

气候要素及 El Niño/La Niña 事件对中国陆地 NPP 变化的影响

崔林丽¹, 史 军², 肖风劲³

(1. 上海市气象科学研究所, 上海 200030; 2. 上海市气候中心, 上海 200030;
3. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 植被净初级生产力(NPP)是表征陆地生态系统碳循环的重要指标,也是人类社会赖以生存与发展的物质基础。基于遥感—过程耦合模型(GLOPEM-CEVSA 模型)模拟的中国区域 NPP 数据和气象站点观测资料以及厄尔尼诺/拉尼娜(El Niño/La Niña)事件信息,利用 GIS 空间分析技术和数理统计方法研究了中国植被 NPP 的时空格局、动态变化以及气候要素和 El Niño/La Niña 气候事件对其影响。结果表明,1982-2011 年,中国植被 NPP 总体上以 $5.66 \text{ gCm}^{-2}(\text{10a})^{-1}$ 的趋势增长,空间上,植被 NPP 在中国西部和东北北部、东部地区增加,而在东北中部、华北平原、内蒙中东部、长三角和珠三角地区减少。中国江淮地区植被 NPP 的降低与日照时数的减少具有较好的对应关系,在华北地区 and 新疆北部, NPP 的增减取决于降水量的增减。东北地区日照时数的增加和气温的升高则是 NPP 增加的主要原因。就全国整体而言,在 El Niño 年植被 NPP 增加的区域略多于减少的区域,在 La Niña 年 NPP 增加的区域则与减少的区域基本相等,日照时数是造成 El Niño 年与 La Niña 年植被 NPP 差异的主要气候因子。未来需要更加关注辐射、极端气候事件以及人为空气污染对中国不同地区植被的影响。

关键词: 净初级生产力;时空演变;气候影响;厄尔尼诺/拉尼娜事件;中国

DOI: 10.11821/dlxb201801005

1 引言

植被是陆地生态系统中的主体,在维护全球气候稳定、调节全球碳平衡等方面具有不可替代的作用。植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指绿色植物在单位时间和单位面积上所累积的有机干物质总量,是判定生态系统碳源/汇的主要指标和调节生态过程的主要因子^[1-2],在全球环境变化以及陆地碳循环中扮演着重要的角色^[3]。同时,植被 NPP 又是人类社会赖以生存与发展的物质基础,人类生存所需的粮食、纤维和燃料都直接或间接来自于 NPP。因此,对植被 NPP 的研究有助于科学评价陆地生态系统环境质量、合理开发利用自然资源以及制定区域经济社会发展战略^[4-5]。

近年来,国外学者从不同角度对植被 NPP 进行了深入研究,在估算方法、时空分布以及影响因素等方面都取得了显著的进展^[1, 6-7]。国内学者针对大范围陆地植被 NPP 的时

收稿日期: 2017-07-24; 修订日期: 2017-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571044, 41001283); 国家重点研发计划(2017YFD0300201); 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室开放基金(KF2017-5); 中国气象局气候变化专项(CCSF201716) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571044, No.41001283; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFD0300201; Open Research Fund Program of the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, No.KF2017- 5; Climate Change Special Fund of the China Meteorological Administration, No.CCSF201716]

作者简介: 崔林丽(1975-), 女, 山西壶关人, 博士, 研究员, 从事植被遥感与气候变化研究。E-mail: cllcontact@163.com

空特征也开展了较多研究, 如于德永等^[8]利用气象数据和 8 km NOVA/AVHRR NDVI 卫星遥感数据, 研究表明 1982-1999 年间东亚地区植被 NPP 在波动中呈现增加趋势; 崔林丽等^[9]利用完全由遥感数据驱动的光能利用率模式 GLO-PEM 分析了 1981-2000 年间中国陆地 NPP 的季节变化, 揭示了 NPP 在四个季节均呈显著增加的趋势; 刘刚等^[10]利用 MuSyQ-NPP 模型估算了 2001-2014 年中国植被 NPP, 表明 NPP 年际变化呈波动增加趋势。此外, 还有许多小范围的研究, 如对西北、华北等地区植被 NPP 的变化特征分析^[11-13]。

可以看出, 采用卫星遥感数据结合陆地生态过程模型开展植被 NPP 的演变分析已经成为 NPP 研究的主流, 但关于植被 NPP 的时空变化仍存在很大的不确定性, 如尽管多数研究认为 2000 年前 NPP 整体表现为上升趋势, 但 2000 年后植被 NPP 或呈现出波动式增长或无明显年际变化趋势, 这是否标志着 2000 年前后 NPP 或其影响因素已发生改变, 同时对 NPP 变化机制的研究也多数是从气温或降水要素变化来开展相关统计分析^[5, 10, 12], 很少考虑日照或太阳辐射变化以及从气候学角度分析深层次的海气相互作用过程如厄尔尼诺与南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 等极端气候事件的影响^[7, 14]。

鉴于此, 本文利用遥感—过程耦合模型 (GLOPEM-CEVSA 模型) 模拟的 1982-2011 年间中国 8 km NPP 数据、同期中国 2043 个气象站点逐月气温、降水、日照时数数据和厄尔尼诺/拉尼娜 (El Niño/La Niña) 事件信息, 分析过去 30 年间中国陆地植被 NPP 的时空演化特征, 并探讨了气候要素和大尺度 El Niño/La Niña 事件对其影响, 为评估陆地生态系统变化以及与气候之间的响应机制提供参考依据。

2 资料与方法

2.1 研究资料

NPP 资料来源于 GLOPEM-CEVSA 模式的模拟结果。该数据集由卫星遥感反演的归一化植被指数 (NDVI) 得到植被总初级生产力 (GPP), 然后以植被生物量和气温及不同植被群落的维持性呼吸系数及温度关系模拟植被维持性呼吸和生长性呼吸, 获得植被 NPP 数据, 模式考虑了生态系统内部的空间异质性^[11, 15]。模拟结果的空间分辨率为 8 km×8 km, 时间间隔为 15 d, 时间序列为 1982 年 1 月-2011 年 12 月, 对模式前期验证表明^[16-17], GLOPEM-CEVSA 模型与地面观测结果的相关性优于 MODIS NPP 数据, 对各植被类型的模拟都比较理想。

气候数据来自中国气象局国家气象信息中心, 共获取 1982-2011 年间中国 2474 个国家基本/基准气象站和一般站逐月平均气温、降水量和日照时数数据, 这些数据都经过了初步的质量控制。在综合考虑数据的序列长度和连续性、缺测率的基础上, 挑选出具有较为完整数据序列的 2043 个站点。此外, 文中利用了 1982-2011 年间赤道中、东太平洋共出现的 9 次 El Niño 事件和 7 次 La Niña 事件信息, 开展大尺度极端气候事件对陆地 NPP 影响的对比分析 (表 1)。该数据来自中国气象局国家气候中心 (http://cmdp.ncc-cma.net/download/ENSO/Monitor/ENSO_history_events.pdf), 以 NINO 3.4 区海表温度异常的平均值作为判定 El Niño/La Niña 事件的依据。当 NINO 3.4 指数 3 个月滑动平均的绝对值 ≥ 0.5 °C、且持续至少 5 个月, 判定为一次 El Niño/La Niña 事件 (NINO 3.4 指数 ≥ 0.5 °C 为 El Niño 事件; NINO 3.4 指数 ≤ -0.5 °C 为 La Niña 事件)^[18]。El Niño/La Niña 事件通常会以遥相关的形式间接地影响到中国天气气候并引发气象灾害。考虑到大气对 El Niño/La Niña 的反应具有一定滞后性, 本文选取 El Niño/La Niña 事件影响年时, 多以发生的当年和/或次年为统计年份, 符合 El Niño/La Niña 本身的强度与其影响并不同步的特征。

表 1 本文分析所选用的厄尔尼诺/拉尼娜事件及其特征值
Tab. 1 The El Niño/La Niña events selected in this study and their characteristics

事件	序号	起止年月	长度(Mon)	峰值时间	峰值强度(°C)	文中统计年
暖事件 (El Niño events)	1	1982.04–1983.06	15	1983.01	2.7	1982, 1983
	2	1986.08–1988.02	19	1987.08	1.9	1987
	3	1991.05–1992.06	14	1992.01	1.9	1991, 1992
	4	1994.09–1995.03	7	1994.12	1.3	1994, 1995
	5	1997.04–1998.04	13	1997.11	2.7	1997, 1998
	6	2002.05–2003.03	11	2002.11	1.6	2002, 2003
	7	2004.07–2005.01	7	2004.09	0.8	2004, 2005
	8	2006.08–2007.01	6	2006.11	1.1	2006, 2007
	9	2009.06–2010.04	11	2009.12	1.7	2009, 2010
冷事件 (La Niña events)	1	1984.10–1985.06	9	1985.01	–1.2	1985
	2	1988.05–1989.05	13	1988.12	–2.1	1988, 1989
	3	1995.09–1996.03	7	1995.11	–0.9	1996
	4	1998.07–2000.06	24	2000.01	–1.6	1999, 2000
	5	2000.10–2001.02	5	2000.12	–0.8	2001
	6	2007.08–2008.05	10	2008.01	–1.7	2008
	7	2010.06–2011.05	12	2010.12	–1.6	2011

2.2 研究方法

文中首先利用 ArcGIS 对时间间隔为 15 d 的 NPP 空间数据进行累加，获得 1982 年 1 月-2011 年 12 月各月的 NPP 值以及 1982-2011 年历年 NPP 值。对历年 NPP 值进行空间加和运算，如果某格点（或区域）30 年的累加值为 0，则认为该格点（或区域）无植被覆盖，这些无植被区在其后的 NPP 统计分析中都不参与运算。同时，采用线性回归法分析植被 NPP 的变化方向以及变化速率。通过对 30 年间每一格点的 NPP 值与年份进行线性回归，获得 NPP 的趋势倾向率。若趋势倾向率大于 0，表示 30 年间 NPP 是增加的，反之表示 NPP 是减少的^[5]。

其次，对 1982-2011 年各月降水量、月平均温度和月总日照时数的气象站点数据，根据各站点的经纬度信息，利用 ArcGIS 进行 Kriging 插值，获得与 NPP 数据空间相匹配的逐年气候要素空间数据序列。在中国西部和北部、东北部一些地区，站点较稀疏，插值结果可能与实际情况有一定的偏差，然而，考虑到这些地区多为沙漠、高山或裸土地，植被稀疏，多年 NPP 均值多小于 0.5 gC m⁻²a⁻¹，因此，文中也不再对这些地区的插值结果开展进一步的订正。

然后，基于格点 NPP 数据和气温、降水、日照数据序列，计算过去 30 年间 NPP 和气候要素在每一个格点的变化趋势及其相关系数，根据变化趋势的方向性判定气候要素变化对 NPP 变化的影响特征，并根据相关系数值判定相关显著性，具体为：极强正相关（0.5541 < r ≤ 1.000）；强正相关（0.4487 < r ≤ 0.5541）；中等正相关（0.3494 < r ≤ 0.4487）；弱正相关（0.2960 < r ≤ 0.3494）；相关不显著（–0.2960 ≤ r ≤ 0.2960）；弱负相关（–0.3494 ≤ r < –0.2960）；中等负相关（–0.4487 ≤ r < –0.3494）；强负相关（–0.5541 ≤ r < –0.4487）；极强负相关（–1.000 ≤ r < –0.5541）。

最后，计算分析逐年 NPP、气温、降水和日照与多年平均（1982-2011 年）值在每个格点的差值，并对比分析 El Niño 事件年和 La Niña 事件年格点 NPP、气候要素差值的异同及对应关系，明确气候要素以及极端气候事件对 NPP 变化的影响及空间差异性。

3 研究结果与讨论

3.1 中国植被 NPP 的年际变化特征

1982-2011 年期间, 中国平均植被 NPP 在 $380 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 附近波动, 最大值出现在 1990 年, NPP 均值为 411 gC m^{-2} , 最小值出现在 1993 年, NPP 均值为 341 gC m^{-2} (图 1a)。过去 30 年间, 植被 NPP 总体上呈缓慢增长趋势, 增长率为 $5.66 \text{ gC m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$, 但增加趋势在统计上不显著 ($P > 0.05$), 其中, 20 世纪 80 年代是植被 NPP 的典型增长期 (图 1b), 期间 NPP 以 $50.0 \text{ gC m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ 的线性趋势显著增长 ($P < 0.01$), 之后在 20 世纪 90 年代 NPP 增长速度放缓 (图 1c), 增长率为 $27.9 \text{ gC m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ ($P > 0.05$)。在 21 世纪初, NPP 在 $361\text{--}403 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间波动变化, 整体变化趋势不明显 (图 1d)。

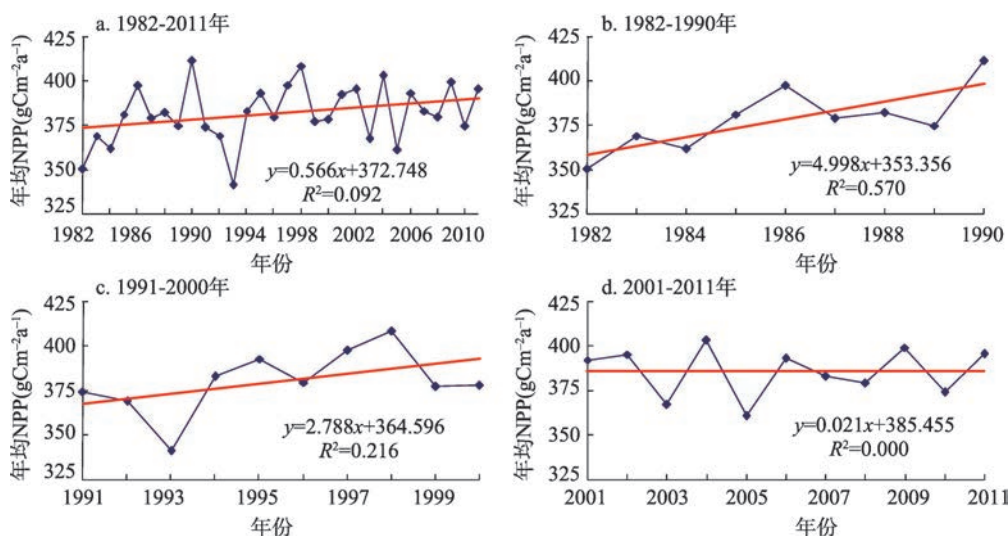


图1 1982-2011年期间中国年均植被NPP变化

Fig. 1 Variations of mean annual NPP in China during 1982-2011

3.2 中国植被 NPP 的空间格局及变化趋势

1982-2011 年间, 中国植被 NPP 的空间分布具有明显的地域差异, 表现为从东南到西北年均 NPP 值逐渐递减 (图 2a)。受气候影响, 中南部湿润区植被年均 NPP 明显高于西部干旱区, NPP 年均值大于 600 gC m^{-2} 的区域主要集中在热带和亚热带湿润区。在中国东南部和南部, 包括浙江、江西、福建、广东北部、湖南、广西、贵州东部和南部、云南南部, 植被 NPP 年均值多在 600 gC m^{-2} 以上; 在中国西部和北部, 包括西藏大部分、青海南部和东部、甘肃中部和东北部、宁夏、陕西北部、山西西部和北部、河北西北部、内蒙中东部, 植被 NPP 年均值多在 200 gC m^{-2} 以下。统计表明, 中国植被 NPP 的年均值多在 $100\text{--}800 \text{ gC m}^{-2}$ 之间, 占全部植被区面积的 76.7%, 其中 NPP 的年均值在 $100\text{--}400 \text{ gC m}^{-2}$ 之间的植被区域的面积占全部植被区面积的 54.5%。

1982-2011 年间, 中国植被 NPP 的变化介于 $-221\text{--}376 \text{ gC m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ 之间, 有 27.6% 的植被区域 NPP 呈减少趋势, 有 64.5% 区域 NPP 呈增加趋势 (图 2b)。空间上, NPP 减少主要发生在东部地区, 包括东北中部、华北平原、长江中下游和内蒙中东部, 在西藏南部、新疆北部和西部、四川中部也有部分地区 NPP 呈减少; 在中国西部和东北北部, NPP 呈增加趋势。植被 NPP 减少趋势值多在 $0\text{--}40 \text{ gC m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ 之间, 占全部植被区域面

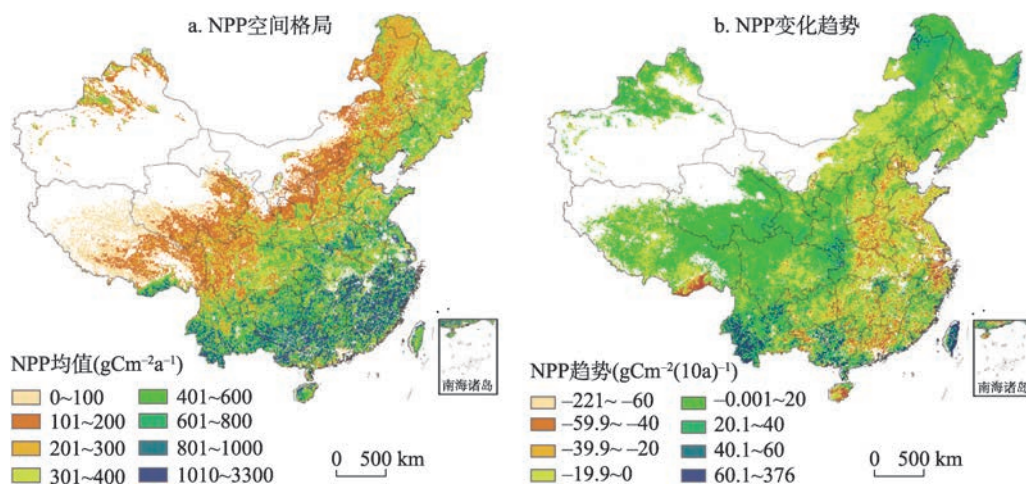


图2 1982-2011年中国植被NPP空间格局及变化趋势

Fig. 2 Spatial distribution and trend of annual NPP in China during 1982-2011

积的25.8%；植被NPP增加趋势值也多在 $0 \sim 40 \text{ gC m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ 之间，占全部面积的60.5%。在台湾中部和东部、云南西南部和北部、广西中部、广东南部以及陕西南部、江西西北部、内蒙东北部一些地区，植被NPP的增加趋势超过 $60 \text{ gC m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ 。

中国植被NPP的空间分布主要受降水影响，呈现出由东南向西北递减的格局（图2a），这与已有研究结果一致^[1, 4, 8, 10]。Liu等^[19]利用BEPS模型模拟2000-2010年期间中国生态系统生产力，结果表明中国陆地NPP呈现出从东到西、从南到北减少的空间格局，与土地覆盖类型和气候有关。仲晓春等^[20]利用CASA模型反演植被NPP时空格局，结果也表明2001-2010年间中国植被平均NPP的空间分布地域性明显，总体上北低南高、由西北向东南逐渐增加，其中西北沙漠地区的植被NPP值最小，大都在 $100 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下，南方大部分地区植被NPP值在 $1000 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上，特别是广西、广东及海南等省更是达到了 $1500 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上。

1982-2011年间，中国植被NPP总体呈增加趋势，其中在20世纪80-90年代NPP呈显著增加趋势，而在21世纪初NPP整体变化趋势不明显（图1）。植被NPP的年际变化趋势与已有的研究结果一致，如Liang等^[1]分析了1982-2010年间中国NPP的时空变化，结果表明NPP呈显著增加趋势，年增加0.42%，但在整个29年期间，NPP的增长趋势不是连续的。Fang等^[21]利用过程模型和遥感数据研究中国陆地NPP变化趋势，结果也表明1982-1999年间，中国陆地NPP增加了18.7%。进入21世纪以来，多数在全国或区域尺度上的研究均表明NPP不变或呈减少趋势，如Wang等^[15]基于改进NPP算法和中国本地驱动数据集及参数，结果表明2000-2012年间中国区域NPP总体上以 4.65 Tg C a^{-1} 的趋势减少。

3.3 气候要素对植被NPP的影响特征

分析1982-2011年间中国气温变化趋势，可以看出，除极个别站点外，气温在整个中国都呈显著增加趋势，并且在多数区域，年均气温以 $0.2 \sim 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$ 的趋势增加（图3a）。在中国东北、东部、南部和西南东部地区，年均气温多以 $0.2 \sim 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$ 的趋势增加；而在中国西北、内蒙中部和西部、青海、西藏以及长三角地区，年均气温多以 $0.4 \sim 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$ 的趋势增加。过去30年间，NPP与气温在多数地区都呈正相关，占整个植被区面积的76.1%，其中NPP与气温显著正相关的区域占37.1%，主要分布在东北北部地区、陕西中南部、湖北西部、甘肃南部、青海东部和南部、四川西部、西藏东北部、

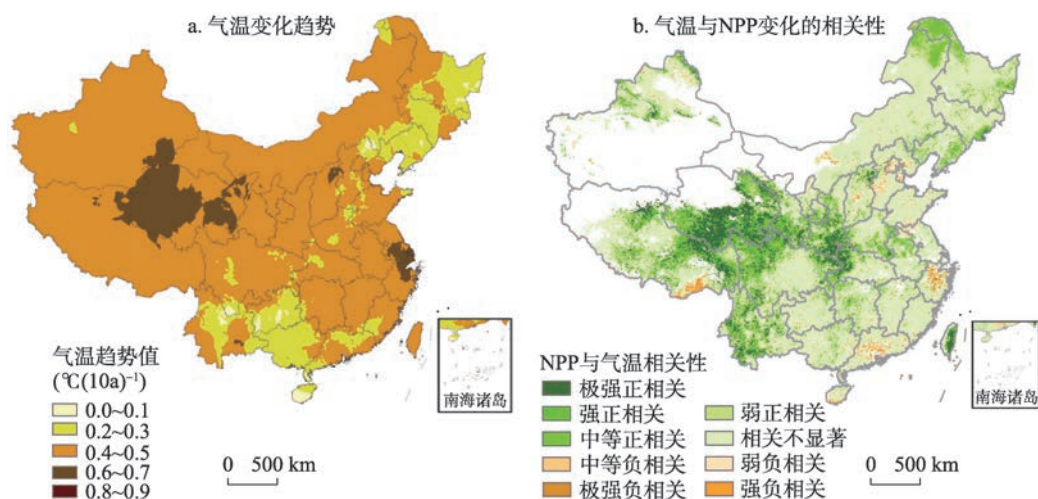


图3 1982-2011年中国气温变化趋势及其与NPP变化的相关性

Fig. 3 Trend in annual temperature and its correlation to annual NPP in China during 1982-2011

云南中部和西部、新疆北部以及其他省(市)一些分散地区(图3b)。在23.9%的植被区, NPP与气温呈负相关, 其中NPP与气温显著负相关的区域占3.6%, 主要分布在浙江、广东、海南、藏南、京津冀等一些地区。

1982-2011年间, 中国年降水量的空间变化具有较为明显的东西部差异(图4a)。在西部地区, 包括新疆、青海、西藏、甘肃西部、内蒙西部和四川西部部分地区, 年降水量基本上以 $1\sim 50\text{ mm}(10\text{a})^{-1}$ 的速率增加; 而在除山东、河南东部、安徽北部和江苏中北部、山西中北部、海南、台湾以外的中国中部、东部和东北地区, 年降水量基本上以 $0\sim 50\text{ mm}(10\text{a})^{-1}$ 的速率减少。然而, 降水量的变化趋势除在内蒙东部、青海西南部、西藏中部以及四川、云南、湖北个别站点外, 在全国几乎所有地区都不显著。过去30年间, NPP与降水在多数地区都呈负相关, 占整个植被区面积的74.9%, 其中NPP与降水显著负相关的区域占39.6%, 主要分布在东北北部和南部、淮河流域、陕西中南部、湖北西部、重庆、四川西部、云南西部以及西藏东部、广西、贵州、福建、浙江南部、山

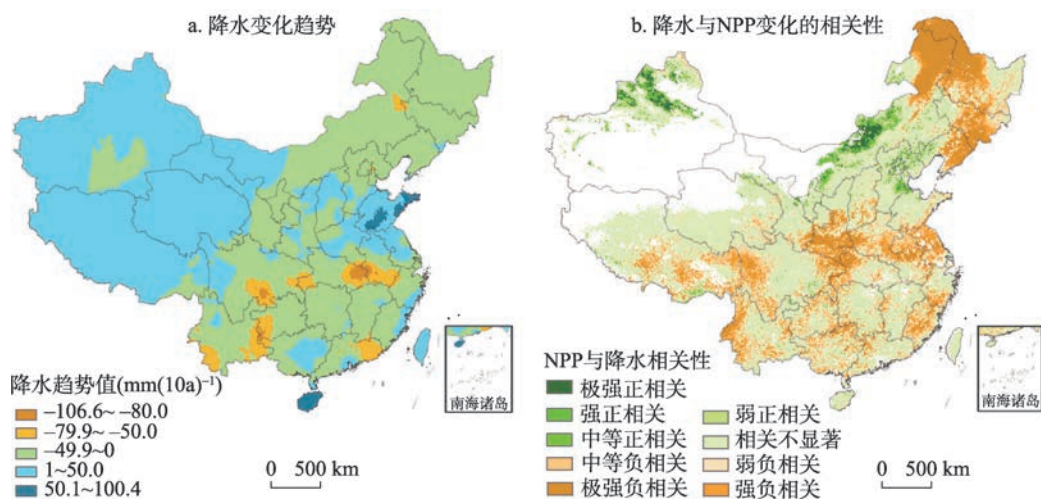


图4 1982-2011年中国降水变化趋势及其与NPP变化的相关性

Fig. 4 Trend in annual precipitation and its correlation to annual NPP in China during 1982-2011

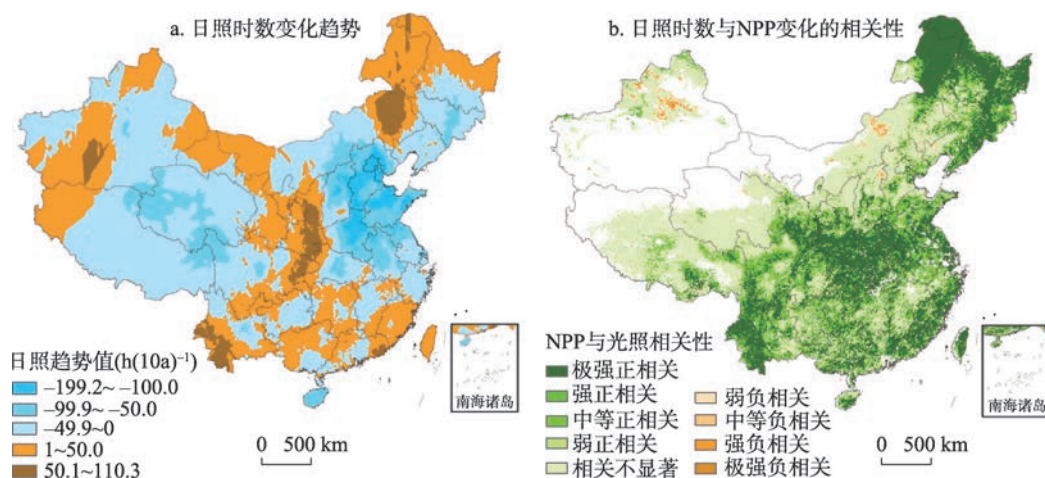


图5 1982-2011年中国日照时数变化趋势及其与NPP变化的相关性

Fig. 5 Trend in annual sunshine hours and its correlation to annual NPP and sunshine hours in China during 1982-2011

西一些地区 (图4b)。在23.9%的植被区, NPP与降水呈正相关, 其中NPP与降水显著正相关的区域占8.0%, 主要分布在内蒙中东部、新疆北部、京津冀、辽宁西部等地区。

进一步对中国日照时数变化分析表明 (图5a), 年日照时数变化的空间一致性较年均气温和年降水量差一些, 但在中国东部和东北地区, 日照时数对植被NPP的变化具有较好的解释性。1982-2011年间, 中国日照时数减少的区域主要分布于东北东南部、华北、长江中下游、海南、四川中部和西部、青海、西藏、新疆一些地区, 日照时数多以0~100 h(10a)⁻¹的速率减少; 日照时数增加的区域主要分布于内蒙东部和西部、黑龙江北部和东部、陕西、甘肃、重庆、四川南部、云南西南部、西藏西部、福建以及广东、广西、湖北、新疆等地区, 多以1~50 h(10a)⁻¹的速率增加。除在中国东南部和中西部地区, 包括浙江、福建、江西、广东、广西、湖南、湖北、四川东部、陕西西部和甘肃南部以及黑龙江东部外, 日照时数的变化在其他地区都在统计上显著。过去30年间, NPP与日照在多数地区都呈正相关, 占整个植被区面积的86.3%, 其中NPP与日照显著正相关的区域占60.2%, 主要分布在东北大部分地区、秦岭—淮河一带、四川、云南及其以东的中国东南部地区 (图5b)。在13.7%的植被区, NPP与日照呈负相关, 但NPP与日照显著负相关的区域仅占1.9%, 主要分布在新疆北部、内蒙中东部和山西北部一些地区。

气候要素对植被NPP的变化有重要的影响。NPP的时空变化主要取决于植被、土壤和气候之间复杂的相互作用, 并受人类活动和全球环境变化的强烈影响^[8]。仲晓春等^[20]研究表明, 2001-2010年间, 全国75.24%的地区年均NPP与年均温之间呈正相关。Liang等^[1]研究表明, 在全国范围内, 气温是控制NPP年际变化的主要气候因素, 尽管在中国中北部和西北部干旱和半干旱地区, NPP的年际变化主要是由降水的变化来解释的。本文研究表明, 1982-2011年间, 全国76.1%植被区年NPP与气温呈正相关, 其中在陕西中南部、湖北西部、甘肃南部、青海东部和南部、四川西部、西藏东北部、云南中部和西部、新疆北部和东北北部地区, NPP与气温显著正相关 (图3b)。因此, 近年来气温升高是上述地区NPP增加的一个重要原因。

降水对植被NPP的影响地域差异较大。在华北地区的内蒙中东部、京津冀以及辽宁西部, NPP与降水存在正相关关系, 近30年来降水减少是NPP降低的主要原因; 而在新疆北部, NPP与降水呈正相关, 降水增加是NPP增加的主要原因 (图2b, 图4)。张莎等^[12]

也发现, 在 2001-2010 年间河北植被 NPP 与降水主要为正相关。Liu 等^[23]也研究表明, 在中国东北, 草地 NPP 随着降水量增加而增加, 随着年均气温增加显著降低, 年降水量是影响 NPP 空间变异性的主要因素。在内蒙古草地, 区域降水减少也是近 30 年来草地 NPP 下降的主要因素^[13]。在中国江淮、江南和华南地区, 植被 NPP 的变化一致性较差, NPP 与气温、降水的关系也具有很大的地域差异性 (图 3b, 图 4b), 总体而言, 植被 NPP 与气温多呈正相关, 与降水多呈负相关。陈瑛瑛等^[22]研究也表明, 中国南方大部分地区的植被 NPP 与温度之间呈正相关, 有超过一半地区的植被 NPP 与降水之间呈负相关。

日照时数的变化与中国东北、东部和南部地区植被 NPP 的变化具有较好的对应关系。在东北大部分地区、秦岭—淮河一带、四川、云南及其以东的一些地区, 植被 NPP 与日照显著正相关, 因此, 日照时数的变化是这些地区 NPP 变化的一个主要原因, 其中, 在湖北西部、福建、广东、广西和云南, NPP 的增加与日照时数的增加有关; 在山东、山西、河南、江苏、安徽、浙江, NPP 的减少与日照减少有关 (图 2b, 图 5)。Wang 等^[15]研究表明, 2000-2012 年间中国 NPP 的降低在很大程度上归因于太阳辐射的减少、而不是干旱, 尤其是在中国南部地区, NPP 的年际变化对太阳辐射比对降水更为敏感。Wang 等^[24]也研究表明, 中国 NPP 在不同地区和时期有不同的影响因子, 在 2001-2012 年期间, 中国东部和中部地区的 NPP 与年太阳辐射显著正相关。因此, 近 10 年来中国 NPP 变化不明显与太阳辐射减少以及南方的极端天气气候事件发生 (如 2008 年初的低温冰冻和 2009 年末的严重干旱) 有密切关系^[19], 未来需要更加关注辐射变化对植被 NPP 的影响。

3.4 El Niño/La Niña 事件对植被 NPP 的影响特征

对比 El Niño 事件年和 La Niña 事件年, 植被 NPP 在东北、华北、长江中下游、西南地区以及广东、福建都有明显的差异, 而且, NPP 值与多年平均值的差在 La Niña 事件年要大于 El Niño 事件 (图 6)。统计表明, El Niño 事件年中国植被在 34.7% 区域 NPP 值与多年平均值相比为负值, 并且多出现在中国东部地区, 包括吉林、内蒙中东部和满洲里地区、河北南部、山东西北部、海南、广东中部和东部、福建、江西、湖北东部、贵州和四川东部 (图 6a)。在东北地区的黑龙江、辽宁东北部、甘肃南部、青海东部和西藏南部较小地区 NPP 值与多年平均值相比也为负值。此外, 全国有 44.4% 植被区 NPP 值与多年平均值相比为正值, 有 20.9% 植被区 NPP 值与多年平均值相等, 即在 El Niño 事件年, 植被 NPP 值超过多年平均值的面积略多于不足平均值的面积。

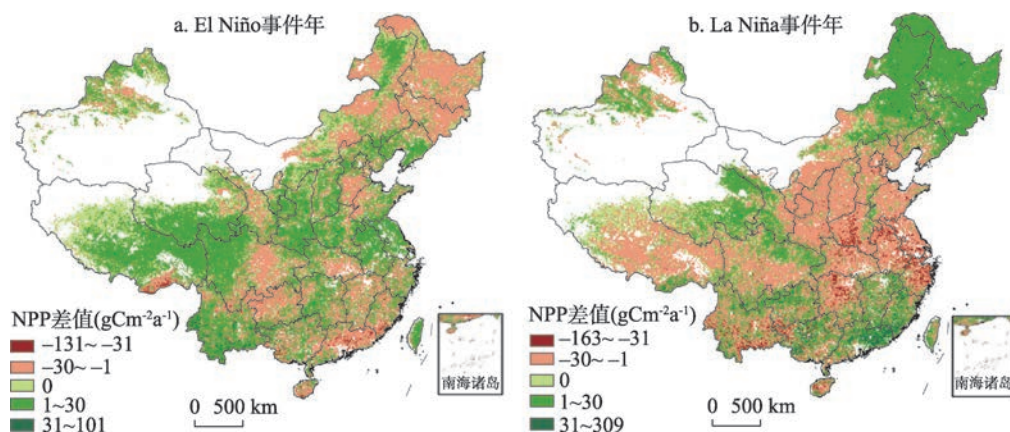


图 6 El Niño 事件年与 La Niña 事件年 NPP 均值与多年平均值的差异对比

Fig. 6 Spatial differences between annual NPP and the long-time averaged NPP in China during El Niño years and La Niña years

在 La Niña 事件年, 中国东北植被 NPP 较高; 江淮地区、浙江、湖北、湖南、四川、西藏、云南植被 NPP 较低。全国有 43.4% 植被区 NPP 值与多年平均值相比为正值, 主要分布于东北地区、广东、福建、台湾、江西、广西、贵州、四川东北部、云南以及青海东北和东南部、甘肃西南部、新疆北部一些地区 (图 6b)。此外, 全国有 43.8% 植被区 NPP 值与多年平均值相比为负值, 有 12.9% 植被区 NPP 值与多年平均值相等, 即在 La Niña 事件年, 植被 NPP 增加的区域与减少的区域大致相当。

进一步对比分析 El Niño 事件年和 La Niña 事件年气候要素的差异, 结果表明在 El Niño 事件年, 全国气温与多年平均值相比都偏高 $0\sim0.4\text{ }^{\circ}\text{C a}^{-1}$ (图 7a1); 降水在东北东部和南部、西北、江淮和江南以偏多 $0\sim85\text{ mm a}^{-1}$ 为主, 而在西南、东北西部和西北东部以偏少为主 (图 7a2); 日照时数在中国东北大部、华北北部、西北中部和江南、华南一些省 (市) 以偏少 $0\sim60\text{ h a}^{-1}$ 为主, 在其他地区则多为偏多 (图 7a3)。在 La Niña 事件年, 气温除在西藏大部分地区、青海东部、云南西部以及四川、新疆、东北北部一些地区偏高外, 在全国多数地区都偏低 $0\sim0.2\text{ }^{\circ}\text{C a}^{-1}$ (图 7b1); 降水在中国东北、西北、江淮和江

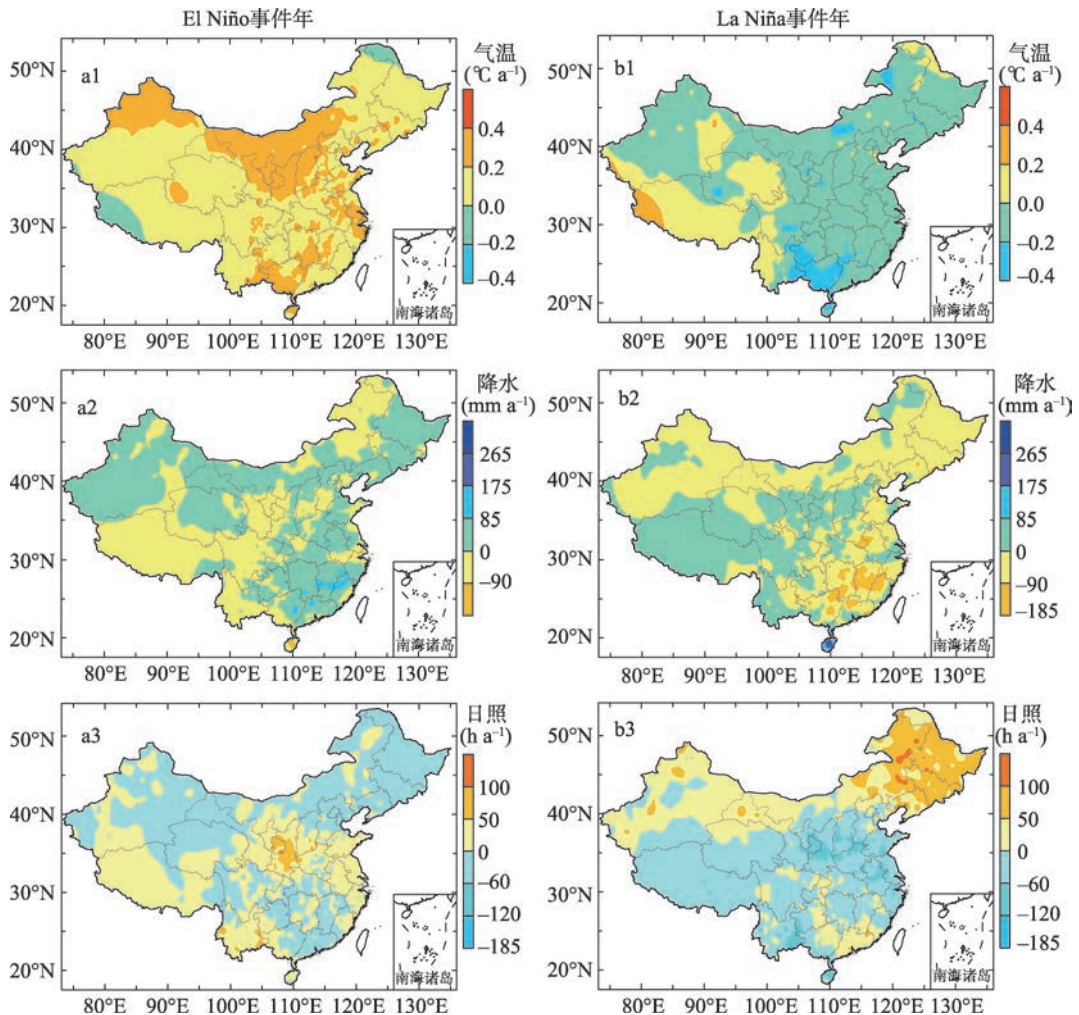


图7 El Niño 事件年与 La Niña 事件年气候要素与多年平均值的差异对比

Fig. 7 Spatial differences between climatic factors and their long-time averages in China during El Niño years and La Niña years

南以偏少 $0\sim 90\text{ mm a}^{-1}$ 为主, 而在西南多数地区都偏多 (图 7b2); 日照在整个东北、华北北部、西北西北部以及南方一些省 (市) 个别地区以偏多 $0\sim 100\text{ h a}^{-1}$ 为主, 而在西南、西北东南部、华北南部、江淮以及江南北部地区以偏少 $0\sim 120\text{ h a}^{-1}$ 为主 (图 7b3)。

可以看出, 气温的正负距平与 NPP 距平的对应关系不明显, 因此, 气温不应成为 El Niño 与 La Niña 事件年植被 NPP 差异的主要影响因子 (图 6, 图 7)。El Niño 与 La Niña 事件年降水距平与植被 NPP 距平仅在西南、西北东部和东北东部地区具有较好的对应关系。日照时数则不同, 在中国多数地区, El Niño 与 La Niña 事件年植被 NPP 距平与日照距平具有很好的对应关系, 因此, 日照是 El Niño 与 La Niña 事件年植被 NPP 差异的主要影响因子, 即 El Niño 与 La Niña 事件更多地通过影响日照时数或辐射进而影响植被 NPP。这也进一步证实了日照时数的变化是中国大部分地区植被 NPP 变化的一个主要原因。

在海气相互作用的过程中, El Niño 和 La Niña 事件通过对副热带高压的强度和位置、东亚夏季风强弱的影响改变着中国气候, 进而影响到植被生长发育。Hashimoto 等^[25]研究表明, 1982-1999 年间全球 NPP 的年际变化与 ENSO 显著相关, 尤其是在低纬度地区 ($22.5^{\circ}\text{N}\sim 22.5^{\circ}\text{S}$), NPP 的变化与气温、饱和水汽压差和辐射密切相关, 在 El Niño 现象发生的当年高 NPP 值对应于凉爽的气温、低的饱和水汽压差以及强辐射。对中国而言, 陶波等^[26]研究表明, 1981-1998 年间, 中国陆地生态系统 NPP 在 El Niño 现象发生的 1982 年、1986 年、1991 年和 1997 年都有一定程度的减少, 但在 1993 年和 1994 两个 El Niño 年, NPP 并没有明显的下降, 甚至 1994 年 NPP 总量有所增加。本文基于国家气候中心最新 El Niño/La Niña 事件标准并考虑大气对 El Niño/La Niña 反应的滞后性, 结果表明, El Niño 事件年植被 NPP 值超过多年平均值的面积略多于不足平均值的面积, La Niña 事件年植被 NPP 与多年平均值的差为正值的面积等于负值的面积, 其中日照是 El Niño 与 La Niña 事件年植被 NPP 差异的主要影响因子 (图 6, 图 7)。不同的生态过程模式数据、不同的 El Niño/La Niña 事件判定标准以及研究时间段的差异都会造成研究结果的不一致。

以人类活动为主导的城市扩张和土地覆盖变化对区域生态环境产生了重要影响, 并与气候变化共同影响植被 NPP^[27]。Fang 等^[21]研究表明, 1982-1999 年间中国陆地 NPP 变化趋势具有较大的空间差异性, 在 30.8% 国土区域 NPP 显著增加, 但在快速城市化地区 NPP 呈减少趋势。Tian 等^[28]对 1989-2000 年期间中国由于城市扩张导致的 NPP 损失估算表明, NPP 总损失为 0.95 Tg C , 占 1989 年全国 NPP 总值的 0.03%, 其中从农田到城市土地的转变导致 NPP 的总损失占 91.93%, 从未利用地、工业和建筑用地、水体转变为城市用地则会导致 NPP 的增加。在中国东部和中部地区, 由于城市扩张, NPP 减少幅度较大。但目前从时空尺度上脱离气候的干扰仅以人类活动为主导因素来定量分析其对植被 NPP 影响的研究尚不充分^[27], 而且已有的研究多是针对特定区域尺度的, 如 Peng 等^[29]分析了北京城市化过程中人口、经济和空间开发对 NPP 的影响, 结果表明 NPP 与经济 and 空间城市化负相关, 城市化导致 NPP 在时间和空间上持续的和可观测到的损失, 尽管在高度城市化地区有一些 NPP 的增加。

除了城市化和土地覆盖变化对 NPP 的影响外, 农业实践、火灾、大气污染等也会导致 NPP 变化的空间差异^[2], 其中人为空气污染对中国陆地 NPP 的增加有强烈的抑制作用。Ren 等^[30]利用基于过程的生态系统动态模型 (DLEM) 模拟表明, 1961-2000 年间, O_3 浓度的升高导致中国 NPP 平均减少 4.5%, 尤其是在中东部地区, O_3 对 NPP 的影响最强, 在中国东北和中部地区, 农田 NPP 在过去 40 年显著减少。Yue 等^[31]也研究表明, 目前空气污染减少中国年 NPP 0.4 Pg C (9%), 其中 O_3 破坏减少 0.6 Pg C (14%), 而气溶胶直接效应增加了 0.2 Pg C (5%)。同时, 综合气溶胶直接和间接效应对降水的抑制作用则降低了中国每年 NPP 的 0.2 Pg C (4%)。中国空气质量的改善可以提高陆地生态系统

NPP对大气CO₂的吸收能力。然而,本文没有开展人类活动对中国植被NPP影响的具体定量分析。随着中国城市化、工业化和社会经济的发展以及生态环境保护力度的加大,人类活动,包括土地覆盖变化、生态保护工程的实施以及人为O₃和气溶胶污染等将成为影响植被NPP动态的一个重要因素。

4 结论

本文分析了遥感—过程耦合模型(GLOPEM-CEVSA模型)模拟的中国植被NPP的时空分布和变化特征,并探讨了气候要素(气温、降水和日照时数)以及厄尔尼诺/拉尼娜(El Niño/La Niña)事件对植被NPP影响,得出如下主要结论:

① 1982-2011年间,中国年均植被NPP以 $5.66 \text{ gC m}^{-2}(10\text{a})^{-1}$ 的趋势增长,其中20世纪80年代植被NPP以 $50.0 \text{ gC m}^{-2}(10\text{a})^{-1}$ 的线性趋势显著增长,20世纪90年代植被NPP增长放缓,至21世纪初,NPP整体变化趋势不明显。② 中国植被NPP表现为从东南向西北逐渐递减的空间分布。过去30年,有64.5%植被区NPP呈增加趋势,主要发生在中国西部和东北北部、东部地区;有27.6%的植被区NPP呈减少趋势,集中于中国东部的东北中部、华北平原、内蒙中东部和长三角、珠三角地区。③ 中国江淮地区NPP的减少与日照时数的减少具有较好的对应关系,在华北地区 and 新疆北部,植被NPP的增减对应于降水的增减,东北地区NPP的增加则受日照时数的增加和气温升高的双重影响。因此,辐射和降水对NPP的影响需要给予更多关注。④ 在El Niño事件年和La Niña事件年,植被NPP在中国东北、华北、长江中下游、西南地区以及广东、福建都有明显的差异,日照是造成植被NPP差异的主要气候因子。El Niño年植被NPP增加的区域略多于减少的区域,La Niña年NPP增加的区域与减少的区域基本相等。⑤ 目前评估的人类活动,包括城市化和土地覆盖变化、人为O₃和气溶胶污染等对植被NPP产生的影响还相对较小,但随着中国工业化、社会经济的发展以及生态环境保护力度的加大,人类活动将成为影响植被NPP动态的一个重要的因素。

参考文献(References)

- [1] Liang W, Yang Y T, Fan D M, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 22-36.
- [2] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): 1605-1622.
- [3] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281: 237-240.
- [4] Sun R, Zhu Q J. Estimation of net primary productivity in China using remote sensing data. *Journal of Geographical Sciences*, 2001, 11(1): 14-23.
- [5] Cui Linli, Du Huaqiang, Shi Jun, et al. Spatial and temporal pattern of vegetation NPP and its relationship with climate in southeastern China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36 (5): 787-793. [崔林丽, 杜华强, 史军, 等. 中国东南部植被NPP的时空格局变化及其与气候的关系研究. *地理科学*, 2016, 36 (5): 787-793.]
- [6] Potter C, Klooster S, Genovese V. Net primary production of terrestrial ecosystems from 2000 to 2009. *Climatic Change*, 2012, 115: 365-378.
- [7] Bastos A, Running S W, Gouveia C, et al. The global NPP dependence on ENSO: La Niña and the extraordinary year of 2011. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(3): 1247-1255.
- [8] Yu Deyong, Pan Yaozhong, Jiang Ping, et al. Spatial and temporal response of NPP of east Asian vegetations to climate changes. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(Suppl. 2): 96-101. [于德永, 潘耀忠, 姜萍, 等. 东亚地区植被净第一性生产力对气候变化的时空响应. *北京林业大学学报*, 2005, 27(Suppl.): 96-101.]
- [9] Cui Linli, Shi Jun, Tang Ping, et al. Seasonal change of terrestrial net primary productivity in China. *Progress in Geography*, 2005, 24(3): 8-16. [崔林丽, 史军, 唐婷, 等. 中国陆地净初级生产力的季节变化研究. *地理科学进展*,

- 2005, 24(3): 8-16.]
- [10] Liu Gang, Sun Rui, Xiao Zhiqiang, et al. Analysis of spatial and temporal variation of net primary productivity and climate controls in China from 2001 to 2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 4936-4945. [刘刚, 孙睿, 肖志强, 等. 2001-2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系. *生态学报*, 2017, 37(15): 4936-4945.]
- [11] Wang Junbang, Liu Jiyuan, Shao Quanqin, et al. Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988-2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the "Three-river Headwaters" region of Qinghai province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 254-269. [王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 等. 基于遥感—过程耦合模型的 1988-2004 年青海三江源区净初级生产力模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 254-269.]
- [12] Zhang Sha, Yuan Jinguo, Zhang Yujia, et al. Analysis of spatiotemporal changes of vegetation net primary productivity and correlation between NPP and climate factors in Hebei province from 2001 to 2010. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2014, 34(5): 516-523. [张莎, 袁金国, 张宇佳, 等. 河北省 2001-2010 年植被 NPP 时空变化及与气候因子相关性分析. *河北大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(5): 516-523.]
- [13] Guo Linghui, Hao Chengyuan, Wu Shaohong, et al. Analysis of changes in net primary productivity and its susceptibility to climate change of Inner Mongolian grasslands using the CENTURY model. *Geographical Research*, 2016, 35(2): 271-284. [郭灵辉, 郝成元, 吴绍洪, 等. 内蒙古草地 NPP 变化特征及其对气候变化敏感性的 CENTURY 模拟研究. *地理研究*, 2016, 35(2): 271-284.]
- [14] Jiang Chao, Xu Yongfu, Ji Jinjun, et al. Influences of the decadal variation of ENSO on the carbon flux in the terrestrial ecosystems. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(6): 107-116. [姜超, 徐永福, 季劲钧, 等. ENSO 年代际变化对全球陆地生态系统碳通量的影响. *地学前缘*, 2011, 18(6): 107-116.]
- [15] Wang J, Dong J, Yi Y, et al. Decreasing net primary production due to drought and slight decreases in solar radiation in China from 2000 to 2012. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017. doi: 10. 1002/2016JG003417.
- [16] Lin Xiaohui. Estimation of carbon sequestration of forest vegetation in South China and South East Asia [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2011: 1-53. [林小惠. 中国南部及东南亚森林植被碳固定遥感估算[D]. 南昌: 江西师范大学, 2011: 1-53.]
- [17] Zhao Guoshuai, Wang Junbang, Fan Wenyi, et al. Vegetation net primary productivity in Northeast China in 2000-2008: Simulation and seasonal change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 621-630. [赵国帅, 王军邦, 范文义, 等. 2000 年-2008 年中国东北地区植被净初级生产力的模拟及季节变化. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 621-630.]
- [18] Li Xiaoyan, Zhai Panmao, Ren Fumin. Redefining ENSO episodes based on changed climate references. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 21(1): 72-78. [李晓燕, 翟盘茂, 任福民. 气候标准值改变对 ENSO 事件划分的影响. *热带气象学报*, 2005, 21(1): 72-78.]
- [19] Liu Y B, Ju W M, He H L, et al. Changes of net primary productivity in China during recent 11 years detected using an ecological model driven by MODIS data. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(1): 112-127.
- [20] Zhong Xiaochun, Chen Wen, Liu Tao, et al. Spatial and temporal change of vegetation net primary productivity and its relationship with climate from 2001 to 2010 in China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(9): 16-22. [仲晓春, 陈雯, 刘涛, 等. 2001-2010 年中国植被 NPP 的时空变化及其与气候的关系. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(9): 16-22.]
- [21] Fang J Y, Piao S L, Field C B, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(6): 293-297.
- [22] Chen Yingying, Chen Wen, Wu Wei, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NPP and its response to climate factors in southern China. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2015, 36(3): 104-110. [陈瑛瑛, 陈雯, 武威, 等. 中国南方植被 NPP 时空变化及其对气候因子的响应. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2015, 36(3): 104-110.]
- [23] Liu F, Zhang H Q, Xu E Q, et al. Responses of grassland net primary productivity to environmental variables in northern China. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(2): 92-100.
- [24] Wang X, Tan K, Chen B, et al. Assessing the spatiotemporal variation and impact factors of net primary productivity in China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44415. doi: 10. 1038/srep44415.
- [25] Hashimoto H, Nemani R R, White M A, et al. El Niño-Southern Oscillation-induced variability in terrestrial carbon cycling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D23). doi: 10. 1029/2004JD004959.
- [26] Tao Bo, Li Kerang, Shao Xuemei, et al. Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 372-380. [陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 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.]
- [27] Wu Yanyan, Wu Zhifeng, Yu Shixiao. Quantitative assessment of the impacts of human activities on net primary

- productivity. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2535-2544. [吴艳艳, 吴志峰, 余世孝. 定量评价人类活动对净初级生产力的影响. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2535-2544.]
- [28] Tian G, Qiao Z. Assessing the impact of the urbanization process on net primary productivity in China in 1989-2000. Environmental Pollution, 2014, 184: 320-326.
- [29] Peng J, Shen H, Wu W H, et al. Net primary productivity (NPP) dynamics and associated urbanization driving forces in metropolitan areas: A case study in Beijing City, China. Landscape Ecology, 2016, 31(5): 1077-1092.
- [30] Ren W, Tian H Q, Liu M L, et al. Effects of tropospheric ozone pollution on net primary productivity and carbon storage in terrestrial ecosystems of China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D22): 449-456.
- [31] Yue X, Unger N, Harper K, et al. Ozone and haze pollution weakens net primary productivity in China. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2017, 17: 1-36.

Impacts of climatic factors and El Niño/La Niña events on the changes of terrestrial ecosystem NPP in China

CUI Linli¹, SHI Jun², XIAO Fengjin³

(1. Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Climate Center, Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030, China;

3. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Net primary productivity (NPP) is one of the most important indicators of terrestrial ecosystem carbon cycle, and is also the material basis for the survival and development of human society. Therefore it plays an important role in the global environment change and the development and utilization of natural resources. Based on the simulated NPP data from GLOPEM-CEVSA model, air temperature, precipitation and sunshine hours data from 2043 weather stations as well as El Niño/La Niña events from 1982 to 2011, the spatial and temporal distributions and dynamic changes of NPP in terrestrial ecosystem were analyzed, and the relationships between NPP and climatic factors and ENSO events in China were examined using the GIS spatial analysis and mathematical statistics methods. Results indicated that vegetation NPP increased at a rate of 5.66 gCm^{-2} per decade in China during 1982-2011, especially in the 1980s it increased significantly at a linear rate of 50.0 gCm^{-2} per decade. Spatially, vegetation NPP increased in western China and the northern and eastern parts of Northeast China, whereas it decreased in the central part of Northeast China, North China Plain, the mid-eastern part of Inner Mongolia, the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta in the past 30 years. In the Yangtze-Huaihe river basins, the decrease of vegetation NPP and the reduction of sunshine hours had good corresponding relationships, and in northern China and northern Xinjiang, the increase (decrease) of NPP was relied more on the increase (decrease) of precipitation. In Northeast China, the increase of NPP was associated with the increases in sunshine hours and temperature. For China as a whole, in El Niño years, regions with the increase of vegetation NPP were slightly larger than those of NPP decrease, but in La Niña years regions with the increase of vegetation NPP was basically equal to those of NPP decrease, and sunshine hours was the main climate factor which leads to the differences of vegetation NPP between El Niño years and La Niña years. More attentions should be paid to the impacts of radiation, extreme climatic events and anthropogenic air pollution on vegetation NPP in different regions of China in future.

Keywords: net primary productivity; spatial-temporal evolution; climatic impacts; El Niño/La Niña events; China