doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.036

基于通量塔观测数据的全球总初级生产力产品综合评估

钱　龙[1]　吴立峰[2]　余兴娇[1]　陈俊英[1,3]　向友珍[1,3]　刘小刚[2]　张智韬[1,4]

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500;
3. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
4. 西北农林科技大学旱区农业新疆研究院, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 准确估算全球总初级生产力(Gross primary productivity,GPP)时空动态对理解碳循环至关重要,卫星遥感为此提供了大范围观测手段,但现有 GPP 产品存在显著差异且缺乏全球系统性验证。本文基于全球 147 个通量塔观测数据,评估了 8 个 GPP 产品(EC-LUE、GLASS、GOSIF、MOD17A2H、MuSyQ、PMLv2、EC-LUE 和 VPM)在 2003—2014 年的时空一致性以及年际变化趋势。研究结果表明:时空分析显示各产品时间相关性极强(R^2 >0.960),而空间上除 GOSIF 与其他产品相关性较低(R^2 ≤0.573)外,其余产品间均有较好的可比性(R^2 ≥0.702)。不同产品年平均 GPP 为 678.3 ~ 1 223.0 g/(m^2·a)(MOD17A2H 最低,GOSIF 最高),除 GLASS 外均呈上升趋势,其中北半球为 GPP 主要上升区,VPM 上升区域占比最高(72.4%),GOSIF 最低(45.2%)。对比通量塔数据发现,PMLv2 相关性最高(R^2 =0.664),EC-LUE(0.547)和 GLASS(0.572)较低,而 GOSIF、GLASS 和 PMLv2 普遍呈现高估。此外,GPP 产品在美洲、高纬度以及湿地和常绿针叶林等地区表现最佳。研究结果对完善生态系统过程模型在不同地区的模拟能力具有重要意义。

关键词: 总初级生产力; GPP 产品; 通量塔; 评估; MK 趋势检验

中图分类号: S127; S156.41　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)04-0369-12　　**OSID**:

Comprehensive Assessment of Global Gross Primary Productivity Products Based on Flux Tower Observation Data

QIAN Long[1]　WU Lifeng[2]　YU Xingjiao[1]　CHEN Junying[1,3]　XIANG Youzhen[1,3]
LIU Xiaogang[2]　ZHANG Zhitao[1,4]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
4. *Xinjiang Research Institute of Agriculture in Arid Areas*, *Northwest A&F University*, *Urumqi* 830091, *China*)

Abstract: Accurately estimating the spatiotemporal dynamics of global gross primary productivity (GPP) and its underlying mechanisms is crucial for understanding the global carbon cycle and climate change. Satellite remote sensing enables continuous observation of large-scale vegetation dynamics, providing valuable opportunities to study the spatial and temporal variations of GPP on a global scale. However, different GPP products often exhibit significant discrepancies in global GPP estimates, and a comprehensive validation and comparison of these products at the global level has not yet been conducted. Therefore, the spatiotemporal consistency and interannual trends of eight GPP products (EC-LUE, GLASS, GOSIF, MOD17A2H, MuSyQ, PMLv2, EC-LUE, and VPM) during 2003—2014 were evaluated by using observations from 147 global flux towers. Spatiotemporal analysis revealed exceptionally strong temporal correlations among products (R^2 > 0.960). Spatially, all products exhibited high comparability (R^2 ≥0.702) except GOSIF, which showed weaker consistency with others (R^2 ≤0.573). Annual GPP estimates ranged from 678.3 g/(m^2·a) (MOD17A2H) to 1 223.0 g/(m^2·a)

收稿日期: 2024-10-19　修回日期: 2025-03-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900404)和国家自然科学基金项目(51979232、52179044)

作者简介: 钱龙(1996—),男,博士生,主要从事农业遥感与水文水资源研究,E-mail: qianlong9611@126.com

通信作者: 张智韬(1976—),男,教授,博士,主要从事农业遥感与水文水资源研究,E-mail: zhitaozhang@126.com

(GOSIF). All products except GLASS displayed increasing trends, with the northern hemisphere dominating the GPP increase. The proportion of ascending areas varied substantially across products, peaking in VPM (72.4%) and reaching a minimum in GOSIF (45.2%). Validation against flux tower data identified PMLv2 as the best-performing product (R^2 = 0.664), while EC - LUE (R^2 = 0.547) and GLASS (R^2 = 0.572) showed relatively lower accuracy. Systematic overestimations were observed in GOSIF, GLASS, and PMLv2 across most sites. Furthermore, the products demonstrated higher accuracy in America, high-latitude regions, and wetlands (WET) and evergreen needleleaf forests (ENF). The research results were significant for improving the ability of ecosystem process models to simulate different regions, and they contributed to a deep understanding of regional ecosystem carbon dynamics and the global carbon cycle.

Key words: gross primary productivity; GPP products; flux tower; assessment; Mann - Kendall trend test

0 引言

IPCC 第六次报告指出,气候变化和人类活动加剧导致全球气温较工业革命前升高约 1.07℃,引发极端天气频发、生态系统退化等一系列连锁效应[1]。实现碳中和是缓解气候危机的关键路径[2],陆地植物可通过光合作用吸收 30% ~40% 的人为二氧化碳(CO_2)排放,是调控碳循环的核心过程[3],其核心指标 GPP 作为陆地生态系统最大的 CO_2 单向吸收通量,主导碳收支平衡并能够抵消部分人为碳排放[4]。然而,GPP 仍然是碳循环中不确定性最大的部分,且在全球的长期年趋势中存在显著差异[5]。因此,全球变暖背景下,精确量化 GPP 并捕捉其时空动态规律对解析碳-气候反馈关系具有决定性意义。

目前获取 GPP 的传统途径有箱法[6]和涡度相关法[7],尽管这些方法能够提供长时间序列的精确数据,但受限于空间代表性不足及站点分布不均[8]。为实现在区域和全球尺度上的 GPP 估计,基于遥感数据的生态系统过程模型[9]和光能利用率模型[10]得以发展,并随着定量遥感技术的发展和应用,卫星遥感提供了对大区域尺度植被动态的连续观测,随之衍生出许多全球 GPP 产品[11-12],突破了 GPP 估算在时间和空间上的局限。

然而,以往的研究大多局限于特定区域。SJÖSTRÖM 等[13]仅通过非洲 12 个通量塔验证 MOD17A2 产品,发现样本不足导致干旱/湿润区精度差异显著;廖玮杰等[6]和唐欢等[14]分别在青藏高原和草原区筛选出最优 GPP 产品,但单一区域的验证难以全面揭示产品特性,因不同地区季节、气候及人类活动等因素会显著影响产品精度稳定性[15]。同时,现有研究涉及产品数量有限,如 WANG 等[16]和冯艾琳等[17]均采用 MODIS 产品分析局部地区的时空动态,但该产品因模型缺陷普遍存在年度 GPP 低估现象,因此多区域验证和多产品比较对客观评估 GPP 精度至关重要。

此外,GPP 产品对于协助捕捉全球任意范围 GPP 的季节性和年际变化至关重要。BAI 等[18]通过整合 5 种全球 GPP 产品,证实近 30 年陆地 GPP 年均值呈上升趋势。田振兴等[19]将遥感产品和地面气象数据结合,成功获取了 2000—2014 年鄱阳湖流域 GPP 时空分布和变化特征。王永琳等[20]利用 GPP 产品、日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced chlorophyll fluorescence,SIF)产品以及气象因子得到中国陆地植被 GPP 和 SIF 时空格局。但目前不同产品对 GPP 的估计值存在很大差异[21],并在区域与生态系统层面波动明显[22]。当前研究对新型数据集(如 TL - LUE 和 MuSyQ)的研究不足,且全球尺度分析多基于低分辨率产品[23]。

因此,本研究系统评估 8 种主流全球 GPP 产品(EC - LUE、GLASS、GOSIF、MOD17A2H、MuSyQ、PMLv2、TL - LUE 和 VPM)在 0.05°及更低分辨率下的表现,量化时间和空间一致性,通过曼-肯德尔(Mann - Kendall,MK)方法计算 2003—2014 年 GPP 变化趋势,基于全球 147 个通量塔观测数据验证产品精度,并揭示其在不同区域、纬度和植被类型间的性能差异。以期为 GPP 产品选择提供科学支撑,并为未来算法优化和产品改进提供参考。

1 材料和方法

1.1 GPP 产品

选择 8 种具有不同分辨率的全球 GPP 产品,时间分辨率均为 8 d,其他信息见表 1。

1.2 研究区域与通量塔数据

采用国际通量观测网络 FLUXNET 发布的数据集 FLUXNET2015 (https://fluxnet.org/data/fluxnet2015-dataset/),该数据集整合 212 个站点(截至 2014 年)多时间尺度通量观测,提供经严格质量控制的 GPP 数据[32]。基于 IGBP 分类系统筛选出 8 类土地覆盖的 147 个站点(图 1,审图号:GS(2021)

表 1　8 个全球 GPP 产品基本信息

Tab. 1　Basic information of eight global GPP products

产品	空间分辨率	年份	文献序号
EC－LUE	0.05°	1982—2017	[24]
GLASS	0.05°	1982—2018	[25]
GOSIF	0.05°	2000—2017	[26]
MOD17A2H	500 m	2001—至今	[27]
MuSyQ	0.05°	1981—2018	[28]
PMLv2	500 m	2002—2017	[29]
TL－LUE	0.05°	1992—2020	[30]
VPM	500 m	2000—2016	[31]

6375)，包括 15 个农田(CRO)、22 个落叶阔叶林(DBF)、44 个常绿针叶林(ENF)、30 个草原(GRA)、8 个混交林(MF)、9 个开阔灌木地(OSH)、5 个稀疏草原(SAV)和 14 个湿地(WET)。此外，根据地理位置划分为美洲地区(Americas region，AM)、亚洲及俄罗斯地区(Asia and Russia region，ARA)和欧洲及非洲地区(Europe and Africa region，EA)；按纬度划分为高、中、低纬。站点筛选遵循三大原则：空间代表性，覆盖全球 6 大洲主要气候区，土地覆盖类型占全球植被面积 85% 以上(基于 MODIS 土地覆盖产品)，每类型至少 5 个站点；数据可靠性，选择观测时长大于 1 年且数据完整性高于 70% 的站点；验证科学性，沿用 FLUXNET 在全球 GPP 验证中的标准框架，通过分区域、分纬度验证增强结论普适性。

1.3　反距离权重法

针对 GPP 产品与通量塔观测的分辨率匹配问题，采用反距离权重法(Inverse distance weight，IDW)对通量塔所在位置的 GPP 数据进行插值处理。该方法基于“邻近相似”原理，通过加权邻近像元值(权重与距离成反比)估算目标点属性值，兼具计算效率高、操作简便和精度稳定等优势。IDW 技术已广泛应用于站点观测与网格产品数据融合研究[33－34]，尤其在通量塔局域尺度 GPP 等数据空间匹配中具有显著适用性。计算公式见文献[35]。

1.4　Mann－Kendall 检验

MK 趋势检验是一种经典的非参数统计方法，广泛应用于水文、气象及生态等领域的时间序列趋势分析[36]。采用该方法评估 GPP 产品的年际变化趋势，其核心原理基于数据序列的秩次比较，通过计算协同-反向对的数量构建统计量，无需假设数据服从特定分布，对异常值和数据缺失具有较强鲁棒性。在 MK 趋势检验中，测试统计量 Z 值用于表示趋势方向，若 $|Z| \geqslant 1.96$，表示在 95% 置信区间内发生显著变化。将 $Z > 1.96$ 或 $Z < -1.96$ 定义为显著增加或减少，$0 < Z \leqslant 1.96$ 和 $-1.96 \leqslant Z < 0$ 定义为轻微增加或减少。计算方法见文献[37]。

1.5　统计指标

采用多维度统计指标评估 GPP 产品精度，包括决定系数(R^2)量化产品与通量塔观测值的拟合程度；均方根误差(RMSE)反映整体估算偏差，而无偏均方根误差(ubRMSE)通过消除空间代表性差异误差，聚焦时间动态变异性评估，二者数值越趋近 0 表明精度越高；百分比偏差(PBias)则标准化偏差量级以对比不同站点的高估和低估程度，其绝对值越小表示偏差控制越优。上述指标已广泛应用于遥感产品验证研究[38－39]，可系统揭示 GPP 产品的时空一

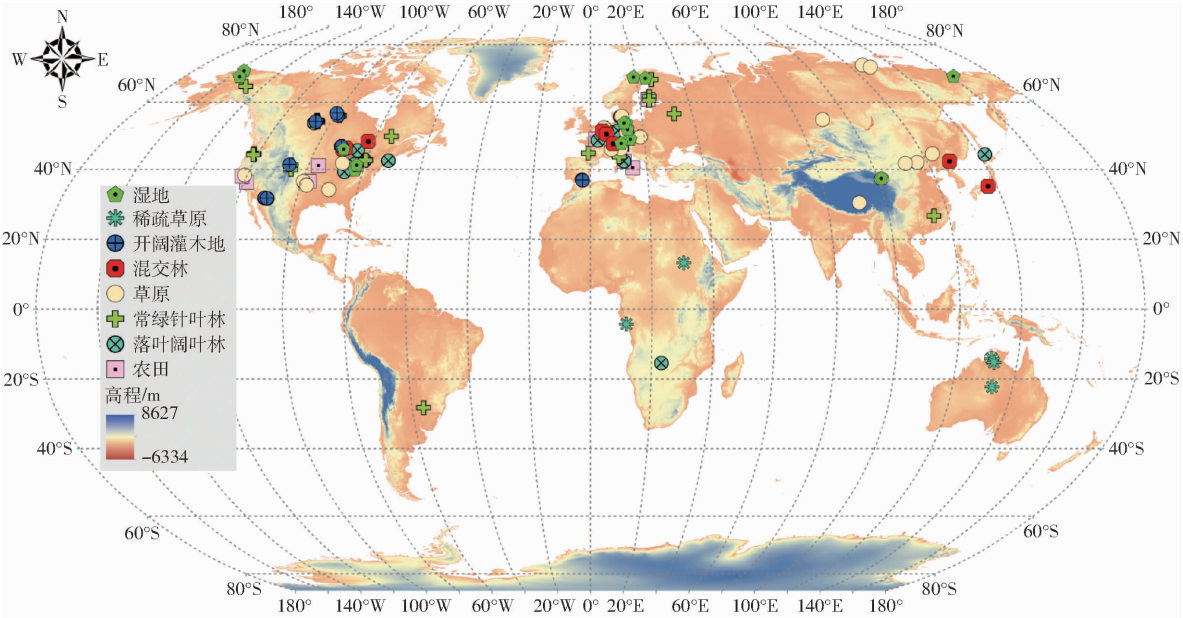

图 1　147 个通量塔地理分布

Fig. 1　Geographical distribution of 147 flux towers

致性缺陷与算法局限性。

2 结果与分析

2.1 GPP 产品时间和空间一致性

各 GPP 产品在 2003—2014 年年平均空间分布显示(图 2,d90 表示 90 百分位点,d50 表示 50 百分位点),全球 GPP 估算存在显著区域差异。低纬度地区(亚马逊热带雨林、非洲刚果盆地和印度地区等)GPP 较高,平均约 3 500 g/(m^2·a),峰值可达 5 000 g/(m^2·a)。在北美和南美中南部等地区均值约为 2 000 g/(m^2·a)。此外,全球 74.7% 的植被区域 GPP 集中在 0 ~ 500 g/(m^2·a)(干旱和高纬度地区)。不同产品间差异显著,如 GOSIF 产品对 GPP 值存在高估,2 500 g/(m^2·a)以上区域约占 10%。而 MOD17A2H 产品相对保守,1 379 g/(m^2·a)以上区域仅占约 10%,峰值约 3 000 g/(m^2·a)。EC - LUE、MuSyQ、TL - LUE 和 VPM 产品中 GPP 大于 230 g/(m^2·a)区域约占 50%,这些产品的估算结果在全球范围内表现较为一致,显示出较为广泛的中等 GPP 水平区域分布。

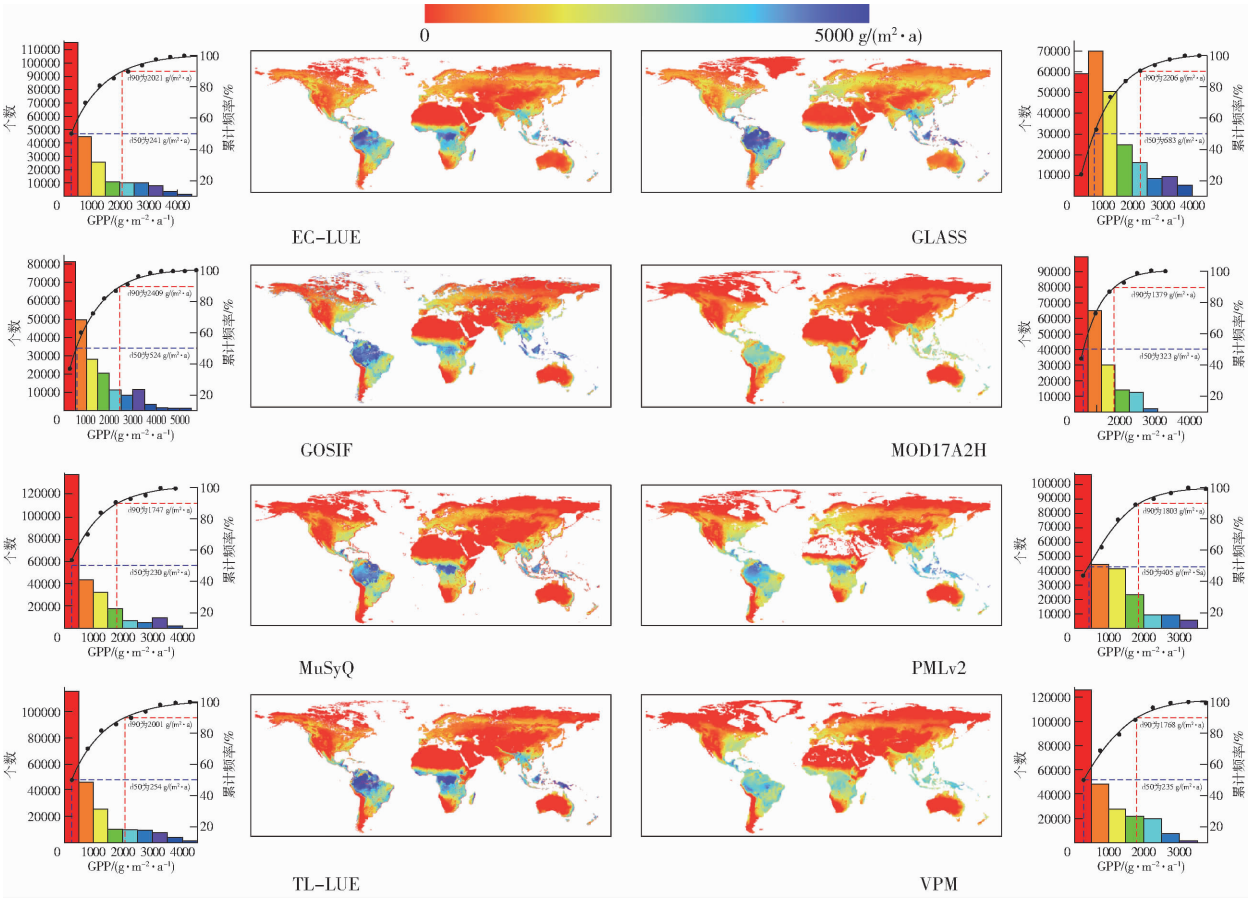

图 2 全球 GPP 产品年平均 GPP 分布与分布直方图

Fig. 2 Annual average GPP distribution map and histogram of global GPP products

R^2 评估结果如图 3 所示,8 个 GPP 产品空间一致性存在分化,下三角矩阵表明各产品在 2003—2014 年全球所有网格的年平均 GPP 对比结果具有较高一致性,除 GOSIF 与其他产品相关性较低($R^2 \leqslant 0.573$)外,其余产品间均有较好的可比性($R^2 \geqslant 0.702$)。约 77.7% R^2 大于 0.7,其中 EC - LUE 和 TL - LUE 一致性最高($R^2 = 0.992$),MOD17A2H 和 PMLv2 估算结果也较为接近($R^2 = 0.914$),VPM 与其他多数产品的一致性也较高。但 GOSIF 的空间异质性显著,其与 GLASS($R^2 = 0.441$)、MOD17A2H($R^2 = 0.523$)的对比值最低。在上三角矩阵中,各产品在通量塔站点月平均 GPP 时间一致性较好,所有产品两两比较的 R^2 均超过 0.960。其中,EC - LUE 与 GLASS 的相关性最高($R^2 = 0.997$),而 EC - LUE 与 MuSyQ 的 R^2 相对较低。值得注意的是,GOSIF 在低纬度区域的高估现象导致其时空一致性整体偏弱,而 PMLv2 和 TL - LUE 在多数对比中表现出较强可比性。

2.2 GPP 产品年际变化

各产品月尺度 GPP 呈显著季节特征(图 4a),峰值集中于 7 月,在 12 月或 1 月达最低值。除 GOSIF 全年呈明显高估外(7 月差异超 100 g/(m^2·a)),其余产品月 GPP 序列高度一致,其中 PMLv2 与 FLUXNET GPP(OBS)最接近。这些产品在夏季差

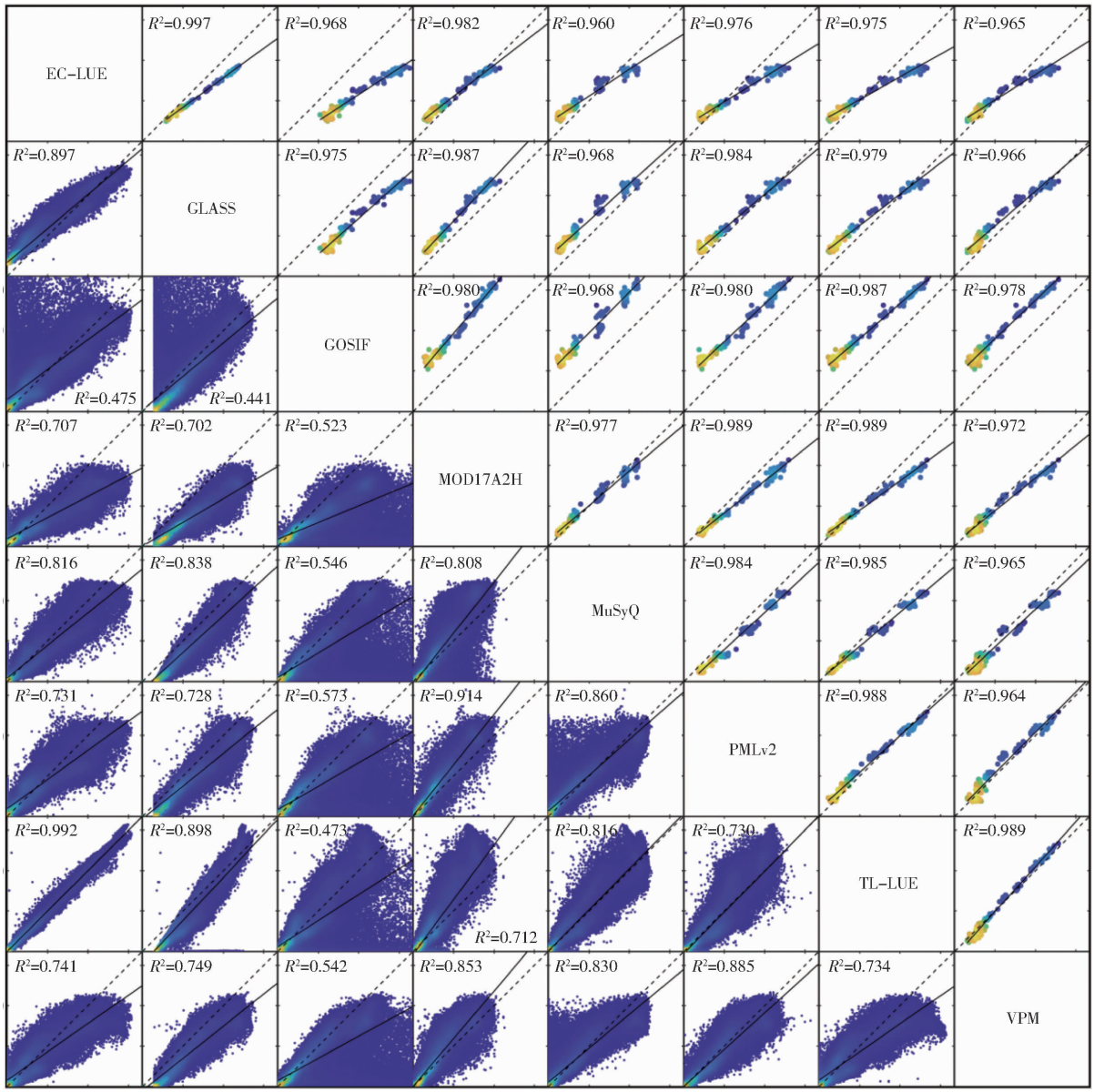

图 3　GPP 产品 2003—2014 年所有网格点年平均 GPP 对比(下三角)和在通量塔月平均 GPP 对比(上三角)

Fig. 3　Comparison of annual average GPP of all grid points from 2003 to 2014 (lower triangle) and monthly average GPP of flux towers (upper triangle) for GPP products

异较大,其中 MOD17A2H 存在较明显低估,GDSIF 与 TL－LUE 轻微高估;在冬季多数产品的一致性均较高,仅 GDSIF 轻微高估,MOD17A2H 和 VPM 有轻微低估。年际尺度上也存在差异(图 4b,括号中数为 MK 趋势检验中的 Sen 斜率,单位为 g/(m^2·a)),长期年平均 GPP 范围从 678.3 g/(m^2·a)(MOD17A2H)到 1 223.0 g/(m^2·a)(GOSIF),GOSIF、GLASS 和 MOD17A2H 的年 GPP 年际变异性高于其他产品,而 MuSyQ 最低。曼-肯德尔分析中的 Sen 斜率显示,除 GLASS 呈下降趋势外,其他产品均呈上升趋势,其中 GOSIF 增幅最高(6.42 g/(m^2·a)),MuSyQ 最低(0.305 g/(m^2·a))。总体而言,夏季不确定性较高,但除 GOSIF 外的产品估算结果与观测值较吻合。

2003—2014 年 GPP 趋势空间格局分析表明(图 5),北半球多个地区(如加拿大中部、非洲西部、中国中部等)呈显著上升趋势,其中 VPM(上升区占比 72.4%)和 EC－LUE(66.4%)增幅区域最广,而 GOSIF(45.2%)和 MuSyQ(52.9%)则相对较缓。下降趋势集中分布于里海周边、南美洲中南部和墨西哥等区域,尤其是在 GOSIF 和 MOD17A2H 估算中,这些区域显著下降趋势尤为明显。尽管各 GPP 产品在趋势变化上存在共性,但在南美洲北部、非洲中部和美国大部分地区存在较大差异。EC－LUE 和 TL－LUE 的 GPP 趋势格局高度一致(R^2 = 0.656),而 GLASS 与 VPM 相关性最低(R^2 = 0.176);GOSIF、MOD17A2H 等产品的空间 R^2 介于 0.380～0.504,显示部分区域趋势共性。值得注意

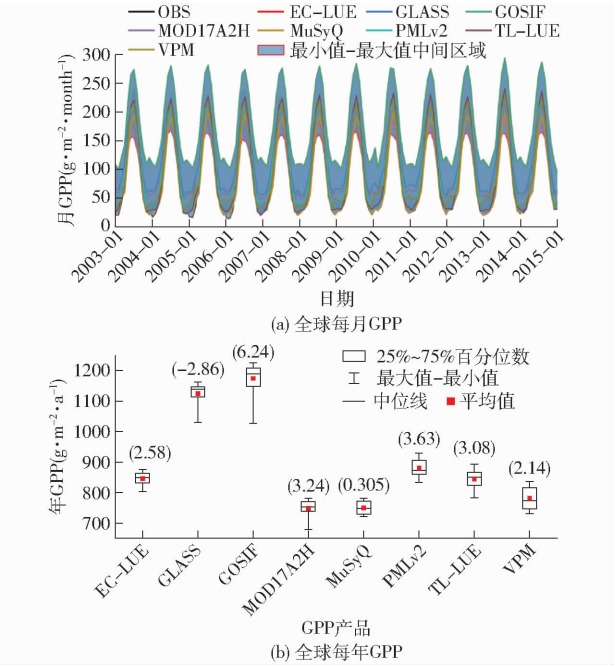

图 4 2003—2014 年全球平均月 GPP 和年 GPP 分布

Fig. 4 Global average monthly GPP changes and annual GPP distribution in 2003—2014

的是,热带地区(南美北部和非洲中部)及美国本土的趋势估算存在较大产品间分歧。整体而言,北半球中高纬地区 GPP 上升、热带区域下降的规律性特征明显,但特定区域的产品差异仍需通过模型优化提升估算一致性。

2.3 基于通量塔数据的总体评估

2.3.1 GPP 产品整体表现

利用通量塔数据获得各站点的日平均 GPP 观测序列,并以此为基准对 8 个 GPP 产品进行评估,147 个站点 8 d 尺度统计指标平均值见表 2。

各产品精度评估显示(表 2),PMLv2 与观测数据的相关性最高(R^2 = 0.664),而 EC-LUE(R^2 = 0.547)和 GLASS(R^2 = 0.572)相对较低。误差分析表明,PMLv2 同样表现最好(RMSE 为 15.657 g/(m²·8d),ubRMSE 为 13.728 g/(m²·8d))。然而,GOSIF 的误差相较于其他产品很难令人满意(ubRMSE 为 20.769 g/(m²·8d))。在偏差方面,GOSIF、GLASS 和 PMLv2 在大多数站点均呈现高估(高估站点分别为 130、111、96 个),MOD17A2H 则呈现最严重低估(96 个站点,平均 PBias 为 -0.272),GLASS 与 PMLv2 产品低估幅度最高和最低。

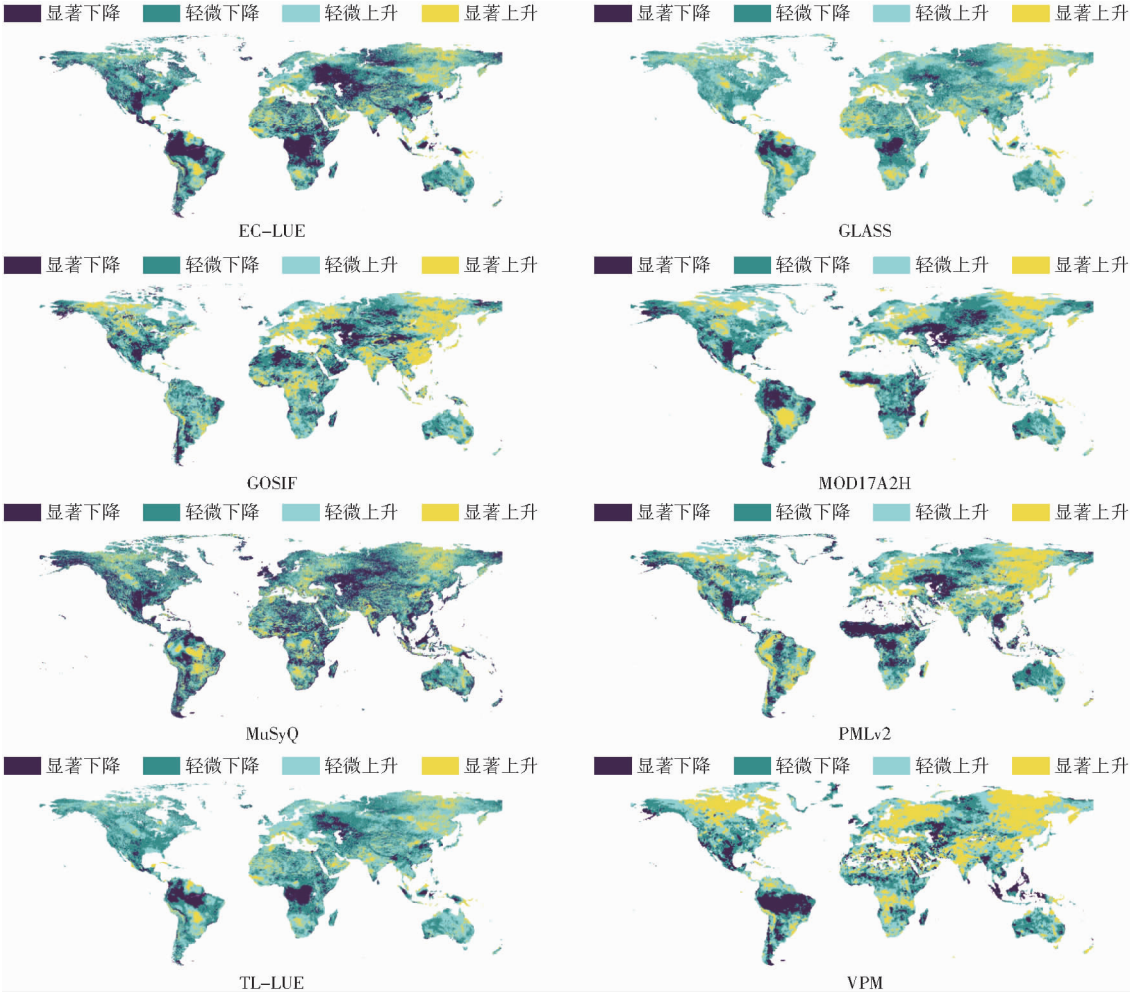

图 5 基于 MK 趋势检验的全球 GPP 线性变化趋势

Fig. 5 Global GPP linear trend based on MK trend test

表 2　GPP 产品统计指标结果

Tab. 2　GPP product statistical indicator results

GPP 产品	决定系数	均方根误差/($g \cdot m^{-2} \cdot (8d)^{-1}$)	无偏均方根误差/($g \cdot m^{-2} \cdot (8d)^{-1}$)	百分比偏差(高估)	百分比偏差(低估)
EC－LUE	0.547[a]	23.658	19.044	0.621 (79)	－0.375
GLASS	0.572	23.763	18.819	0.649 (111)	－0.413[a]
GOSIF	0.635	29.945[a]	20.769[a]	0.987 (130)[a]	－0.189
MOD17A2H	0.581	18.446	15.850	0.355 (51)[b]	－0.272
MuSyQ	0.601	18.644	15.567	0.398 (62)	－0.318
PMLv2	0.664[b]	15.657[b]	13.728[b]	0.393 (96)	－0.186[b]
TL－LUE	0.622	18.603	15.875	0.442 (66)	－0.252
VPM	0.611	19.038	15.761	0.508 (64)	－0.263

注：括号内数值表示高估站点数量，a 表示表现较差，b 表示表现较好。

2.3.2　不同地区 GPP 产品表现

区域尺度评估显示(图 6)，各 GPP 产品 R^2 表现存在显著空间分异。AM 和 EA 地区 R^2 多集中于 0.5～0.8(站点一致性较高)，而 ARA 地区 R^2 普遍偏低(0.3～0.7)，反映该地区产品一致性较差。具体而言，PMLv2 在 AM 和 EA 地区表现较好，超过 75% 的站点 R^2 在 0.5 以上，而 MOD17A2H 则在 ARA 地区的相关性表现最佳；EC－LUE 和 GLASS 在 3 个地区的 R^2 均值均低于 0.6，时空动态捕捉能力有限。GOSIF 产品在 ARA 地区 R^2 波动较大，站点间不确定性较高。

偏差分析显示，AM 地区 GPP 产品普遍高估，其中 GOSIF 和 GLASS 尤为明显(PBias 为 －2.0～4.0)。相比之下，EC－LUE、MOD17A2H、MuSyQ 和 VPM 在 EA 地区呈现低估趋势，MuSyQ 和 TL－LUE 在 ARA 地区呈轻微低估。PMLv2 和 MOD17A2H 表现稳健，三大区域 PBias 波动均控制在 －0.5～0.5 区间，而 GOSIF 在 ARA 地区全部站点高估，GLASS 多数站点显著高估。误差评估表明，GOSIF 在所有地区存在严重误差，ubRMSE 均大于等于 19.834 $g/(m^2 \cdot 8d)$，GLASS 在 ARA 地区的 ubRMSE 达到 20.232 $g/(m^2 \cdot 8d)$。相比之下，PMLv2 和 MOD17A2H 的 ubRMSE 表现最佳，ubRMSE 均小于等于 15.689 $g/(m^2 \cdot 8d)$，验证其估算可靠性。

2.3.3　不同纬度 GPP 产品表现

不同纬度地区的分析表明(图 7)，GPP 产品精度随纬度变化显著。从相关性来看，高纬度区表现最优(TL－LUE 与 MuSyQ R^2 分别达 0.769、0.731)，显著优于低纬度区；中低纬度 R^2 整体偏低，尤其在热带区域差异突出。在偏差方面，高纬度地区多数产品 PBias 接近于 0，TL－LUE 和 VPMP Bias 分别为 0.316 和 －0.271。而在中纬度地区，不同产品 PBias 波动较大，其中 GOSIF PBias 为 0.964。低纬度地区 GPP 产品呈现出较为明显的低估，其中 MuSyQ 和 PMLv2 的 PBias 分别为 －0.254 和 －0.255。此外，高纬度误差最小，中纬度 GLASS 误差峰值达 19.863 $g/(m^2 \cdot 8d)$，低纬度 MOD17A2H 误差达 18.797 $g/(m^2 \cdot 8d)$。综合评估显示，PMLv2、MuSyQ 及 TL－LUE 在高纬度兼具高精度与低误差，GOSIF 在中低纬度存在高估与误差放大问题。纬度升高与估算精度呈正相关，热带区域仍为 GPP 反演难点。

2.3.4　不同土地覆盖类型 GPP 产品表现

进一步基于通量塔观测数据评估了不同覆盖类型 GPP 产品的估算表现(图 8)。从相关性来看，WET 与 ENF 表现最优，PMLv2 在 MF(R^2 为 0.781)和 WET(0.794)表现最佳；SAV 与 CRO 表现最弱(R^2 均为 0.5)，其中 MOD17A2H 在 SAV 最低(0.221)，EC－LUE 在 CRO 最低(0.349)。就误差而言，CRO 的 ubRMSE 最大(大于 23.156 $g/(m^2 \cdot 8d)$)，DBF 与 ENF 误差波动显著，而 OSH 误差最小(低于 13.784 $g/(m^2 \cdot 8d)$)。就偏差而言，除 SAV 外，多数植被类型呈整体高估，尤以草地(GRA)和 SAV 为甚。综合而言，WET 和 ENF 的 GPP 估算精度较高，CRO 和 MF 的误差控制亟待优化，SAV 等稀疏植被类型仍为反演难点。

3　讨论

产品间性能差异主要源于模型算法机理与输入数据本质差异。GOSIF 高估源于：①光学与气象数据预处理缺陷(大气遮蔽、云覆盖干扰)。②SIF－GPP 线性反演框架未考虑碳三(C3)和碳四(C4)植物光合路径差异及 SIF 高光饱和效应[40-41]。③植被类型适应性不足与光谱分辨率限制导致的信号混叠[42]。机理分析表明，产品间性能差异主要源于模型算法机理与输入数据本质差异。EC－LUE 低估主要受限于：固定最大光能利用率(ε_{max})低估极端干旱响应，非线性水分胁迫函数弱化干旱区敏感性，

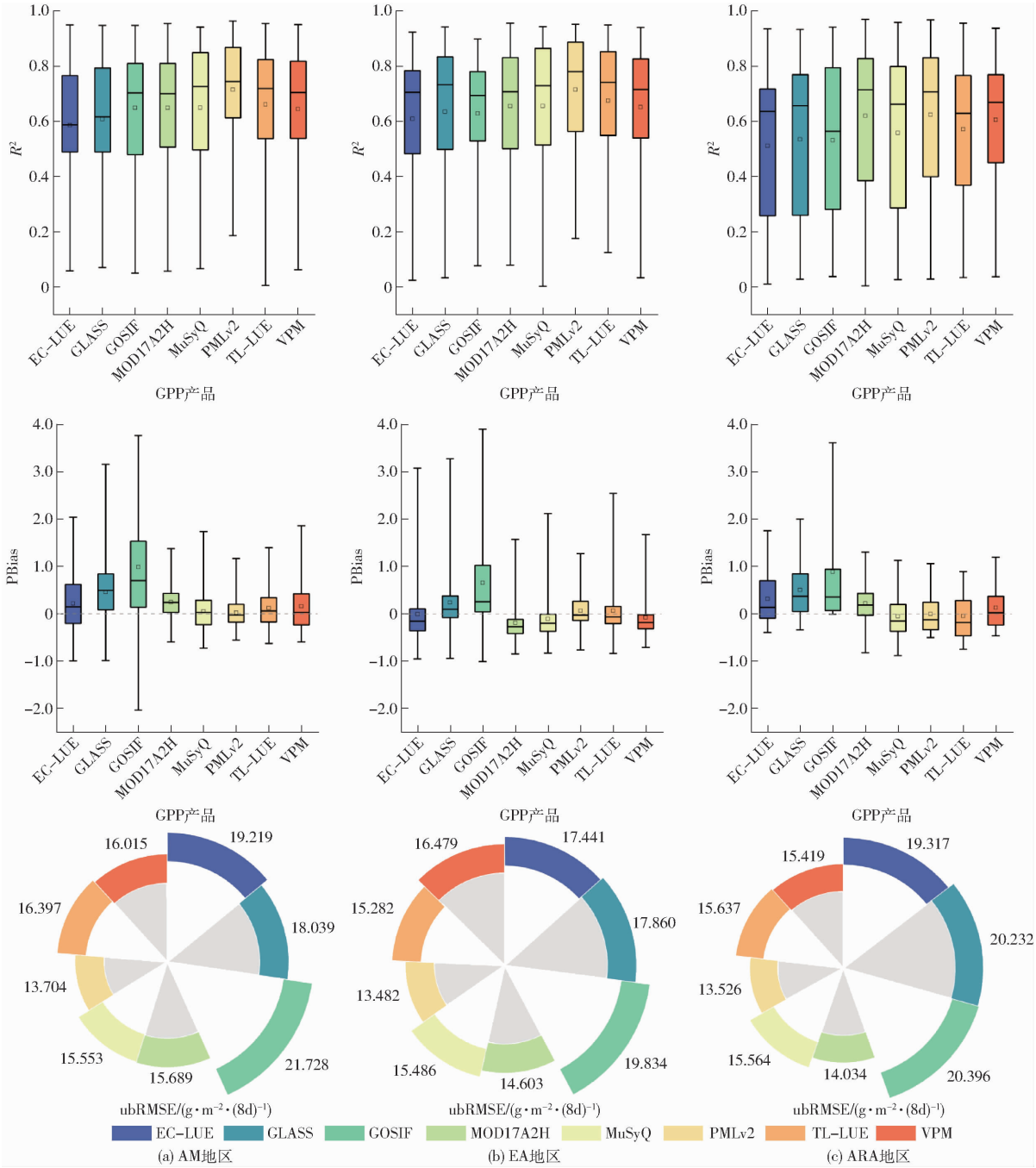

图 6 不同地区 GPP 产品 R^2、PBias 和 ubRMSE 对比

Fig. 6 Comparison of R^2, PBias, and ubRMSE estimation for GPP products across different regions

以及未整合土壤氮循环对光合的调控[43]。GLASS 虽通过动态 ε_{max} 优化改进 EC－LUE 框架，但其精度受限于：①光合有效数据（Fraction of absorbed photosynthetically active radiation，FPAR）在季风区云覆盖时的缺失。②未区分 C3/C4 作物光合差异。③ε_{max} 参数化不确定性[21]。此外，输入数据分辨率与验证数据尺度不匹配亦影响模型表现。

PMLv2 的优异性能源于其多源耦合机制：①通过分光解耦降低噪声干扰，联合光合与土壤蒸发过程提升水分胁迫响应精度。②采用 Google Earth Engine（GEE）平台双线性插值法将气象输入从 0.25°降尺度至 500 m，缓解足迹效应[29]。③叶面积指数（LAI）加权平滑算法有效抑制云雪噪声导致的低估，但需注意其对高纬度冻土区湿度波动的过度敏感可能引发误差。MOD17A2H 精度提升得益于气象数据与 FPAR 产品的分辨率升级[27]，但其固定 ε_{max} 参数仍限制对植被生理动态（如物候相变）的捕捉。VPM 优势则体现在：①融合 MODIS 与 NCEP Reanalysis Ⅱ数据驱动。②C3/C4 光合路径分型建模。③植被指数缺口填充算法优化，但其高分辨率依赖可能引发尺度效应，且未整合叶片质量与光合速率等新调控因子[44]。

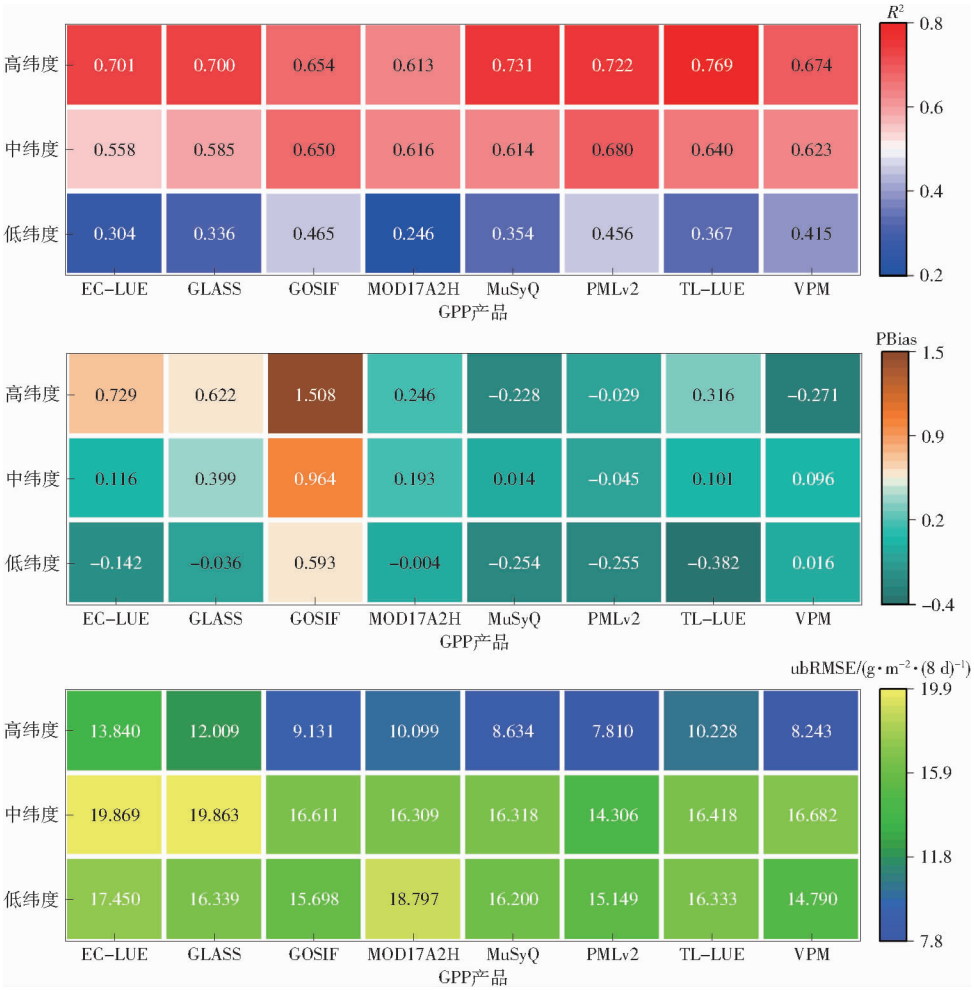

图 7　不同纬度 GPP 产品 R^2、PBias 和 ubRMSE 对比

Fig. 7　Comparison of R^2, PBias, and ubRMSE of GPP products under different latitudes

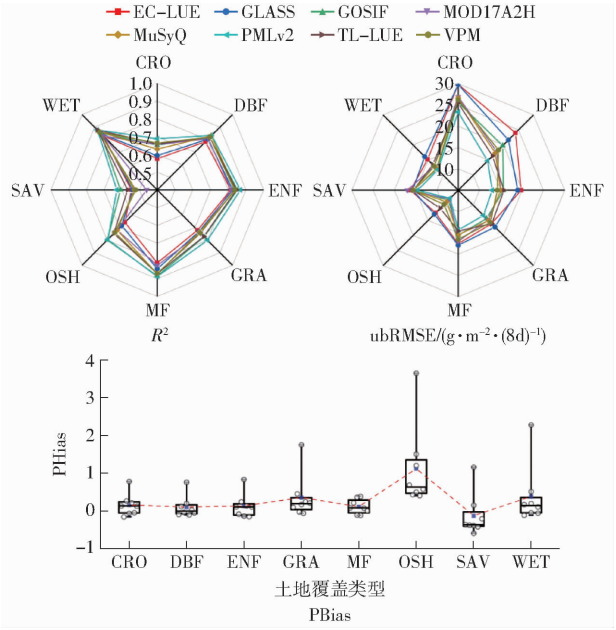

图 8　不同土地覆盖类型下 GPP 产品的 R^2、ubRMSE 和 PBias 对比

Fig. 8　Comparison of R^2, ubRMSE, and PBias of GPP products under different land cover types

其次，GPP 产品在高纬度地区表现较好，而在低纬度地区表现较差的原因主要可以归结为几个关键因素：①高纬度地区单一植被类型（如针叶林/苔原）与显著的光温季节性变化，使得模型参数化更为稳定。②叠加气候条件稳定、云层及气溶胶干扰较少等因素，共同保障了遥感数据质量与反演精度；而低纬度地区因植被结构复杂（如热带雨林）、光温水条件季节波动弱，且受云层覆盖与降水频繁干扰，导致数据缺失与噪声累积，加剧了模型估算不确定性[41]。③农田受高强度人为管理（如季节性耕作）引发的短周期植被动态扰动，以及混交林多物种冠层异质性引发的遥感信号混叠效应，分别从生态过程复杂性（模型动态响应不足）与遥感物理机制（光谱特征解译偏差）层面制约了 GPP 反演精度。

最后，本研究揭示 2003—2014 年全球年平均 GPP 呈显著上升趋势，其驱动机制可能源于大气 CO_2 浓度升高增强的碳汇效应，特别是在气候变暖显著的高纬度区域，但需注意二氧化碳施肥效应可能在大尺度空间受极端气候、土壤养分限制等因素削弱，导致部分产品存在高估风险[45]。本研究也存在一定程度的局限性，主要体现在：①基于卫星产品

的间接反演(0.05°或更低分辨率)可能忽略湿地/农田等高异质性区域的局部动态,导致 MK 趋势检验存在空间代表性偏差。因此,准确和精细的 GPP 产品可以为气候变化下 GPP 的评估和预测提供更准确参考。②本研究分析了 2003—2014 年全球 GPP 年际变化趋势,下一步还应考虑一年内 GPP 趋势以及环境因素对 GPP 的影响。对不同 GPP 产品的分析可以避免给定产品的固有局限性,有利于在全球范围内对年度 GPP 进行趋势分析,对产品的分析无法阐明其对气候变化等环境因素的反应,未来研究需将其与动态植被模型相结合。尽管如此,本研究依旧有以下贡献:首次对全球 8 种主流 GPP 产品进行跨算法、跨时空综合比对,揭示了不同模型在估算植被生产力时的系统性差异(例如同一区域不同产品年 GPP 可相差近 1 倍),为选择可靠数据提供了明确依据和支持——高纬度冻土区优先使用耦合水分胁迫响应模型,热带雨林区慎用易受光强饱和影响的 SIF 模型。同时,提供了"从数据验证到区域推荐"的分析流程思路,例如可以利用通量塔数据校正产品偏差以及结合气候分区筛选最优模型等,可应用于评估未来全新 GPP 产品,帮助政策制定者更精准地核算森林碳汇潜力,减少碳中和目标下的决策不确定性。

4 结论

(1)各产品年均 GPP 空间分布呈现显著纬度梯度(从大到小依次为低纬度、中纬度、高纬度)。空间上,除 GOSIF 与其他 GPP 产品具有较低的可比性外($R^2 \leqslant 0.573$),其余产品间的可比性均较高($R^2 \geqslant 0.702$),其中 EC - LUE 与 TL - LUE 因共享优化温度限制函数框架,空间一致性最高($R^2 = 0.992$);GOSIF 因依赖 SIF 线性反演未考虑 C3/C4 路径差异,在低纬度热带雨林区高估显著(年均 GPP 达 1 223.0 g/(m^2·a))。

(2)2003—2014 年期间,GPP 产品月平均 GPP 持续在 7 月达到峰值,并具有较高的不确定性,在 12 月或 1 月达到最低值。8 个产品的长期年平均 GPP 范围从 678.3 g/(m^2·a)(MOD17A2H)到 1 223.0 g/(m^2·a)(GOSIF)。年际趋势显示除 GLASS 外多数产品呈上升趋势,其中 GOSIF 因光强响应敏感上升率最高(6.42 g/(m^2·a));而 MuSyQ 则因耦合光合-蒸散过程,上升率最低(0.305 g/(m^2·a)),年际趋势平稳。

(3)基于通量塔观测数据验证,PMLv2 精度最优($R^2 = 0.664$),得益于双源模型的水分胁迫优化机制,推荐用于高纬度冻土区及湿地生态系统;而 EC - LUE($R^2 = 0.547$)和 GLASS($R^2 = 0.572$)表现较差,因未显式区分 C3/C4 植被的光合路径,在 CRO 和 MF 中误差显著。MOD17A2H 因固定光能利用率参数,在干旱区表现稳定但低估植被动态响应,适用于气象驱动明确的均质生态系统。区域评估显示产品精度由大到小依次为 AM、EA、ARA,主因站点密度与植被异质性差异且高纬度模型表现普遍优于中低纬度,凸显稀疏植被区与复杂生态系统仍是 GPP 反演的主要挑战。

参 考 文 献

[1] BARATI A A, ZHOOLIDEH M, AZADI H, et al. Interactions of land-use cover and climate change at global level: how to mitigate the environmental risks and warming effects[J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109829.

[2] CHEN J M. Carbon neutrality: toward a sustainable future[J]. The Innovation, 2021, 2(3): 100127.

[3] PIAO S, WANG X, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1: 14 - 27.

[4] DAMM A, ELBERS J, ERLER A, et al. Remote sensing of sun-induced fluorescence to improve modeling of diurnal courses of gross primary production (GPP)[J]. Global Change Biology, 2010, 16: 171 - 186.

[5] ANAV A, FRIEDLINGSTEIN P, BEER C, et al. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: a review[J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53(3): 785 - 818.

[6] 廖玮杰,焦悦,李世禧,等. 基于多种遥感产品的青藏高原长时间序列总初级生产力对比分析[J]. 生态学杂志, 2023, 43(6): 1859 - 1869.
LIAO Weijie, JIAO Yue, LI Shixi, et al. Comparative analysis of gross primary productivity in the Qinghai-Tibet Plateau based on long-time series of remote sensing products[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 43(6): 1859 - 1869. (in Chinese)

[7] 于贵瑞,伏玉玲,孙晓敏,等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的研究进展及其发展思路[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(增刊 1): 1 - 21.
YU Guirui, FU Yuling, SUN Xiaomin, et al. Progress and development strategy of ChinaFLUX: a terrestrial ecosystem flux observation network in China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(Supp.1): 1 - 21. (in Chinese)

[8] 夏烨,陈敬华,王绍强,等. 基于多源遥感信息的河北省陆地植被生产力模拟分析[J]. 生态学杂志, 2024, 43(12): 3735 - 3745.
XIA Ye, CHEN Jinghua, WANG Shaoqiang, et al. Simulation of vegetation productivity in Hebei based on multiple sources of remote sensing data[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(12): 3735 - 3745. (in Chinese)

[9] CAO M, WOODWARD F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change[J]. Global Change Biology, 1998, 4: 185 – 198.

[10] YUAN W, LIU S, ZHOU G, et al. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143: 189 – 207.

[11] 牛忠恩,闫慧敏,陈静清,等. 基于 VPM 与 MOD17 产品的中国农田生态系统总初级生产力估算比较[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 191 – 198.
NIU Zhongen, YAN Huimin, CHEN Jingqing, et al. Comparison of crop gross primary productivity estimated with VPM model and MOD17 product in field ecosystem of China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 191 – 198. (in Chinese)

[12] BAI Y, LIANG S, YUAN W. Estimating global gross primary production from sun-induced chlorophyll fluorescence data and auxiliary information using machine learning methods[J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 963.

[13] SJÖSTRÖM M, ZHAO M, ARCHIBALD S, et al. Evaluation of MODIS gross primary productivity for Africa using eddy covariance data[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 275 – 286.

[14] 唐欢,李振旺,丁蕾,等. 基于地面涡度数据的中国草原区 GPP 遥感产品验证[J]. 草业科学, 2018, 35(11): 2568 – 2583.
TANG Huan, LI Zhenwang, DING Lei, et al. Validation of GPP remote sensing products using eddy covariance flux observations in the grassland area of China[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(11): 2568 – 2583. (in Chinese)

[15] 曹玉娟,宋振华,武志涛, 等. 不同数据集的 1982—2017 年中国总初级生产力的时空动态[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 1644 – 1652.
CAO Yujuan, SONG Zhenhua, WU Zhitao, et al. Spatio-temporal dynamics of gross primary productivity in China from 1982 to 2017 based on different datasets[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 1644 – 1652. (in Chinese)

[16] WANG L C, ZHU H G, LIN A W, et al. Evaluation of the latest MODIS GPP products across multiple biomes using global eddy covariance flux data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(5): 418.

[17] 冯艾琳,武晋雯,孟莹,等. 基于 MODIS GPP 数据产品的辽宁省碳源/汇空间格局分布研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(4): 857 – 864.
FENG Ailin, WU Jinwen, MENG Ying, et al. Research on spatial distribution of carbon source/sink of Liaoning Province based on MODIS GPP data products[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(4): 857 – 864. (in Chinese)

[18] BAI Y, LIANG S L, JIA A L, et al. Different satellite products revealing variable trends in global gross primary production [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2023, 128(7): e2022JG006918.

[19] 田振兴,咎梅,汪进欣. 基于 MODIS 遥感数据的鄱阳湖流域生态系统生产力变化研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1933 – 1942.
TIAN Zhenxing, ZAN Mei, WANG Jinxin. Studies on temporal and spatial variations of ecosystem productivity in Poyang Lake Basin based on MODIS data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(10): 1933 – 1942. (in Chinese)

[20] 王永琳,迟永刚,周蕾. 2007 ~ 2018 年中国陆地植被总初级生产力与日光诱导叶绿素荧光的时空格局及其气候调控[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(3): 692 – 701.
WANG Yonglin, CHI Yonggang, ZHOU Lei. Spatiotemporal patterns and climate regulation of gross primary productivity and sun-induced chlorophyll fluorescence of terrestrial vegetation in China from 2007 to 2018[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(3): 692 – 701. (in Chinese)

[21] YUAN W P, CAI W W, XIA J Z, et al. Global comparison of light use efficiency models for simulating terrestrial vegetation gross primary production based on the LaThuile database[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 192(4): 108 – 120.

[22] LIU Y B, JU W W, 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[J]. Frontiers of Earth Science, 2013, 7(1): 112 – 127.

[23] ZSCHEISCHLER J, MAHECHA M D, BUTTLAR J B, et al. A few extreme events dominate global interannual variability in gross primary production[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(3): 35001 – 35013.

[24] ZHENG Y, SHEN R Q, WANG Y W, et al. Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation, 1982 – 2017[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 2725 – 2746.

[25] YUAN W, LIU S, YU G, et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1416 – 1431.

[26] LI X, XIAO J. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO – 2, MODIS, and reanalysis data[J]. Remote Sensing, 2019, 11: 517.

[27] RUNNING S, MU Q, ZHAO M. MOD17A2H MODIS/Terra gross primary productivity 8-day L4 global 500 m SIN grid V006 [DB/OL]. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD17A2H.

[28] WANG J M, SUN R, ZHANG H L, et al. New global MuSyQ GPP/NPP remote sensing products from 1981 to 2018[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 5596 – 5612.

[29] ZHANG Y Q, KONG D D, GAN R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002 – 2017[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 165 – 182.

[30] BI W J, HE W, ZHOU Y L, et al. A global 0.05° dataset for gross primary production of sunlit and shaded vegetation

canopies from 1992 to 2020[J]. Scientific Data, 2022, 9: 213.

[31] ZHANG Y, XIAO X, WU X, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000 – 2016[J]. Scientific Data, 2017, 4: 170165.

[32] PASTORELLO G, TROTTA C, CANFORA E, et al. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 225.

[33] 刘仁杰,孙意凡,张振乾,等. 基于产量监测系统的小麦产量图生成与空间变异性分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 136 – 143.
LIU Renjie, SUN Yifan, ZHANG Zhenqian, et al. Wheat yield distribution map generation and spatial variability analysis based on yield monitoring system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 136 – 143. (in Chinese)

[34] 贾悦,崔宁博,魏新平,等. 基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 130 – 138.
JIA Yue, CUI Ningbo, WEI Xinping, et al. Applicability evaluation of reference evapotranspiration algorithms in Yangtze River Basin based on inverse distance weighting method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 130 – 138. (in Chinese)

[35] QIAN L, WU L F, ZHANG Z T, et al. High uncertainty of evapotranspiration products under extreme climatic conditions[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 110332.

[36] 程小强,周兆叶,李旺平,等. 基于 MODIS 数据的中亚地区旱情监测及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 128 – 137.
CHENG Xiaoqiang, ZHOU Zhaoye, LI Wangping, et al. Monitoring drought situation and analyzing influencing factors in Central Asia using MODIS data[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 128 – 137. (in Chinese)

[37] 黄永江,白芳芳. 基于 Mann – Kendall 检验的盐渍化灌区排水变化规律研究—以河套灌区为例[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 1 – 9.
HUANG Yongjiang, BAI Fangfang. Research on the variation of drainage in salinized irrigation area based on Mann – Kendall test: taking Hetao Irrigation District as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 1 – 9. (in Chinese)

[38] QIAN L, YU X J, ZHANG Z T, et al. Assessing and improving the high uncertainty of global gross primary productivity products based on deep learning under extreme climatic conditions[J]. Science of the Total Environment, 2024, 957: 177344.

[39] ZHANG Y H, YE A Z. Would the obtainable gross primary productivity (GPP) products stand up? A critical assessment of 45 global GPP products[J]. Science of the Total Environment, 2021, 783: 146965.

[40] JIANG C, RYU Y. Multi-scale evaluation of global gross primary productivity and evapotranspiration products derived from Breathing Earth System Simulator (BESS)[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 528 – 547.

[41] GAO H Q, LIU S G, LIU W Z, et al. Global analysis of the relationship between reconstructed solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) and gross primary production (GPP)[J]. Remote Sensing, 2021, 13(14): 2824.

[42] HU J C, LIU L Y, YU H Y. Upscaling GOME – 2 SIF from clear-sky instantaneous observations to all-sky sums leading to an improved SIF – GPP correlation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 306: 108439.

[43] TAN B, WOODCOCK C E. The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105: 98 – 114.

[44] WU J, ALBERT L P, LOPES A P, et al. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests[J]. Science, 2016, 351(6276): 972 – 976.

[45] KEENAN T F, PRENTICE I C, CANADELL J G, et al. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO_2 due to enhanced terrestrial carbon uptake[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 13428.