾市草地生态系统的平均水平，而热性草丛的ANPP值则低于整个宜宾市草地生态系统的平均水平。



误差棒代表ANPP的1倍标准误差；ANPP代表草地的地上净初级生产力

图2 2000-2015年期间宜宾市草地生态系统及其不同类型草地植被ANPP多年平均值的大小。

表1 全球主要草地生态系统ANPP的大小比较。

区域	Area (10^7Km^2)	ANPP (g C m^{-2} yr^{-1})	文献
全球	3.23	143.50	[34]
全球	2.40	127.50	[35]
全球	2.40	59.38	[36]
全球	1.47	71.40	[14]
全球		72.90	[37]
北美洲	0.37	109.89	[18]
北美洲	0.28	75.10	[14]
南美洲	0.13	113.40	[14]
澳洲和新西兰	0.10	78.40	[14]
非洲	0.27	68.50	[14]
欧亚大陆草原	0.87	43.78	[19]
宜宾市	1.73×10^{-4}	129.91	本研究

注：Area 表示区域的面积，ANPP是指地上净初级生产力的区域平均值。

不同研究对全球草地生态系统ANPP大小的评估范围为72.90 - 143.50 g C m^{-2} yr^{-1} [14, 18, 34-37]（表1），宜宾市草地生态系统ANPP的大小接近于对全球草地生态系统平均水平估算的高值。尽管宜宾市草地生态系统的面积比较小，但是ANPP的区域平均值却处于比较高的水平，其平均值高于北美洲、南美洲、澳洲以及欧亚大陆等世界上其他主要草地区域的平均水平[14, 18, 19]，对气候的调节和畜牧业的发展都具有重要的作用。

3.1.2．ANPP的动态变化规律

运用简单线性回归对2000-2015年期间宜宾市ANPP的年际变化规律的探讨表明（图3a），宜宾市的ANPP在这16年期间呈显著增加的变化趋势，增加的速率为2.19 g C m^{-2} yr^{-1}（p<0.05）。纵观这16年期间ANPP的大小变化可知，ANPP的增加趋势并不是持续的。采用PLR对ANPP动态变化规律的进一步分析表明（图3b），ANPP的变化规律在2007年发生了显著的转折，该转折年份将

2000-2015年划分为2个不同的时期，ANPP在2个时期的变化规律分别为“增加-减小”。ANPP在2000-2007年和2007-2015年2个时期的变化速率分别为-2.37 g C m^{-2} yr^{-1}（p<0.05）和5.90 g C m^{-2} yr^{-1}（p<0.05）。

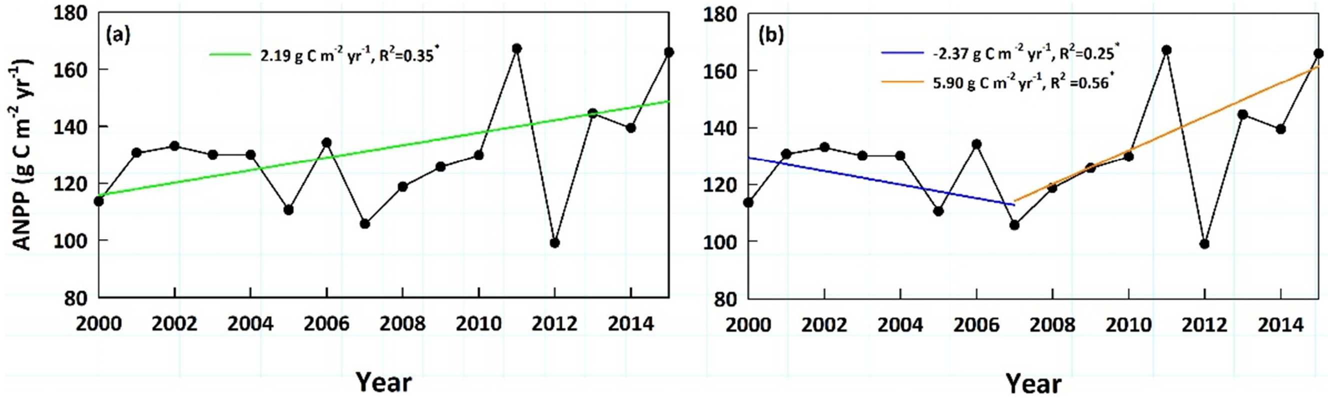


图3 2000 – 2015年期间宜宾市的ANPP及其变化规律。

（a）ANPP在2000 -2015年整个时期的变化趋势：线性变化趋势（绿色线条）；（b）ANPP在不同时期的线性变化趋势：蓝色线条代表ANPP在2000-2007年期间的变化趋势；橙黄色线条代表ANPP在2007-2015年期间的变化趋势。*表示线性回归在p<0.05 的水平显著。ANPP表示宜宾市草地地上净初级生产力的区域平均值。

宜宾市的ANPP在过去16年整体上呈显著增加的变化趋势（图3a），与全球、北半球植被[38]和欧亚大陆草原植被[19]生产力的变化趋势相一致。宜宾市的ANPP在过去16年期间随时间的变化趋势并不是持续的，在2007年发生显著的转折（图3b），这与过去对蒙古高原[39]和蒙古国[40]草地植被绿度变化趋势的研究中得出的结论类似。全球[41]、中亚地区[42-43]、欧亚大陆地区[44]、北美洲西南地区[45]以及阿根廷地区[46]植被绿度在过去也有类似的变化规律。

3.2．气象因素与ANPP之间的关系

草地生态系统ANPP的动态变化通常由当地降水、温度及辐射等气象因素的变化直接引起[12, 17, 22, 47, 48]。为了细致地刻画气候变化对ANPP动态变化地影响，本研究分别计算了ANPP与降水和温度之间的偏相关系数（图4）。从分析的结果可以看出，ANPP的年际变异与年总降水量（图4a）和年平均温度（图4b）之间都是呈显著正相关关系，说明在宜宾市温度和降水对草地ANPP都是起到正的促进作用，并且温度对ANPP变异的解释能力要大于降水。

宜宾市草地ANPP的年际变化是由温度和降水的变化共同决定的，这与过去的研究结论不同。过去对温带草地生态系统的研究表明，草地ANPP的变化主要是由降水的变化控制的[39, 40, 49, 50]，主要因为温带草地生态系统主要是位于干旱-半干旱气候区，水分是草地植被生长的主要限制条件[40, 51]。针对高寒草地生态系统的研究表明，草地生态系统的ANPP主要是由温度决定的，因为在高寒地区低温是限制植被生长的主要条件[16, 22]。宜宾市的草地生态系统所处的气候带与过去多关注的内蒙古温带草原和青藏高原高寒草原都不同。宜宾市的草地生态系统位于亚热带湿润季风气候，具有气候温和、热量丰足、雨量充沛、光照适宜等特点，气候呈暖湿型，因此温度和降水对ANPP的变化都是正的促进作用。

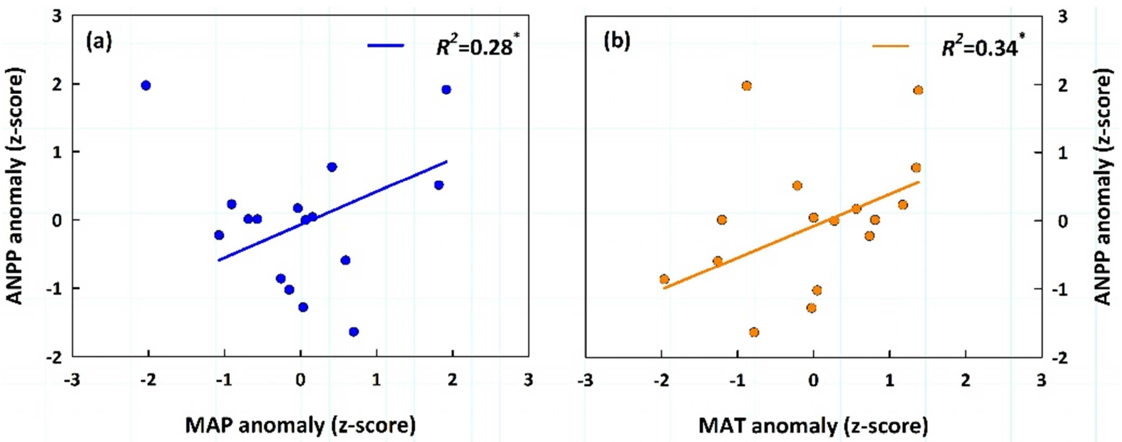


图4 2000-2015年期间宜宾市草地ANPP的变异与年总降水量(a)和年平均温度(b)之间的相关关系。

ANPP anomaly (z-score)，MAP anomaly (z-score) 和 MAT anomaly (z-score) 分别代表地上净初级生产力、年总降水量和年均温度经过数据均一化处理之后的值。

4．结论

本研究以宜宾市的草地生态系统为研究对象，借助长时间序列（2000-2015年）的遥感和气象数据，对宜宾市草地生态系统地上净初级生产力在过去十几年的变化规律进行了分析，并且探讨了气候因素对其变化的影响作用，得到以下主要结论：

（1）宜宾市草地ANPP在2000-2015年期间的平均值为129.91g C m^{-2} yr^{-1}，其内温性草原和热性草丛的ANPP分别为130.48 g C m^{-2} yr^{-1}和 116.34 g C m^{-2} yr^{-1}，其平均水平高于北美洲、南美洲、澳洲以及欧亚大陆等世界上其他主要草地区域的平均水平。

（2）宜宾市草地的ANPP在2000-2015年期间呈显著增加的变化趋势，但是这种变化趋势并不是持续的，而是在2007年发生了显著的转折。ANPP在2000-2007年期间呈显著减小的变化趋势，而在2007-2015年期间呈显著增加的变化趋势。

（3）宜宾市草地ANPP的年际变化趋势由降水和温度的变化共同决定，并且降水和温度对ANPP的变化都是起到正的促进作用。本研究对认识亚热带草地对气候变化的响应机制具有重要意义。

致谢

本研究受到四川轻化工大学校内人才引进项目（2017RCSK19，2017RCSK20），四川省旅游局旅游科研重点基地智慧旅游研究基地重点项目（ZHZR18-01，ZHYR19-01），四川省高校人文社会科学重点研究基地-四川省农村社区治理研究中心项目（SQZL2019C03），四川省高校人文社会科学重点研究基地-四川旅游发展研究中心项目（LY19-40）和自贡市社科联产业转型与创新研究中心项目（CZ19B01）的共同支持。

参考文献

[1] McNaughton SJ, Oesterheld M, Frank DA, Williams K. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. Nature 1989, 341: 142-144.

[2] Scurlock JMO, Cramer W, Olson RJ, Parton WJ, Prince SD. Terrestrial NPP: Toward a consistent data set for global model evaluation. Ecological applications 1999, 9(3): 913-919.

[3] Singh D, Tsiang M, Rajaratnam B, Diffenbaugh NS. Precipitation extremes over the continental United States in a transient, high-resolution, ensemble climate model experiment. Journal of Geophysical Research-Atmospheres 2013, 118(13): 7063-7086.

[4] Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, Defries R, Galloway J, Heimann M. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC (eds). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013.

[5] Gherardi LA, Sala OE. Enhanced precipitation variability decreases grass- and increases shrub-productivity. Proceedings of the national academy of sciences of the united states of America 2015, 112(41): 12735-12740.

[6] 于贵瑞, 方华军, 伏玉玲, 王秋凤. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展. 生态学报 2011(19): 5449-5459.

[7] Parton W, Morgan J, Smith D, Del Grosso S, Prihodko L, Lecain D, Kelly R, Lutz S. Impact of precipitation dynamics on net ecosystem productivity. Global Change Biology 2012, 18(3): 915-927.

[8] Adams JM, Faure H, Fauredenard L, McGlade JM, Woodward FI. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present. Nature 1990, 348(6303): 711-714.

[9] Fang J, Piao S, Tang Z, Peng C, Ji W. Interannual variability in net primary production and precipitation. Science 2001, 293(5536): 1723.

[10] Scurlock JMO, Hall DO. The global carbon sink: a grassland perspective. Global Change Biology 1998, 4(2): 229-233.

[11] Grime JP, Brown VK, Thompson K, Masters GJ, Hillier SH, Clarke IP, Askew AP, Corker D, Kielty JP. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. Science 2000, 289(5480): 762-765.

[12] Brookshire ENJ, Weaver T. Long-term decline in grassland productivity driven by increasing dryness. Nature Communications 2015, 6: 7148.

[13] Mao D, Wang Z, Li L, Ma W. Spatiotemporal dynamics of grassland aboveground net primary productivity and its association with climatic pattern and changes in Northern China. Ecological Indicators 2014, 41: 40-48.

[14] Xia JZ, Liu SG, Liang SL, Chen Y, Xu WF, Yuan WP. Spatio-temporal patterns and climate variables controlling of biomass carbon stock of global grassland ecosystems from 1982 to 2006. Remote Sensing 2014, 6(3): 1783-1802.

[15] Gao Q, Schwartz M, Zhu W, Wan Y, Qin X, Ma X, Liu S, Williamson M, Peters C, Li Y. Changes in global grassland productivity during 1982 to 2011 attributable to climatic factors. Remote Sensing 2016, 8(5): 384.

[16] Zhang YL, Qi W, Zhou CP, Ding MJ, Liu LS, Gao JG, Bai WQ, Wang ZF, Zheng D. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982. Journal of Geographical Sciences 2014, 24(2): 269-287.

[17] Hufkens K, Keenan TF, Flanagan LB, Scott RL, Bernacchi CJ, Joo E, Brunsell NA, Verfaillie J, Richardson AD. Productivity of North American grasslands is increased under future climate scenarios despite rising aridity (vol 29, pg 1, 2016). Nature Climate Change 2016, 6(7).

[18] Lauenroth WK. Grassland primary production: North American grasslands in perspective. *Perspectives in grassland ecology*. Springer, 1979, pp 3-24.

[19] Jiao CC, Yu GR, Ge JP, Chen X, Zhang C, He NP, Chen Z, Hu ZM. Analysis of spatial and temporal patterns of aboveground net primary productivity in the Eurasian steppe region from 1982 to 2013. Ecology and Evolution 2017, 7(14): 5149-5162.

[20] Ma WH, Liu ZL, Wang ZH, Wang W, Liang CZ, Tang YH, He JS, Fang JY. Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland. Journal of Plant Research 2010, 123(4): 509-517.

[21] Wang ZQ, Yang S, Lau NC, Duan AM. Teleconnection between Summer NAO and East China Rainfall Variations: A Bridge Effect of the Tibetan Plateau. Journal of Climate 2018, 31(16): 6433-6444.

[22] Mao D, Luo L, Wang Z, Zhang C, Ren C. Variations in net primary productivity and its relationships with warming climate in the permafrost zone of the Tibetan Plateau. Journal of Geographical Sciences 2015, 25(8): 967-977.

[23] Chapin III FS, Matson PA, Mooney HA. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, Second edn. Dordrecht Heidelberg: London, 2011.

[24] Ma WH, Fang JY, Yang YH, Mohammat A. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982-2006. Sci China-Life Sci 2010, 53(7): 841-850.

[25] White R, Murray S, Rohweder M. *Pilot analysis of global ecosystems: grassland ecosystems*. World Resources Institute: Washington, DC, 2000.

[26] Sala OE, Parton WJ, Joyce LA, Lauenroth WK. Primary production of the central grassland region of the united-states. Ecology 1988, 69(1): 40-45.

[27] Craine JM, Nippert JB, Elmore AJ, Skibbe AM, Hutchinson SL, Brunsell NA. Timing of climate variability and grassland productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2012, 109(9): 3401-3405.

[28] Wilcox KR, von Fischer JC, Muscha JM, Petersen MK, Knapp AK. Contrasting above- and belowground sensitivity of three Great Plains grasslands to altered rainfall regimes. Global Change Biology 2015, 21(1): 335-344.

[29] Harris I, Jones PD, Osborn TJ, Lister DH. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology 2014, 34(3): 623-642.

[30] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被及其地理格局: 中华人民共和国植被图(1:1000 000), 2007.

[31] Ahlstrom A, Raupach MR, Schurgers G, Smith B, Arneth A, Jung M, Reichstein M, Canadell JG, Friedlingstein P, Jain AK, Kato E, Poulter B, Sitch S, Stocker BD, Viovy N, Wang YP, Wiltshire A, Zaehle S, Zeng N. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO2 sink. Science 2015, 348(6237): 895-899.

[32] Wilks DS. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press: Oxford, UK, 2011.

[33] Zhu ZC, Piao SL, Xu YY, Bastos A, Ciais P, Peng SS. The effects of teleconnections on carbon fluxes of global terrestrial ecosystems. Geophysical Research Letters 2017, 44(7): 3209-3218.

[34] Bazilevich N, Rodin LY, Rozov N. Geographical aspects of biological productivity. Soviet Geography 1971, 12(5): 293-317.

[35] Whittaker RH, Likens GE. The Biosphere and Man. In: Lieth H, Whittaker RH (eds). *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer Berlin Heidelberg: Heidelberg, 1975, pp 305-328.

[36] Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, Schimel DS, Hall DO, Coughenour MB, Garcia Moya E, Gilmanov TG, Kamnalrut A, Kinyamario JI, Kirchner T, Kittel TGF, Menaut JC, Sala OE, Scholes RJ, van Veen JA, Members SG. Impact of climate-change on grassland production and soil carbon worldwide. Global Change Biology 1995, 1(1): 13-22.

[37] Yang YH, Fang JY, Ma WH, Wang W. Relationship between variability in aboveground net primary production and precipitation in global grasslands. Geophysical Research Letters 2008, 35(23): L23710.

[38] Bastos A, Running SW, Gouveia C, Trigo RM. The global NPP dependence on ENSO: La Nina and the extraordinary year of 2011. Journal of Geophysical Research-Biogeoscience 2013, 118(3): 1247-1255.

[39] Bao G, Qin ZH, Bao YH, Zhou Y, Li WJ, Sanjjav A. NDVI-Based Long-term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau. Remote Sensing 2014, 6(9): 8337-8358.

[40] Bao G, Bao YH, Sanjjava A, Qin ZH, Zhou Y, Xu G. NDVI-indicated long-term vegetation dynamics in Mongolia and their response to climate change at biome scale. International Journal of Climatology 2015, 35(14): 4293-4306.

[41] Pan NQ, Feng XM, Fu BJ, Wang S, Ji F, Pan SF. Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends. Remote Sensing of Environment 2018, 214: 59-72.

[42] Mohammat A, Wang XH, Xu XT, Peng LQ, Yang Y, Zhang XP, Myneni RB, Piao SL. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia. Agricultural and Forest Meteorology 2013, 178: 21-30.

[43] Li Z, Chen Y, Li W, Deng H, Fang G. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 2015, 120(24): 12345-12356.

[44] Piao SL, Wang XH, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. Global Change Biology 2011, 17(10): 3228-3239.

[45] Zhang Y, Song C, Band LE, Sun G, Li J. Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? Remote Sensing of Environment 2017, 191: 145-155.

[46] van Leeuwen W, Hartfield K, Miranda M, Meza F. Trends and ENSO/AAO Driven Variability in NDVI Derived Productivity and Phenology alongside the Andes Mountains. Remote Sensing 2013, 5(3): 1177-1203.

[47] Parmesan C, Hanley ME. Plants and climate change: complexities and surprises. Annals of Botany 2015, 116(6): 849-864.

[48] Guo L, Cheng J, Luedeling E, Koerner SE, He J-S, Xu J, Gang C, Li W, Luo R, Peng C. Critical climate periods for grassland productivity on China's Loess Plateau. Agricultural and Forest Meteorology 2017, 233: 101-109.

[49] Bao G, Bao Y, Qin Z, Xin X, Bao Y, Bayarsaikan S, Zhou Y, Chuntai B. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2016, 46: 84-93.

[50] La Pierre KJ, Blumenthal DM, Brown CS, Klein JA, Smith MD. Drivers of variation in aboveground net primary productivity and plant community composition differ across a broad precipitation gradient. Ecosystems 2016, 19(3): 521-533.

[51] Angerer J, Han G, I. F, Havstad K. Climate change and ecosystems of Asia with emphasis on Inner Mongolia and Mongolia. Rangelands 2008, 30(3): 46-51.