

青藏高原 1981~2000 年植被净初级 生产力对气候变化的响应

黄 玫¹ 季劲钧^{1,2} 彭莉莉¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大气物理研究所 北京 100029

摘 要 基于分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的植被、土壤和气象数据, 利用大气—植被相互作用模型 (AVIM2) 模拟研究了青藏高原 1981~2000 年植被净初级生产力 (NPP) 对气候变化的响应。结果表明: 青藏高原近 20 年自然植被 (森林、草地和灌木) 受气温和降水量增加的影响, NPP 总量呈现上升趋势。灌木和森林 NPP 总量分别以每年 1.14% 和 0.88% 的速度增加, 均达到统计上的显著性水平。草地 NPP 上升趋势不如灌木和森林显著。降水量变化对森林和草地 NPP 的影响高于气温变化对它们的影响, 而降水量变化对灌木的影响则小于气温变化影响。总的区域平均来看, 尽管 1981~2000 年青藏高原年平均净辐射通量略有降低, 但由于平均气温以 $0.058\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率增加, 且降水量略有增长, 降水量与气温的共同作用使得青藏高原植被 NPP 总量呈上升趋势。

关键词 青藏高原 AVIM2 模型 净初级生产力 气候变化

文章编号 1006-9585 (2008) 05-0608-09 **中图分类号** Q148 **文献标识码** A

The Response of Vegetation Net Primary Productivity to Climate Change during 1981—2000 in the Tibetan Plateau

HUANG Mei¹, JI Jin-Jun^{1,2}, and PENG Li-Li¹

1 Synthesis Research Center, Chinese Ecosystem Research Network, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on the $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ resolution map of vegetation type, soil texture and meteorological data, the atmosphere—vegetation interaction model (AVIM2) was used to simulate the response of net primary productivity (NPP) to climate change in the Tibetan Plateau. The results show that the vegetation NPP increased during the past 20 years in the Tibetan Plateau owe to the combination effects of the temperature and precipitation change. The changes of annual mean temperature and annual precipitation were positively correlated with the change of NPP during the last 20 years. The influence of precipitation change to forests and grassland NPP were higher than that of temperature, whereas the effects of precipitation to shrubs were lower than that of temperature. The total NPP for shrub and forest increased 1.14% and 0.88% per year, individually. There increasing trend reach the statistically significant level. The increasing trend for grassland NPP was gentler than that for forests and shrubs. On the whole

收稿日期 2007-08-17 收到, 2008-08-06 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2005CB422006、中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-219 和中国科学院地理科学与资源研究所创新三期领域前沿项目 066U0607SZ

作者简介 黄玫, 女, 1968 年出生, 博士, 副研究员。从事气候变化与陆地生态系统碳循环模拟研究。
E-mail: huangm@igsnr.ac.cn

study region, the average annual mean temperature increased 0.058 °C per year, annual precipitation increased and the total vegetation NPP increased during 1981—2000.

Key words Tibetan Plateau, AVIM2, net primary productivity, climate change

1 引言

青藏高原是世界上最高的独立地貌单元, 平均高度在 4 000 m 以上, 有“世界屋脊”和世界“第三极”之称, 其独特的自然地理特征影响着欧亚大陆的大气环流和生态系统分布, 其地表过程变化不仅会引起亚洲大气环流的重大变化, 而且还会对北半球甚至全球大气环流产生重大影响^[1]。另一方面, 气候的微小波动会对青藏高原生态系统产生强烈影响, 导致高原生态系统的格局、过程与功能发生改变^[2]。研究表明高海拔地区对全球气候变化更敏感, 青藏高原气候变化对全国具有指示意义^[3, 4]。过去几十年青藏高原气候发生了很大变化, 气温和降水量总体呈上升趋势^[5]。在这样的气候变化背景下, 其自然植被对气候变化的响应是当前迫切需要研究的问题。

植被净初级生产力 (NPP) 是衡量植物群落在自然环境条件下生产能力的重要指标, 它的变化直接反映了生态系统对环境气候条件的响应。目前大范围估算陆地植被净初级生产力主要以模型研究为主。我国已有不少模型对国家尺度上植被净初级生产力进行了模拟^[6~12], 但这些研究由于涉及面广, 对特定区域气候变化与植被 NPP 的关系没有进行过深入探讨。吕建华等^[13]利用大气植被相互作用模型 (AVIM) 模拟了青藏高原 1991~1993 年平均植被 NPP 的空间分布, 给出了青藏高原植被净初级生产力的空间分布特征。周才平等^[14]将陆地生态系统模型 (TEM) 与 MODIS 数据相结合, 模拟了 2001 年青藏高原植被 NPP 的空间分布和季节变化特征。他们的研究由于模拟时段短, 不能反映出青藏高原植被对近 20 年来急剧变化的气候条件的响应。Piao^[15]等利用 1982~1999 年的遥感数据, 通过 CASA 模型模拟了青藏高原 NPP 的时空变化特征, 得到了有意义的结果。

本研究以大气植被相互作用模型 (AVIM2) 为基础, 以分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格的植被、土

壤和气候数据作为驱动, 模拟了青藏高原植被 1981~2000 年净初级生产力的空间分布格局和年际动态变化特征, 并在此基础上分析了青藏高原自然植被对气候变化的响应。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域与资料

本研究的空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬度网格, 研究区域以我国气候区划所给出的青藏地区作为标准, 地理位置大致位于 ($27^\circ \sim 40^\circ \text{N}$, $80^\circ \sim 105^\circ \text{E}$)。包括西藏自治区以及青海省、新疆维吾尔自治区、甘肃省、四川省和云南省的部分区域, 总面积约为 $255 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

文中所用的 1981~2000 年的 104 个气象站观测数据来源于中国气象局气候资料中心。采用澳大利亚 ANUSPLIN3.1 插值软件的样条函数插值法对气象数据进行了空间插值, 在内插中主要考虑了经纬度的影响, 在对温度的插值中还考虑了海拔高度的影响。植被分类采用国际地圈生物圈计划 (IGBP) 分类系统, 共分为 14 类, 分别为常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、有林草地、草地、高寒草甸、郁闭灌丛、开放灌丛、农作物、农作物与自然植被混杂、荒漠草原和荒漠等^[16]。土壤质地分类是在 1:14 000 000 中国成土母质类型图和中国科学院南京土壤研究所编制的中国土壤图的基础上形成的, 共分为 12 类, 分别为石砾、沙、粗砂土、细砂土、面砂土、砂粉土、粉土、粉粘土、粉壤土、壤土、壤粘土和粘土^[17]。

2.2 模型简介

本文应用大气—植被相互作用模型 (AVIM2) 模拟植被净初级生产力。AVIM2 是在 AVIM 基础上经过发展和改进而形成的新版本。AVIM 模型对站点尺度的森林、农作物、草地等生态系统净初级生产力的模拟与观测数据有较好的一致性^[18~21]。在区域尺度上对西南地区、青藏高原、中国区域以及全球生态系统的 NPP 都进行过模

拟,得到了很好的模拟效果^[13, 22, 23]。新版的 AVIM2 对若干物理和生理过程的参数化作了改进,采用多层的土壤模型和新的水文过程参数化^[24],同时增加了详细的土壤碳循环模块,包含了植被凋落物的分解和异养呼吸过程。

2.3 模型检验

由于缺少研究区域内 NPP 动态变化的实测值,对于模型估算进行实时验证是很困难的。本研究结合前人研究成果和统计资料,对模型估算的青藏高原 1981~2000 年平均的 NPP 进行了验证。

对森林 NPP 的验证采用罗天祥^[25]收集并整理的 NPP 实测数据集。该数据集包含 1989~1993 年中国林业局的森林 NPP 清查数据以及 1994 年前中国多种文献的 NPP 实测数据。全国共 600 多个森林样地,其中有 72 个样地在本研究区域内。图 1 为研究区域内 72 个森林样地的模型估计值和实测值的散点图。由图可见,观测和模拟值大多在 1:1 线附近分布。经计算这 72 个样地 NPP 的平均值为 $400.62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。略高于模型估算的平均值 $391.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。

除森林以外,本研究对青藏高原稀疏灌木 NPP 的估计平均值为 $89.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C),对农田的估计值为 $665.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C),略高于周才平等^[14]利用 2001 年资料估计的 63.95 和 $621.85 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。周才平等^[14]对高寒草原和高寒草甸 NPP 的估计值分别为 63.95 和

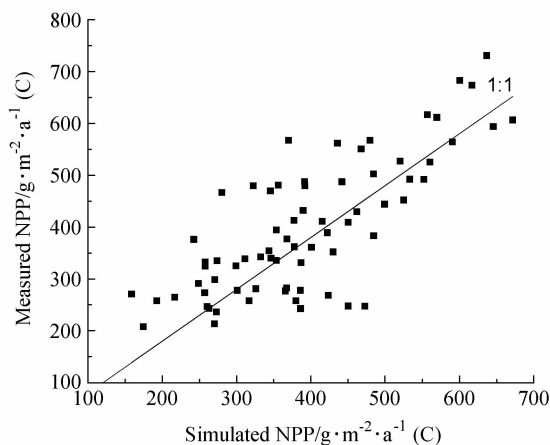


图1 研究区域内 72 个森林样地实测 NPP 与模拟值比较
Fig. 1 Comparison of estimated and observed NPP in the 72 sampling sites of forest in research area

$214.64 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C),略高于本研究对相应植被 NPP 的平均估计值 $50.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 和 $190.39 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。总的来看,模型估计的各类植被的 NPP 平均值在合理范围。但由于可比较的 NPP 数据在研究区域和研究时段上与本研究不一致,以上的比较只是粗略的估计。

3 结果与讨论

3.1 青藏高原植被净初级生产力空间分布格局

图 2 为 1981~2000 年平均青藏高原净初级生产力 (NPP) 的空间分布格局。图中显示,青藏高原植被 NPP 呈现从东南向西北递减趋势。区域内植被 NPP 最高值在 $1000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。以上,平均值为 $165 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。在青藏高原东南部的河谷地区由于地势低、水热条件好,植被 NPP 较大,多在 $600 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 以上,其中一些常绿阔叶林的 NPP 达 $800 \sim 1000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 左右。青藏高原的东部和中部,是草原和高寒草甸广泛分布的区域,这些地区植被 NPP 在 $200 \sim 400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 之间;青藏高原的西南部广泛分布的稀疏灌木, NPP 多在 $60 \sim 200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 之间;青藏高原北部植被稀少,大部分地区的 NPP 在 $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 以下,部分地区接近于 0。

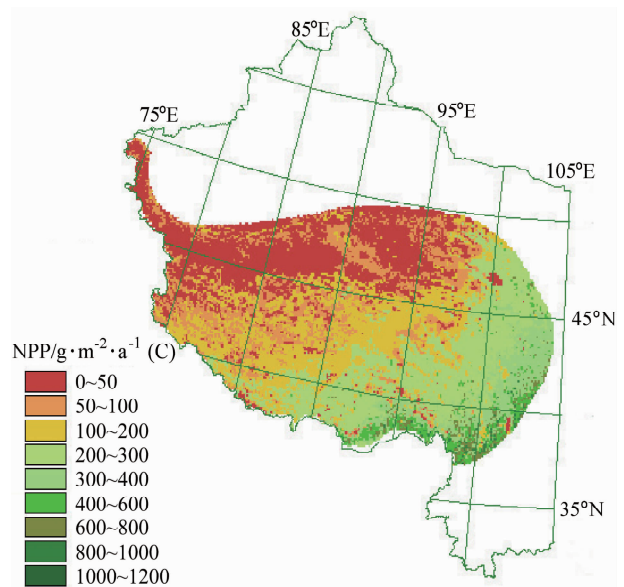


图2 青藏高原 NPP 空间分布
Fig. 2 The spatial distribution of NPP in Tibetan Plateau

值得注意的是, 由于青藏高原的西北部地区缺乏常规气象观测数据, 采用空间插值方法产生的气象要素序列在该区域可能存在不确定性, 从而可能导致 NPP 模拟结果的不确定性。另外本研究的空间分辨率有限, 仅为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 经纬度网格, 而青藏高原地形复杂, 植被分布存在较高的空间异质性, 由此也会给模拟的 NPP 带来误差。尽管如此, 模拟的植被净初级生产力空间格局与吕建华等^[13]和周才平等^[14]的研究结果基本一致, 因此模拟结果在合理范围内。

3.2 区域平均气温、降水量、净辐射通量和植被净初级生产力动态变化

图 3 为 1981~2000 年青藏高原年平均气温、降水量和 NPP 总量的年际变化和线性拟合趋势。青藏高原近 20 年区域平均气温为 -1.295°C 。年平均气温在 1998 年最高, 达 -0.158°C ; 其次是 1999 年, 达 -0.171°C 。1983 年为平均气温最低年, 低达 -2.39°C (图 3a)。在社会科学统计软件 (Statistical Program for Social Sciences, SPSS) 上统计计算得知, 近 20 年青藏高原平均

气温上升速率为 $0.058^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, 通过信度为 0.05 的置信度检验。

青藏高原近 20 年区域平均降水量为 396 mm。1994 年是区域平均降水量的低值年, 1998~2000 年降水量持续增加, 于 2000 年达最大值 449 mm (图 3b)。在 SPSS 上通过统计检验得知降水量的上升趋势不显著。

净辐射通量是地表面收入的太阳辐射能量和支出的有效辐射能量之间的差额, 主要受云量的影响, 同时还与日照长短、大气透明度、一般天气气候条件和地表面的状态和特征等有关。它是气候形成的主要因子之一, 也是驱动植被生长的关键气候因子。图 3c 是模拟的青藏高原年平均净辐射通量的多年变化。由此看到年平均净辐射通量略有下降趋势, 但在 SPSS 上通过统计检验得知其下降趋势不显著。年平均净辐射通量最高值出现在 1984 年, 达 $85.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 最小值出现在 1997 年, 为 $79.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。研究区域 20 年平均净辐射通量为 $81.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于全国平均水平^[26], 可能原因是研究区域包括净辐射通量较低

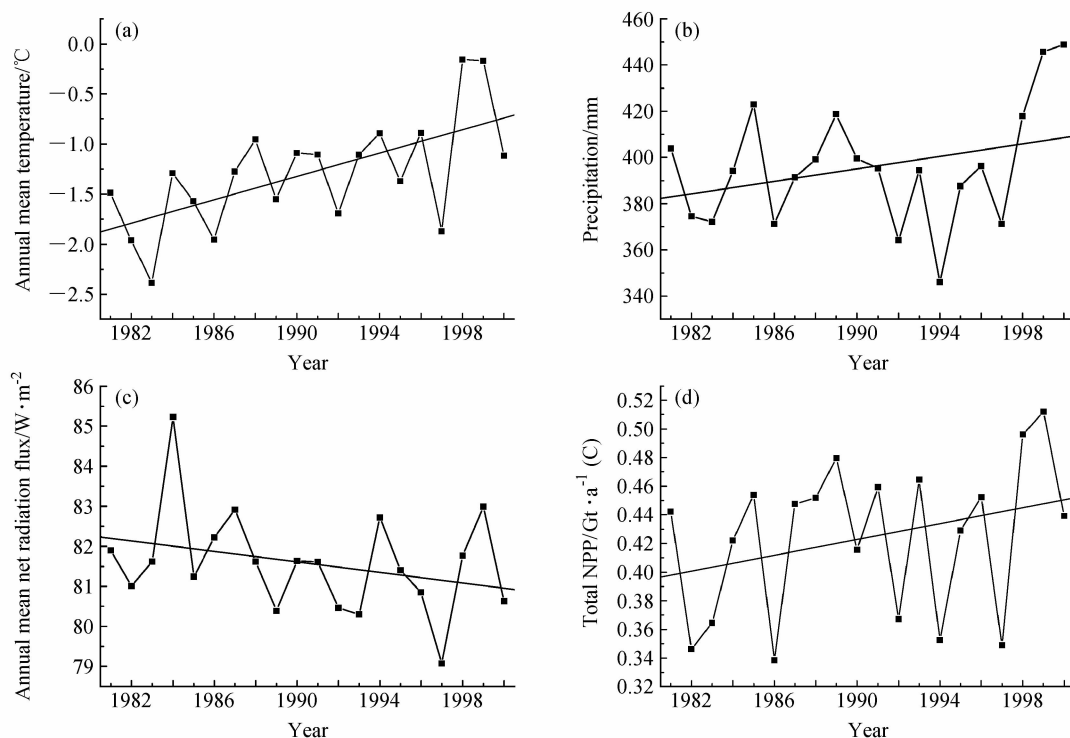


图 3 青藏高原 (a) 年平均气温、(b) 年降水量、(c) 年平均净辐射通量和 (d) NPP 总量多年变化及趋势

Fig. 3 The inter annual variation and linear tendency of (a) mean air temperature, (b) total precipitation, (c) mean net radiation flux and (d) total NPP for Tibetan Plateau area

的四川盆地。

尽管研究区域净辐射通量略有降低,但在气温明显增加和降水量略有增加的气候背景下,近 20 年青藏高原 NPP 仍然呈增加趋势(图 3d)。其中 1999 年为 NPP 总量最高年而 1986 年是 NPP 总量最小年。近 20 年 NPP 总量的平均为 $0.424 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} \text{ (C)}$, 是全国总量 $3.445 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} \text{ (C)}$ 的 12.3%。由于计算区域总面积为 $255.425 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国总面积 ($959.698 \times 10^4 \text{ km}^2$) 的 26.6%, 因此青藏高原植被净初级生产力的水平低于全国平均水平。本文对 NPP 总量的估算高于周才平等^[14]的估计值 $0.302 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} \text{ (C)}$, 其中主要的原因可能是文中的研究面积大于周等的研究范围, 另外二者研究时段也不一样。对 NPP 趋势的估计与 Piao 等^[15]和 Fang 等^[27]的估计是一致的。

3.3 自然植被净初级生产力对气候变化的响应

将青藏高原自然植被分类为森林、灌木和草地, 分别用森林、灌木和草地的区域平均值来代表该类植被的变化, 以此来研究不同植被 NPP 对气候变化的响应。

图 4 为森林区域的年平均气温、年降水量和森林 NPP 总量多年变化。由此看到, 森林区域年平均气温呈上升趋势(图 4a)。经 SPSS 统计计算得知, 森林区域年平均气温上升速率达 $0.025 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, 超过 0.05 置信度。森林年降水量有增加趋势(图 4b), 但在统计上尚不显著。森林 NPP 总量有明显上升趋势(图 4c), 经计算其上升速率为 $2.71 \times 10^{-4} \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} \text{ (C)}$, 超过 0.01 置信度, 相当于 NPP 总量每年增加 0.88%。

图 5 为灌木区域的年平均气温、年降水量和 NPP 总量多年变化。由此看到, 灌木区域年平均气温呈上升趋势(图 5a), 1998 年和 1999 年是年平均气温较高年。经 SPSS 统计计算得知, 灌木区域年平均气温上升速率达 $0.063 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, 超过 0.01 置信度。灌木区域年降水量略有增加趋势(图 5b)。1999 年和 2000 年是灌木区域降水量的高值年, 分别为 370 和 410 mm。灌木 NPP 总量有明显上升趋势(图 5c), 经计算其上升速率为 $5.457 \times 10^{-4} \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} \text{ (C)}$, 超过 0.01 置信度, 相当于 NPP 每年增加 1.14%。1999 年是灌木 NPP 最高年。

图 6 为草地区域的年平均气温、年降水量和 NPP 总量多年变化。由此看到, 草地年平均气温呈上升趋势(图 6a), 1998 年是草地年平均气温最高年, 1999 年次之。经统计计算得知, 草地年平均气温上升速率达 $0.057 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, 超过 0.01 置信度。草地年降水量从 1998 年以后一直增加(图 6b)。1999 年和 2000 年是草地降水量的高值年, 分别为 466 和 467 mm。图 6c 显示草地 NPP 有上升趋势, 受气温和降水量变化影响, 1998 年和 1999 年是草地 NPP 较高年, 1999 年 NPP 为最

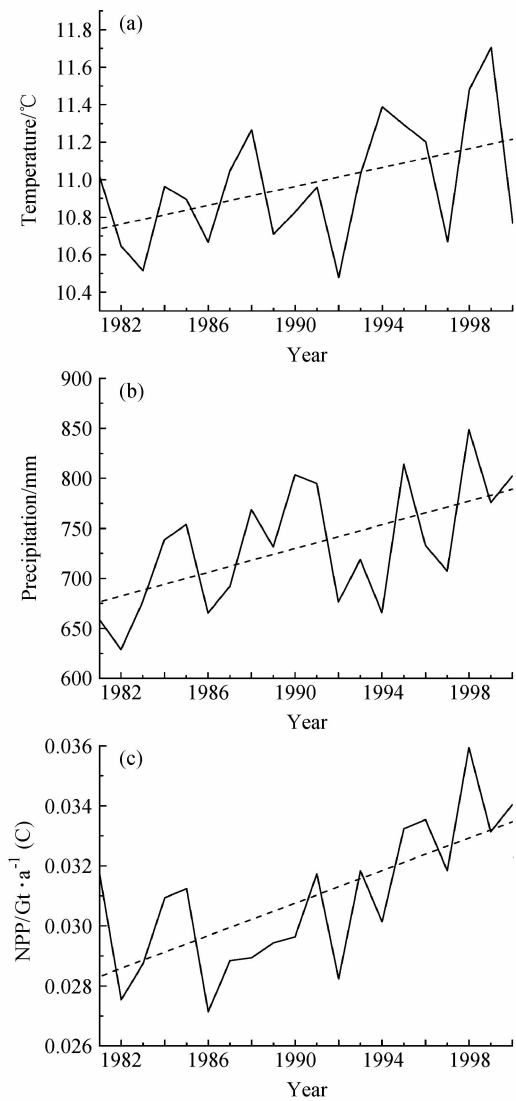


图 4 森林区 (a) 年平均气温、(b) 年降水量和 (c) NPP 总量多年变化及趋势

Fig. 4 The inter annual variation and linear tendency of (a) mean air temperature, (b) total precipitation and (c) total NPP for forest

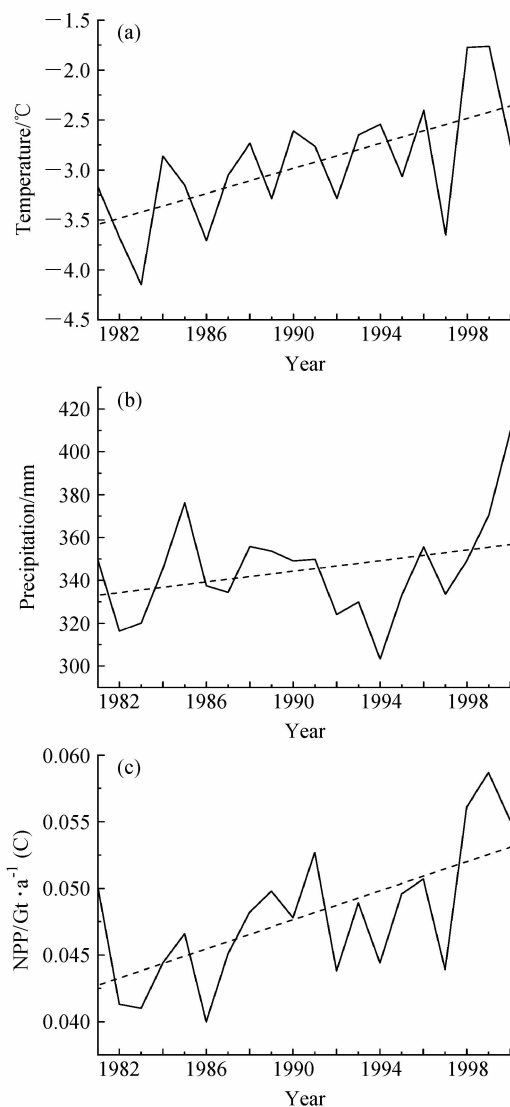


图 5 灌木区 (a) 年平均气温、(b) 年降水量和 (c) NPP 总量多年变化及趋势

Fig. 5 The interannual variation and linear tendency of mean air temperature (a), total precipitation (b) and total NPP (c) for shrub land

高值，达 $0.393 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$ 。杨元合等^[28]研究了青藏高原 1982~1999 年之间 NDVI 的变化，得出生长季草地 NDVI 显著增加的结论，该结论与本研究估计的青藏高原草地 NPP 变化趋势一致。

表 1 列出了近 20 年青藏高原自然植被净初级生产力与气温和降水量的相关系数。由此看到，森林、灌木和草地的净初级生产力与该区域年平均气温和年降水量都呈正相关关系。即当气温和降水量增加时，青藏高原自然植被的净初级生产力都增加。其中森林 NPP 与气温的相关系数为

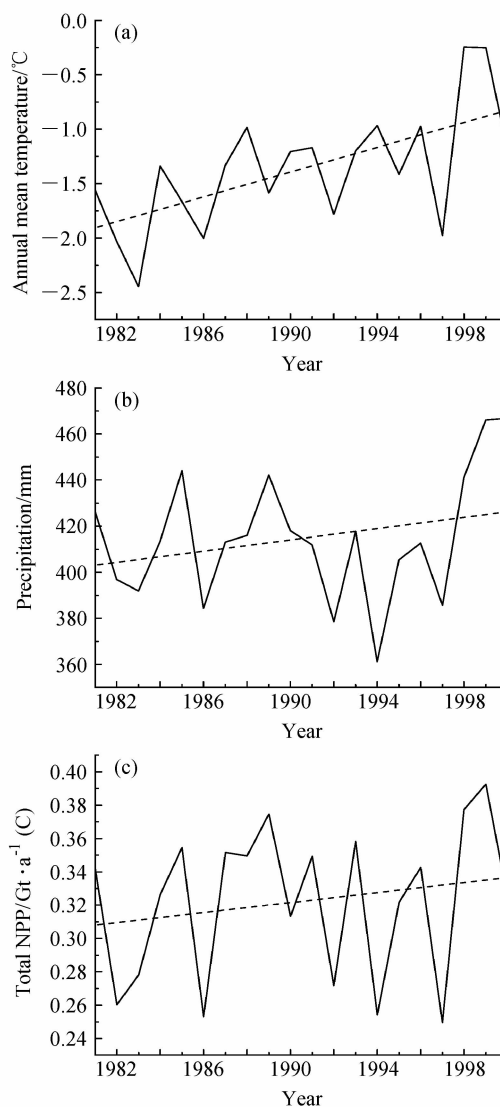


图 6 草地区 (a) 年平均气温、(b) 年降水量和 (c) NPP 总量多年变化及趋势

Fig. 6 The interannual variation and linear tendency of (a) mean air temperature, (b) total precipitation and (c) total NPP for grassland

0.571，与降水量的相关系数为 0.768。灌木 NPP 与气温的相关系数为 0.802，与降水量的相关系数为 0.720。草地 NPP 与气温的相关系数为 0.662，与降水量的相关系数为 0.813。相关系数的大小显示，森林和草地净初级生产力与降水量的相关系数均大于与气温的相关系数，而灌木 NPP 与降水量的相关系数小于与气温的相关系数。也就是说，对于青藏高原东南部森林和东部、中部的草地来说，降水量变化对其净初级生产力的影响大于气温变化的影响。而对于在青藏高原西北部广泛分

表 1 青藏高原自然植被净初级生产力与气温和降水量的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between NPP, temperature and precipitation for various vegetation types in the Tibetan Plateau

植被类型	年降水量	年平均气温
森林	0.768	0.571
灌木	0.720	0.802
草地	0.813	0.662

注：相关系数均达到 0.01 置信度水平

布的稀疏灌木来说，气温变化对其净初级生产力的影响大于降水量变化的影响，也就是青藏高原灌木受温度的限制较大。

4 结论

通过模拟和分析 1981~2000 年青藏高原植被 NPP 的空间分布和年际变化对气温和降水量变化响应的特征，得出以下初步结论：

青藏高原近 20 年森林、草地和灌木的 NPP 变化与气温和降水量变化呈正相关关系，即气温和降水量增加时，植被 NPP 增加。对森林和草地的 NPP 而言，降水量变化对它们的影响高于气温变化的影响。对灌木的 NPP 来说，降水量变化对它的影响小于气温变化对它的影响。

近 20 年青藏高原灌木区域气温显著升高，其上升速率超过青藏高原的平均水平，达 $0.063\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由于其气温限制部分解除，同时降水量也呈增加趋势，因而青藏高原灌木的 NPP 呈明显增加趋势，增长速率达 $5.457 \times 10^{-4} \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)，超过 0.01 置信度，相当于 NPP 每年增加 1.14%。

森林区年平均气温上升速率低于青藏高原平均水平，为 $0.025\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ，但由于年降水量也有增加趋势。因此森林 NPP 总量也有较明显上升趋势，上升速率为 $2.71 \times 10^{-4} \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)，达到 0.05 置信度水平。相当于 NPP 总量每年增加 0.88%。

青藏高原草地面积广大，草地年平均气温上升速率达 0.057，接近于青藏高原的平均水平。草地年降水量略有增加。草地 NPP 有上升趋势，但上升趋势不如灌木和森林显著，还没有达到统计

上的显著性水平。

总的区域平均来看，青藏高原 1981~2000 年的平均气温有明显增加趋势，增加速率为 $0.058\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ，降水量略有增加。尽管年平均净辐射通量略有减少，但受气温和降水量增加的影响，植被 NPP 总量呈上升趋势。

参考文献 (References)

- [1] 姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策. 地球科学进展, 2006, **21** (5): 459~464
Yao Tandong, Zhu Liping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy. *Progress in Geography* (in Chinese), 2006, **21** (5): 459~464
- [2] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应. 北京: 科学出版社, 2004
Zheng Du, Yao Tandong. *Uplifting of Tibetan Plateau with Its Environmental Effects* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004
- [3] 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题. 科学通报, 2000, **45** (1): 98~106
Yao Tandong, Liu Xiaodong, Wang Ninglian. Amplitude of climatic changes in Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45** (1): 98~106
- [4] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, **43** (6): 633~636
Feng Song, Tang Maocang, Wang Dongmei. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot region of climatic fluctuation in China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1998, **43** (6): 633~636
- [5] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. 地理学报, 2005, **60** (1): 3~11
Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2005, **60** (1): 3~11
- [6] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. 植物生态学报, 1996, **20** (1): 11~19
Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. Study on NPP of natural vegetation in China under global climate change. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 1996, **20** (1): 11~19
- [7] 孙睿, 朱启疆. 植被净第一性生产力模型及中国净第一性生产力的分析. 地理学报, 2000, **55** (1): 36~45
Sun Rui, Zhu Qijiang. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2000, **55** (1): 36~45

- [8] 李迪强, 孙成永, 张新时. 中国潜在植被生产力的分布与模拟. 植物学报, 1998, **40** (6): 560~566
Li Diqiang, Sun Chengyong, Zhang Xinshi. Modelling the net primary productivity of the natural potential vegetation in China. *Acta Botanica Sinica* (in Chinese), 1998, **40** (6): 560~566
- [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
Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2001, **25** (5): 603~608
- [10] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 1981~1998 年中国陆地净初级生产力时空特征模拟. 地理学报, 2003, **58** (3): 372~380
Tao Bo, Li Kerang, Shao Xuemei, et al. Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58** (3): 372~380
- [11] Xiao X M, Melillo J M, Pan Y, et al. Net primary production of terrestrial ecosystems in China and its equilibrium responses to changes in climate and atmospheric CO₂ concentration. *Formerly Acta Phytocol Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (2): 97~118
- [12] 何勇, 董文杰, 季劲钧, 等. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟. 地球科学进展, 2005, **20** (3): 345~349
He Yong, Dong Wenjie, Ji Jinjun, et al. The net primary production simulation of terrestrial ecosystems in China by AVIM. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2005, **20** (3): 345~349
- [13] 吕建华, 季劲钧. 青藏高原大气—植被相互作用的模拟试验 II: 植被叶面积指数和净初级生产力. 大气科学, 2002, **26** (2): 255~262
Lu Jianhua, Ji Jinjun. A simulation study of Atmosphere-Vegetation Interaction over the Tibetan Plateau. Part II: Net primary productivity and leaf area index. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 255~262
- [14] 周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算. 地理学报, 2004, **59** (1): 74~79
Zhou Caiping, Ouyang Hua, Wang Qinxue, et al. Estimation of net primary productivity in Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, **59** (1): 74~79
- [15] Piao Shilong, Fang Jingyun, He Jinsheng. Variations in vegetation net primary production in the Qinghai—Xizang Plateau, China, from 1982 to 1999. *Climatic Change*, 2006, **74**: 253~267
- [16] 张时煌, 彭公炳, 黄玫. 基于遥感与地理信息系统支持下的地表植被特征参数反演. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 80~91
Zhang Shihuang, Peng Gongbing, Huang Mei. Derivation of earth surface parameters in vegetation properties supported by GIS techniques. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 80~91
- [17] 张时煌, 彭公炳, 黄玫. 基于地理信息系统技术的土壤质地分类特征提取与数据融合. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 65~79
Zhang Shihuang, Peng Gongbing, Huang Mei. The feature extraction and data fusion of regional soil textures based on GIS techniques. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 65~79
- [18] 季劲钧, 胡玉春. 一个植物冠层物理传输和生理生长过程的多层模式. 气候与环境研究, 1999, **4** (2): 152~164
Ji Jinjun, Hu Yuchun. A multi-level canopy model including physical transfer and physiological growth processes. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4** (2): 152~164
- [19] 季劲钧, 苗曼倩. 不均匀植被分布对地表面和大气边界层影响的数值模拟. 大气科学, 1994, **18** (3): 293~302
Ji Jinjun, Miao Manqian. Numerical experiments of influence of heterogeneous vegetation distribution on the states of surface and atmospheric boundary layer. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1994, **18** (3): 293~302
- [20] 季劲钧, 余莉. 地表物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究. 大气科学, 1999, **23** (3): 439~448
Ji Jinjun, Yu Li. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (3): 439~448
- [21] Lu Jianhua, Ji Jinjun. A simulation and mechanism analysis of long-term variations at land surface over arid/semi-arid area in north China. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: 1~19
- [22] 谷晓平, 黄玫, 季劲钧, 等. 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
Gu Xiaoping, Huang Mei, Ji Jinjun, et al. The influence of climate change to the net primary productivity of southwest China. *Nature Resources Research* (in Chinese), 2007, **22** (2): 251~259
- [23] 李银鹏, 季劲钧. 全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究. 地理学报, 2001, **56** (4): 379~389
Li Yinpeng, Ji Jinjun. Simulations of carbon exchange between global terrestrial ecosystem and the atmosphere. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, **56** (4): 379~389
- [24] 季劲钧, 刘青, 李银鹏. 半干旱地区地表水平衡的特征和模拟. 地理学报, 2004, **59** (6): 964~971

- Ji Jinjun, Liu Qing, Li Yinpeng. Features and simulation of surface water balance in semi arid areas. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, **59** (6): 964~971
- [25] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 中国科学院自然资源综合考察委员会博士论文, 1997
- Luo Tianxiang. Observation and modeling of the distribution of biological productivities of China's forest. Ph. D. dissertation (in Chinese), Commission for Integrated Survey of Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, 1997
- [26] 黄玫. 中国陆地生态系统水、热、碳通量模拟研究. 中科院地理科学与资源研究所博士毕业论文, 2006
- Huang Mei. Modeling the water, energy and CO₂ exchanges in China's terrestrial ecosystems. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2006
- [27] Fang J Y, Piao S L, Field C B, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999, *Front. Ecol. Environ.*, **1** (6): 293~297
- [28] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2006, **30** (1): 1~8
- Yang Yuanhe, Piao Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology* (in Chinese), 2006, **30** (1): 1~8