

杜军, 胡军, 张勇, 等. 西藏植被净初级生产力对气候变化的响应 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(5): 738-743.

西藏植被净初级生产力对气候变化的响应

杜军¹, 胡军², 张勇², 左慧林³, 拉巴¹

(1 西藏自治区气候中心; 2 拉萨市气象局; 3 西藏自治区气象局, 西藏 拉萨 850001)

摘要: 根据 1971—2005 年年平均气温、降水量资料, 采用 Thornthwaite Memorial 模型计算了西藏植被净初级生产力 (net primary production, NPP), 分析了 NPP 的空间分布、年际和年代际变化特征, 以及未来气候变化对 NPP 的影响。结果表明, 西藏 NPP 有自东南向西北递减的分布规律。近 35 a 阿里地区西南部、聂拉木、江孜 NPP 为减少趋势, 减幅为 $11.9 \sim 314.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 以普兰减幅最大; 其他各地呈不同程度的增加趋势, 增幅为 $26.8 \sim 459.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 其中拉萨增幅最明显; 林芝地区、昌都地区北部、那曲地区 NPP 呈明显的逐年代增加趋势, 阿里地区西南部、聂拉木 NPP 表现为逐年代减少趋势。就西藏平均而言, 20 世纪 70 年代气候“冷干”, NPP 偏低; 90 年代气候“暖湿”, NPP 偏高。从设定的气候变化情景来看, “暖湿型”气候对西藏 NPP 有利, 平均增产 6% ~ 13%; “冷干型”气候对西藏 NPP 不利, 平均减产 6% ~ 14%。未来西藏以“暖湿型”气候为主, 到 2050 年 NPP 将增加 11% ~ 26%。

关键词: 净初级生产力; 空间分布; 年际和年代际变化; 西藏

中图分类号: P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)05-0738-06

Responses of Net Primary Production to Climatic Changes over Tibet Plateau from 1971 to 2005

DU Jun¹, HU Jun², ZHANG Yong², ZUO Hui-lin³, LAHA Pa¹

(1 Tibet Climate Center; 2 Lhasa Meteorological Bureau; 3 Tibet Meteorological Bureau, Lhasa 850001, China)

Abstract Based on the annual mean temperature and precipitation data at the 38 meteorological stations over Tibet from 1971 to 2005, the net primary production (NPP) is computed by Thornthwaite Memorial Model. The spatial distributions, interannual and interdecadal variations of the NPP are analyzed and the influences of climate changes on NPP are discussed. The results show that the distribution of NPP is characterized by a remarkable regional feature, i.e. decreasing from the southeastern to the northwestern of Tibet. During last 35 years, the reduction of NPP was insignificant in southwestern Ngari district and Nyalam county and it ranged from 11.9 to $314.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, with the largest in Purang county. In other districts of Tibet, NPP has increased and the increment ranged from 26.8 to $459.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, with the largest in Lhasa. Also, the results show that NPP has increased interdecadally in Nyngri district, northern Chamdo district and Nakchu district, but decreased in southwestern Nyalam county and Gyantse county. On an average over the whole Tibet, the NPP changed interdecadally. When the cold and dry climate occurred in the 1970s, the NPP was lower, and when the warm and wet climate appeared in the 1990s, the NPP was higher. Under climate change scenarios, the warm and wet climate would benefit the NPP with an average increment of yield by 6% to 13% over Tibet, while the cold and dry climate would have an adverse impact on NPP with an average reduction of yield by 6% to 14%. The future climate over Tibet would become warm and moist, and the NPP would also increase by 11% to 26% in 2050.

Key words net primary production; spatial distribution; interannual and interdecadal variations; Tibet

收稿日期: 2007-08-03 改回日期: 2007-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40565002)

作者简介: 杜军 (1969-), 男, 贵州绥阳人, 学士, 正高级高级工程师, 研究方向为气候变化与农业气候, dujun0891@163.com.

0 引言

气候变化对全球的自然生态系统以及社会经济体系具有深远的影响, 是当今各国政府和科学界乃至普通民众广泛关注的热点问题。近 100 a (1906—2005 年) 全球平均地表温度上升了 $(0.74 \pm 0.18) ^\circ\text{C}$, 1850 年以来最暖的 12 个年份有 11 个出现在近期 (1995—2006 年), 过去 50 a 升温率几乎是过去 100 a 的 2 倍^[1]。位于亚洲腹地的青藏高原也同样表现出与全球一致的增温过程, 它不仅是气候变化的敏感区和启动区^[2], 还被认为是全球气候变化的驱动机与放大器^[3]。近年来国内学者对青藏高原的气候变化^[4-11]及其气候对周边区域影响^[12-17]的研究较多。过去 30 a 内青藏高原海拔 3 500 m 以上地区年平均气温每 10 a 增加 $0.25 ^\circ\text{C}$ ^[5]; 1961—2000 年近 40 a 来青藏高原年平均气温以 $0.26 ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的增长率上升^[6]; 1962—1999 年高原冬春降水的增加主要发生在青藏高原东部和海南地区, 青海北部特别是东北部的冬春降水减少^[7]; 1971—2000 年西藏大部分地区年降水量为正趋势变化, 而阿里地区呈较明显的减少趋势^[11]; 前期冬、春季青藏高原地温的三维结构对长江中下游地区夏季降水异常具有“强信号”指示特征^[15]; 华北地区汛期降水与青藏高原 5—6 月地表温度具有显著的正相关, 第一典型场表现出大体一致的变化特点^[16]。但是, 西藏植被生态系统对人为干扰和自然环境变化的敏感程度极高, 水分和温度的微小变化就可导致生物生产力的改变, 其气候变化对生态系统的结构和功能的影响目前尚不是很清楚, 是一个需要研究的科学问题。

植被净初级生产力 (net primary production, NPP) 是指绿色植被在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量, 是衡量植物群落在自然环境条件下生产能力的重要指标。在全球生物学计划 (IBP) 的推动下, NPP 的研究在世界范围内无论在理论上、测量方法上, 还是在模型的发展和运用上都得到了迅速发展, 由最初的气候统计模型 (Mimmi 模型^[18]、Thomthwaite 模型^[19]) 和生态生理过程模型 (CENTURY^[20]、TEM^[21]等), 到基于 RS GIS 技术的光能利用率模型 (CASA^[22]、GLO-PEM^[23]等)。目前国内学者采用上述 3 种模型分析了气候变化对 NPP 的影响^[24-28]。鉴于此, 本文分析了西藏 NPP 的变化趋势和时空分布特征及其对全球气候变化的响应, 对西藏农业生产、生态环境保护和恢复具有重要指导

意义。

1 资料和方法

NPP 计算方法很多。考虑所用资料既易获取又能清楚说明气候变化的影响, 采用李斯 (Lieth) 著名的 Thomthwaite Memorial 模型, 即根据世界各地植物生物产量与年平均气温、年降水量之间的关系, 用实际蒸散量来估算 NPP (以量 P_{NP} 表示)^[24-25]:

$$P_{\text{NP}} = 30\,000 [1 - e^{-0.0009695(V-20)}] \quad (1)$$

式中: P_{NP} 为植被净初级生产力 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); V 为年平均实际蒸散量 (mm), 采用目前国内大部分学者使用的简化计算公式^[24-25], 即:

$$V = \frac{1.0R}{\sqrt{1 + (1.0R/L)^2}} \quad (2)$$

式中: R 为年降水量 (mm); L 为年最大蒸散量 (mm), 它是年平均气温 t ($^\circ\text{C}$) 的函数, 与 t 之间存在如下关系:

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3 \quad (3)$$

西藏气象观测站点稀少, 为了全面了解高原 NPP 的空间分布特征, 选取 1971—2000 年西藏 38 站年平均气温、年降水量的多年平均值, 计算西藏各站 NPP。

西藏大部分站点观测年限较短, 文中选取了资料年限为 30 a 以上的 25 站 1971—2005 年平均气温和降水量资料, 以此计算各站逐年 NPP。采用气候倾向率方法, 以分析西藏近 35 a NPP 的年际变化趋势。

2 计算结果

2.1 NPP 的空间分布特征

通过 (1) ~ (3) 式的计算, 给出了西藏 1971—2000 年 NPP 的多年平均值 (图 1)。由图 1 可知, 西藏 NPP 呈东南向西北递减的分布规律: 林芝地区、山南地区东南部、嘉黎 NPP 在 $10\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上; 昌都地区西北部、那曲地区东部、拉萨市东部、加查、聂拉木为 $8\,000 \sim 10\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 拉萨河中下游河谷、年楚河下游河谷、帕里至错那一带、那曲地区中部和昌都地区中东部为 $6\,000 \sim 8\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 那曲地区西部、日喀则地区西北部、羊卓雍湖流域、江孜、隆子、尼木等干旱、半干旱地区为 $4\,000 \sim 6\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 阿里地区大部不足 $3\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。西藏东、西部 NPP 差异较大, 最大相差达 $10\,100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 造成差异的主要原

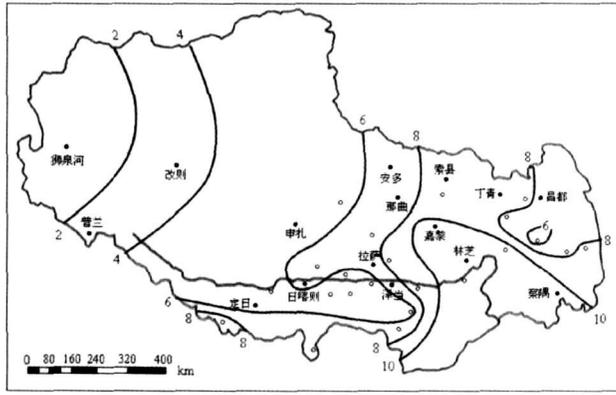


图 1 西藏 NPP 的空间分布 (单位: $10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig 1 Spatial distribution of net primary production ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) over Tibet

因是阿里地区、那曲地区西部干旱少雨,那曲地区北部、南部边缘地区气温低,而东南部气温高、降水较充沛。

2.2 NPP 的年度变化趋势

根据近 35 a 西藏 25 站 NPP 的气候倾向率(图略)可知, NPP 在阿里地区西南部、聂拉木、江孜减少趋势不明显,减幅为 $11.9 \sim 314.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,普兰减幅最大。其他各地均呈不同程度的增加趋势,增幅为 $26.8 \sim 459.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,以拉萨增幅最大(通过 0.01 显著性水平检验)。其中林芝地区中东部、昌都地区北部为 $153.0 \sim 308.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (通过 0.10 显著性水平检验);羊卓雍湖流域为 $156.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,但未通过 0.10 显著性水平检验;以那曲增幅最明显,为 $158.4 \sim 278.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (通过 0.01 显著性水平检验),班戈次之,为 $257.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (通过 0.01 显著性

水平检验);南部边缘地区大部分为 $75.2 \sim 217.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

西藏平均 NPP 以 $161.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率显著增加(图 2 通过 0.01 显著性水平检验),尤其是近 25 a(1981—2005 年),增幅更明显,达 $285.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。在过去 35 a 里,1992 年全自治区大部分地方出现了严重干旱, NPP 降至最低,仅为 $64.25 \sim 12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,较多年平均值偏少 9.10%;1998 年气温偏高、降水偏多, NPP 达到最高,为 $770.124 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,较多年平均值偏高 8.93%。其中 1998—2005 年连续 8 a NPP 为正距平,有利于植物干物质的积累。

2.3 NPP 的年代际变化

根据西藏站点各年代 NPP 的平均值(表 1)分析,阿里地区西南部、聂拉木 NPP 呈现为逐年代减少趋势,20 世纪 90 年代与 70 年代比较,狮泉河减幅最大,达 25.12%,其次是普兰,为 16.02%。林芝

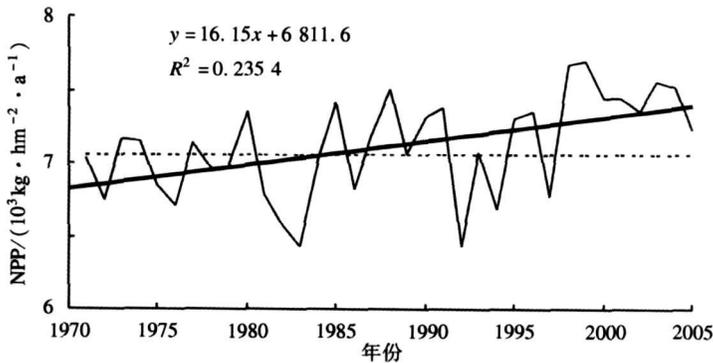


图 2 1971—2005 年西藏 NPP 的年度变化 (折线为历年值,点线为多年平均值,粗斜线为趋势值)

Fig 2 The interannual variation of net primary production over Tibet during 1971—2005

(The broken line denotes the original value, the dot line the long-term mean value, and the thick straight line the linear trend value)

地区、昌都地区北部、那曲地区 NPP 表现为明显的逐年代增加趋势, 90 年代较 70 年代增加了 1.52% ~ 6.85%, 以那曲增幅最大, 其次是林芝, 增加了 5.62%。沿雅鲁藏布江一线 (以下简称沿江一线) 河谷农区和羊卓雍湖流域因 20 世纪 80 年代多干旱少雨, NPP 最低; 90 年代雨水偏多, NPP 最高, 与 80 年代比较, 增加了 5.58% ~ 13.80%, 以泽当增幅最明显。

从各年代 NPP 的变化来看: (1) 20 世纪 70 年代那曲地区大部、昌都地区北部、林芝地区 50% ~ 90% 的年份 NPP 为负距平, 以嘉黎最明显。沿江一线河谷农区在 1975、1976 年出现了较大负距平, 为 70 年代最低值。(2) 80 年代西藏大部分地区属于“暖干型”气候, 沿江一线、阿里地区、昌都地区北部、那曲地区西部 NPP 为负距平的年份达 50% ~ 70%。其中 1982、1983 年西藏地区出现了大范围的干旱, 沿江一线、羊卓雍湖流域、南部边缘地区大部 NPP 降至最低点; 狮泉河 1982 年 NPP 仅为 63.76

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 较多年平均值偏低 95.8%, 为历史最低值。(3) 90 年代除阿里地区属于“暖干型”气候, NPP 为负距平外, 其他大部分地区属于“暖湿型”气候, 有 60% ~ 80% 的年份 NPP 为正距平。在此期间, 1992 年、1994 年和 1997 年出现了不同程度的干旱, NPP 为负距平; 1998 年因降水显著偏多, 气温偏高, NPP 达到最大, 为近 35 a 的最高值。(4) 就西藏平均而言, NPP 呈逐年代增加趋势。70 年代因气候“冷干”, NPP 偏低, 是近 35 a 最低的 10 a, 而 90 年代气候“暖湿”, 植物干物质积累多, NPP 最高 (图 3)。

2.4 气候变化对 NPP 的影响

假设未来由于 CO_2 等温室气体的增加导致气候变暖或变冷, 使西藏各地年平均气温升高或降低 1°C , 年降水量增加或减少 10%, 分析 NPP 的响应变化。

表 1 西藏代表站各年代 NPP 的平均值

Table 1 The different decade values of net primary production at the representative stations of Tibet

站点	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$			
	70 年代	80 年代	90 年代	多年平均值
狮泉河	1 844.97	1 421.86	1 381.44	1 549.42
普兰	3 679.19	3 671.01	3 089.89	3 465.80
那曲	5 320.61	5 571.74	5 685.21	5 525.86
日喀则	7 529.48	7 216.66	7 870.26	7 538.80
拉萨	7 930.94	7 391.77	8 312.80	7 878.50
泽当	7 568.06	6 921.80	7 816.86	7 485.24
昌都	8 032.47	8 169.14	8 392.62	8 198.07
林芝	9 686.87	9 814.77	10 231.00	9 910.88
西藏平均	7 010.08	7 014.77	7 181.18	7 068.67

2.4.1 “暖湿型”气候对 NPP 的影响

当年平均气温升高 1°C , 年降水量增加 10% 时, 西藏各地 NPP 变化如图 4a 所示。西藏 NPP 呈东南向西北增加趋势, 增幅为 6% ~ 13%。其中, 沿江一线、林芝地区增加 6% ~ 8%, 那曲地区中西部增加 9% ~ 11%, 阿里地区增加 10% ~ 13%, 说明“暖湿型”气候有利于植物干物质的积累。

2.4.2 “暖干型”气候对 NPP 的影响

当年平均气温升高 1°C , 年降水量减少 10% 时, 西藏大部分地区 NPP 呈减少趋势 (图 4b), 尤其在干旱、半干旱地区。其中, 阿里地区减少 7% ~ 12%, 沿江一线、羊卓雍湖流域减少 1% ~ 5%, 林

芝、察隅减幅不足 1%。在那曲地区中东部、昌都地区西北部、聂拉木至错那一带、波密、米林 NPP 为增加趋势, 增幅在 1% ~ 6%, 其中安多增幅最大。“暖干型”气候加剧了干旱、半干旱地区农田水分不足的形势, 造成植物产量下降。

2.4.3 “冷湿型”气候对 NPP 的影响

“冷湿型”气候 (年平均气温降低 1°C , 年降水量增加 10%) 对干旱、半干旱地区有利 (图 4c)。阿里地区、八宿、隆子 NPP 增加 4% ~ 12%, 极度干旱的狮泉河增幅最大; 沿江一线河谷农区、昌都、洛隆增加 1% ~ 4%。那曲地区、南部边缘地区、林芝地区呈减少趋势, 其中那曲地区中部、嘉黎减少 5% ~

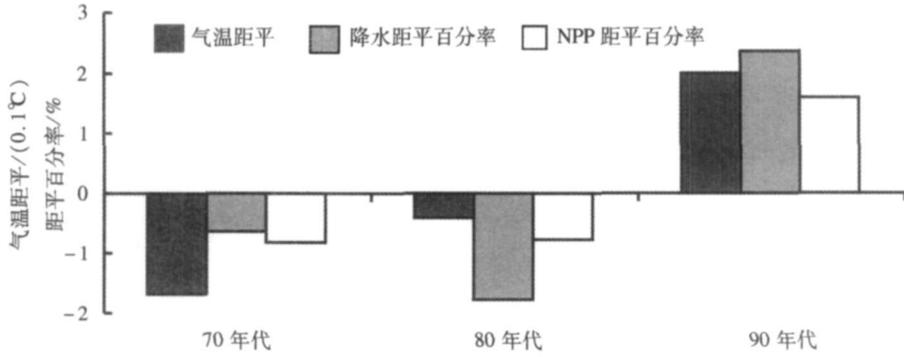


图 3 20 世纪西藏年平均气温、降水量和 NPP 的年代际变化

Fig 3 The interdecadal variations of annual mean temperature, precipitation and net primary production in twenty century

8%, 林芝地区减少 1% ~ 3% (以波密减少较多), 南部边缘地区减少 3% 左右, 说明温度是限制这些地区 NPP 提高的主要因子。

2.4.4 “冷干型”气候对 NPP 的影响

“冷干型”气候使西藏地区 NPP 均呈减少趋势。图 4d 为年平均气温降低 1℃、降水量减少 10% NPP 的变化。从图中可看出, 由东向西、从南向北 NPP 减少的百分率逐步增加, 林芝地区在 7% 以下, 那曲地区为 8% ~ 12%, 阿里地区为 10% ~ 14%, 沿江一线河谷农区和羊卓雍湖流域为 7% ~ 9%。

此外, 根据有关研究对未来西藏气候变化的预

测^[29], 计算了未来西藏 NPP 的可能变化。若只考虑温室气体增加情形时, 2050 年西藏地区的温度将升高 2~ 4℃, 年平均降水为增加趋势, 增加的范围为 2.5~ 10 mm /月。在此“暖湿型”气候情形下, 西藏 NPP 将达到 7 815.15~ 8 936.33 kg · hm⁻² · a⁻¹, 较多年平均值增加 11% ~ 26%。

3 结论与讨论

(1) 西藏 NPP 自东南向西北递减的分布规律, 温暖湿润的东南部最高, 在 10 000 kg · hm⁻² · a⁻¹ 以上, 而低温少雨的阿里地区、那曲地区西部最低,

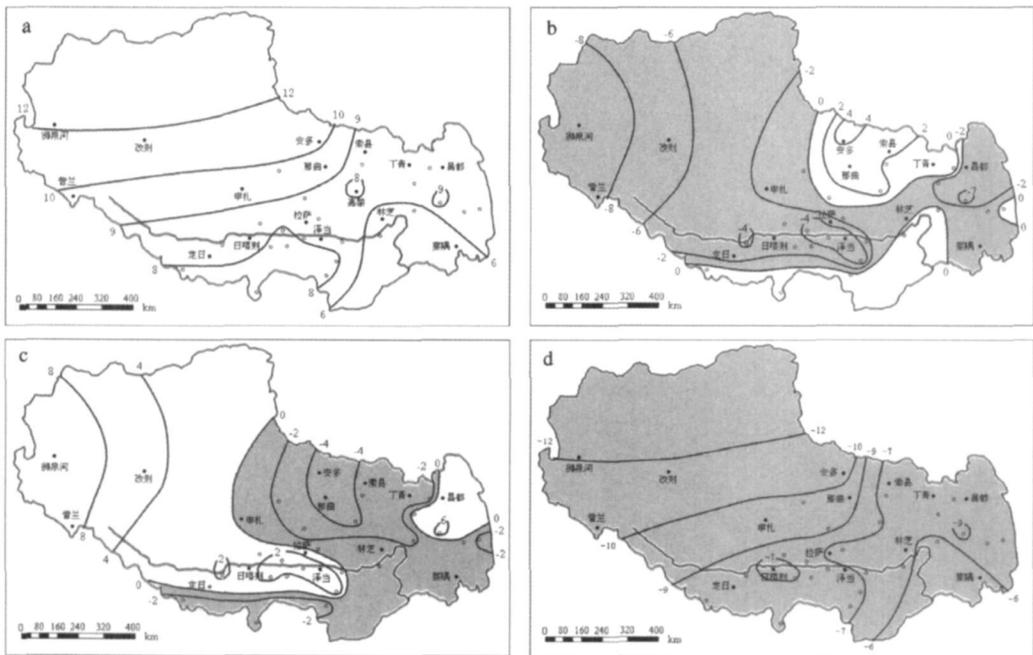


图 4 气候变化对西藏 NPP 的影响 (%) ; 阴影为负值区)

a 暖湿型气候; b 暖干型气候; c 冷湿型气候; d 冷干型气候

Fig 4 The influence of climatic change on net primary production over Tibet

(units %; gray regions denote negative anomalies)

a warm/wet climate; b warm/dry climate; c cold/wet climate; d cold/dry climate

不足 $3\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2) 近 35 a 阿里地区、聂拉木 NPP 以 $-11.9 \sim -314.2\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10\ \text{a})^{-1}$ 的速率呈不显著的减少趋势, 其中普兰减幅最大。其他各地表现为 $26.8 \sim 459.8\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10\ \text{a})^{-1}$ 的增加趋势, 以拉萨增幅最大。就 NPP 的年代际变化而言, 阿里地区、聂拉木呈逐年代减少趋势; 林芝地区、昌都地区北部、那曲地区表现为明显的逐年代增加趋势; 沿江一线河谷农区和羊卓雍湖流域因 20 世纪 80 年代多干旱少雨年, NPP 最低; 90 年代雨水偏多, NPP 最高。

(3) 气候变化对 NPP 影响明显, “暖湿型”气候对西藏地区皆有利, 平均增产 $6\% \sim 13\%$; “冷干型”气候对西藏都不利, 平均减产 $6\% \sim 14\%$; “暖干型”气候对沿江一线河谷农区、阿里地区、林芝地区大部分不利; “冷湿型”对藏北牧区、南部边缘地区、林芝农林区不利。降水对 NPP 的影响大于温度对 NPP 的影响。若只考虑温室气体增加的情形, 2050 年西藏地区的温度升高 $2 \sim 4\ ^\circ\text{C}$, 年平均降水增加 $2.5 \sim 10\ \text{mm}/\text{月}$, NPP 将增加 $1\% \sim 26\%$, 对高原生态环境的改善十分有利。

(4) 全球气候变暖总体上来说对地球环境生态是灾难性的, 但对局部地区, 如西藏高原这样的地区, 就 NPP 来说还是有好处的, 应全面辩证地分析, 避免误解。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis Summary for policymakers [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 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 [J]. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636.
- [3] 潘保田, 李吉均. 青藏高原—全球气候变化的驱动力与放大器 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1996, 32(1): 108-115.
- [4] 刘晓东, 侯萍. 青藏高原及其邻近地区近 30 年气候变暖与海拔高度的关系 [J]. 高原气象, 1998, 17(3): 245-249.
- [5] 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题 [J]. 科学通报, 2000, 45(1): 98-106.
- [6] 杜军. 青藏高原近 40 年的气温变化 [J]. 地理学报, 2001, 56(6): 682-690.
- [7] 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化 [J]. 大气科学, 2003, 27(2): 157-170.
- [8] 葛朝霞, 王会荣, 曹丽青, 等. 西藏降水量气温变化特征及相关关系 [J]. 气象科学, 2004, 24(4): 468-473.
- [9] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势 [J]. 地理学报, 2005, 60(1): 3-11.
- [10] 朱西德, 李林, 秦宁生, 等. 青藏高原年降水量的气候变化及其异常类型研究 [J]. 气象科学, 2003, 23(4): 452-459.
- [11] 杜军, 马玉才. 青藏高原降水变化趋势的气候分析 [J]. 地理学报, 2004, 59(3): 375-382.
- [12] Kutzbach J E, Prell W L, Rudd J W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau [J]. J Geol, 1993, 101: 177-190.
- [13] 王群, 郭品文, 曹艳艳, 等. 春季青藏高原东部热力异常与东亚夏季风关系的年代际变化 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 259-265.
- [14] 王兰宁, 郑庆林, 宋青丽. 青藏高原下垫面对中国夏季环流影响的研究 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 186-191.
- [15] 周玉淑, 高守亭, 邓国, 等. 青藏高原冬春季地温异常对长江中下游夏季旱涝影响的研究 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(5): 611-619.
- [16] 余锦华, 荣艳淑, 任健. 青藏高原地表温度对华北汛期降水变化的影响 [J]. 气象科学, 2005, 25(6): 579-586.
- [17] Bolashina M, Benedict S. The role of the Himalayas and the Tibetan Plateau within the Asian monsoon system [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2004, 85(7): 1001-1004.
- [18] Leith H. Computer mapping of forest data [C] // Proc 51 Annual Mtg American Sect Society of American Foresters, 1972: 53-79.
- [19] Leith H, Witter R H. Modeling the primary productivity of the world [C] // Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer Verlag, 1975: 237-263.
- [20] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide [J]. Glob Biogeochem Cycles, 1993, 7: 785-890.
- [21] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates [J]. J Biogeogr, 1995, 22(4/5): 785-796.
- [22] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. Glob Biogeochem Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [23] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, et al. Satellite remote sensing of primary production: An improved production efficiency modeling approach [J]. Ecological Modelling, 1999, 122(3): 239-255.
- [24] 姚玉璧, 王毅荣, 张存杰, 等. 黄土高原作物气候生产力对气候变化的响应 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(1): 101-106.
- [25] 邵海荣. 用 Lieth 法估算北京地区的植物气候生产力 [C] // 中国林业气象文集. 北京: 气象出版社, 1989: 14-20.
- [26] 李勇华, 高阳华, 韩逢庆, 等. 重庆地区年气温与降水量变化特征及对 NPP 的影响 [J]. 应用气象学报, 2007, 18(1): 73-79.
- [27] 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 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 251-259.
- [28] 周广胜, 张新时, 高素华, 等. 中国植被对全球变化反应的研究 [J]. 植物学报, 1997, 39(9): 879-888.
- [29] 徐影, 丁一汇, 李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化 [J]. 高原气象, 2003, 22(5): 451-457.