

未来气候情景下中国植被净初级生产力 稳定性及气候影响

陈 惺^{1,2}, 王军邦^{1,2}, 何启凡³, 王春雨⁴, 叶 辉³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室
生态系统大数据与模拟中心, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 九江学院旅游与地理学院, 九江 332005; 4. 齐鲁师范学院, 济南 250200)

摘要: 中国陆地生态系统在全球碳循环中发挥着重要作用, 植被净初级生产力(NPP)是重要碳循环分量。但对中国植被NPP未来变化趋势、稳定性及应对气候变化机制的研究尚少见报道。本文应用前期发展的生态系统过程模型CEVSA-RS, 分别模拟了RCP4.5和RCP8.5气候情景下2006—2099年中国植被NPP, 利用分段线性回归分析NPP年际变化转折点, 采用滑动窗口法分析NPP稳定性的变化及气温和降水的影响。结果表明: ① 中国植被NPP在RCP4.5和RCP8.5气候情景下的总量分别为 4.41 Pg C a^{-1} 和 4.40 Pg C a^{-1} , 季风区分别贡献了总量的72.8%和73.4%。② 两种情景下NPP年际变化均为先增后减, 转折点分别为2062年和2055年; 转折年份之前NPP分别以 $5.3 \text{ g C m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$ 、 $6.5 \text{ g C m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$ 显著增加, 后以前期的4.28倍和2.57倍速率下降。③ 两种气候情景下滑动窗口计算的NPP稳定性分别以 $-2.9\% 10\text{a}^{-1}$ 和 $-4.3\% 10\text{a}^{-1}$ 的速率显著下降。④ RCP4.5和RCP8.5情景下, 气温显著升高, 干旱指数显著下降, 饱和水汽压差显著升高, 全国趋向暖干化。⑤ 降水稳定性的降低主导着温带季风区NPP稳定性的降低, 而气温稳定性的降低主导着青藏高原区NPP稳定性的降低。本文结果表明, 未来气候系统的稳定性降低、气候趋向暖干化将导致全国植被NPP不升反降。因此, 积极开展减缓和适应气候变化行动, 如双碳行动, 具有重要的科学和现实意义。

关键词: 净初级生产力NPP; CEVSA-RS模型; 未来气候情景; 稳定性

DOI: 10.11821/dlxb202303012

1 引言

植被净初级生产力(NPP)被定义为单位时间和单位面积绿色植物通过光合作用积累的有机物质^[1], 是研究全球陆地生态系统对气候变化响应的基础, 对加强全球变暖下陆地生态系统碳固定至关重要^[2]。由于全球地表气温持续升高, 大多数气候模型预测全球大部分区域的NPP将增加^[3], 但NPP波动很大^[4]; 最近的研究表明连续的湿润和干旱对生产力以及碳固定有重要影响^[5-6], 生产力的波动会影响碳固定的大小^[6], 而驱动碳汇变化的气候等主要因素却在时空上呈现巨大差异, 并且气候变化的影响范围和程度在不断升高^[7]。除气温升高外, 降水格局在时空尺度上也发生了变化^[8]。气候变化的改变正在通过直接和

收稿日期: 2022-08-16; 修订日期: 2023-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31861143015, 31971507); 中国科学院—青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项(LHZX-2020-07) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.31861143015, No.31971507; Chinese Academy of Sciences-Qinghai Provincial People's Government Joint Research Project on the Sanjiangyuan National Park, No.LHZX-2020-07]

作者简介: 陈惺(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为全球变化生态学。E-mail: chenx.20s@igsnr.ac.cn

通讯作者: 王军邦(1974-), 男, 副研究员, 研究方向包括生态学、全球变化及遥感应用。E-mail: jbwang@igsnr.ac.cn

间接的方式影响陆地生态系统生产力, 需要更好地了解气候变化可能给生态系统带来的不利影响, 对开展有效的适应性管理等具有重要意义^[9]。

中国位于亚欧大陆东部, 太平洋西岸, 东西和南北跨度广, 导致受海洋影响程度不同, 形成了复杂多样的气候类型, 使其陆地生态系统成为受气候影响最大的区域之一。作为影响碳平衡的重要因素之一, 气候变化正在显著地影响中国陆地生态系统碳动态^[10], 并且具有较强的空间异质性^[11-12]。Piao等^[13]研究发现中国陆地生态系统的净碳汇与欧洲地区相当, 对全球碳动态有着重要意义, 但不同方法的估算结果存在一定的差异^[14]。

生态系统模型模拟是研究区域气候变化对生态系统影响的重要方法之一^[15-16]。估算NPP的模型通常分为气候统计模型、遥感参数模型和生态过程模型^[17-18]。气候统计模型是依赖于有限观测数据的经验方法; 遥感参数模型以时空连续的卫星遥感数据为输入, 能够反映同一植被类型内部的空间异质性, 但对碳循环过程和机理的刻画存在不足; 而建立在小尺度精细试验分析基础上的生态过程模型, 被认为具有较好的机理诊断和未来变化预测能力, 如CEVSA (Carbon Exchange between Vegetation, Soil, and Atmosphere)、CEVSA 2^[19]、BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator) 等^[20-21]。结合遥感参数模型和生态过程模型, 通过尺度融合实现更高精度模拟生态系统碳动态^[22-25]。然而生态系统未来变化的预测, 仍然依赖于生态过程模型。

建立在生理生态学基础上的CEVSA模型, 已用于全球及区域陆地生态系统碳循环过程及变化诊断和预测^[26-27]。后在此基础上发展了物候、氮循环以及蒸腾算法, 发展了CEVSA2^[28-29], 模拟物候、氮循环等对陆地生态系统碳循环过程的影响^[30]; 并进一步通过强迫法发展了遥感驱动的生态系统过程模型 (CEVSA-RS), 模型表现出对生态系统生产力较高的模拟精度^[31-32]。该模型在关闭遥感驱动时, 可在气候驱动下模拟历史和未来气候情景下陆地生态系统碳循环时空动态, 为本文提供了方法基础。

CMIP5 基于不同温室气体排放情景模拟了全球未来气候变化, 为研究气候变化对陆地生态系统生产力的未来影响提供了数据基础。RCP2.6情景是最理想最严格的低排放情景, 现实发生的可能性相对较低, 而RCP4.5和RCP8.5情景发生的可能性相对较高^[33-34], 并且RCP4.5模拟的温室气体排放与经济均衡发展模式, 是优先发展的模式^[35], 而RCP8.5作为在不实施有效气候变化减缓措施的情况下, 人类活动导致气温气体浓度达到的最高情景, 代表人类在本世纪面对的最恶劣气候情景, 可以作为气候变化的“底线”与RCP4.5进行对比^[36]。基于此, 本文仅选择了这两种情景数据, 进行了模拟分析。应用CEVSA-RS模型模拟了未来气候情景下2006—2009年全国植被NPP, 分析了NPP的大小、变化趋势和稳定性, 探究两种气候情景下中国陆地生态系统NPP及其稳定性的变化和影响因素, 以期为全国陆地生态系统的碳汇管理, 生态恢复措施实施及生态系统管理策略制定等提供科学基础。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 数据

2.1.1 气候情景数据 数据来自2006—2009年全国陆地生态系统气候情景数据^[37-38]。该数据是基于区域气候模型第4版 (RegCM 4.6) 和CMIP5中的HadGEM2-ES数据情景, 具有4种不同的代表性浓度路径 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5), 本文使用中、高排放气候情景RCP4.5和RCP8.5数据。该气候情景原始数据的空间分辨率为0.25°, 时间

分辨率为 3 h, 包括气温、降水量、云量和空气相对湿度。本文将数据处理为旬时间步长, 0.1°空间分辨率, 用于模型输入, 详细的模型输入输出数据见表 1。

表 1 模型输入输出数据
Tab. 1 Input data and output data of the model

| 类型 | 名称 | 描述 | 时间分辨率 | 空间分辨率 | 单位 |
|------|----------------|--------|-----------|-------|-------------------------------------|
| 驱动变量 | Tas | 气温 | 旬均值 | 0.1° | °C |
| | Prc | 降水 | 旬均值 | 0.1° | mm |
| | Hum | 相对湿度 | 旬均值 | 0.1° | % |
| | Clo | 云量 | 旬均值 | 0.1° | % |
| | Chinacover2010 | 土地覆盖数据 | 年值(2010年) | 0.1° | 无 |
| 输出变量 | NPP | 净初级生产力 | 年值 | 0.1° | g C m ⁻² a ⁻¹ |

2.1.2 土地利用数据 采用 2010 年中国土地覆盖遥感数据 (ChinaCover)。该数据是基于 Landsat TM/ETM、HJ-1 卫星数据以及野外调查数据产生的 30 m 空间分辨率的土地覆盖数据, 全国尺度一级分类精度为 94%, 二级分类精度为 86%^[39-40]。本文对其二级分类进行归并, 得到用于模型输入的植被分类 (表 2); 采用邻近值法空间重采样得到 0.1°空间分辨率数据, 用于模型输入。

2.2 模型

CEVSA 模型是一个基于生理生态过程模拟植物—土壤—大气能量交换和水碳氮耦合循环的生物地球化学模型, 包括 3 个子模块^[26-27]: ① 植物—土壤—大气之间水热交换、土壤含水量和气孔传导等过程模拟的生物物理子模块; ② 植物光合作用、呼吸作用、氮吸收速率、叶面积以及碳氮在植物各器官之间分配、积累、周转和凋落物产生模拟的植物生理生长子模块; ③ 土壤有机质分解与转化和有机氮矿化等过程模拟的土壤碳氮转化子模块^[32]。本文应用 CEVSA2 模型基础上发展的基于卫星遥感驱动的 CEVSA-RS 模型, 模型结构见图 1。

该模型在发展过程中基于中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 观测数据进行了验证评价研究。模拟结果与内蒙古、长白山和禹城站点的涡度相关碳通量观测数据对比表明, 模型能够解释总初级生产力 (GPP) 观测值季节变化的 58%~94%^[31]; 同时与 MODIS 的 GPP 遥感产品 (MYD17A2H) 表现出了较好的一致性^[31]。说明 CEVSA-RS 模型具有较高的可靠性。

2.3 数据分析方法

2.3.1 饱和水汽压差 饱和水汽压差 (Vapor Pressure Deficit, VPD) 被用来分析大气水分对植被 NPP 的影响。采用基于修正的 Tetens 的经验公式, 以气温计算未来气候情景下 VPD^[41]。具体计算方程如下:

$$E=6.112e^{\left(\frac{17.67TAS}{TAS+243.5}\right)}$$

(1)

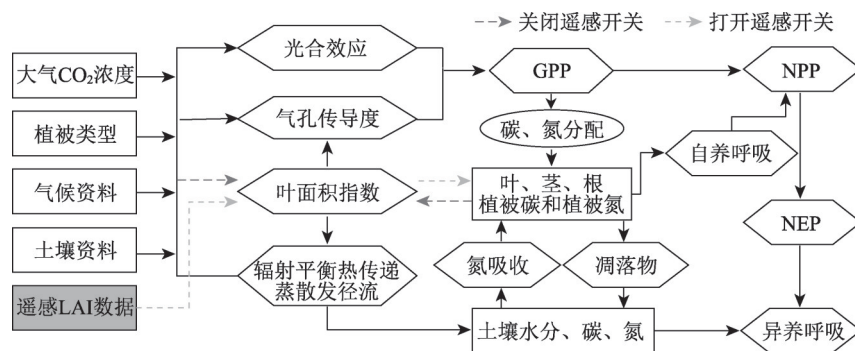
$$VPD=E(1-HUM)$$

(2)

式中: TAS 为气温 (°C), 在 -35~30 °C 范围内该公式与 Tentens 公式的误差小于 0.3%; E

表 2 Chinacover2010 数据分类体系
Tab. 2 Classification system of Chinacover2010

| 一级类型编号 | 一级类型名称 |
|--------|--------|
| 1 | 常绿针叶林 |
| 2 | 落叶针叶林 |
| 3 | 针阔混交林 |
| 4 | 常绿阔叶林 |
| 5 | 落叶阔叶林 |
| 6 | 草地 |
| 7 | 灌丛 |
| 8 | 其他 |
| 9 | 农作物 |
| 10 | 人工表体 |
| 11 | 水体 |



注：根据文献[32]改绘。

图1 CEVSA-RS模型主要结构示意图

Fig. 1 The main structure of CEVSA-RS model

为饱和水汽压 (hPa); HUM 为空气相对湿度, 用百分数表示; VPD 为饱和水汽压差 (hPa), 即表征实际空气距离水汽饱和状态的程度^[42]。

2.3.2 干旱指数 干旱指数 (Aridity Index, AI) 作为水热的综合性指标, 能有效表征区域的干旱程度。为分析未来气候下区域的干湿状况, 采用基于气温和降水的计算方法^[43-44]:

$$AI_i = \frac{PRC_i}{(TAS_i + 10)} \quad (3)$$

式中: AI_i 为第 i 年的干旱指数; PRC_i 为第 i 年的平均降水; TAS_i 为第 i 年的平均气温。AI 越大, 代表当年的气候湿润程度越高, 反之越干旱; AI 小于 15 表示干旱, 15~30 间表示半干旱, 大于 30 表示湿润。

2.3.3 稳定性系数 稳定性可以表示一个系统保持不变或者规律性变动的稳定程度, 变异系数本身表达波动性^[45], 通常采用变异系数倒数的绝对值量化稳定性, 计算公式如下:

$$S_{X(i,j)} = \left| \frac{M_{X(i,j)}}{STD_{X(i,j)}} \right| \quad (4)$$

式中: S_X 、 M_X 和 STD_X 分别表示给定时间范围内生态系统生产力、气候系统中气温和降水等量的稳定性、均值和标准偏差, 取绝对值以消除气温均值可能出现的负值的影响; i 代表第 i 年; j 代表第 j 个像元点。

为了分析稳定性年代际变化及其变化趋势, 本文使用滑动窗口法计算稳定性系数。其中窗口大小设定为 11 a, 逐年滑动分别计算均值和标准差, 得到稳定系数时间序列数据。具体计算公式如下:

$$S_k = \frac{\sum_{k=i-5}^{i+5} X_k}{11STD_k} \quad (5)$$

式中: X_k 代表第 k 年的 NPP 或气温等气候要素; STD_k 表示第 k 年前后 5 a 共 11 a 期间 X 时间序列的标准差; S_k 是第 k 年前后 5 a 期间的稳定性系数。

2.3.4 趋势分析 一元线性回归的斜率广泛应用于年际变化趋势及影响因素分析的量化指标, 其计算公式如下^[46]:

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (6)$$

式中: $Slope$ 为像元尺度线性回归方程的斜率; X_i 为第 i 年的 NPP 及 TAS、PRC、AI、VPD 等气候要素; n 为研究的时间长度, i 为研究时段内的第 i 年。当 $Slope > 0$ 且显著性水平 $p < 0.05$ 时, 为显著增加趋势; 当 $Slope < 0$ 且 $p < 0.05$ 时, 为显著下降趋势; 无论 $Slope$ 取值多少, 当 $p \geq 0.05$ 时, 无显著变化趋势^[47]。

2.3.5 多元线性回归 采用多元线性回归分析气象因子对 NPP 的影响。公式如下:

$$y = aX_1 + bX_2 + c \quad (7)$$

式中: X_1 和 X_2 分别表示标准化后的气温和降水量; a 、 b 为回归系数; c 为截距。

2.3.6 转折点 为了确定时间序列数据的年际变化是否存在趋势转折, 采用分段线性回归方法估计出现转折的年份^[48], 公式如下:

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, & x \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2(x - \alpha) + \varepsilon, & x > \alpha \end{cases} \quad (8)$$

式中: α 为变化趋势的估计断点, 由最小平方差法估计; x 为年份; y 在本文分别为 NPP、气温和降水等气候因子; β_1 和 $\beta_1 + \beta_2$ 分别为断点之前和之后的变化率; ε 为残差误差; 用 t 检验来检验线性回归与分段回归的显著性, $p < 0.05$ 为显著。

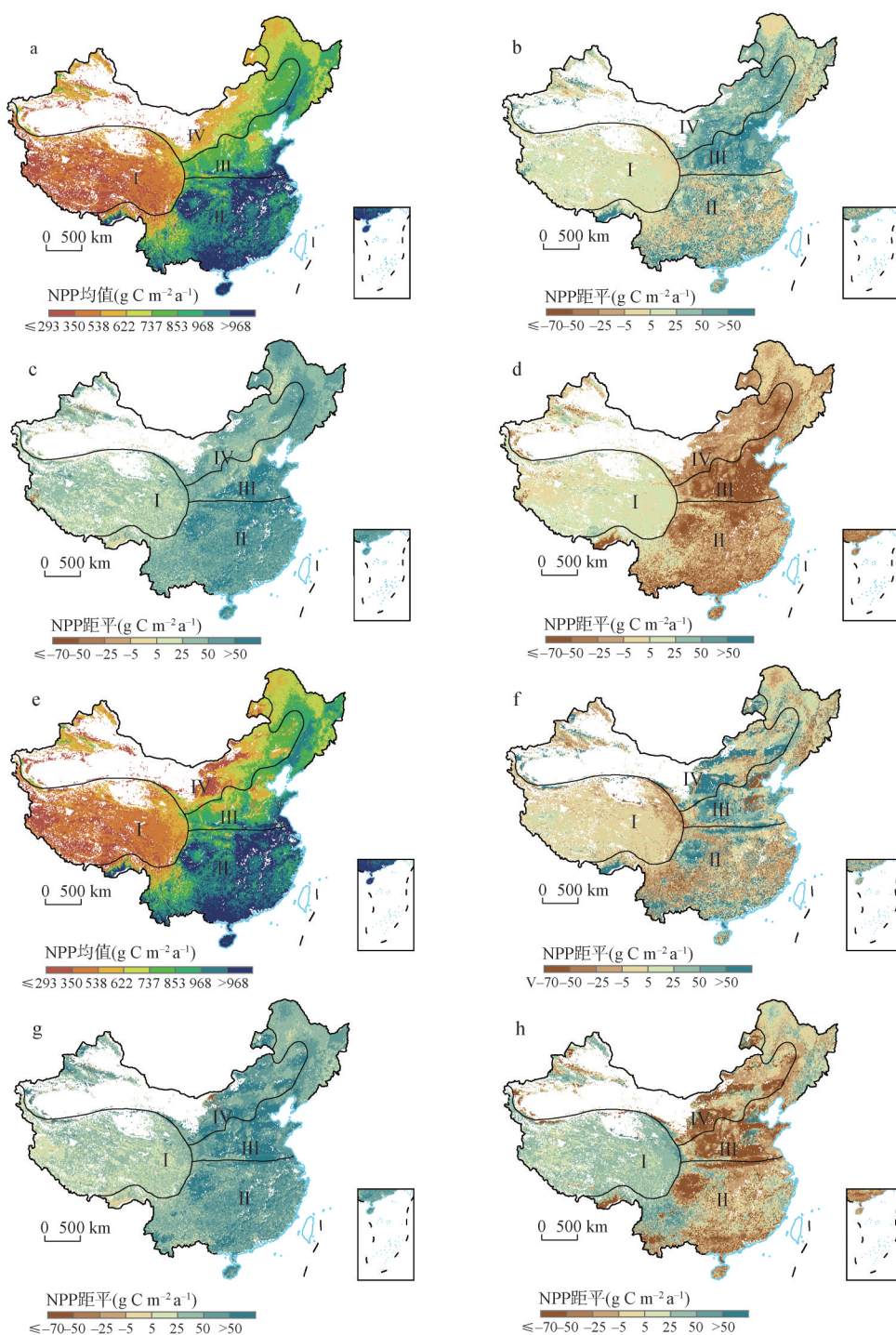
3 结果

3.1 净初级生产力空间格局

2010—2009 年中国陆地生态系统净初级生产力多年均值分布总体上呈现东高西低, 南高北低的空间分布 (图 2)。在 RCP4.5 情景下, 全国的年均 NPP 总值为 4.41 Pg C a^{-1} , 相比于 RCP8.5 情景下的 4.40 Pg C a^{-1} 略高。各分区间的 NPP 总量差距较大 (表 3), 尤其是热带—亚热带季风气候区, NPP 值较高; 而 NPP 低值区域大多分布在青藏高原气候区。

热带—亚热带季风区对全国 NPP 的贡献最高, 在 RCP4.5 情景下年均 NPP 总量为 2.09 Pg C a^{-1} , 占全国 NPP 总量 47.32%, 而 RCP8.5 情景下的贡献量略高于 RCP4.5, 为 2.12 Pg C a^{-1} , 占比 48.18%。温带季风区次之, RCP4.5 情景下年均 NPP 总量 1.12 Pg C a^{-1} , 贡献率为 25.48%, RCP8.5 情景下略低, 为 1.11 Pg C a^{-1} , 贡献率为 25.23%。季风区对全国 NPP 的总贡献分别高达 72.80% (RCP4.5) 和 73.41% (RCP8.5)。温带大陆区在 RCP4.5 情景下 NPP 总量为 0.63 Pg C a^{-1} , 贡献率为 14.22%, 但在 RCP8.5 情景下只有 0.58 Pg C a^{-1} , 贡献率仅为 13.18%。青藏高原区在 RCP4.5 情景下年均 NPP 总量为 0.57 Pg C a^{-1} , 贡献率只有 12.99%, 但在 RCP8.5 情景下超过温带大陆区, 达到 0.59 Pg C a^{-1} , 贡献率达 13.41%。虽然 RCP8.5 情景下季风区对 NPP 总量的贡献比 RCP4.5 情景高, 并且高排放情景下青藏高原区 NPP 高于中等排放情景, 但温带大陆气候区 NPP 总量在 RCP8.5 情景下低于 RCP4.5, 导致 RCP8.5 情景下全国 NPP 总值低于 RCP4.5 情景。

比较近期 (2010—2039 年)、中期 (2040—2069 年) 和远期 (2070—2099 年) NPP 大小变化 (图 2), 全国 RCP4.5 情景下近、中、远期的变化分别是整个时段的 2.17%、4.05% 和 -5.56%, 而 RCP8.5 情景的 3 个时期变化分别是 0.76%、4.41% 和 -5.28%。青藏高原区近期较整个时段低 0.56% (RCP4.5)、4.27% (RCP8.5), 中期较整个时段分别高 2.38% 和 2.44%, 但远期有较大不同, RCP4.5 下远期比整个时段低 1.47%, RCP8.5 情景下却比整个时段高 2.56%, 青藏高原表现出其独特性。热带—亚热带季风区、温带季风区和温带大陆气候区表现出相似的距平变化, 近期和中期的距平较整个时段高, 但远期的距平却较整个时段下降幅度较大; 尤其是温带大陆气候区在 RCP8.5 情景下远期较整个时段下降高达 17.25%, RCP4.5 情景是其相对优势的情景。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1594号的标准地图制作,底图边界无修改;图a,e分别为RCP4.5和RCP8.5情景的2010—2009年均NPP空间分布图,图b,c,d和f,g,h分别为RCP4.5和RCP8.5情景的2010—2039年、2040—2069年和2070—2099年NPP距平空间分布图;I代表青藏高原气候区,II代表热带—亚热带季风区,III代表温带季风区,IV温带大陆气候区。

图2 RCP4.5和RCP8.5气候情景下不同时段中国陆地生态系统NPP均值及距平

Fig. 2 Mean and anomaly of NPP in Chinese terrestrial ecosystems at different time periods in RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios

表3 两个气候情景下分区年均NPP值(Pg C a⁻¹)

Tab. 3 Zonal annual average NPP in two climate scenarios (Pg C a⁻¹)

| | 青藏高原气候区 | | 热带—亚热带季风区 | | 温带季风区 | | 温带大陆区 | | 全国 | |
|------------|---------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 |
| 2006—2039年 | 0.57 | 0.56 | 2.11 | 2.11 | 1.14 | 1.13 | 0.64 | 0.63 | 4.47 | 4.43 |
| 2040—2069年 | 0.59 | 0.60 | 2.17 | 2.19 | 1.18 | 1.17 | 0.65 | 0.62 | 4.59 | 4.59 |
| 2070—2099年 | 0.56 | 0.61 | 1.97 | 2.05 | 1.05 | 1.03 | 0.58 | 0.48 | 4.16 | 4.16 |
| 2006—2099年 | 0.57 | 0.59 | 2.09 | 2.12 | 1.12 | 1.11 | 0.63 | 0.58 | 4.41 | 4.40 |

3.2 净初级生产力年际趋势

2006—2099年间，NPP在不同气候情景和气候区中普遍呈现出先上升再下降的趋势(图3)。RCP4.5情景下的转折点年份普遍在2060—2070年之间，RCP8.5情景NPP的下降趋势出现的转折年份比中排放情景早，说明较于高排放情景下，中等排放情景下的NPP增长会持续的更久。全国陆地区域在RCP4.5和RCP8.5情景下的转折点分别为2062年和2055年，转折点之前分别以5.3 g C m⁻² 10a⁻¹和6.5 g C m⁻² 10a⁻¹速率显著增加($p < 0.01$)，而转折点之后则呈显著下降趋势，下降速率分别为22.7 g C m⁻² 10a⁻¹和16.7 g C m⁻² 10a⁻¹，分别是转折点前的4.28倍和2.57倍，即NPP呈现加速下降的趋势。

不同气候情景下，不同气候区NPP年际变化转折点前后的变化速率有差异(图3)。青藏高原区的NPP分段年际变化趋势变化为，RCP4.5情景下2064年之前以2.7 g C m⁻² 10a⁻¹速率增加，而RCP8.5情景下，2056年之前上升速率是RCP4.5的1.96倍，RCP4.5后期以6.0 g C m⁻² 10a⁻¹速率加速下降，而RCP8.5后期下降趋势不显著。

热带—亚热带季风区在RCP4.5情景下2062年以前以8.7 g C m⁻² 10a⁻¹的速率显著上升，而RCP8.5情景下，2061年之前上升速率达到了10.3 g C m⁻² 10a⁻¹，是RCP4.5情景的1.18倍，RCP4.5情景下后期以38.0 g C m⁻² 10a⁻¹的速率显著下降，是RCP8.5情景后期下降速率的1.50倍。

温带季风区在RCP4.5情景下2061年以前以9.5 g C m⁻² 10a⁻¹的速率显著上升，但RCP8.5情景下2055年之前以8.9 g C m⁻² 10a⁻¹速率不显著上升，RCP4.5情景后期以36.3 g C m⁻² 10a⁻¹的速率加速下降，下降速率是RCP8.5同期的1.23倍。

温带大陆气候区在RCP4.5情景下2065年之前以2.6 g C m⁻² 10a⁻¹速率上升，是RCP8.5情景下2053年之前的2.6倍，RCP8.5后期以19.4 g C m⁻² 10a⁻¹的速率下降，为RCP4.5情景下同期的1.20倍。

总体表现为青藏高原区和热带—亚热带季风区在RCP4.5情景下前期NPP增长速率要低于RCP8.5情景，后期的下降速率却高于RCP8.5情景，温带季风区后期RCP4.5下降速率高于RCP8.5；温带大陆气候区较为特殊，RCP4.5情景前期NPP上升速率高于RCP8.5，RCP4.5情景后期NPP下降速率却缓于RCP8.5，与前3个气候区对不同未来气候情景的响应相反。

总之，4个气候区都表现为高排放下的NPP下降转折点的出现普遍早于中等排放情景，但不同气候区下NPP年际变化速率对不同气候情景的响应不同，RCP4.5情景下前期NPP上升速率最快的是温带季风区，后期下降最快的是热带—亚热带季风气候区；RCP8.5情景下前期上升最快的是热带—亚热带季风气候区，后期下降最快的是温带季风气候区。季风区NPP变化趋势较大的原因是季风区NPP总量对全国的贡献大，导致变化幅度大。NPP变化趋势可以提供未来陆地生态系统碳固定的发展方向和速度，由未来气候情景下NPP在21世纪中叶出现转折点的研究结果可知，转折点应该受到更多的关注^[49]。

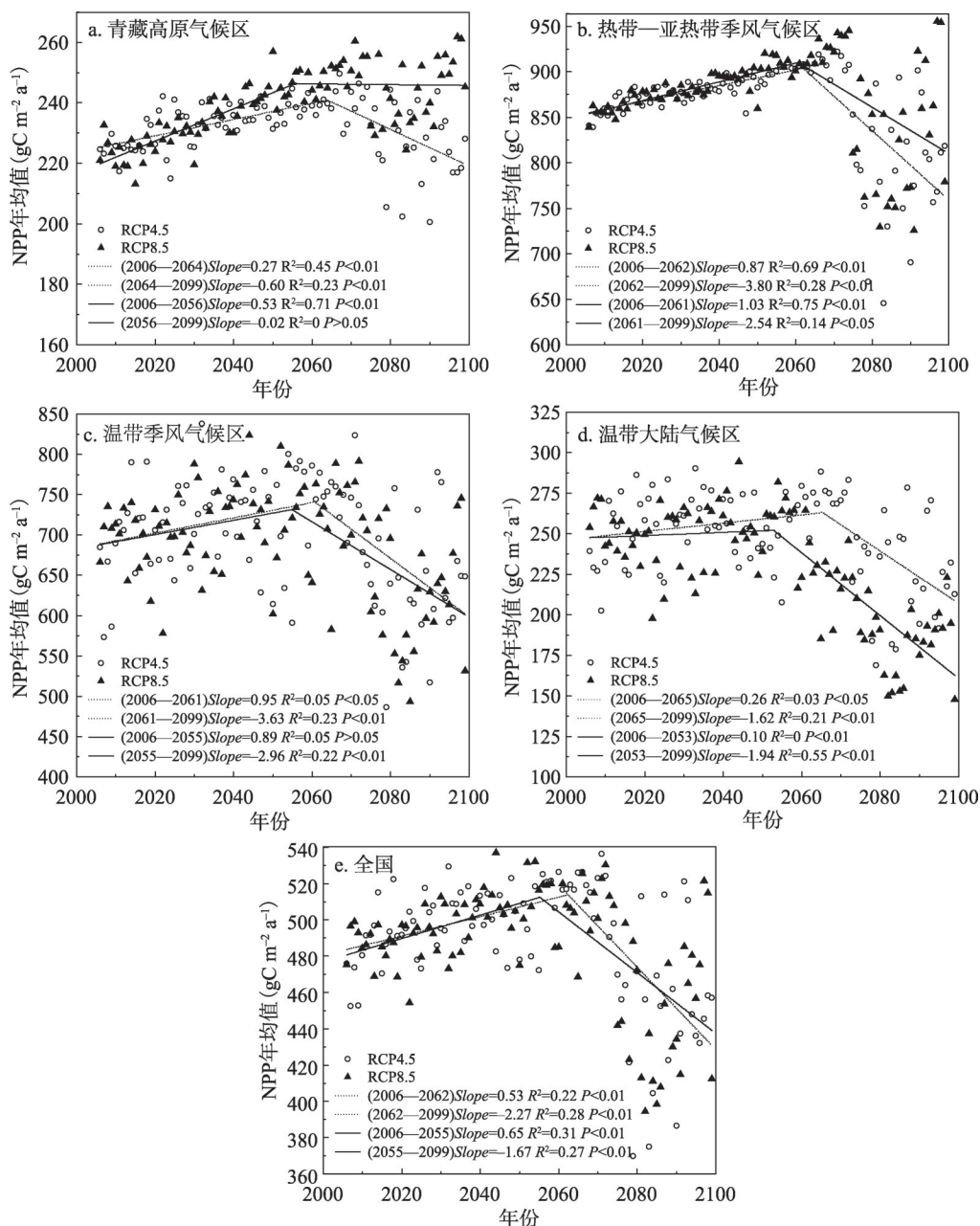
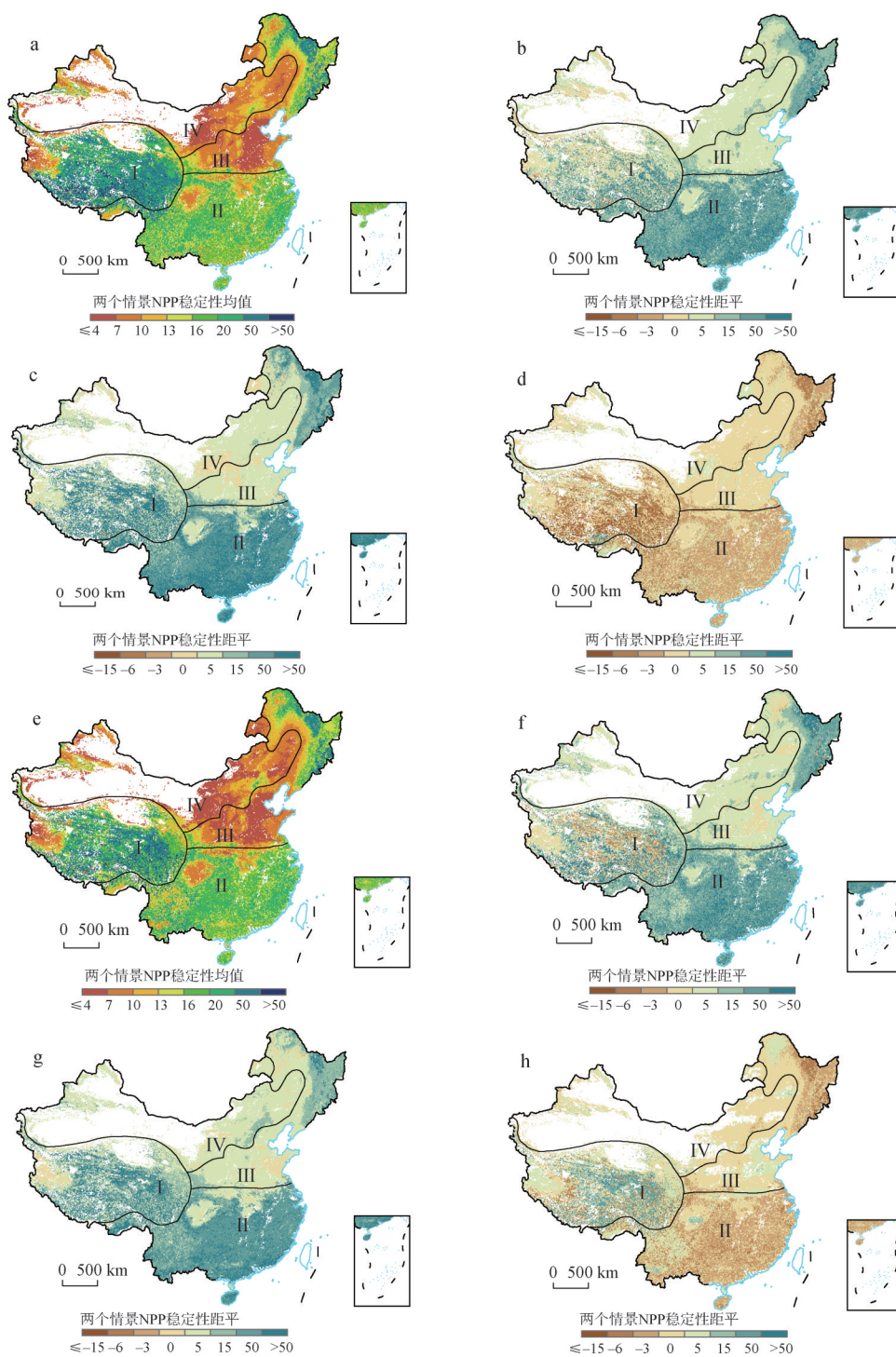


图3 两种气候情景下4个气候区及全国的NPP年际变化

Fig. 3 Interannual variability of NPP in four climate zones and nationally in two climate scenarios

3.3 净初级生产力的稳定性时空变化

NPP稳定性的空间分布显示两种情景后期的NPP稳定性普遍呈现下降的趋势,但青藏高原区的NPP稳定性在两种情景后期的下降程度不同(图4)。总体上,青藏高原气候区和热带—亚热带季风区的NPP稳定性较好,温带季风区和温带大陆气候区的大部分地区的稳定性较差。在NPP稳定性整体较好的青藏高原区和热带—亚热带季风区中,四川盆地和部分长江中下游平原区域以及西藏西部的NPP稳定性相对较差;而稳定性较差的



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1594号的标准地图制作，底图边界无修改；I代表青藏高原气候区，II代表热带—亚热带季风区，III代表温带季风区，IV温带大陆性气候区；a、b、c、d和e、f、g、h分别代表RCP4.5和RCP8.5情景的整个时段NPP稳定性空间分布和2010—2039年、2040—2069年和2070—2099年的NPP稳定性距平空间分布。

图4 RCP4.5和RCP8.5气候情景下不同时段中国陆地生态系统NPP稳定性均值及距平

Fig. 4 Mean and anomaly of NPP stability in Chinese terrestrial ecosystems at different time periods in RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios

温带季风气候区以及温带大陆气候区的大兴安岭、小兴安岭以及长白山脉的稳定性相对较好, 全国陆地生态系统NPP稳定性呈现明显的空间异质性。

总体来看, 全国区域内两气候情景下每 11 a 滑动窗口计算 NPP 稳定性的结果显示 (图 5), NPP 稳定性有明显降低的趋势, 分别以每年 -2.9% (RCP4.5) 和 -4.3% (RCP8.5) 速率显著下降, RCP4.5 情景下, NPP 转折点后期相较于前期 NPP 稳定性下降至 68.33% , 而 RCP8.5 情景下转折点后期相较于前期下降至 54.57% , 高排放情景下 NPP 稳定性下降更多。RCP4.5 情景下, 全国的 NPP 稳定性年均值为 31.86 , 略高于 RCP8.5 情景下的 30.32 。稳定性最差的气候区为温带大陆区, 分别为 13.69 (RCP4.5) 和 12.91

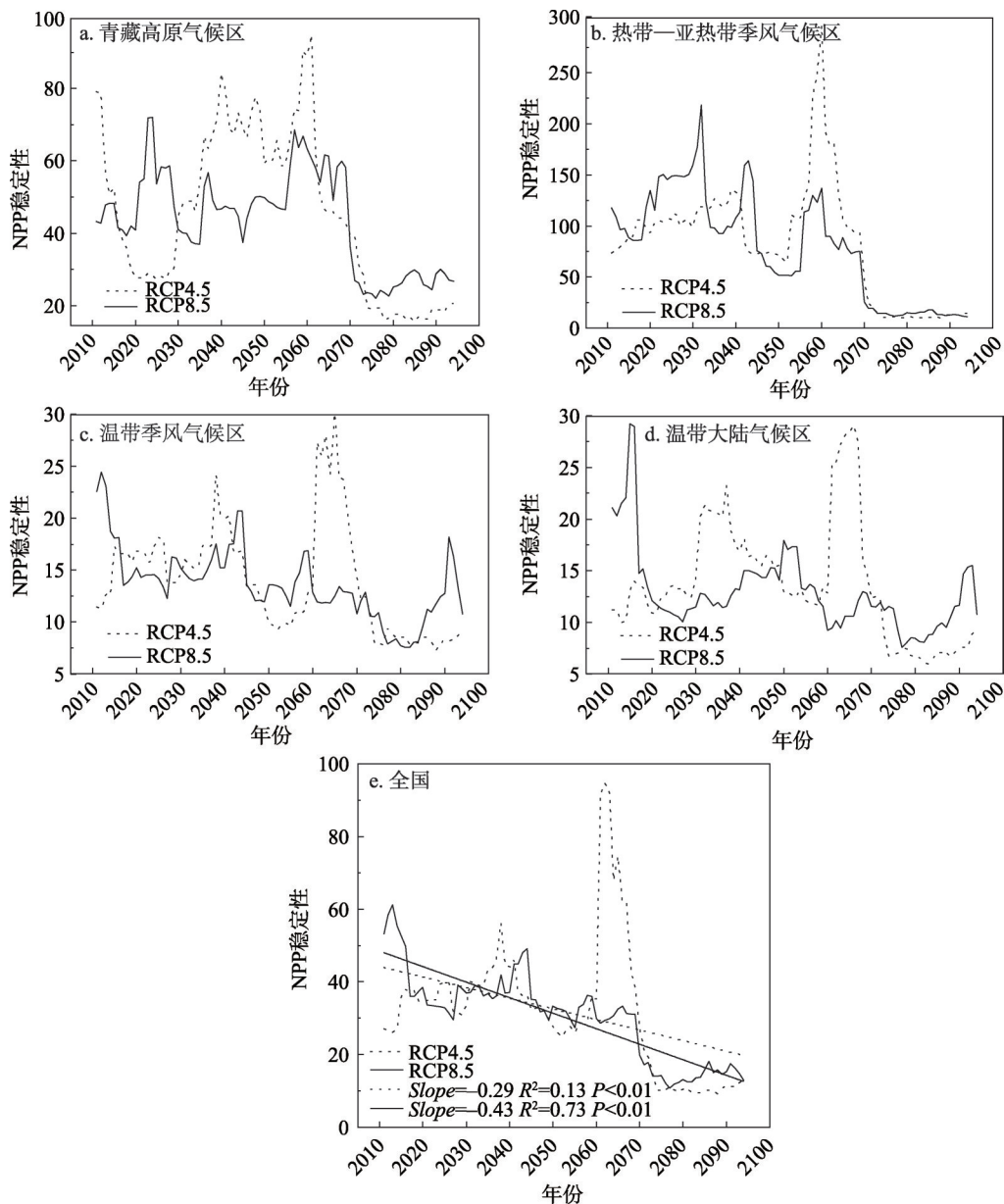


图5 两种气候情景下不同气候区及全国的NPP稳定性年际变化

Fig. 5 Interannual variability of NPP stability in different climate zones and nationally in two climate scenarios

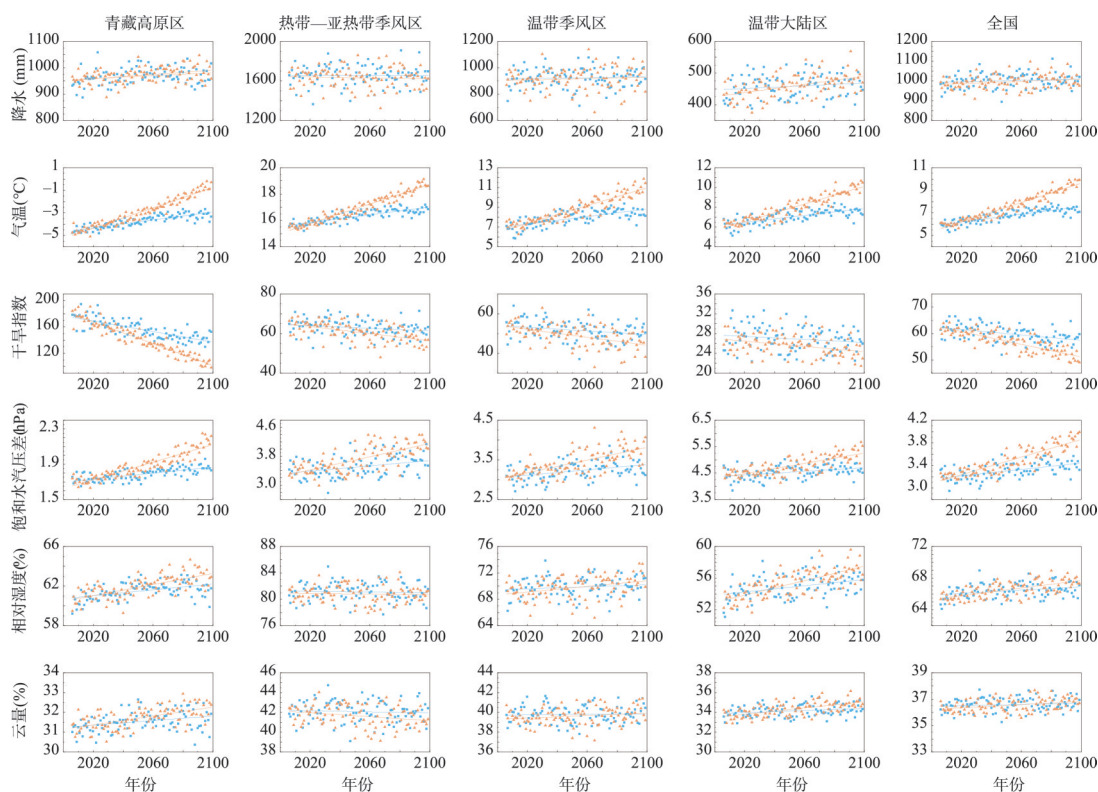
(RCP8.5), 温带季风区略高于温带大陆区, 稳定性年均值最高的是热带—亚热带季风区, 分别为 83.09 (RCP4.5) 和 78.98 (RCP8.5)。全国范围内 RCP4.5 情景下的 NPP 稳定性普遍高于 RCP8.5, 并且高排放相较中等排放情景下 NPP 稳定性下降的速率更快。

4 讨论

4.1 不同气候情景下净初级生产力及其影响因素

水热气候指标在不同的气候情景下和不同气候区中存在差异 (图 6)。各气候区气温均显著变暖, 且 RCP8.5 情景下气温变暖的速率普遍高于 RCP4.5, 全国范围内高排放情景升温速率是中排放情景的 2.52 倍 (表 4)。表征干旱程度的 AI 和 VPD 均显示出全国范围气候变干。其中, 两个情景下全国陆地范围内 AI 呈现显著下降趋势, 分别为 $-0.51 \text{ } 10\text{a}^{-1}$ (RCP4.5) 和 $1.20 \text{ } 10\text{a}^{-1}$ (RCP8.5), 表示全国陆地气候有显著变干的趋势; 同时 VPD 表现为显著上升趋势, RCP8.5 情景下的 VPD ($0.078 \text{ hPa } 10\text{a}^{-1}$) 普遍高于 RCP4.5 情景的对应值 ($0.029 \text{ hPa } 10\text{a}^{-1}$), 同样表现出全国尺度的气候显著变干趋势。

有研究表明不同情景下气温、降水等气候因子对 NPP 的影响不同^[50]。尽管全国陆地区域气温与降水对 NPP 年际变化的解释度高达 71% (RCP4.5) 和 63% (RCP8.5) (表 5), 但根据单因素线性回归分析, 较之于气温和降水间相关性, NPP 分别与 AI 和 VPD 间具有更显著的线性关系 (表 6), 因此, 在未来气候 AI 降低, VPD 显著升高的暖干化趋势, 是



注: 蓝色代表 RCP4.5 情景, 橙色代表 RCP8.5 情景。

图 6 两个气候情景下 4 个气候区及全国的气候因子年际变化

Fig. 6 Interannual variation of meteorological factors in four climate zones and nationally in two climate scenarios

表4 气象因素的年际变化趋势
Tab. 4 Interannual trends in meteorological factors

| | 气温 | | 降水 | | 相对湿度 | | 云量 | | 干旱指数 | | 饱和水汽压差 | |
|-----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 |
| 青藏高原区 | 0.02*** | 0.05*** | 0.28* | 0.40*** | 0.01*** | 0.03*** | 0.01** | 0.01*** | -0.40*** | -0.83*** | 0.002*** | 0.005*** |
| 热带—亚热带季风区 | 0.01*** | 0.04*** | 0.02 | -0.19 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.01* | -0.03* | -0.09*** | 0.004*** | 0.01*** |
| 温带季风区 | 0.02*** | 0.04*** | 0.17 | 0.26 | 0.01 | 0.02*** | 0.001 | 0.01 | -0.05* | -0.10*** | 0.003*** | 0.01*** |
| 温带大陆区 | 0.02*** | 0.04*** | 0.22 | 0.65*** | 0.02*** | 0.05*** | 0.01* | 0.02*** | -0.02 | -0.03*** | 0.003*** | 0.01*** |
| 全国 | 0.02*** | 0.04*** | 0.18 | 0.29* | 0.01** | 0.02*** | 0.003 | 0.01*** | -0.05*** | -0.12*** | 0.003*** | 0.01*** |

注: *代表 $P<0.05$, **代表 $P<0.01$, ***代表 $P<0.001$ 。

表5 两个气候情景下NPP与气温、降水二元线性拟合结果
Tab. 5 Results of binary linear fitting of NPP with temperature and precipitation in two climate scenarios

| | 气温回归系数 | | 降水回归系数 | | 二元回归决定系数 | | 共线性检验 VIF | |
|-----------|----------|----------|---------|----------|----------|--------|-----------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 |
| 青藏高原区 | 0.02*** | 0.15*** | 0.06*** | 0.34*** | 0.59 | 0.83 | 1.04 | 1.12 |
| 热带—亚热带季风区 | 0.004*** | -0.04*** | 0.16*** | 0.12*** | 0.56 | 0.56 | 1.02 | 1.01 |
| 温带季风区 | -0.07*** | 0.04*** | 0.26*** | 0.27*** | 0.52 | 0.49 | 1.01 | 1.00 |
| 温带大陆区 | 0.004*** | -0.06*** | 0.23*** | -0.16*** | 0.50 | 0.71 | 1.00 | 1.22 |
| 全国 | 0.02*** | 0.03*** | 0.22*** | 0.12*** | 0.71 | 0.63 | 1.00 | 1.04 |

注: *代表 $P<0.05$, **代表 $P<0.01$, ***代表 $P<0.001$ 。

表6 NPP与气候因素的一元线性拟合的回归系数
Tab. 6 Regression coefficients for univariate linear fitting of NPP and climatic factors

| | 气温 | | 降水 | | 干旱指数 | | VPD | | 相对湿度 | | 云量 | |
|-----------|--------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 |
| 青藏高原区 | 0.20* | 0.66*** | 0.13 | 0.30** | -0.18 | -0.69*** | 0.09 | 0.59*** | 0.24* | 0.55*** | 0.08 | 0.46*** |
| 热带—亚热带季风区 | -0.17 | -0.17 | 0.10 | 0.07 | 0.14 | 0.14 | -0.32** | -0.22* | 0.27** | 0.14 | 0.21* | 0.18 |
| 温带季风区 | -0.22* | -0.40*** | 0.63*** | 0.59*** | 0.62*** | 0.70*** | -0.46*** | -0.63*** | 0.45*** | 0.38*** | 0.39*** | 0.39*** |
| 温带大陆区 | -0.26* | -0.72*** | 0.61*** | 0.0002 | 0.65*** | 0.65*** | -0.43*** | -0.76*** | 0.36*** | -0.25* | 0.32** | -0.23* |
| 全国 | -0.21* | -0.39*** | 0.35*** | 0.20 | 0.38*** | 0.47*** | -0.38*** | -0.51*** | 0.29** | 0.07 | 0.26* | 0.17 |

注: *代表 $P<0.05$, **代表 $P<0.01$, ***代表 $P<0.001$ 。

导致未来NPP出现下降的主要因素。针对NPP与气温和降水的多元线性回归分析中,可能存在的气温与降水间共线性问题,分析表明回归方程膨胀因子都小于3,说明自变量气温和降水间共线性特征不显著,这也与文献分析结果较为一致,即气候变暖和降水增加的交互效应低于单因素的效应^[51]。随着气候持续变暖,降水增加不显著情况下,地表蒸散将显著增加而产生水分胁迫,而干旱通过增加自养呼吸,减少光合作用的机制^[52],导致NPP的增长受限^[53],并且这种风险面积可能扩大^[54],生态系统的稳定性下降会导致干旱的影响将更大^[55]。

4.2 不同气候区净初级生产力的差异

气候因子对净初级生产力的影响具有明显的空间异质性,这种区域差异性也得到其他研究的证实^[56]。其中差异性较为突出的是青藏高原高寒气候区,随气候变暖NPP呈增加趋势。青藏高原区的降水呈显著上升趋势,上升速率在4个气候区中最高,气温同样也呈显著上升趋势;但AI在中、高排放情景下是4个气候区中下降速率最快,分别为

4.02 10a⁻¹和8.27 10a⁻¹ (表4), 即气候将加速变干, 但其值较之其他4个区均较高, 即持续为湿润气候。因此, 至少在21世纪前叶, 暖干化的RCP8.5情景相比于RCP4.5情景更利于青藏高原NPP增长, 但青藏高原区加速变干, 将导致NPP稳定性在2060年之后迅速下降。这种NPP稳定性的变化, 主要是因为气温的波动对青藏高原NPP稳定性的影响要大于降水(表7), 气温的稳定性相对其他气象因子较低, RCP4.5气候情景下的气温稳定性相比于RCP8.5更高(图7), RCP4.5情景NPP稳定性对气温稳定性的敏感性高于RCP8.5情景(图8a)。前人研究也表明青藏高原的生产力的气候驱动因素具有与其他区域的差异较为突出^[57], 并且有研究也发现在SRES的B2情境下1961—2100年中国平均NPP随着预测气温的上升而下降, 但青藏高原是唯一随着变暖NPP增加的区域^[58]。

表7 两个气候情景下4个气候区及全国NPP变异系数与气象因子变异系数偏相关结果
Tab. 7 Results of partial correlation of NPP coefficients of variation and meteorological factor coefficients of variation for four climate zones and nationally in two climate scenarios

| | 偏相关系数 | | | | 决定系数 | | | |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | RCP4.5 PRC | RCP4.5 TAS | RCP8.5 PRC | RCP8.5 TAS | RCP4.5 PRC | RCP4.5 TAS | RCP8.5 PRC | RCP8.5 TAS |
| 青藏高原区 | 0.43*** | -0.75*** | 0.32** | -0.55*** | 0.19 | 0.56 | 0.11 | 0.30 |
| 热带—亚热带季风区 | -0.03 | -0.09 | -0.08 | 0.22* | 0.001 | 0.01 | 0.01 | 0.05 |
| 温带季风区 | 0.30** | -0.30** | 0.47*** | 0.24* | 0.09 | 0.09 | 0.22 | 0.06 |
| 温带大陆区 | 0.20 | -0.20 | -0.11 | -0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 0.001 |
| 全国 | 0.21 | -0.41*** | 0.06 | 0.17 | 0.04 | 0.17 | 0.00 | 0.03 |

注: *代表 $P<0.05$, **代表 $P<0.01$, ***代表 $P<0.001$ 。

与青藏高原相反, 总体为半干旱气候的温带大陆气候区, 气候变化将导致NPP早在2053年(RCP4.5)和2065年(RCP8.5)出现下降趋势, 稳定性也将降低。两个气候情景下, 暖干化的RCP8.5情景对温带大陆气候区的NPP增长更加不利, 同时气候因子越不稳定, NPP稳定性也变得更低。由于温带大陆气候区的VPD下降速率较高, 温带大陆气候区正在显著的变干, 并且NPP与AI、VPD的一元线性关系显著, 持续的变干会导致温带大陆气候区NPP的显著下降(图9)。

有研究认为夏季季风的增加会导致碳汇增加^[59], 本文的结果同样反映了季风区的独特性, 热带—亚热带季风区NPP稳定性普遍高于温带季风区, 并且气温和降水的波动对热带—亚热带季风区NPP稳定性的影响很小(表7)。偏回归和多元回归结果表明, 相对于气温的波动, 降水的波动对温带季风区NPP稳定性的影响更大, 降水的波动会显著降低NPP稳定性, 并且RCP4.5情景下降水的稳定性比RCP8.5情景差, 导致RCP8.5情景下降水波动对NPP波动的解释度更高。这是因为温带季风区NPP波动对降雨波动的高度敏感性(图8b)以及东亚夏季季风异常导致的降水量波动较大(图7), 与张黎等的研究结果一致^[6]。

4.3 不足与展望

气候变化和人类活动的影响使生态系统结构和功能处于动态变化中, 人类活动影响主导的区域可能更广泛而深远^[31]; 但人类活动对NPP的影响复杂, 并认为人类活动增加了全球碳循环系统的不确定性^[60]。人类活动通过影响土地利用和土地覆盖来影响自然环境, 如耕地开垦、植树造林、刈割等, 尤其是草地放牧被认为是导致荒漠化乃至草地退化的主要因素^[61]。有研究通过估算潜在和现实生产力区分人类活动和气候变化影响的碳固定水平^[62-63]。此外, 二氧化碳和氮沉降等环境变化也是影响NPP的重要因素^[64]。研究表明氮沉降的正效应与较强碳增汇潜力的幼龄林, 使中国亚热带陆地碳汇在全球碳汇中占

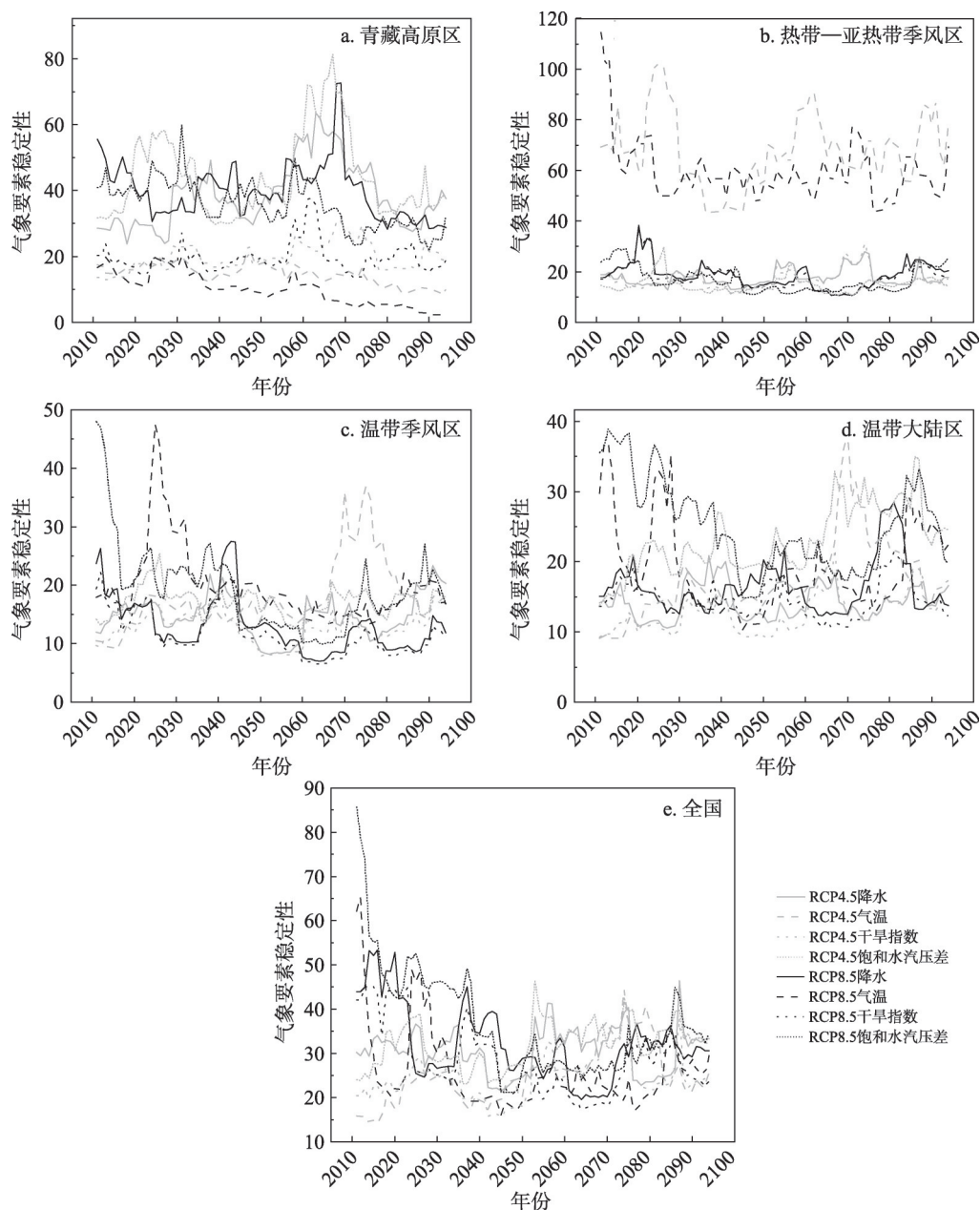


图7 两个气候情景下4个气候区及全国气象要素稳定性年际变化

Fig. 7 Interannual variability of meteorological factors' stability in the two climate scenarios in the four climate zones and nationally

有重要贡献^[65]；21世纪初中国氮沉降速率的增高致使NPP增加，超过了LUCC对氮沉降的间接影响^[66]。有研究认为CO₂增加还会抵消气候变化对NPP的消极影响^[67]，但若不做任何缓解措施，这种遏制气候变暖的作用可能会削弱^[68]。另外，在模型模拟的过程中应该考虑未来植被、土地利用及土地覆盖动态变化未来情景^[69]。如未来气候变化将导致植被带变化进而影响陆地碳循环^[70]；20世纪70年代实施的生态恢复工程，在全国碳汇中的贡献可能超过了一半^[63]，随着社会经济的发展，如生态恢复工程、城市化等政策的实施远

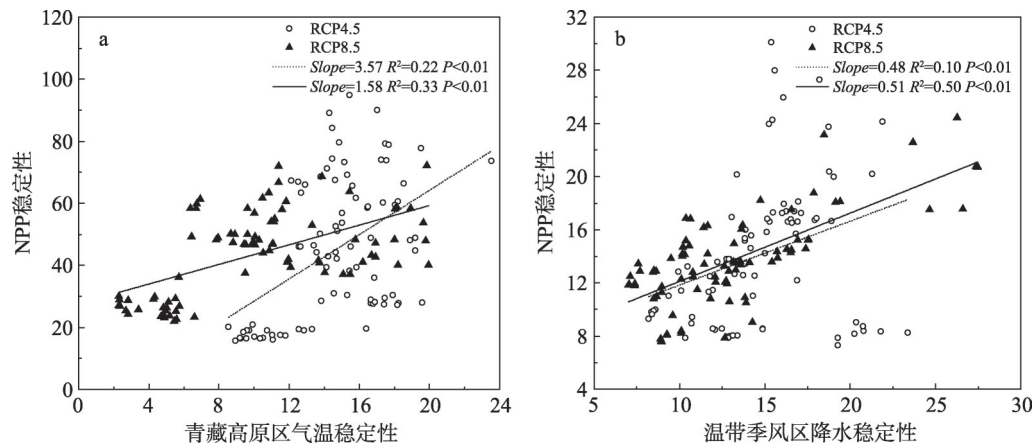
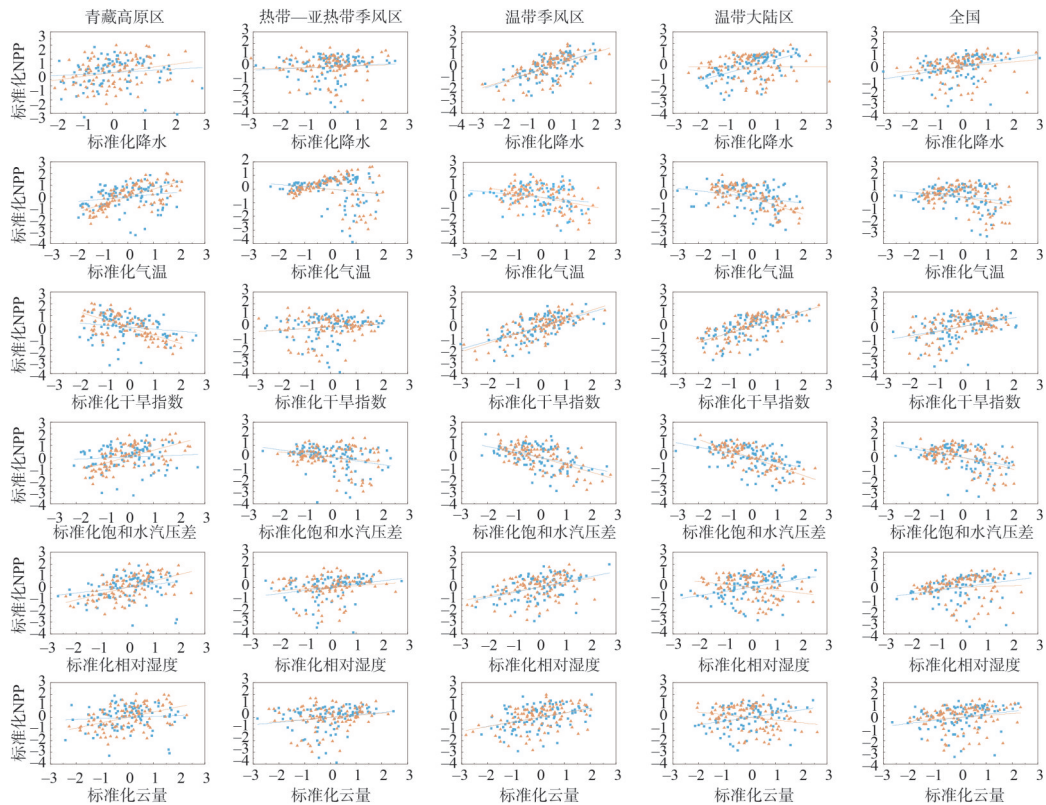


图8 部分气候区NPP稳定性与主要气候因子稳定性一元线性拟合结果

Fig. 8 Results of unary linear correlation of NPP stability and the stability of major climate factors in selected climatic zones



注：蓝色代表RCP4.5情景,橙色代表RCP8.5情景。

图9 NPP与气象因子的一元线性关系

Fig. 9 Unary linear correlation of NPP and meteorological factors

多于过去，因此这种影响还会不断扩大。本文考虑了气候变化对NPP的影响机制以及暖干化对NPP稳定性带来的不利影响。然而综合对二氧化碳施肥效应、氮沉降、动态植被、生态系统管理以及土地利用与覆被变化等方面的考虑是未来生态系统模型改进的发展方向。

5 结论

本文通过发展的生态系统过程模型,模拟了不同未来气候情景下的NPP大小、年际变化趋势及稳定性以及气候影响机制。结果表明,中国植被NPP在RCP4.5和RCP8.5两种气候情景下的总量分别为 4.41 Pg C a^{-1} 和 4.40 Pg C a^{-1} ,季风区分别贡献了全国NPP总量的72.8%(RCP4.5)和73.4%(RCP8.5)。两种气候情景下NPP均表现为前期增加,后期降低的年际变化趋势。两气候情景下每11年滑动窗口计算的NPP稳定性表现出明显降低的趋势,并且RCP8.5情景下NPP的稳定性降低更多。分析影响NPP的气象因子以及表征干旱的指标,发现AI显著下降($p < 0.01$),全国陆地趋向暖干化,导致了全国NPP在2050年代之后出现下降趋势,高排放情景下干旱导致更为严重的下降。不同气候区对气候变化存在不同的响应,暖干化对温带大陆气候区的负面影响最显著。影响NPP稳定性的气候因子在不同气候区也有差别,温带季风气候区NPP稳定性主要是降水波动主导,青藏高原区的NPP稳定性主要是气温波动主导;NPP下降转折点的出现表现为NPP稳定性发生剧烈变化。未来研究需进一步考虑氮沉降、土地覆被与利用变化等人类活动等因素。本文研究气候变化情景下植被生产力的变化,可为考虑区域差异开展诸如生态保护与修复及双碳行动等减缓和适应气候变化的举措等提供科学参考。

参考文献(References)

- [1] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, et al. 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.
- [2] Hao L, Wang S, Cui X P, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation net primary productivity and its response to climate change in Inner Mongolia from 2002 to 2019. *Sustainability*, 2021, 13(23): 13310. DOI: 10.3390/su132313310.
- [3] Alo C A, Wang G L. Potential future changes of the terrestrial ecosystem based on climate projections by eight general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G1): G01004. DOI: 10.1029/2007JG000528.
- [4] Cao M K, Prince S D, Small J, et al. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000. *Ecosystems*, 2004, 7(3): 233-242.
- [5] Zhao Y J, Lu X M, Wang Y, et al. How precipitation legacies affect broad-scale patterns of primary productivity: Evidence from the Inner Mongolia grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108954. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.108954.
- [6] Zhang L, Ren X L, Wang J B, et al. Interannual variability of terrestrial net ecosystem productivity over China: Regional contributions and climate attribution. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(1): 014003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaec95.
- [7] Ostberg S, Schaphoff S, Lucht W, et al. Three centuries of dual pressure from land use and climate change on the biosphere. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(4): 044011. DOI: 10.1088/1748-9326/10/4/044011.
- [8] Liu Yan. Analysis of global climate change in the next one hundred years. *Geological Survey of China*, 2021, 8(3): 1-11. [刘焰. 未来百年全球气候变化分析. *中国地质调查*, 2021, 8(3): 1-11.]
- [9] Lawler J J. Climate change adaptation strategies for resource management and conservation planning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162: 79-98.
- [10] Piao S L, Ito A, Li S G, et al. The carbon budget of terrestrial ecosystems in East Asia over the last two decades. *Biogeosciences*, 2012, 9(9): 3571-3586.
- [11] Hu G Z, Gao Q Z, Ganjurjav H, et al. The divergent impact of phenology change on the productivity of alpine grassland due to different timing of drought on the Tibetan Plateau. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(14): 4033-4041.
- [12] Li J G, Yu S Y, Liu L L. Determining the dominant factors determining the variability of terrestrial ecosystem productivity in China during the last two decades. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(15): 2131-2145.
- [13] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-

1013.

- [14] Piao Shilong, He Yue, Wang Xuhui, et al. Estimation of carbon sinks in terrestrial ecosystems in China: Methodology, progress and prospects. *Scientia Sinica: Terrae*, 2022, 52(6): 1010-1020. [朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(6): 1010-1020.]
- [15] Fu Bojie. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932. [傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923-1932.]
- [16] Peng Shushi, Piao Shilong, Yu Jiahuo, et al. A review of geographical system models. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 109-120. [彭书时, 朴世龙, 于家焯, 等. 地理系统模型研究进展. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 109-120.]
- [17] Xu Yuqing, Xiao Fengjin, Yu Li. Review of spatio-temporal distribution of net primary productivity in forest ecosystem and its responses to climate change in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4710-4723. [徐雨晴, 肖凤劲, 於琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述. *生态学报*, 2020, 40(14): 4710-4723.]
- [18] Sun Qingling, Li Baolin, Li Fei, et al. Review on the estimation of net primary productivity of vegetation in the Three-River Headwater Region, China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1596-1612. [孙庆龄, 李宝林, 李飞, 等. 三江源植被净初级生产力估算研究进展. *地理学报*, 2016, 71(9): 1596-1612.]
- [19] Gu Fengxue, Tao Bo, Wen Xuefa, et al. Modeling Long-term changes in carbon fluxes and storage in a subtropical coniferous plantation based on CEVSA2 model. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6598-6605. [顾峰雪, 陶波, 温学发, 等. 基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟. *生态学报*, 2010, 30(23): 6598-6605.]
- [20] Gao Zhiqiang, Liu Jiyuan. A comparative study of vegetation net productivity in China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(3): 317-326. [高志强, 刘纪远. 中国植被净生产力的比较研究. *科学通报*, 2008, 53(3): 317-326.]
- [21] Cao Mingkui, Tao Bo, Li Kerang, et al. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2003, 45(5): 552-560. [曹明奎, 陶波, 李克让, 等. 1981—2000 年中国陆地生态系统碳通量的年际变化. *植物学报*, 2003, 45(5): 552-560.]
- [22] Law B E, Turner D, Campbell J, et al. Disturbance and climate effects on carbon stocks and fluxes across Western Oregon USA. *Global Change Biology*, 2004, 10(9): 1429-1444.
- [23] 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. *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.]
- [24] Zhao Yumin, Niu Shukui, Wang Junbang, et al. Light use efficiency of vegetation: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1471-1477. [赵育民, 牛树奎, 王军邦, 等. 植被光能利用率研究进展. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1471-1477.]
- [25] Dai Wujun, Jin Huiying, Zhang Yuhong, et al. Advances in plant phenology. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19): 6705-6719. [代武君, 金慧颖, 张玉红, 等. 植物物候学研究进展. *生态学报*, 2020, 40(19): 6705-6719.]
- [26] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 185-198.
- [27] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [28] Gu F X, Zhang Y D, Tao B, et al. Modeling the effects of nitrogen deposition on carbon budget in two temperate forests. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 139-148.
- [29] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, et al. Nitrogen deposition and its effect on carbon storage in Chinese forests during 1981-2010. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 171-179.
- [30] Li Min, Yao Wanqiang, Ren Xiaoli, et al. Estimation and analysis of net primary productivity of forest ecosystems in Shennongjia forestry district during 1981-2015. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(5): 749-757. [李敏, 姚顽强, 任小丽, 等. 1981—2015 年神农架林区森林生态系统净初级生产力估算. *环境科学研究*, 2019, 32(5): 749-757.]
- [31] Wang Junbang, Yang Yihan, Zuo Chan, et al. Impacts of human activities and climate change on gross primary productivity of the terrestrial ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7085-7099. [王军邦, 杨屹涵, 左婵, 等. 气候变化和人类活动对中国陆地生态系统总初级生产力的影响厘定研究. *生态学报*, 2021, 41(18): 7085-7099.]
- [32] Yang Yihan. Impacts of human activities and climate change on gross primary productivity of the terrestrial ecosystems in China since 2000 [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. [杨屹涵. 2000 年以来人类活动和气候变化对中国陆地生态系统总初级生产力的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.]

- [33] Zhang Lei, Wang Chunyan, Pan Xiaoduo. A review of future climate change based on regional climate models. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(5): 1440-1448. [张磊, 王春燕, 潘小多. 基于区域气候模式未来气候变化研究综述. *高原气象*, 2018, 37(5): 1440-1448.]
- [34] Yu L, Gu F X, Huang M, et al. Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on net primary productivity and carbon balance in China's terrestrial ecosystems. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2849. DOI: 10.3390/su12072849.
- [35] Chu Zheng, Guo Jianping, Zhao Junfang. Impacts of future climate change on agroclimatic resources in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1248-1260. [初征, 郭建平, 赵俊芳. 东北地区未来气候变化对农业气候资源的影响. *地理学报*, 2017, 72(9): 1248-1260.]
- [36] Zhang Xuezheng, Li Xiaxiang, Zhang Lijuan, et al. Multi-model ensemble projection of crop yield of India under RCP 8.5 climate change scenario during the 21st century. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2314-2328. [张学珍, 李侠祥, 张丽娟, 等. RCP 8.5 气候变化情景下 21 世纪印度粮食单产变化的多模式集合模拟. *地理学报*, 2019, 74(11): 2314-2328.]
- [37] Pan Xiaoduo, Zhang Lei. Future climate projection over Northwest China based on RegCM4.6 (2007-2099). National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2019. <https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpd.c.270120>. <https://cstr.cn/18406.11.Meteoro.tpd.c.270120>. [潘小多, 张磊. 基于 RegCM4.6 的中国西北未来气候预测(2007—2099). 国家青藏高原科学数据中心, 2019. <https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpd.c.270120>. <https://cstr.cn/18406.11.Meteoro.tpd.c.270120>.]
- [38] Pan X D, Zhang L, Huang C L. Future climate projection in Northwest China with RegCM4.6. *Earth and Space Science*, 2020, 7(2). DOI: 10.1029/2019EA000819.
- [39] Wu Bingfang, Yuan Quanzhi, Yan Changzhen, et al. Land cover change in China in the first decade of the 21st century. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4): 723-731. [吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. 第四纪研究, 2014, 34(4): 723-731.]
- [40] Zhang Lei, Wu Bingfang, Li Xiaosong, et al. Classification system of China land cover for carbon budget. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24): 7158-7166. [张磊, 吴炳方, 李晓松, 等. 基于碳收支的中国土地覆被分类系统. *生态学报*, 2014, 34(24): 7158-7166.]
- [41] Liu Jianwen, Guo Hu, Li Yaodong, et al. Fundamentals of the Calculation of Physical Quantities for Weather Analysis and Forecasting. Beijing: China Meteorological Press, 2005, 4-5. [刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础. 北京: 气象出版社, 2005, 4-5.]
- [42] Zhang Hongmei, Wu Bingfang, Yan Nana. Remote sensing estimates of vapor pressure deficit: An overview. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 559-568. [张红梅, 吴炳方, 闫娜娜. 饱和水汽压差的卫星遥感研究综述. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 559-568.]
- [43] Sun J, Zhou T C, Liu M, et al. Water and heat availability are drivers of the aboveground plant carbon accumulation rate in alpine grasslands on the Tibetan Plateau. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(1): 50-64.
- [44] Sun J, Zhou T C, Liu M, et al. Linkages of the dynamics of glaciers and lakes with the climate elements over the Tibetan Plateau. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 308-324.
- [45] Liu Liang, Guan Jingyun, Mu Chen, et al. Spatio-temporal characteristics of vegetation net primary productivity in the Ili River Basin from 2008 to 2018. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(12): 4861-4871. [刘亮, 关靖云, 穆晨, 等. 2008—2018 年伊犁河流域植被净初级生产力时空分异特征. *生态学报*, 2022, 42(12): 4861-4871.]
- [46] Piao Shilong, Fang Jingyun, Chen Anping. Seasonal dynamics of terrestrial net primary production in response to climate changes in China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2003, 45(3): 269-275. [朴世龙, 方精云, 陈安平. 我国不同季节陆地植被 NPP 对气候变化的响应. *植物学报*, 2003, 45(3): 269-275.]
- [47] Sun Qingling, Li Baolin, Xu Lili, et al. Analysis of NDVI change trend and its impact factors in the Three-River Headwater region from 2000 to 2013. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(12): 1707-1716. [孙庆龄, 李宝林, 许丽丽, 等. 2000—2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析. *地球信息科学学报*, 2016, 18(12): 1707-1716.]
- [48] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(11): 4309-4314.
- [49] Bernardino P N, De Keersmaecker W, Fensholt R, et al. Global-scale characterization of turning points in arid and semi-arid ecosystem functioning. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(7): 1230-1245.
- [50] Shi Hongxia, Wang Chenghai. Change of NPP at the mid-high latitude of Northern Hemisphere in the 21st century and its relation with climate factors. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 327-335. [施红霞, 王澄海. 21 世纪北半球中高纬度净初级生产力(NPP)变化及其与气候因子之间的关系. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 327-335.]

- [51] Li Bowen, Wang Qi, Lv Wangwang, et al. The effects of warming and added water on key processes of grassland carbon cycle. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1668-1679. [李博文, 王奇, 吕汪汪, 等. 增温增水对草地生态系统碳循环关键过程的影响. *生态学报*, 2021, 41(4): 1668-1679.]
- [52] Brando P M, Paolucci L, Ummenhofer C C, et al. Droughts, wildfires, and forest carbon cycling: A pantropical synthesis. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2019, 47: 555-581.
- [53] Zhao M S, Running S W. Response to Comments on "Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009". *Science*, 2011. 333(6046): 4.
- [54] Yin Yunhe, Ma Danyang, Deng Haoyu, et al. Climate change risk assessment of ecosystem productivity in the arid/humid transition zone of northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1605-1617. [尹云鹤, 马丹阳, 邓浩宇, 等. 中国北方干湿过渡区生态系统生产力的气候变化风险评估. *地理学报*, 2021, 76(7): 1605-1617.]
- [55] Zhang Y, Gentine P, Luo X Z, et al. Increasing sensitivity of dryland vegetation greenness to precipitation due to rising atmospheric CO₂. *Nature Communications*, 2022. 13(1): 4875. DOI: 10.1038/s41467-022-32631-3.
- [56] Zhao Dongsheng, Wu Shaohong, Yin Yunhe. Variation trends of natural vegetation net primary productivity in China under climate change scenario. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 897-904. [赵东升, 吴绍洪, 尹云鹤. 气候变化情景下中国自然植被净初级生产力分布. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 897-904.]
- [57] Yao Y T, Wang X H, Li Y, et al. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years. *Global Change Biology*, 2018, 24(1): 184-196.
- [58] Wu S H, Yin Y H, Zhao D S, et al. Impact of future climate change on terrestrial ecosystems in China. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(6): 866-873.
- [59] He H L, Wang S Q, Zhang L, et al. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [60] Zhang F G, Zeng B, Cao Y, et al. Human activities have markedly altered the pattern and trend of net primary production in the Ili River basin of Northwest China under current climate change. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(14): 2585-2595.
- [61] Hilker T, Natsagdorj E, Waring R H, et al. Satellite observed widespread decline in Mongolian grasslands largely due to overgrazing. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 418-428.
- [62] Chen Bingming, Zhao Shanchao, Sun Fenghua, et al. Impacts of climate change and human activities on the NPP of vertical natural belts in arid zones. *Chinese Journal of Ecology*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220620.1011.002.html>. [陈炳铭, 赵善超, 孙丰华, 等. 气候变化和人类活动对干旱区垂直自然带NPP的影响. *生态学杂志*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220620.1011.002.html>.]
- [63] Tu Haiyang, Jiapaer Guli, Yu Tao, et al. Analysis of spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of net primary productivity in terrestrial ecosystems of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1219-1233. [涂海洋, 古丽·加帕尔, 于涛, 等. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素. *生态学报*, 2023, 43(3): 1219-1233.]
- [64] Zhu K, Chiariello N R, Tobeck T, et al. Nonlinear, interacting responses to climate limit grassland production under global change. *PNAS*, 2016, 113(38): 10589-10594.
- [65] Yu G R, Chen Z, Piao S L, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *PNAS*, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [66] Lu X H, Jiang H, Zhang X Y, et al. Relationship between nitrogen deposition and LUCC and its impact on terrestrial ecosystem carbon budgets in China. *Science China-Earth Sciences*, 2016, 59(12): 2285-2294.
- [67] Shaw M R, Zavaleta E S, Chiariello N R, et al. Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO₂. *Science*, 2002, 298(5600): 1987-1990.
- [68] Shi H, Tian H Q, Pan N Q, et al. Saturation of global terrestrial carbon sink under a high warming scenario. *Global Biogeochemical Cycles*, 2021, 35(10): e2020GB006800. DOI: 10.1029/2020GB006800.
- [69] Xue P, Liu H Y, Zhang M Y, et al. Nonlinear characteristics of NPP based on ensemble empirical mode decomposition from 1982 to 2015: A case study of six coastal provinces in southeast China. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 15. DOI: 10.3390/rs14010015.
- [70] Pan N, Wang S, Wei F L, et al. Inconsistent changes in NPP and LAI determined from the parabolic LAI versus NPP relationship. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108134. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108134.

Stability of vegetation net primary productivity and climate impacts in China under future climate scenarios

CHEN Xing^{1,2}, WANG Junbang^{1,2}, HE Qifan³, WANG Chunyu⁴, YE Hui³

(1. National Ecosystem Science Data Center, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Tourism and Geography, Jiujiang University, Jiujiang 332005, Jiangxi, China; 4. Qilu Normal University, Jinan 205200, China)

Abstract: Chinese terrestrial ecosystems play an important role in the global carbon cycle. Net primary productivity (NPP) of vegetation is an important carbon cycle component. However, the report was seldom found until present on the trends and stability of NPP and its climate impact for Chinese terrestrial vegetations. In this study, through an ecosystem process model CEVSA-RS developed previously, the NPP was simulated for Chinese vegetation under climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 for the period from 2006 to 2099. The interannual trends and turning points were analyzed by segmented linear regression. The moving window method was applied to quantify the changes of NPP stability and the effects of temperature and precipitation. The results showed that: (1) the total NPP of vegetation in China will be respectively 4.41 Pg C a^{-1} and 4.40 Pg C a^{-1} under two climate scenarios. The temperate and tropical-subtropical monsoon zones together contribute 72.8% (RCP4.5) and 73.4% (RCP8.5) in the national total NPP. (2) NPP will have an increasing and then a decreasing trend with the turning points respectively in 2062 and 2055 under the two climate scenarios. Specifically, NPP will increase significantly ($p < 0.01$) by the rates of $5.3 \text{ g C m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$ and $6.5 \text{ g C m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$ before the turning points, and then significantly accelerate a decrease by the rate of 4.28 and 2.57 times higher than those before turning points, respectively, for the two scenarios. (3) The NPP stability will significantly ($p < 0.01$) decrease by the rates of -2.9% and -4.3% every 11 years under the two scenarios respectively. The NPP stability after turning year will decrease to 68.33% (RCP4.5) and 54.57% (RCP8.5) of the previous turning year, respectively. (4) In the future, the temperature will be significant warmer by the rates of $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ per decade under both of the scenarios, while precipitation will change insignificantly under RCP4.5 scenario but will be wetter by the rate of 2.9 mm per decade under the RCP8.5 scenario. Therefore, the drought indices, calculated from temperature and precipitation, will decrease significantly ($p < 0.01$) by the rates of -0.5 and -1.2 per decade under the two scenarios and the future climate will be warmer and drier. Responding to the future climate change, NPP will have a downward trend after 2055 over Chinese terrestrial ecosystems due to drought under the RCP8.5 scenario. This study reveals that in the future more instable warm and dry climate will cause a declining and instable NPP over the terrestrial ecosystems, which will probably result in some ecological and environmental problems, such as decreasing ecosystem services. Further, this study indicates that the policies and measures, such as carbon neutrality by 2050 implemented in China, are essential to mitigate and adapt climate change.

Keywords: net primary productivity (NPP); CEVSA-RS model; future climate scenarios; stability