

干旱影响下光能利用率模型模拟常绿针叶林 总初级生产力的比较

董 浩^{1,2,3}, 丁丽霞^{1,2,3}

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300; 3. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】研究干旱影响下不同光能利用率模型估算常绿针叶林总初级生产力 (GPP) 的能力, 为精准模拟北半球常绿针叶林的 GPP 提供参考依据。【方法】采用 MODIS 数据和通量站点观测数据, 在 8 d 尺度上对常绿针叶林的 GPP 进行参数化建模。首先利用皮尔逊相关系数和随机森林因子评价方法分析 GPP 各个驱动因子的重要性。使用降水量和潜在蒸散量 (PET) 构造干湿指数, 对各个站点进行干湿分类。其次在植被光合模型 (VPM) 的基础上, 去除其中的水分参数, 得到改进的植被光合模型 (VPMsw)。最后定量比较各站点在不同干湿类型下, VPM 模型与 VPMsw 模型拟合 GPP 的精度。【结果】①由驱动因子分析可知: GPP 与温度、PET 相关性较强, 与陆表水指数 (LSWI) 相关性较弱, 温度对 GPP 的重要性大于水分。②与 VPM 模型相比, VPMsw 模型在干旱和半干旱站点拟合 GPP 的精度有所提高, 均方根误差分别减少 6.5% 和 23.4%, 在半干旱地区精度提升效果更明显。【结论】干旱影响下, LSWI 不能较好地反映干旱和半干旱地区常绿针叶林的水分情况, 所以在干旱和半干旱地区, VPMsw 模型拟合 GPP 的精度更高。图 3 表 3 参 25

关键词: 总初级生产力; 光能利用率模型; 潜在蒸散量; 常绿针叶林; 干旱

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)06-1109-08

A comparison of different radiation use efficiency models in gross primary production accuracy under drought

DONG Hao^{1,2,3}, DING Lixia^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] With an investigation of different radiation use efficiency models estimating the gross primary production (GPP) of evergreen needle-leaved forest (ENF) under the influence of drought, this paper is aimed to provide basis for accurately simulating GPP of ENF in Northern Hemisphere. [Method] MODIS data and flux site observation data at 8-day scale were used to simulate the GPP of ENF. Firstly, Pearson correlation coefficient and random forest factor evaluation method were used to analyze the correlation and importance of each driving factor of GPP while precipitation and potential evapotranspiration (PET) were used to calculate the dry-wet index to classify the dry-wet type of each site. Secondly, the VPMsw model was constructed by deleting the moisture parameter in the vegetation photosynthesis model (VPM). Finally, the accuracy of GPP

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-06-11

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LY21C030001)

作者简介: 董浩 (ORCID: 0000-0003-3399-4710), 从事森林资源遥感监测与信息技术研究。E-mail: woshidonghao3@163.com。通信作者: 丁丽霞 (ORCID: 0000-0002-9016-9162), 副教授, 从事森林资源遥感监测与信息技术研究。E-mail: dlxlxy@126.com

estimated from VPM model and VPMsw model were quantitatively compared under different dry and wet types at each site. **[Result]** (1) GPP had strong correlation with temperature and PET, but weak correlation with Land Surface Water Index (LSWI). (2) compared with the VPM model, the accuracy of VPMsw model in fitting GPP was improved in arid and semi-arid sites, and the root mean square error (RMSE) decreased by 6.5% and 23.4%, respectively. the accuracy of GPP estimates in semi-arid sites was significantly improved by the VPMsw model. **[Conclusion]** VPMsw model was more accurate in simulating GPP in arid and semi-arid areas because LSWI could not well reflect the water content of the ENF in arid and semi-arid areas under the influence of drought. [Ch, 3 fig. 3 tab. 25 ref.]

Key words: gross primary production (GPP); radiation use efficiency model; potential evapotranspiration; evergreen needleleaved forests; drought

陆地总初级生产力 (GPP) 是指在单位时间和空间上, 绿色植物通过光合作用所固定的有机物总量。GPP 不仅能够反映植被群落的生产能力, 还是客观评价生态系统功能状况的重要指标^[1]。光能利用率模型可以利用植被吸收的光合有效辐射 (APAR) 和光能利用率估算 GPP, 已经成为估算区域和全球尺度 GPP 的主流方法, 包括 CASA、MOD17、GLO-PEM、EC-LUE、TL-LUE、VPM 等模型, 其中 VPM 模型因其结构简单, 计算效率高, 精度好等特点而被广泛运用^[2-3]。增强型植被指数 (EVI) 和陆表水指数 (LSWI) 是 VPM 模型的主要驱动因子, 在估计 GPP 中起到重要的作用。EVI 已被广泛用于指示植被覆盖状况, 是估计 GPP 较好的参数^[4-5]。刘丹等^[6]认为: LSWI 对土壤相对湿度很敏感。然而, 叶昊天^[7]研究发现: LSWI 并不能很好地反映生态系统土壤含水量的大小, 因此其准确性还有待考证。蒸散量是地球水循环的关键驱动因子, 主要与温度和降水有关, 也与叶面积有关, 是影响干旱的重要因素^[8-9]。干旱不仅会影响植被的形态特征和代谢系统, 还会减少光合有效面积, 影响植被 GPP 的大小^[10-11]。因此, 本研究利用 MODIS 及通量塔数据, 对 GPP 的驱动因子进行了分析, 利用潜在蒸散量 (PET) 和降水量 (P) 对站点进行干湿划分, 探究 LSWI 参数的准确性及在干旱影响下不同光能利用率模型模拟 GPP 的能力, 对准确模拟北半球常绿针叶林 GPP 提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究对象为北半球常绿针叶林 (ENF) 的 23 个站点, 时间从 2001–2014 年, 纬度为 38°53'43"~67°21'43"N(表 1)。站点包括温带大陆性气候、高原山地气候、地中海气候等多种干湿类型的气候带。

表 1 北半球常绿针叶林通量塔站点分布情况

Table 1 Distribution of flux tower sites of evergreen needleleaved forests in Northern Hemisphere

站点名称	纬度	经度	海拔/m	站点名称	纬度	经度	海拔/m
CA-Man	55°52'47"N	98°28'51"W	259	CZ-BK1	49°30'08"N	18°32'13"E	875
CA-Obs	53°59'14"N	105°07'04"W	629	DE-Obe	50°47'01"N	13°43'11"E	735
CA-Qfo	49°41'33"N	74°20'32"W	382	DE-Tha	50°57'49"N	13°34'01"E	380
FR-LBr	44°43'02"N	0°46'09"W	61	FI-Hyy	61°50'51"N	24°17'42"E	181
IT-Ren	46°35'13"N	11°26'01"E	1 730	FI-Sod	67°21'43"N	26°38'16"E	180
IT-SRo	43°43'40"N	10°17'04"E	6	IT-Lav	45°57'22"N	11°16'53"E	1 353
US-Blo	38°53'43"N	120°37'58"W	1 315	NL-Loo	52°10'00"N	5°44'37"E	25
US-GBT	41°21'57"N	106°14'23"W	3 191	RU-Fyo	56°27'41"N	32°55'20"E	265
CA-TP1	42°39'39"N	80°33'34"W	265	US-GLE	41°21'59"N	106°14'24"W	3 197
CA-TP3	42°42'24"N	80°20'54"W	184	US-Me2	44°27'08"N	121°33'27"W	1 253
CA-TP4	42°42'37"N	80°21'27"W	184	US-NR1	40°01'58"N	105°32'47"W	3 050
CH-Dav	46°48'55"N	9°51'21"E	1 639				

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据 MODIS 数据来源于美国国家航空航天局 (NASA) Terra 卫星传感器。数据通过输入通量塔站点的经纬度下载 (<https://modis.ornl.gov/globalsubset/>), 包括 2001–2014 年的光合有效辐射吸收比 (MOD15A2H)、潜在蒸散量 (MOD16A2) 和地表反射率 (MOD09A1), 时间步长为 8 d, 空间分辨率为 500 m。

1.2.2 通量塔数据 涡流协方差测量数据采集自 FLUXNET 2015 数据集, 该数据集可从 FLUXNET 通量观测网站下载 (<https://fluxnet.org/about/>), 包括 2001–2014 年的 GPP、温度、降水、短波辐射数据集。时间步长为每天。

1.2.3 数据处理 为了与模型中遥感参数步长相匹配, 对通量塔数据进行 8 d 的累加。建立通量塔数据与遥感数据相匹配的 2001–2014 年时间序列, 删除遥感数据中的空缺值以及排除平均值的 3 倍标准差之外的异常值。本研究的陆表水指数 (I_{LSW})、增强型植被指数 (I_{EV})、光合有效辐射吸收比 (F_{PAR}) 计算如下:

$$I_{LSW} = (r_{nir} - r_d) / (r_{nir} + r_d); \quad (1)$$

$$I_{EV} = [2.5(r_{nir} - r_R)] / (r_{nir} + 6r_R - 7.5r_b + 1); \quad (2)$$

$$F_{PAR} = I_{EV}。 \quad (3)$$

式 (1)~(3) 中: r_{nir} 为近红外波段的反射值; r_d 为短波红外波段的反射值; r_R 为红光波段的反射值; r_b 为蓝光波段的反射值。

1.3 干湿度指数

不同水热条件下植被的生长状况有明显差异, 在研究 GPP 时, 有必要针对具体的气候区域进行研究^[12]。降水和蒸散分别是植被获取和失去水分的主要途径, 用这 2 个变量构造干湿度指数, 可以反映站点的水分情况。其中降水数据为实际观测值, 而遥感数据潜在蒸散量与温度、光照和 GPP 具有很高的相关性, 因此用于构造干湿度指数 (I_D) 具有合理性, 即 1 a 降水量和潜在蒸散量累加和的比值, 其计算如下:

$$I_D = \sum_{i=1}^n P_i / \sum_{i=1}^n P_{eti}。 \quad (4)$$

式 (4) 中: P_i 为 8 d 的降水量 (mm), P_{eti} 为 8 d 的潜在蒸散量 (mm), i 为站点数据的条号, $i=1, 2, 3, \dots, n$, n 为站点数据的总条数。根据干湿度指数将站点分为^[13]: 干旱地区 (I_D 为 0.25~0.50)、半干旱地区 (I_D 为 0.50~0.67)、半湿润地区 (I_D 为 0.67~1.00) 和湿润地区 (I_D 为 1.00~2.00)。

1.4 基于植被光合模型 (VPM) 的 GPP 估算

1.4.1 VPM 模型 VPM 模型是利用温度、水分等环境因子以及涡度观测碳通量数据, 并且考虑了植被叶绿素吸收的光合有效辐射来估计 GPP 的 1 种光能利用率模型。VPM 模型的一般形式有:

$$G_{PP} = \varepsilon F_T F_W F_P F_{PAR} P_{AR}; \quad (5)$$

$$P_{AR} = 0.45 S_{Wrad}; \quad (6)$$

$$F_T = [(T - T_{min})(T - T_{max})] / [(T - T_{min})(T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2]; \quad (7)$$

$$F_W = (1 + I_{LSW}) / (1 + I_{LSWmax})。 \quad (8)$$

式 (5)~(8) 中: G_{PP} 表示总初级生产力; ε 表示最大的光能利用效率; F_T 、 F_W 和 F_P 分别表示模拟温度、水、物候对 GPP 的影响, 本研究 F_P 取值为 1^[14]; F_{PAR} 表示植被吸收的光合有效辐射的比例; P_{AR} 表示光合有效辐射; S_{Wrad} 表示站点短波辐射; T 表示温度; T_{opt} 表示植被生长所需温度最优值; T_{max} 表示温度最大值; T_{min} 表示温度最小值; 当 T 小于 T_{min} 时, F_T 等于 0, 当 T 大于 T_{max} 时, F_T 等于 1。在拟合时 T_{min} 取值 -5 °C, T_{max} 取值 40 °C, T_{opt} 通常取值 20 °C^[15], 但在本研究中, ε 和 T_{opt} 通过非线性拟合得到^[16]。 I_{LSW} 为陆表水指数, I_{LSWmax} 为生长季最大陆表水指数。

1.4.2 植被光合改进模型 (VPMsw) LSWI 由 MODIS 遥感数据中的地表反射率计算得到, 但由于常绿针叶林林冠层绿度季节变动性较弱, 因此遥感信息提取存在较大的不确定性^[17]。在不同干湿类型的

23 个站点上, 分别作出各站点 2001–2014 年的年平均 LSWI 与年尺度上的日平均降水量 (图 1)。LSWI、日平均降水量分别由遥感数据和站点观测数据得到, 发现 LSWI 在干旱和半干旱地区的数值高于半湿润地区, 而降水量从干旱区到湿润区依次递增, 两者相矛盾, 说明 LSWI 可能在干旱和半干旱地区不能反映常绿针叶林的水分情况。为了提高干旱和半干旱地区 GPP 的估算精度, 将 VPM 模型中的模拟水 (F_w) 因子去除, 生成改进的 VPMsw 模型, 计算如下:

$$GPP = \varepsilon F_T F_P F_{PAR} P_{AR} \quad (9)$$

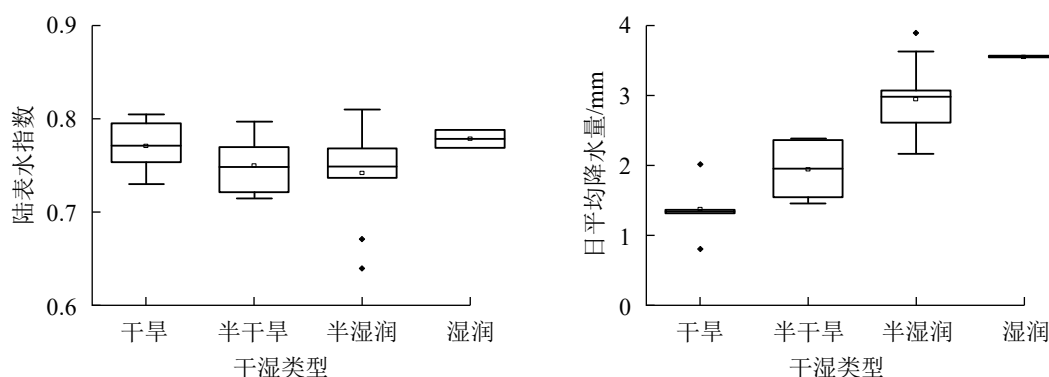


图 1 不同干湿类型站点陆表水指数和日平均降水量分布

Figure 1 Distribution of land surface water index and daily mean precipitation at different dry and wet stations

1.5 评价方法

1.5.1 因子重要性评价 通过皮尔逊相关性分析, 分析温度、陆表水指数、光合有效辐射和潜在蒸散量对 GPP 影响的重要性。本研究使用随机森林算法分析温度、光照和水分对 GPP 的重要性, 通过打乱其中 1 个因子的取值造成随机森林前后结果的错误率, 错误率越高说明该因子越重要^[18]。该方法对异常值具有较好的容忍度, 并且不容易出现过拟合现象。

1.5.2 模型精度评价 采用均方根误差和决定系数来检验模型的精度, 均方根误差越小, 偏离程度越小, 表现力越好。决定系数越大, 解释程度越高, 效果越好^[19]。

2 结果与分析

2.1 驱动因子与 GPP 相关性分析

由皮尔逊相关性分析可知: GPP 与温度、潜在蒸散量和光合有效辐射相关系数较高, 而与陆表水指数相关系数较低 (表 2)。

随机森林分析结果表明: 在 23 个站点中, 17 个站点以温度为主导因子, 重要性达 70% 以上; 5 个站点以光照为主导因子, 重要性超过 50%; 仅 1 个站点 (US-Blo) 是以水分为主导因子的, 重要性达 60%。

2.2 干湿度划分及模型拟合

对所有站点区分干湿类型后, 使用 VPM 和 VPMsw 模型模拟 GPP, 计算均方根误差和决定系数 (R^2), 结果见表 3。在干旱和半干旱地区, VPMsw 模型的 R^2 比 VPM 模型高, 但均方根误差比 VPM 模型低。VPMsw 模型在干旱站点上均方根误差平均减少了 6.5%, 在半干旱站点上均方根误差平均减少了 23.4%, 在半干旱地区精度提高的效果较好; 而在半湿润和湿润地区, VPM 模型的精度比 VPMsw 模型高。基于 VPMsw 模型在干旱和半干旱地区较好的模拟效果, 将干旱和半干旱站点所有数据实测值与估计值进行线性拟合 (图 2) 发现: 相比 VPM 模型, VPMsw 模型在干旱地区模拟 GPP 的精度高于半干旱地区。

2.3 不同干湿类型的日平均降水量

从图 3 可见: 从干旱地区到湿润地区, 日平均降水量总体呈逐渐增大趋势, 但也存在部分站点降水

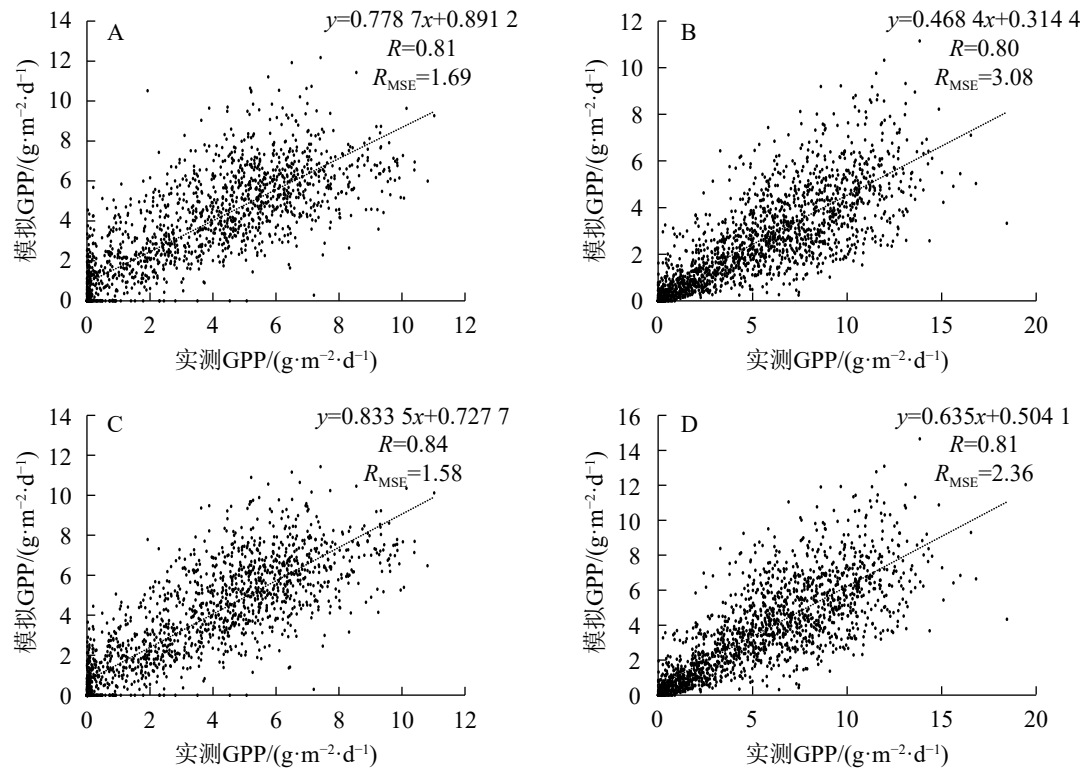
表 2 各因子之间皮尔逊相关性

Table 2 Pearson correlation among the factors					
因子	陆表水指数	光合有效辐射	温度	潜在蒸散量	GPP
陆表水指数	1	-0.31**	-0.45**	-0.36**	-0.28**
光合有效辐射	-0.31**	1	0.68**	0.86**	0.60**
温度	-0.45**	0.68**	1	0.74**	0.74**
潜在蒸散量	-0.36**	0.86**	0.74**	1	0.66**
GPP	-0.28**	0.60**	0.74**	0.66**	1

说明: **表示极显著相关 ($P < 0.01$)

表 3 站点干湿湿度指数及模型均方根误差对比

Table 3 Comparison of dry humidity index and model root mean square error											
干湿类型	站点	干湿湿度指数	均方根误差		决定系数		干湿类型	站点	干湿湿度指数	均方根误差	
			VPMsw模型	VPM模型	VPMsw模型	VPM模型				VPMsw模型	VPM模型
干旱	CA-Man	0.28	1.28	1.58	0.71	0.77	半湿润	FR-LBr	0.73	2.27	2.15
	US-GBT	0.29	1.29	1.70	0.83	0.66		CH-Dav	0.76	2.17	2.38
	US-Me2	0.35	1.91	1.96	0.51	0.51		IT-Ren	0.76	2.09	1.85
	CA-Obs	0.41	1.23	1.44	0.78	0.68		DE-Obe	0.79	3.69	3.53
	US-NR1	0.47	1.58	1.72	0.77	0.72		CA-TP1	0.80	3.84	3.73
半干旱	RU-Fyo	0.50	2.48	2.77	0.65	0.53		CA-TP4	0.81	2.46	2.20
	FI-Hyy	0.56	2.17	2.53	0.69	0.49		CA-TP3	0.82	2.46	2.15
	FI-Sod	0.62	1.55	1.90	0.63	0.38		CA-Qfo	0.94	1.39	1.28
	IT-SRo	0.62	3.19	3.00	0.36	0.36		US-GLE	0.95	1.39	1.24
	DE-Tha	0.66	2.93	3.03	0.67	0.57	湿润	CZ-BK1	1.00	3.23	3.28
	NL-Loo	0.67	2.49	2.72	0.71	0.61		IT-Lav	1.04	3.59	3.48
半湿润	US-Blo	0.72	1.75	2.48	0.42	0.49					



A和B分别表示VPM模型在干旱站点和半干旱站点拟合的GPP；C和D分别表示VPMsw模型在干旱站点和半干旱站点拟合的GPP。*R*表示相关系数；*R*_{MSE}表示均方根误差

图 2 干旱和半干旱站点 GPP 拟合精度对比

Figure 2 Comparison of fitting accuracy of GPP between arid and semi-arid sites

量突增的情况，如 US-NR1、IT-SRo、DE-Tha、US-Blo 和 US-GLE 站点。而日平均降水量标准差也从干旱地区到湿润地区呈逐渐增大趋势，其中 US-Me2、FI-Hyy、IT-SRo、DE-Tha 和 US-Blo 站点的日平均降水量标准异常大，且这些站点的日平均降水量都处于所在干湿区降水量的较高水平。日平均降水量标准异常大的站点在干旱地区有 4 个，湿润地区仅 1 个。

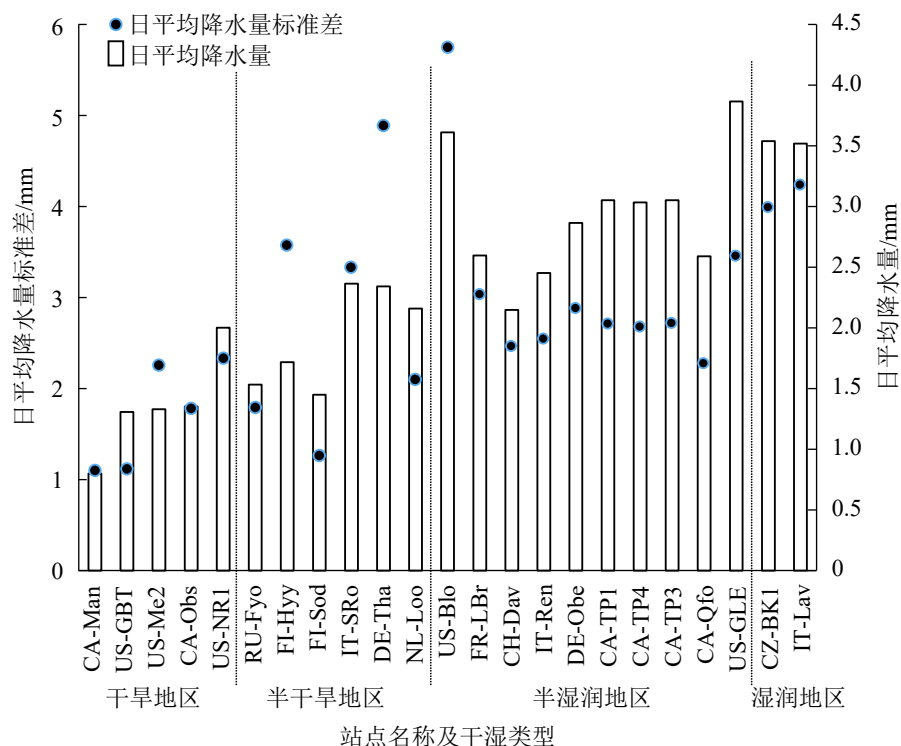


图3 每个站点的日平均降水量及其标准差

Figure 3 Average daily precipitation and standard deviation in each site

3 结论与讨论

3.1 结论

常绿针叶林 GPP 的主要驱动因子是温度、潜在蒸散量, LSWI 与 GPP 的相关性最低。干旱和半干旱地区, LSWI 不能较好地反映常绿针叶林的水分情况, 所以在干旱和半干旱地区, VPMsw 模型拟合 GPP 的精度较高。

3.2 讨论

温度与 GPP 的相关性最高, 这与贺忠华等^[20]的研究结果一致。温度的适量增加有助于延长植被生长季的长度, 对 GPP 增加效果明显, 是影响植被 GPP 的主要驱动因子^[21-22]。

水分与 GPP 的相关性最低。由表 3 可知: 在不同干湿类型地区, LSWI 对 GPP 估计的影响从大到小依次为干旱区、半干旱地区、半湿润、湿润地区。也有研究表明: LSWI 不能反映近岸地区潮汐作用对植被光合作用的影响, 导致 VPM 模型的拟合效果变差^[23]。

本研究发现: 温度为主导因子的站点最多且重要性最大, 认为温度的影响力大于水分。温度是植被生长的主要驱动因子, 水分只是植被生长的限制因子。在干旱和半干旱地区常年降水量较低, 降水主要来自于夏季。从干旱和半干旱部分站点过高的日降水量标准差可知: 这些站点受到高温胁迫导致夏季降水的天数减少, 而半湿润和湿润地区日降水量较多, 能有效缓解高温对植被造成的生产力下降的负面影响^[24], 其降水量标准差大是由于日降水量分布范围大。在干旱和半干旱地区植被更易受到高温和缺水的影响, 因此植被在干旱和半干旱地区更易受到水分的限制作用。其他研究也表明: 高温和缺水会导致 VPM 模型拟合的 GPP 不准确^[25], 这是因为遥感数据不能准确地反映水分的变化。由于温度变化比较稳定, 且遥感数据获取的温度比较准确, 因此为了更准确地使用 VPM 模型拟合 GPP, 在干旱和半干旱地区需要更准确的遥感数据来反映水分因子。

本研究发现: LSWI 参数在干旱和半干旱的常绿针叶林区域不能很好地表现水分情况, 从而影响了 VPM 模型拟合 GPP 的准确性。本研究构造的干湿指数可在长时间尺度上区分站点的水分情况; 对干湿指数进行变换处理, 使之成为可直接带入模型的水分参数还有待研究。未来在干旱和半干旱地区找到准确反映水分状况的遥感数据是提高模型拟合 GPP 的关键。

4 参考文献

- [1] 张方敏, 居为民, 陈镜明, 等. 基于遥感和过程模型的亚洲东部陆地生态系统初级生产力分布特征[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(2): 307–318.
ZHANG Fangmin, JU Weimin, CHEN Jingming, *et al.* Characteristics of terrestrial ecosystem primary productivity in East Asia based on remote sensing and process-based model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(2): 307–318.
- [2] 陈静清, 闫慧敏, 王绍强, 等. 中国陆地生态系统总初级生产力 VPM 遥感模型估算[J]. 第四纪研究, 2014, **34**(4): 732–742.
CHEN Jingqing, YAN Huimin, WANG Shaoqiang, *et al.* Estimation of gross primary productivity in Chinese terrestrial ecosystems by using VPM model [J]. *Quaternary Sci*, 2014, **34**(4): 732–742.
- [3] WANG Zheng, XIAO Xiangming, YAN Xiaodong. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in northeastern China [J]. *Agric For Meteorol*, 2010, **150**(9): 1160–1167.
- [4] 刘世梁, 董玉红, 安南南, 等. 基于增强型植被指数序列和景观格局分析的松嫩平原盐碱地动态——以大安市为例[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(11): 3263–3269.
LIU Shiliang, DONG Yuhong, AN Nannan, *et al.* Dynamics of salinization land based on EVI series data and landscape pattern analysis in Songnen Plain: a case study in Da'an City [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(11): 3263–3269.
- [5] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, *et al.* Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, **300**(5625): 1560–1563.
- [6] 刘丹, 冯锐, 于成龙, 等. 基于植被指数的春玉米干旱响应遥感监测[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(20): 152–161.
LIU Dan, FENG Rui, YU Chenlong, *et al.* Remote sensing monitoring of drought response of spring maize based on vegetation indexes [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2019, **35**(20): 152–161.
- [7] 叶昊天. 锡林郭勒半干旱针茅草原夜间生态系统呼吸作用及生态系统呼吸模型研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
YE Haotian. *A Study of Nighttime Ecosystem Respiration and Ecosystem Respiration Model in a Semiarid Stipa Grassland of Xilin Gol*[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019.
- [8] CUI Mingyue, WANG Junbang, WANG Shaoqiang, *et al.* Temporal and spatial distribution of evapotranspiration and its influencing factors on Qinghai-Tibet Plateau from 1982 to 2014 [J]. *J Resour Ecol*, 2019, **10**(2): 213–224.
- [9] 宋成刚, 李红琴, 王军邦, 等. 青海海北高寒嵩草草甸系统水分利用效率特征[J]. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(6): 90–96.
SONG Chenggang, LI Hongqin, WANG Junbang, *et al.* Characterizing ecosystem water use efficiency of alpine Kobresia meadow over the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2017, **31**(6): 90–96.
- [10] BOVARD B D, CURTIS P S, VOGEL C S, *et al.* Environmental controls on sap flow in a northern hardwood forest [J]. *Tree Physiol*, 2005, **25**(1): 31–38.
- [11] 汪本福, 王晴芳, 李阳, 等. 干旱胁迫对水稻叶片生理生化特性的影响综述[J]. 湖北农业科学, 2019, **58**(23): 5–9.
WANG Benfu, WANG Qingfang, LI Yang, *et al.* Review on the effects of drought stress on physiological and biochemical characteristics of rice leaves [J]. *Hubei Agric Sci*, 2019, **58**(23): 5–9.
- [12] 袁文平, 蔡文文, 刘丹, 等. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(5): 541–550.
YUAN Wenping, CAI Wenwen, LIU Dan, *et al.* Satellite-based vegetation production models of terrestrial ecosystem: an overview [J]. *Adv Earth Sci*, 2014, **29**(5): 541–550.
- [13] 孔令颖, 扶松林, 韩晓阳, 等. 基于传统干湿指数的省域长历时气象干旱变化特征及其对旱作粮食单产的影响[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(3): 159–167.
KONG Lingying, FU Songlin, HAN Xiaoyang, *et al.* Spatiotemporal variation of long-term meteorological drought and its impacts on grain yield in Shaanxi Province based on the traditional arid-wet index [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2020, **27**(3): 159–167.
- [14] 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 Zhong'en, 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]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, **32**(4): 191 – 198.
- [15] XIAO Xiangming, ZHANG Qingyuan, BRASWELL B, *et al.* Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data [J]. *Remote Sensing Environ*, 2004, **91**(2): 256 – 270.
- [16] 刘正佳, 刘纪远, 邵全琴. 不同土地覆盖类型上植被生长的最适温度[J]. 地球信息科学学报, 2014, **16**(1): 1 – 7.
- LIU Zhengjia, LIU Jiyan, SHAO Quanqin. Optimum temperature of vegetation growth for various land cover types in China [J]. *J Geo-inf Sci*, 2014, **16**(1): 1 – 7.
- [17] JÖNSSON A M, EKLUNDH L, HELLSTRÖM M. Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology [J]. *Remote Sensing Environ*, 2010, **114**(11): 2719 – 2730.
- [18] LIAW A, WIENER M. Classification and regression by randomForest [J]. *R News*, 2002, **2/3**: 18 – 22.
- [19] 郭含茹, 张茂震, 徐丽华, 等. 基于地理加权回归的区域森林碳储量估计[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(4): 497 – 508.
- GUO Hanru, ZHANG Maozhen, XU Lihua, *et al.* Geographically weighted regression based on estimation of regional forest carbon storage [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(4): 497 – 508.
- [20] 贺忠华, 张育慧, 何月, 等. 浙江省近 20 年植被变化趋势及驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(8): 1530 – 1539.
- HE Zhonghua, ZHANG Yuhui, HE Yue, *et al.* Trends of vegetation change and driving factor analysis in recent 20 years over Zhejiang Province [J]. *Ecol Environ Sci*, 2020, **29**(8): 1530 – 1539.
- [21] 陈正华, 麻清源, 王建, 等. 利用 CASA 模型估算黑河流域净第一性生产力[J]. 自然资源学报, 2008, **23**(2): 263 – 273.
- CHEN Zhenghua, MA Qingyuan, WANG Jian, *et al.* Estimation of Heihe basin net primary productivity using the CASA model [J]. *J Nat Resour*, 2008, **23**(2): 263 – 273.
- [22] 杨明兴, 代侦勇, 杜启勇, 等. 遥感 GPP 模型在亚热带常绿林的应用比较[J]. 测绘地理信息, 2019, **44**(1): 69 – 73.
- YANG Mingxing, DAI Zhenyong, DU Qiyong, *et al.* Comparison of different GPP models in subtropical evergreen forest sites [J]. *J Geomatics*, 2019, **44**(1): 69 – 73.
- [23] 郭海强. 长江河口湿地碳通量的地面监测及遥感模拟研究[D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- GUO Haiqiang. *Carbon Fluxes over an Estuarine Wetland: In Situ Measurement and Modeling*[D]. Shanghai: Fudan University, 2010.
- [24] NIU Shuli, LI Zhixiong, XIA Jianyang, *et al.* Climatic warming changes plant photosynthesis and its temperature dependence in a temperate steppe of northern China [J]. *Environ Exp Bot*, 2007, **63**(1): 91 – 101.
- [25] 伍卫星, 王绍强, 肖向明, 等. 利用 MODIS 影像和气候数据模拟中国内蒙古温带草原生态系统总初级生产力[J]. 中国科学: 地球科学, 2008, **38**(8): 993 – 1004.
- WU Weixing, WANG Shaoqiang, XIAO Xiangming, *et al.* Using MODIS images and climate data to simulate the total primary productivity of temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia, China [J]. *Sci Sin Terrae*, 2008, **38**(8): 993 – 1004.