

基于植被动态模式预估中国植被净初级生产力变化格局

马忠学^{1,2}, 崔惠娟^{1,2}, 葛全胜^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文选用部门间影响模式比较计划 (ISI-MIP) 提供的 6 个植被动态模式数据, 对比遥感反演值计算了各模式在中国不同植被区的拟合优度, 评估了模式的适用性; 并提出了以拟合优度为权重的区域年均净初级生产力 (NPP) 算法, 有效解决了已有研究由于数据和方法的不同而对中国 NPP 估算效果较差的问题。结合两种浓度路径下 (RCP2.6 和 RCP6.0) 的模式估算结果, 评估了未来 30 年中国 NPP 的变化格局。结果表明: 单个模式数据对中国大部分区域 NPP 的拟合效果较差 ($R^2 < 0.4$), 所计算的中国平均 NPP 整体偏高 33%~97%, 但能较为准确地反映空间上从东南向西北递减的趋势。通过加权合成的新序列整体拟合优度为 0.86, 在单一植被区的拟合优度也基本大于 0.3, 能更好地反映未来 NPP 的变化格局。未来中国平均 NPP 仍将保持由东南向西北递减的分布, 中国均值呈波动增长状态, 在 2035 年达到 $8.8 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 2050 年达到 $9.7 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 左右。随着时间的推移, RCP2.6 路径下主要增长区将由南方地区向北偏移, 在华北地区增长变显著, 在西南、中南地区增速变慢, 显著增长的面积变小; 在 RCP6.0 路径下主要增长区将向东北、东南和西部地区退缩, 中东部地区增长变不显著。研究发现高浓度路径对 2016—2025 年间植被 NPP 的增长主要起促进作用, 但在 2035—2050 年间开始起抑制作用。同时, 高浓度路径下 NPP 的空间分布将变得更加极端, 特别是位于青藏高原西北部的高寒荒漠、温性荒漠及灌木半灌木荒漠将增长缓慢或不增长。

关键词: 净初级生产力; 部门间影响模式比较计划; 气候变化; 变化格局

DOI: 10.11821/dlxb202207017

1 引言

植被作为陆地生态系统的重要组成部分, 在维持全球气候稳定、降低温室气体浓度和维持碳平衡等方面发挥着重要作用^[1-3]。但随着全球变暖不断加剧, 极端天气、酸雨和大气污染等影响植被生长状况的事件频发, 中国植被的组成结构和空间格局正在遭受重大影响, 如气候变暖使植被的生长期提前或延长^[4]; 极端天气影响土地功能和状态, 从而引起土地退化等^[5]。同时, 气候模式预估的结果显示, 未来中国气候变暖的趋势将会进一步加剧, 可能引发地表温度升高、暴雨天气增多、干旱区范围扩大等一系

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2022-05-02

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23100401); 国家自然科学基金项目(41877454); 中国科学院青年创新促进会会员人才专项(2019053) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA23100401; National Natural Science Foundation of China, No. 41877454; Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences, No.2019053]

作者简介: 马忠学(1998-), 男, 博士生, 研究方向为复合极端事件的变化及影响。E-mail: mazx.20b@igsnr.ac.cn

通讯作者: 崔惠娟(1986-), 女, 副研究员, 主要研究方向为随机水文过程、水文预报和气候变化。

E-mail: cuihj@igsnr.ac.cn

列连锁反应^[6], 将会使得气候敏感区域植被退化更加严重^[7], 威胁社会经济的可持续发展 and 人类的生存环境。因此, 在全国尺度上探究植被对气候变化的响应, 预测未来增暖情景下植被的变化趋势和空间分布, 将为中国优化生态系统的组成和结构, 保护区域生物多样性与生态安全提供理论依据。

净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 是植被通过光合作用从大气中吸收的碳除去自身损耗之外的部分, 反映了植被吸收二氧化碳的能力, 是生态系统物质和能量转换研究的基本单位, 也是评估植被生长状况的重要指标^[8-9]。全国尺度上 NPP 的研究由于缺少长序列的定位观测数据, 基本都基于不同统计方法和模型的估算。已有研究表明中国 NPP 在空间分布上呈现“南高北低”, 由东南向西北递减的趋势^[10-12], 地带性变化规律与水、热状况的地带性规律相一致^[12]。然而, 由于选用的数据、估算方法和估算模型不同, 不同学者对 NPP 趋势变化的研究得出了不一致甚至完全相反的结论。部分基于遥感碳模型 (CASA) 的研究认为 1982 年以来中国主要植被类型的净初级生产力都具有逐渐上升的年际趋势^[12-14], 其中高寒植被、常绿阔叶林、常绿针叶林的增加幅度比其他自然植被类型的要大^[13]。也有部分研究使用 LPJ 全球植被动态模式或气候生产力模型后, 认为中国植被 NPP 呈波动下降趋势^[10-11], 在东部 NPP 值相对较高的地区以减少为主, 在西部 NPP 值相对较低的地区以增加趋势为主^[10]。而卢玲等^[15]利用碳通量估算模型 C-FIX 得到的结果则认为中国西部地区 NPP 正在迅速下降。同时, 基于 CASA 模型和 CENTURY 生物地球化学循环模型分析的中国 NPP 对气候要素的响应也差异较大, 前者分析的结果表明中国除干旱与半干旱地区受降水主导外, 绝大部分区域 NPP 变化受气温影响^[14]; 而后者则认为植被 NPP 年际变异对温度的响应程度低于对降水的响应程度, 植被 NPP 的响应情况近似于单独降水变化时对植被 NPP 产生的影响^[16]。因此, 数据和模型的差异使得已有研究在全国植被 NPP 的变化上存在争议。

已有的 NPP 估算数据中, 基于遥感影像数据生成的 NPP 序列和基于植被动态模式的序列使用最为广泛。前者能有效捕捉植被动态的时空变化^[17], 是目前较为准确的反映植被生长状况的方法。但受限于卫星观测数据的序列长度, 遥感反演的 NPP 数据只能反映过去较短时间内的植被变化。植被动态模式数据耦合了植被动态、生物地理和生物地球化学过程, 可以模拟依赖于生理和生态过程的 NPP 长期动态变化, 能更全面地反映生态系统从日尺度到年际尺度对气候变化的响应^[18], 并对未来情景下 NPP 的变化趋势做出预测。但由于植被动态模型一般只在植被组成较为单一的局地尺度准确性较好, 因此目前利用植被动态模式数据对全国 NPP 变化预测的研究较少。如尹云鹤等^[19]利用 LPJ 模式对 NPP 的研究主要聚焦在中国北方干湿过渡区。同时, 少有的几项全国尺度上的应用都着眼于对单一模式的不断改进, 难以进一步完善模式在构建过程中简化和忽略的因素。如赵东升等^[10]通过对中国不同植被区 LPJ 模式因子的改进而得到的数据和其文中基于 MODIS 遥感反演数据的空间分布差异较大, 对海南、云南等地未来 NPP 变化幅度的预测也和刘少军等^[20]的结果有所不同。因此, 通过对比多个植被动态模式数据在各植被地带对遥感反演数据的模拟优度, 将多模式数据以拟合优度为权重加权合成新的兼具各模式优势的 NPP 数据将是一种提高模式数据的适用范围、增加数据准确度的新方法。

部门间影响模式比较计划 (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISIMIP) 提供了一个多模式数据比较分析的平台, 为遴选和结合多个植被动态模式数据预估未来给出了数据支撑。该计划选用了多种全球植被动态模式, 在共同的网格气候数据集驱动下, 模拟了未来不同 RCPs 路径和社会经济人口情景下全球水、生态、森林、农业等部门的变化。在生态领域, ISIMIP 采用了 CARAIB、ORCHIDEE、DLEM 等 10 个模

型估算了全球植被NPP, 不同模式在对碳限制、植被动态和热应激等因素的考虑上互有侧重。其中, LPJML、LPJ-GUESS、DLEM、VISIT、ORCHIDEE和CLM4.5等植被动态模式的数据在中国陆表区域已有使用^[21-25], 整体表现较好。

为了更为准确地预估未来30 a中国净初级生产力变化格局, 本文选取了基于遥感影像数据生成的NPP序列为验证, 比较了6个植被动态模式数据在中国各植被区域的拟合优度(R^2); 在此基础上, 以拟合优度为权重, 生成了综合6个模式的新NPP数据, 分析了2035年之前及2035—2050年间两种浓度路径下中国NPP的变化趋势; 并讨论了新NPP序列对气候因子的响应情况。本文可为中国到2035年实现生态环境质量根本好转, 2050年全面建成美丽中国的生态文明建设愿景提供科学指导。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 NPP遥感反演数据 本文使用了陈鹏飞等^[26]研发的1985—2015年NPP遥感反演数据(<http://www.geodoi.ac.cn>)验证和校准模式数据。该数据集以1985—2015年中国陆地逐月气象数据、全国土壤质地数据和基于MODIS和AVHRR遥感影像的土地覆被和植被指数数据为输入, 通过Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) 模式获得了中国陆地1 km栅格下的植被NPP。该遥感产品估测的1985—2015年全国陆地生态系统年总NPP在1.69~2.16 Pg C/a之间^[26], 虽然相较于其余基于遥感影像数据的产品略低, 但在几个典型植被类型区内较实测值而言在正常波动范围内, 且对植被类型间的相对大小关系描述较好, 时间尺度长、空间、时间分辨率也相对较高, 在已有的应用中取得了良好的结果^[27-28]。

本文根据资源环境科学与数据中心的1980年1:100万植被区划图(<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=133>), 将中国划分为了8个一级植被区域和34个二级植被亚区域或地带, 一级植被区分别为寒温带针叶林区域, 暖温带落叶阔叶林区域, 青藏高原高寒植被区域, 热带季风雨林、雨林区域, 温带草原区域, 温带荒漠区, 温带针叶阔叶混交林和亚热带常绿阔叶林区域, 所处位置及对应名称分别见图1和表1。

根据划分出的植被地带, 通过栅格平均计算了每个植被地带内上述遥感反演数据的多年均值, 可以看出该均值呈现出由东南向西北递减的整体趋势, 在中国南部热带季风雨林区最大($18.6 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$), 由此向北逐植被地带递减, 在青藏高原东南—秦岭—淮河以南大部分区域 $> 8.9 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 在内蒙古自治区西部经河西走廊西部以及藏北高原以北的大部分区域 $< 5.5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 在中国青藏高原西北部高寒荒漠地带最小($1.2 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$)。

2.1.2 植被动态模式数据 ISIMIP2b协议在统一的气候驱动集和 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格下用多个植被模式估算了未来RCPs路径下全球植被NPP数据。本文选取了其中6个在中国陆表区域已有应用的模式的输出数据进行验证和分析(<https://www.isimip.org/impactmodels/>)。其中, ORCHIDEE陆面过程模式在全球范围内被广泛使用和二次开发, 该模式综合考虑了光合作用、土壤水分、动态植被等自然过程和人为过程, 只忽视了氮限制的影响(表2)。DLEM模式耦合了陆地生态系统中的碳、养分和水循环, 用于估计多个尺度的水文和生物化学通量^[29], 但缺少对动态植被、植被生根深度差异及能量平衡的考虑。LPJ-GUESS模式结合了动态植被与生态系统生物地球化学循环, 是一种应用于生物群落的动态全球植被模式^[30], 没有考虑系统内的能量平衡、多年冻土及土—水—热耦合的影响。CIM模式是由美国国家大气中心发布的用作陆面过程模拟的地球系统模式, 当前版本有进一步考虑土壤的热学和水文特征^[31], 但没有考虑动态植被、热应激和多年冻土。

表2 9类影响因素在6个模式中的差异

Tab. 2 Differences in consideration of 9 types of influencing factors by six models

	动态植被	氮限制	热应激	生根深度	多年冻土	能量平衡	土—水—热耦合	潜热	显热
ORCHIDEE	是	否	是	是	是	是	是	是	是
DLEM	否	是	是	否	是	否	是	是	否
LPJ-GUESS	是	是	是	是	否	否	否	否	否
VISIT	否	否	是	是	否	否	否	是	否
LPJML	是	否	是	否	否	是	是	是	是
CLM4.5	否	是	否	是	否	是	是	是	是

LPJML 模式模拟了以多种植物功能类型、作物功能类型和生物量功能类型为代表的潜在自然植被、农业及人工林，缺少对氮限制、生根深度和多年冻土的考虑。Visit 模式在生态系统净初级生产力的模拟上主要关心植被的辐射和水文条件^[32]，考虑的影响因素在6个模式中最少。

本文以1985—2015年为验证期，以2016—2050年为未来情景。但由于ISI-MIP第二阶段的试验以2006为未来路径的起始年份，因此本文取1985—2005年间的历史数据及2006—2015年间两种路径下模式数据均值与相应的遥感反演数据做验证。

2.1.3 气象数据 本文考虑的气象要素包括降水、相对湿度、日照时数、平均气温及风速，均来源于中国气象数据网的地面气候标准值月值数据集 (<http://data.cma.cn/>)。该数据集由中国589个基本、基准地面气象观测站的观测结果整编而得。本文选取了其中验证期1985—2015年内五类气象因子的观测值，通过插值后转换为栅格数据，计算了每个植被地带内各栅格的平均值，以分析NPP对气象因子的响应。

2.2 研究方法

2.2.1 模式修正与新数据合成 由于基于植被动态模式的数据在较大的空间尺度下准确性较差，存在整体的偏离，因此使用遥感反演数据对各二级植被区内6个植被动态模式数据的均值和方差进行了校准，其计算公式如下：

$$N_{i,t}^* = \left[N_{i,t}^m + \left(\hat{M}_{N_i}^r - \hat{M}_{N_i}^m \right) \right] \times \frac{\widehat{sd}_{N_i}^r}{\widehat{sd}_{N_i}^m} \tag{1}$$

式中： $N_{i,t}^*$ 为修正后第*i*个植被区在*t*年的NPP模式值； $N_{i,t}^m$ 为修正前第*i*个植被区在*t*年的NPP模式值； $\hat{M}_{N_i}^r$ 为验证期内第*i*个植被区NPP遥感反演值的均值； $\hat{M}_{N_i}^m$ 为修正前验证期内第*i*个植被区NPP模式值的均值； $\widehat{sd}_{N_i}^r$ 为验证期内第*i*个植被区NPP遥感反演值的标准差； $\widehat{sd}_{N_i}^m$ 为修正前验证期内第*i*个植被区NPP模式值的标准差。

以各植被地带内遥感反演值与修正后模式值的拟合优度 R^2 为权重，将6个生态影响模式数据进行加权平均后，合成了新的泛用性更强、对遥感反演数据的变异性解释度更高的新NPP序列：

$$NPP_i^* = \sum_{j=1}^n \frac{N_{j,i}^* R_{j,i}^2}{\sum R_i^2} \tag{2}$$

式中： NPP_i^* 为第*i*个植被地带新合成的NPP值；*n*为模式个数，此处为6； $N_{j,i}^*$ 为第*j*个模式在*i*处修正后的NPP模式值； $R_{j,i}^2$ 为第*j*个模式在*i*处与遥感反演值的拟合优度，为数

据回归平方和与总平方和的比值,代表了模式值的变异性中可由遥感反演值解释的部分所占的比例,该值越接近1,模式的拟合效果越好。

2.2.2 未来趋势检验 利用 Mann-Kendall 非参数检验方法评估新合成的 NPP 序列在未来是否存在单调性。该方法对样本的分布没有要求,受少数异常值的干扰小,所得结果较为可靠。其计算公式如下:

$$S = \sum_{a=1}^{T-1} \sum_{b=a+1}^T \text{Sgn}(N_b - N_a) \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: N_a 、 N_b 为第 a 、 b 年的 NPP 值; $\text{Sgn}(N_b - N_a)$ 为指示函数,依据 $N_b - N_a$ 的正负号取值为 1、0 或 -1; 统计量 Z 的正负表示 NPP 序列的增减性, Z 的绝对值在大于 1.28、1.64、2.32 时,分别表示通过了置信度 90%、95% 和 99% 的显著性检验。

2.2.3 相关分析 以验证期内五类气象因子与遥感反演值、新模式值的皮尔逊相关系数 r 分析各植被地带内气象因子对 NPP 变化的影响,以验证新模式序列的可靠性,第 i 个植被地带相关系数 r_i 计算公式如下:

$$r_i(X, \text{NPP}^*) = \frac{\text{Cov}(X, \text{NPP}^*)}{\sqrt{\text{Var}[X]\text{Var}[\text{NPP}^*]}} \quad (5)$$

式中: $\text{Cov}(X, \text{NPP}^*)$ 为气象因子与新 NPP 序列的协方差; $\text{Var}[X]$ 为气象因子的方差; $\text{Var}[\text{NPP}^*]$ 为新 NPP 序列的方差。

采用假设检验的方法,假设气象因子与 NPP 不存在相关性的前提下,计算两变量不存在相关性的概率值 (P),以双尾 P 值检验相关系数 r 的显著性。 $p < 0.05$ 和 $0.05 < p < 0.1$ 分别表示气象要素与 NPP 存在相关性的概率大于 95% 及介于 90% 与 95% 之间。 P 值计算如下:

$$P = 2 \left[1 - \text{tcdf} \left(r \sqrt{\frac{T-2}{1-r^2}}, T-2 \right) \right] \quad (6)$$

式中: r 为 NPP 与气象因子间的相关系数; T 为序列长度,此处为 31 a; tcdf 表示自由度为 $T-2$ 的 t 分布累积分布函数值。

3 结果分析

3.1 模式结果与遥感反演值对比

模拟的中国陆表多年平均 NPP 相比遥感反演值整体偏高,其中 DLEM ($8.5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$) 模式和遥感反演值 ($6.4 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$) 最为接近, VISIT ($12.6 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$) 模式和遥感反演值相差最大(表 3)。具体到各植被区域,偏高的部分主要来源于寒温带针叶林、温带针阔叶混交林、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林和热带季雨林、雨林等 5 个位于中国东部 NPP 均值较高的区域,而位于中国西北部的内蒙古高原的温带草原、温带荒漠和青藏高原高寒植被区中遥感反演均值和模式均值相差不大。另外,模式对各植被区域 NPP 的

表3 1985—2015年各植被区NPP多年均值($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$)
Tab. 3 Multi-year mean value of NPP in each vegetation area from 1985 to 2015 ($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$)

	寒温带 针叶林	温带针阔 叶混交林	暖温带落 叶阔叶林	亚热带常 绿阔叶林	热带季雨 林、雨林	温带 草原	温带 荒漠	青藏 高寒区	全国
DLEM	12.5	12.5	13.9	15.9	21.8	8.2	1.1	2.7	8.5
ORCHIDEE	14.6	18.9	15.3	18.3	23.8	10.9	1.2	5.8	10.4
VISIT	12.0	19.7	15.8	25.4	33.4	4.2	1.5	13.6	12.6
LPJ-GUESS	17.4	18.8	15.1	15.4	19.9	13.3	4.0	2.8	10.5
LPJML	15.4	16.8	15.7	19.6	23.0	10.8	2.5	9.6	11.7
CLM4.5	12.4	18.0	9.8	18.2	21.9	6.6	0.7	4.8	8.8
遥感反演值	8.5	9.5	7.7	9.9	12.5	6.2	2.4	3.4	6.4

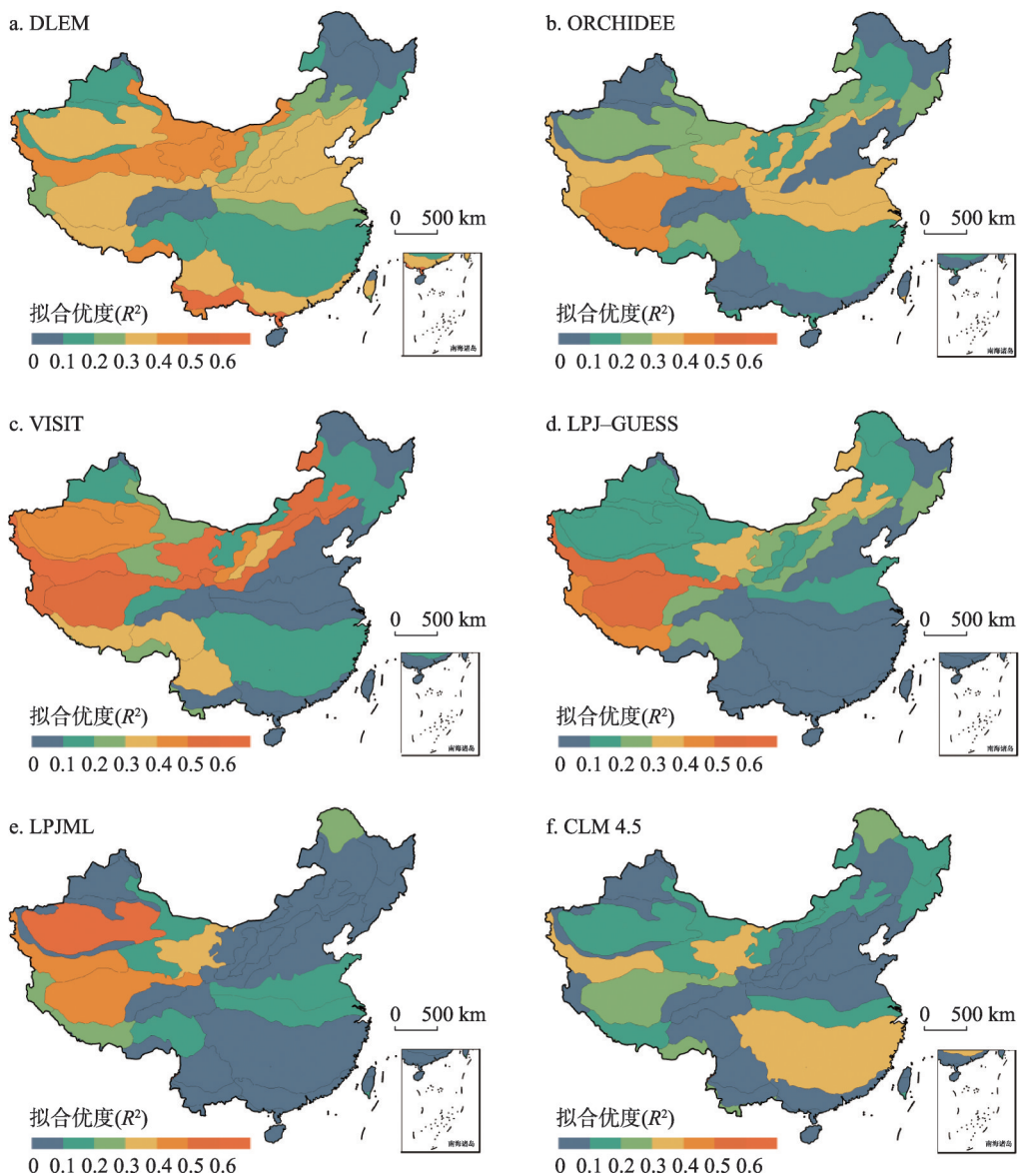
相对大小关系与遥感反演值得出的结果一致，即热带季雨林、雨林最大，温带荒漠区域最小。

根据1985—2015年间各植被带内修正后的模式值与遥感反演值均值的拟合优度（图2），可知单个模式对全国大部分区域NPP的拟合效果较差（ $R^2 < 0.4$ ），但不同的模式在特定的植被地带有较强的适用性，整体上6个模式适用性较好的区域涵盖了中国大部分植被带。其中，以DLEM模式适用性较好的范围最广，拟合优度在中国东南部的南亚热带季风常绿阔叶林和北热带半常绿季雨林 > 0.6 ，在中国青藏高原西北部的高寒荒漠、内蒙古高原温带半灌木和灌木为主的半荒漠亚区 > 0.4 ，在其余大部分植被地带也在0.3以上。相比于DLEM模式，ORCHIDEE模式拟合优度较大的区域开始向内收缩，主要在青藏高原西南部的温性和高寒草原适用性较好（ $R^2 > 0.4$ ）。VISIT模式尤其适用于中国西北地区 and 青藏高原地区，拟合优度在这里的高寒荒漠地带和温带灌木半灌木荒漠地带 > 0.6 ，在其余多个植被地带拟合优度 > 0.5 。LPJ-GUESS模式适用性较好的范围向青藏高原西南部和内蒙古高原进行了进一步缩小，拟合优度基本均小于VISIT模式；LPJML模式主要适用于塔里木盆地附近的暖温带灌木半灌木裸露地，在此处拟合优度为0.61。CLM4.5模式整体拟合效果最差，各植被带 R^2 基本都 < 0.4 。

3.2 验证新NPP序列

以模式数据与遥感反演数据的拟合优度 R^2 为权重，对修正后的6个模式进行加权平均后得到了新的模拟序列。该序列同样表现出了由东南向西北递减，基本以等降水量线为界的梯级分布，这与梁伟等^[14]利用CASA模式得出的结果基本一致（图3a）。通过与遥感反演数据的对比，发现新序列适用性较好的范围远优于单个模式数据，其在全国尺度上的整体拟合优度 R^2 为0.86；在植被地带层面上结合了6个模式的模拟优势，在中国青藏高原西南部、塔里木盆地、内蒙古高原和东南热带地区的大部分植被地带拟合优度大于0.5，在其余大部分植被地带大于0.3（图3b），可以代替单个模式更好地估算未来NPP的变化格局。

然而，虽然新序列较好地描述了验证期内的空间分布，但由于合成方式和模式数据本身的不足，仍存在较大的不确定性。这一方面是因为新序列在合成过程中综合了所有6个植被动态模式的数据，因此单个模式在特定植被地带的强适用性被其余模式进行了削弱，比如高寒荒漠地带VISIT模式数据的拟合优度为0.66，但合成后新序列的拟合优度降为了0.61。另一方面，模式数据本身在估算过程中没有考虑部分影响因素，尤其是人类活动的影响，使得所有的模式数据在部分人为干预强烈的地区拟合优度极低。特别



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1585号标准地图制作,底图边界无修改。

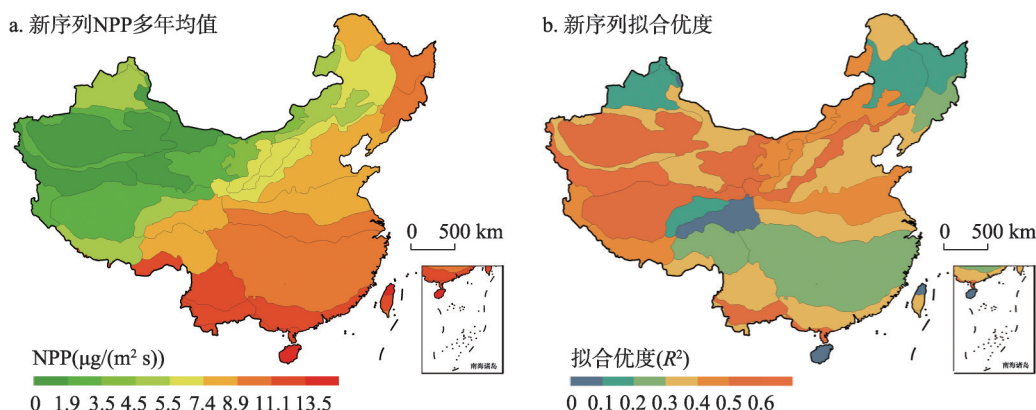
图2 修正后各模式值与遥感反演值的拟合优度

Fig. 2 The goodness of fit between the corrected model values and the remote sensing inversion values

是青藏高原西南部的高寒草甸、高寒灌丛草甸地区，在6个模式数据中拟合优度都小于0.2，因此在合成后的新序列中和周围高寒草原、温性草原等地带0.4以上的拟合优度形成了较为鲜明的对比（图3b）。这很大程度上考虑是该区域在放牧管理之前存在的长期重度放牧破坏了脆弱且难以修复的生态系统，使得牧民定居点出现的放射性逆向演替^[33]和水土流失^[34]所致。

3.3 未来趋势

两种路径下2016—2050年中国平均NPP都呈波动上升趋势，RCP2.6路径下在2025年以前增长迅速，之后逐渐变缓；RCP6.0路径下则一直呈现近似线性的稳定增长趋势。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1585号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 新NPP序列的多年均值及拟合优度

Fig. 3 The multi-year mean values and goodness of fit for the new NPP sequence

2035年和2050年RCP2.6路径下平均NPP分别达到了 $8.8 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 和 $9.7 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$, RCP6.0路径下节点平均NPP相对于RCP2.6路径略大, 离散程度更高, 但由于两个时间节点前后存在较大的波动而差异不明显(图4)。

从空间分布来看, 未来中国NPP在两种浓度路径下仍将保持从东南向西北递减的整体趋势。在RCP2.6路径下, 2016—2035年的平均NPP最大值位于南热带季雨林、湿润雨林地带(VAii), 达到了 $17.8 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 从南热带向北、向西逐植被地带递减, 在西北塔里木盆地附近的暖温带灌木半灌木裸露地(VIIBiib)最小, 为 $2.8 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$ (图5a); 2035—2050年相较于前20年中国东南、华北地区的大部分亚热带常绿阔叶林和暖温带落叶阔叶林的平均NPP整体变大, 平均NPP最大的南热带季雨林、湿润雨林增加为了 $1.83 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 西北地区除暖温带灌木、半灌木荒漠外其余地区变化幅度较小(图5c)。与RCP2.6路径相似, RCP6.0路径下两个时间段内平均NPP的整体分布及最值所在区域保持不变, 2035—2050年平均NPP相较于2016—2035年仍然整体较高, 尤其是内蒙古高原东北部、东北平原及长白山脉附近增加明显(图5b、5d)这和部分研究得出的气候变暖使植被生长活动呈显著上升趋势的结论一致^[35]。

两种浓度路径下均值的对比上, RCP6.0路径下植被NPP的均值将变得更加极端, 即有更多中东部地区的高值地带平均NPP将在RCP6.0路径下大于RCP2.6路径, 更多西北低值区植被地带平均NPP将在RCP6.0路径下小于RCP2.6路径。这种现象在NPP均值处于中间大小(RCP2.6路径下介于 $3.8 \sim 5.6 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 之间)的青藏高原荒漠亚区和内蒙古高原、东北平原的草原亚区尤为显著。在2016—2035年间, RCP6.0路径下的高寒荒漠地带平均NPP小于RCP2.6路径, 而温带灌木乔草半荒漠亚区平均NPP则大于RCP2.6路径(图5a、5b); 到了2035—2050年, RCP6.0路径下高寒荒漠、温性荒漠、以及暖温带灌木半灌木荒漠亚区都小于RCP2.6路径, 而温带灌木乔草半荒漠亚区、温带北部典型草原和草甸草原、温带南部森林(草甸)草原平均NPP则大于RCP2.6路径(图5c、5d)。这可能是主导中国中东部地区和西北地区NPP变化的气象要素不同所致。

从变化速率来看, 随着时间的推移, 中国植被NPP的主要增长区和增长速率在两种路径下都会有一定程度的收缩和减小。在RCP2.6路径下, 2016—2035年间平均NPP在秦

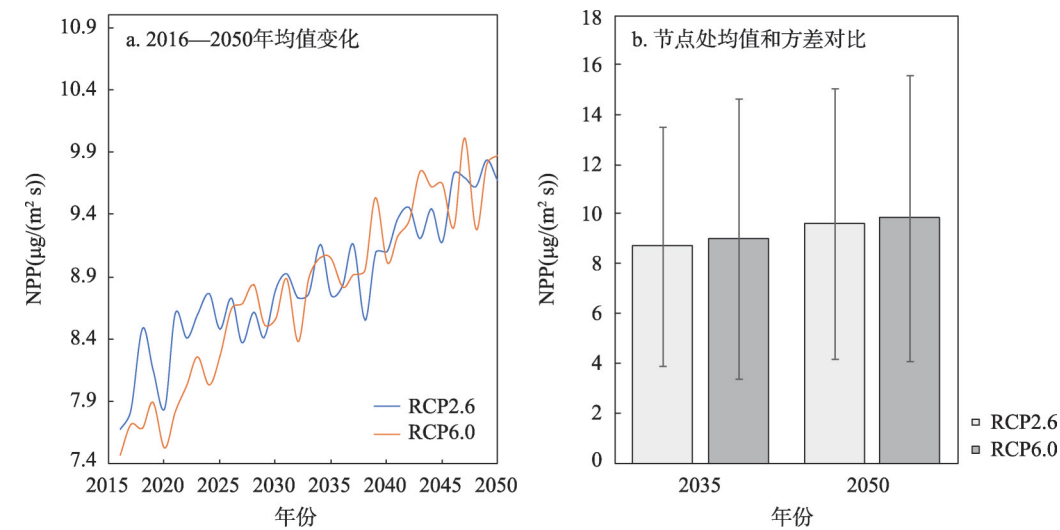
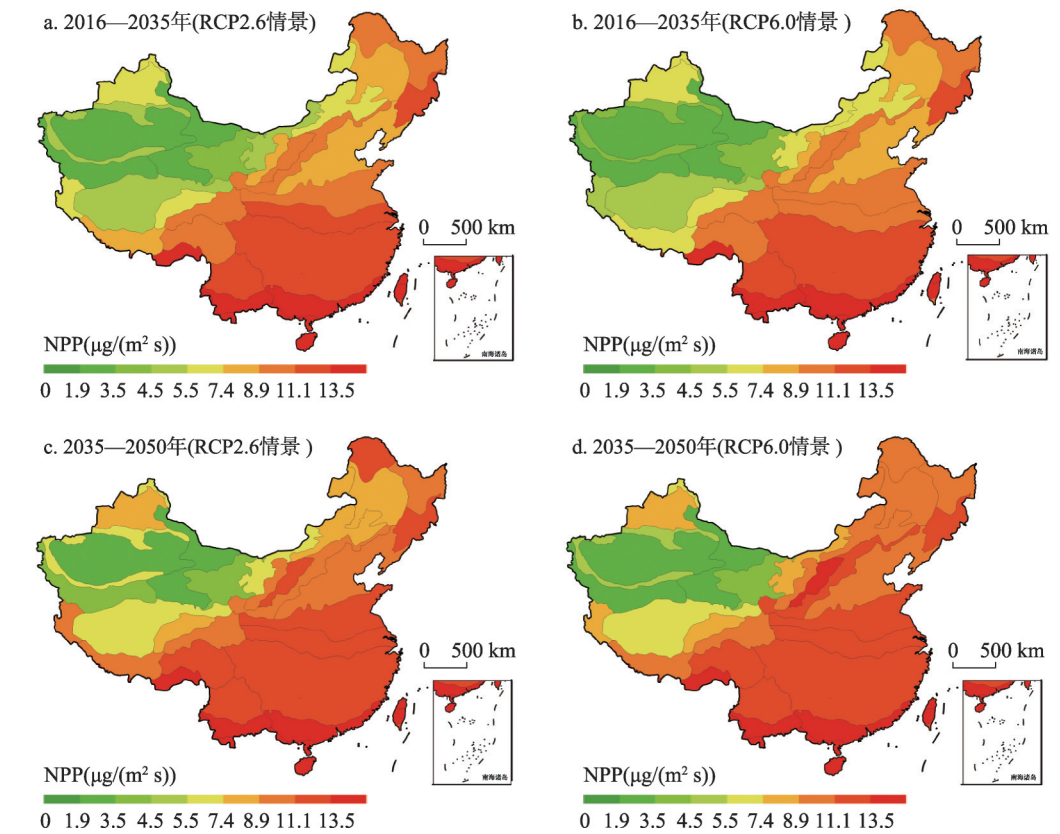


图4 2016—2050年两种RCP路径下NPP年均值变化

Fig. 4 Changes of annual average NPP under two RCP scenarios from 2016 to 2050



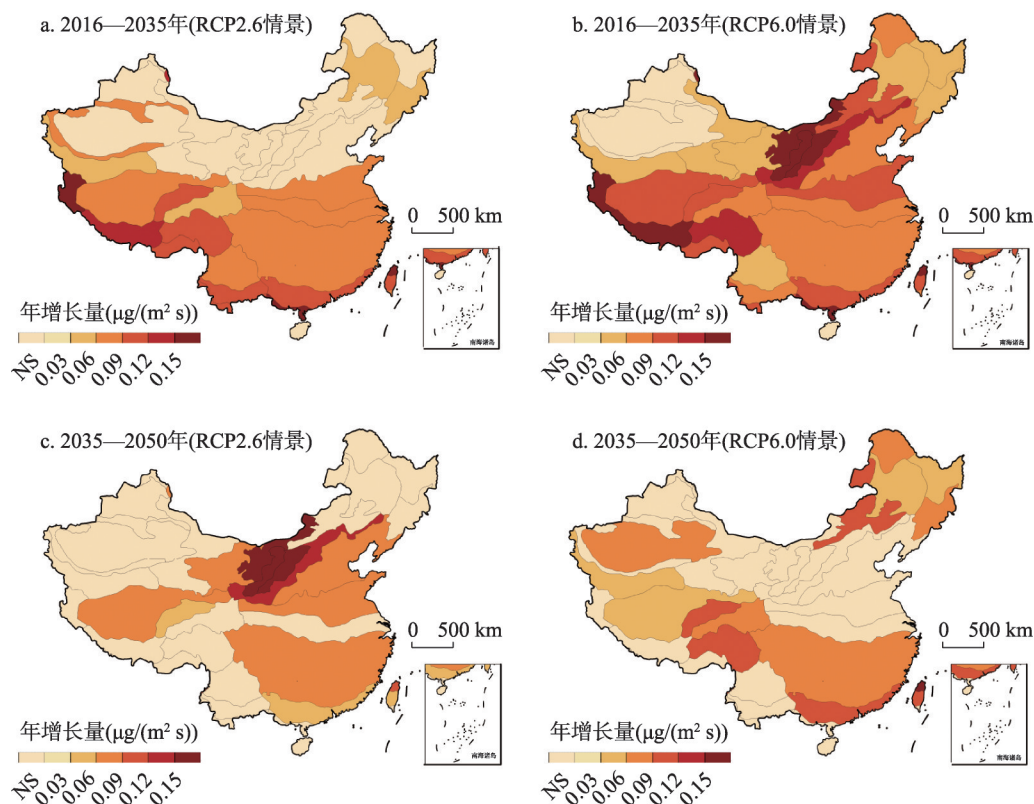
注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1585号标准地图制作,底图边界无修改。

图5 2035—2050年两种浓度路径下未来各植被带NPP多年均值

Fig. 5 The multi-year average NPP of each vegetation zone in the future under the two RCP scenarios from 2016 to 2035

岭淮河以南及青藏高原的大部分植被地带增长显著, 增长速率由南向北递减, 在东南亚热带半常绿季雨林、湿润和青藏高原西部温性荒漠地带增速较快 (年增 $> 0.15 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$), 在北方内蒙古、新疆和东北大部分地区增长不显著 (图 6a); 2035—2050 年间 NPP 主要增长区由前 20 年的南方地区开始向北偏移, 平均 NPP 在华北地区增长变得显著, 在西南、中南地区增速变慢, 整体显著增长的面积减小 (图 6c)。同样, RCP6.0 路径下 2035—2050 年间 NPP 的主要增长区相较于前 20 年开始向东北、东南和西部地区退缩, 中东部地区增长变不显著 (图 6b、6d)。

高浓度路径对 2016—2035 年间植被 NPP 的增长主要起促进作用, 2035—2050 年 NPP 的增长主要起抑制作用。2016—2035 年 RCP6.0 路径下的 NPP 增长区在 RCP2.6 路径的基础上扩展到了中国东北部的暖温带落叶阔叶林、温带针叶落叶阔叶混交林、寒温带针叶林和温带草原的大部分区域, 特别是华北地区的温带灌木乔草半荒漠亚区、温带南部荒漠草原亚区带和温带南部典型草原等植被地带由不显著增长变为了年增长值大于 $0.15 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$ 的显著增长, 其余大部分区域增长速率也有不同程度的提升 (图 6a、6b)。2035—2050 年 RCP6.0 路径下相比 RCP2.6 路径原本华北高增长区逐渐偏移到了东北地区 and 塔里木盆地附近, 总体速率降低, 增长区面积减小, 只有青藏高原东南部的高寒灌丛草甸地带和亚热带山地寒温性针叶林地以每年 $0.07 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$ 和 $0.11 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$ 的较低速率开始显著增长 (图 6c、6d)。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1585号标准地图制作, 底图边界无修改; 图中NS区域增长不显著。

图6 未来路径下各植被地带NPP平均年增长量

Fig. 6 The average annual growth of NPP in each vegetation zone under the future scenarios

4 讨论

新序列虽然能较好地反映未来全国NPP的空间分布和增减趋势，但由于合成方法、模式构建的不足和部分地区解释程度不高等原因不一定能准确反映遥感反演数据的各项特征。因此，本文进一步对比了验证期内遥感反演序列和新NPP序列对气象要素的响应情况，以探究新序列在描述气候变化背景下NPP变化格局的准确性。由遥感反演值和气象要素间的相关关系可知（图7a），植被NPP对气象因子的响应与植被带所处的干湿情况密切相关。在处于湿润与半湿润地区的大部分植被地带中，NPP与降水、气温和日照呈现显著的正相关关系，与相对湿度、风速呈现不显著的负相关；在处于干旱和半干旱地区的大部分植被带中，NPP与降水、相对湿度和风速呈现显著的正相关，与气温和日照呈现不显著的负相关。

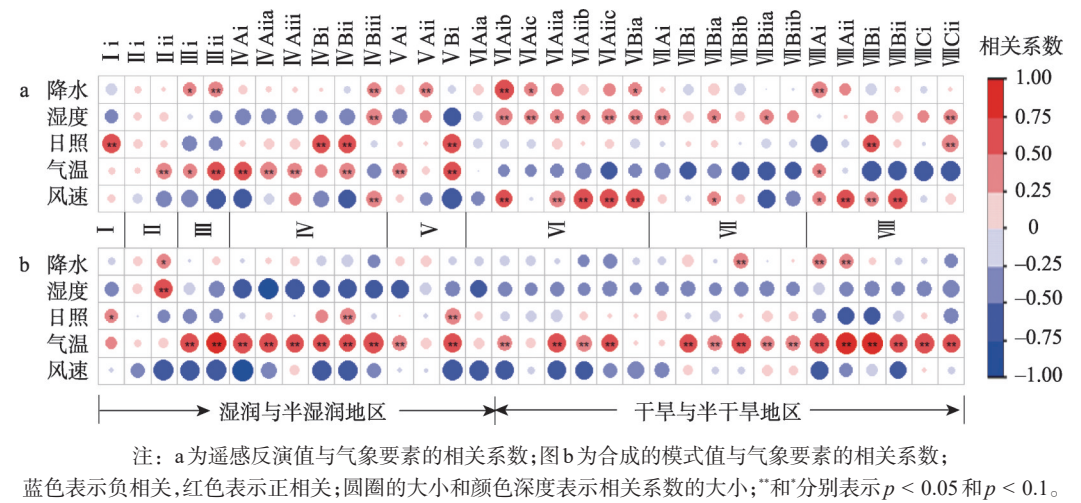


图7 植被NPP与气象要素的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient between vegetation NPP and meteorological elements

模式对大部分湿润与半湿润地区的NPP与气象要素的相关关系模拟较好（图7b），只在亚热带山地寒温性针叶林的相关性反映上出现了与遥感反演结果相反的情况。同时模拟的新序列在保持显著性基本不变的情况下，对原有的相关关系进行了整体强化，即5项相关系数的绝对值相较于遥感反演结果偏大。但在干旱与半干旱地区，模式仍然延续了湿润区域的相关关系，准确性较差，这一方面可能是由于CLM4.5和DLEM两个充分考虑了水汽条件的模式在新NPP的合成过程中所占权重较小，导致新NPP序列对影响植被生长状况的蒸腾、蒸散等^[36-37]水分条件的变化反应不敏感；另一方面则可能是因为所使用的几个全球模式一般在较小的空间尺度上经过修正后适用性较好，但在较大的空间尺度上很容易忽略局部特征，尤其是模式数据难以刻画的人为影响^[38]。因此，除了进一步准确率定模式中的各项参数外，未来植被动态模式想要在中国陆表区域更为准确地估测植被NPP，就需要进一步完善模式中描述水汽特征的模块，特别是LPJ-GUESS和VISIT两个没有考虑土—水—热耦合的模式。

同时，由于模式值在大部分干旱与半干旱地区对气象要素响应的准确性较差，甚至将青藏高原的高寒荒漠、温性荒漠等地带NPP和气温间的负相关关系反映为了正相关，使得这部分区域NPP在未来高浓度路径下相对于低浓度路径的减少量被严重低估。根据

基于CMIP5多模式的预估,未来中国大部分区域在高浓度路径下平均气温和降水都会更大。其中,相对于RCP2.6路径,高浓度路径下平均气温在青藏高原,平均降水在内蒙古高原东北部、华北平原、东北平原西部的增长将尤为显著^[39]。而模式值由于没有准确描述气温和NPP间的相关关系,因此基本不能反映这部分升高的气温对青藏高原部分地区NPP的抑制,升高的降雨对内蒙古高原典型草原和荒漠草原部分地区NPP的促进,从而低估了高浓度路径下的极端化。这和金凯等^[40]分析气候变化对植被的影响时提出的未来变暖将对中国西北和东北部分地区的植被变化具有一定的负面影响,以及高江波等^[41]指出的温度升高可能引起青藏高原地区植被受干旱影响加剧的结论能相互印证。因此,未来青藏高原西北部的高寒荒漠、温性荒漠及灌木、半灌木荒漠将成为受气候变暖不利影响较为严重的区域。

此外,作为6个植被动态模式的验证数据,遥感产品的准确性对本文的结果起着重要影响。相较于其余基于遥感影像数据的产品,该遥感数据在可接受的范围内略微偏低,可能使得本文预测的2035年和2050年两个节点上的年总NPP偏低。但由于遥感数据、陈鹏飞等用于遥感数据验证的实测数据以及本文选用的6个植被动态模式数据在典型植被区内的相对大小关系基本一致,因此这种偏小基本不会影响本文对NPP空间分布和相对趋势的分析。

5 结论

本文通过修正和对比ISI-MIP中6个生态影响模式对中国NPP的估算结果,分析了不同模式在中国不同地区的适用性,通过加权平均合成了在中国陆表区域适用性更强的新序列,利用新序列对未来两种浓度路径下NPP的时空趋势进行了预测,并探究了各个植被区NPP和气象要素间的关系,主要结论如下:

模式数据计算所得的中国平均NPP整体偏高,其中以DLEM ($8.5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$) 模式和遥感反演值 ($6.4 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$) 最为接近,VISIT ($12.6 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$) 模式相对遥感反演值偏离最大。但模式数据基本准确地反映了NPP均值在热带季雨林、雨林区域最大,向北和向西逐区域递减的相对大小关系。修正后的单个模式数据对中国大部分区域NPP的拟合效果较差 ($R^2 < 0.4$),只在特定的植被地带有较强的适用性。对几类影响因素考虑更全面的DLEM模式和ORCHIDEE模式的拟合优度大于0.4的区域更多,可适用范围更广。

根据6个模式数据生成的新NPP序列结合了各模式在不同植被地带的模拟优势,整体拟合优度为0.85,在大部分植被地带的拟合优度也基本大于0.3,相比单个模式能更好地反映未来NPP的空间分布和增减趋势。但由于合成方式、模式数据本身的不足以及部分地带的低拟合优度,新序列对气象要素的响应在干旱与半干旱地区有较大的不确定性。

未来中国平均NPP的空间分布仍将保持由东南向西北递减的趋势,中国均值呈波动增长状态,在2035年达到 $8.8 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$,2050年达到 $9.7 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 左右。随着时间的推移,RCP2.6路径下主要增长区将由南方地区向北偏移,在华北地区以 $> 15 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s a})$ 的速率显著增长,在西南、中南地区增速变慢,显著增长的面积减小;在RCP6.0路径下主要增长区将向东北、东南和西部地区退缩,中东部地区增长变不显著。高浓度路径对2016—2025年间植被NPP的增长主要起促进作用,但在2035—2050年间开始起抑制作用。同时,高浓度路径下NPP的空间分布将变得更加极端,特别是在模式数据低估了极端化程度的情况下,位于青藏高原西北部的高寒荒漠、温性荒漠及灌木、半灌木荒漠将成为受不利影响较严重的区域,在未来高浓度路径下增长缓慢或不增长。

参考文献(References)

- [1] Le Quéré C, Raupach M R, Canadell J G, et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience*, 2009, 2(12): 831-836.
- [2] Wang B, Gao P, Niu X, et al. Policy-driven China's grain to green program: Implications for ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 38-47.
- [3] Wu D H, Piao S L, Zhu D, et al. Accelerated terrestrial ecosystem carbon turnover and its drivers. *Global Change Biology*, 2020, 26(9): 5052-5062.
- [4] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 1996, 382(6587): 146-149.
- [5] Chen D L, Chen H W. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901-2010. *Environmental Development*, 2013, 6: 69-79.
- [6] Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. National Assessment Report of Climate Change (I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8, 50. [丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8, 50.]
- [7] Li Dan, Zhuang Yilin, Wu Xiuqin. Simulation and prediction of vegetation dynamics in the karst faulted basin from 2020 to 2050 in climate scenarios. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(3): 435-443. [李丹, 庄义琳, 吴秀芹. 基于气候情景的岩溶断陷盆地 2020—2050 年植被动态变化模拟预测. 地球学报, 2021, 42(3): 435-443.]
- [8] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, et al. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, 2004, 54(6): 547-560.
- [9] Huang N, Niu Z, Wu C Y, et al. Modeling net primary production of a fast-growing forest using a light use efficiency model. *Ecological Modelling*, 2010, 221(24): 2938-2948.
- [10] 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.]
- [11] Sun Jinke, Niu Haipeng, Yuan Ming. Spatial pattern change and analysis of NPP in terrestrial vegetation ecosystem in China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 162-168. [孙金珂, 牛海鹏, 袁鸣. 中国陆地植被生态系统 NPP 空间格局变迁分析. 农业机械学报, 2020, 51(6): 162-168.]
- [12] Zhang Meiling, Chen Quangong, Yan Peijie. Spatio-temporal distribution of natural grassland net primary productivity in China. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5): 1124-1131. [张美玲, 陈全功, 闫培洁. 中国天然草地净初级生产力时空分布. 草地学报, 2018, 26(5): 1124-1131.]
- [13] Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in China during 1982-1999. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2001, 37(4): 563-569. [朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(4): 563-569.]
- [14] 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.
- [15] Lu Ling, Li Xin, Veroustraete F. Terrestrial net primary productivity and its spatial-temporal variability in Western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1026-1032, 1237. [卢玲, 李新, Frank Veroustraete. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. 生态学报, 2005, 25(5): 1026-1032, 1237.]
- [16] Huang Jue, Chen Haishan, Yu Miao. Sensitivity experiments on response of terrestrial net primary productivity in China to climate change during 1981-2008. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2013, 36(3): 316-322. [黄珏, 陈海山, 俞淼. 1981—2008 年中国陆地植被 NPP 对气候变化响应的敏感性试验. 大气科学学报, 2013, 36(3): 316-322.]
- [17] Fang O Y, Wang Y, Shao X M. The effect of climate on the net primary productivity (NPP) of *Pinus koraiensis* in the Changbai Mountains over the past 50 years. *Trees*, 2016, 30(1): 281-294.
- [18] Zhao Dongsheng, Wu Shaohong. Responses of vulnerability for natural ecosystem to climate change in China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 602-610. [赵东升, 吴绍洪. 气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究. 地理学报, 2013, 68(5): 602-610.]
- [19] 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.]
- [20] Liu Shaojun, Li Weiguang, Chen Xiaomin, et al. Prediction of net primary productivity of vegetation in main rubber areas of China under future climate change. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(3): 622-626. [刘少军, 李伟光,

- 陈小敏, 等. 未来气候变化情景下中国橡胶主产区植被净初级生产力预估. 热带作物学报, 2020, 41(3): 622-626.]
- [21] Feng Xiaohui, Cheng Ruimei, Xiao Wenfa, et al. Productivity and carbon dynamic of the Masson pine stands in Jigongshan region based on LPJ-GUESS model. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(4): 7-15. [封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等. 基于LPJ-GUESS模型的鸡公山马尾松林生产力和碳动态. 林业科学, 2013, 49(4): 7-15.]
- [22] Sun Guodong. Simulation of potential vegetation distribution and estimation of carbon flux in China from 1981 to 1998 with LPJ dynamic global vegetation model. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(4): 341-351. [孙国栋. LPJ模型对1981—1998年中国区域潜在植被分布和碳通量的模拟. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 341-351.]
- [23] Tian Hanqin, Liu Mingliang, Zhang Chi, et al. The dynamic land ecosystem model (DLEM) for simulating terrestrial processes and interactions in the context of multifactor global change. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1027-1047. [田汉勤, 刘明亮, 张弛, 等. 全球变化与陆地系统综合集成模拟: 新一代陆地生态系统动态模型(DLEM). 地理学报, 2010, 65(9): 1027-1047.]
- [24] Peng Shushi, Yue Chao, Chang Jinfeng. Developments and applications of terrestrial biosphere model. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(4): 436-448. [彭书时, 岳超, 常锦峰. 陆地生物圈模型的发展与应用. 植物生态学报, 2020, 44(4): 436-448.]
- [25] Wang Yuanyuan, Xie Zhenghui, Jia Binghao, et al. Simulation and evaluation of gross primary productivity in China by using land surface model CLM4. *Climatic and Environmental Research*, 2015, 20(1): 97-110. [王媛媛, 谢正辉, 贾炳浩, 等. 基于陆面过程模式CLM4的中国区域植被总初级生产力模拟与评估. 气候与环境研究, 2015, 20(1): 97-110.]
- [26] Chen Pengfei. Monthly NPP dataset covering China's terrestrial ecosystems at north of 18°N (1985-2015). *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2019, 3(1): 34-41. [陈鹏飞. 北纬18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力1公里栅格数据集(1985—2015). 全球变化数据学报, 2019, 3(1): 34-41.]
- [27] Naeem S, Zhang Y Q, Tian J, et al. Quantifying the impacts of anthropogenic activities and climate variations on vegetation productivity changes in China from 1985 to 2015. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1113. DOI: 10.3390/rs12071113.
- [28] Huang L, Ning J, Zhu P, et al. The conservation patterns of grassland ecosystem in response to the forage-livestock balance in North China. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(4): 518-534.
- [29] Tian H Q, Chen G S, Lu C Q, et al. North American terrestrial CO₂ uptake largely offset by CH₄ and N₂O emissions: Toward a full accounting of the greenhouse gas budget. *Climatic Change*, 2015, 129(3-4): 413-426.
- [30] Smith B, Wärlind D, Arneth A, et al. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model. *Biogeosciences*, 2014, 11(7): 2027-2054.
- [31] Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. Parameterization improvements and functional and structural advances in Version 4 of the Community Land Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2011, 3(1): M03001. DOI: 10.1029/2011MS00045.
- [32] Ito A, Oikawa T. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling*, 2002, 151(2-3): 143-176.
- [33] Zhang Qipeng, Wang Jian, Zhang Zhigang, et al. Dynamic change of landscape patterns and its driving mechanism in the Qinghai-Tibetan alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6510-6521. [张起鹏, 王建, 张志刚, 等. 高寒草甸草原景观格局动态演变及其驱动机制. 生态学报, 2019, 39(17): 6510-6521.]
- [34] Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Zhou Li, et al. A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the "alpine meadow" of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, (3): 31-40. [周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. 草业学报, 2005, (3): 31-40.]
- [35] Zhou Yuke. Analysis of controlling factors for vegetation productivity in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 53-67. [周玉科. 中国东北地区植被生产力控制因素分析. 地理学报, 2020, 75(1): 53-67.]
- [36] Zhang Yongqiang, Kong Dongdong, Zhang Xuanze, et al. Impacts of vegetation changes on global evapotranspiration in the period 2003-2017. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 584-594. [张永强, 孔冬冬, 张选泽, 等. 2003—2017年植被变化对全球陆面蒸散发的影响. 地理学报, 2021, 76(3): 584-594.]
- [37] Ren Xiaoli, Lu Qianqian, He Honglin, et al. Spatio-temporal variations of the ratio of transpiration to evapotranspiration in forest ecosystems along the North-South Transect of Eastern China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 63-75. [任小丽, 路倩倩, 何洪林, 等. 中国东部南北样带森林生态系统蒸腾与蒸散比值(T/ET)时空变化. 地理学报, 2019, 74(1): 63-75.]
- [38] Wang Jianbang, Zhao Jun, Li Chuanhua, et al. The spatial-temporal patterns of the impact of human activities on vegetation coverage in China from 2001 to 2015. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 504-519. [王建邦, 赵军, 李传华, 等. 2001—2015年中国植被覆盖人为影响的时空格局. 地理学报, 2019, 74(3): 504-519.]

- [39] Liang Yulian, Yan Xiaodong. Prediction of climate change over China and uncertainty analysis during the 21st century under rcps. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 32(2): 183-192. [梁玉莲, 延晓冬. RCPs情景下中国21世纪气候变化预估及不确定性分析. *热带气象学报*, 2016, 32(2): 183-192.]
- [40] Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961-974. [金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.]
- [41] Gao Jiangbo, Jiao Kewei, Wu Shaohong. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 534-543. [高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析. *地理学报*, 2019, 74(3): 534-543.]

Prediction of net primary productivity change pattern in China based on vegetation dynamic models

MA Zhongxue^{1,2}, CUI Huijuan^{1,2}, GE Quansheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Patterns and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Six vegetation dynamic models, provided by the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP), are selected and verified for net primary productivity (NPP) in China based on remote sensing retrials. Then the goodness of fit of each model is used as the weight to synthesize a new sequence to estimate the future change pattern of China's NPP under the RCP2.6 and RCP6.0 scenarios. This study aims to solve inaccuracy of the estimation on the change pattern of China's NPP due to differences in data and methods. The results show that the single model has a poor fitting effect on NPP in most regions of China ($R^2 < 0.4$), the average NPP is 33%-97% higher than the remotely sensed value, but it can well reflect the decreasing trend from southeast to northwest China. The overall goodness of fit of the proposed NPP data is 0.85, and the goodness of fit in most vegetation zones is basically greater than 0.3. In the future 30 years, China's average NPP will continue to decrease from southeast to northwest, and the average value will show a fluctuating growth, which is expected to reach 8.8 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$ in 2035 and 9.7 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$ in 2050. With the elapse of time, the main growth area under the RCP2.6 scenario will shift from southern to northern China. This is reflected in the fact that NPP in north China will increase significantly at a rate greater than 0.15 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ s})$ per year, but the growth rate will slow down and the area of significant growth will decrease in the southwestern and central-south regions. Under the RCP6.0 scenario, the main growth areas will retreat to the northeastern, southeastern and western regions, and the growth in the central and eastern regions will become insignificant. The high emission scenario will promote the growth of NPP before 2035 and inhibit the growth after 2035. The NPP will be extremely distributed under the RCP 6.0 scenario. For instance, the alpine desert grassland, temperate desert, shrub and semi-shrub desert in the northwest of Qinghai-Tibet Plateau will grow slowly or even stop growing.

Keywords: net primary productivity; ISI-MIP; climate change; change pattern