

任小丽,何洪林,张黎,等.散射辐射对青藏高原高寒草地总初级生产力模拟的影响[J].环境科学研究,2017,30(12):1898-1907.
REN Xiaoli, HE Honglin, ZHANG Li, et al. Effects of diffuse radiation on estimation of gross primary production of alpine grasslands on the Tibetan Plateau [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(12): 1898-1907.

散射辐射对青藏高原高寒草地总初级生产力模拟的影响

任小丽¹, 何洪林^{1,2*}, 张黎^{1,2}, 葛蓉^{1,2}, 曾纳^{1,2}, 李攀³, 于贵瑞^{1,2}

1.中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101
2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100190
3.中国科学院地球化学研究所,环境地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550081

摘要: 太阳辐射的散射组分能够增强植被冠层 LUE(light use efficiency, 光能利用率), 因此需要在生产力模型中显式地加入散射辐射的影响, 从而更准确地模拟植被冠层光合作用. 以青藏高原高寒草地为研究对象, 改进光能利用率模型, 增加散射辐射模块, 利用站点通量观测数据估计模型关键参数; 结合区域尺度气象数据和遥感数据, 模拟了 2003—2008 年青藏高原高寒草地区域尺度 GPP(gross primary production, 总初级生产力), 并量化了 GPP 模拟的不确定性, 进而通过分析模型改进前后 GPP 空间分布及其不确定性的差异量化了散射辐射的作用. 结果表明: 考虑散射辐射对 LUE 的影响后, 模型参数优化效果明显提升, 青藏高原高寒草地 GPP 的模拟效果得到提升; 2003—2008 年青藏高原高寒草地 GPP 模拟值呈现东南部较大, 西北部较小的空间格局, 与不考虑散射辐射的结果一致, 但 GPP 平均值由 312.3 g/(m²·a) 增至 341.7 g/(m²·a), 增幅约 9.4%, 说明不考虑散射辐射会低估青藏高原高寒草地 GPP; GPP 模拟值不确定性的空间分布与不考虑散射辐射的结果一致, 但是平均不确定性大小有所降低, 从 9.15% 降至 8.66%. 研究显示, 若在青藏高原高寒草地的 GPP 模拟中不考虑散射辐射, 虽不会影响其空间格局, 但会低估 GPP 模拟值的大小, 同时增加其不确定性.

关键词: 散射辐射; 光能利用率; 总初级生产力; 不确定性分析

中图分类号: X87

文章编号: 1001-6929(2017)12-1898-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.03.23

Effects of Diffuse Radiation on Estimation of Gross Primary Production of Alpine Grasslands on the Tibetan Plateau

REN Xiaoli¹, HE Honglin^{1,2*}, ZHANG Li^{1,2}, GE Rong^{1,2}, ZENG Na^{1,2}, LI Pan³, YU Guirui^{1,2}

1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: The effects of diffuse radiation on photosynthesis must be incorporated into ecosystem models to accurately simulate gross vegetation photosynthesis, since diffuse radiation can enhance vegetation canopy light use efficiency (LUE). We modified an LUE model to incorporate the effects of diffuse radiation on photosynthesis to simulate the gross primary production (GPP) of alpine grasslands on the Tibetan Plateau during 2003–2008, and quantified the effects of diffuse radiation on the estimation and uncertainty of GPP. Values of key model parameters were estimated using eddy covariance observational data. The results showed that: (1) The performance of the modified model in simulating GPP was improved by considering the impacts of diffuse radiation on LUE, with high correlation between the modeled

and observed GPP ($R^2 > 0.80$). (2) Compared to the results without considering diffuse radiation, GPP simulated by the modified model kept the same heterogeneous spatial pattern across the Tibetan Plateau, i. e., higher in the southeast and lower in the northwest. When incorporating the effects of diffuse radiation, the mean annual GPP in Tibetan alpine grasslands increased 9.4%, from 312.3 g/(m²·a) to 341.7 g/(m²·a). (3) The spatial distribution of the uncertainty in GPP was

收稿日期: 2017-04-14

修订日期: 2017-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500204); 国家自然科学基金项目(41571424); 科技基础性工作专项(2015FY110700)

作者简介: 任小丽(1984-),女,河北邢台人,助理研究员,博士,主要从事碳循环模型数据融合研究, renxl@igsnr.ac.cn.

* 责任作者,何洪林(1971-),男,湖南娄底人,研究员,博士,博导,主要从事碳循环模型和生态信息学研究, hehl@igsnr.ac.cn

opposite to that of GPP, with larger uncertainty occurring in regions with lower GPP, which was consistent with the results without considering diffuse radiation. The mean uncertainty decreased from 9.15% to 8.66% when diffuse radiation was considered. These results indicated that the magnitude of GPP will be underestimated, and the uncertainty of GPP will be overestimated, if the effects of diffuse radiation are not considered in the LUE model. This emphasizes the importance of diffuse radiation in GPP simulation using the LUE model.

Keywords: diffuse radiation; light use efficiency (LUE); gross primary production (GPP); uncertainty analysis

太阳辐射是地球上所有生物的主要能量来源^[1-2], 散射辐射在总辐射中占有相当的比重, 据祝昌汉^[3]统计, 我国散射辐射年总量与总辐射年总量的比率即散射比例平均为 46%; REN 等^[4]研究指出, 我国近 30 年散射比例均值高达 47%, 并且整体呈上升趋势, 青藏高原区域的上升趋势最为明显. 散射辐射能够到达植被冠层的更深处^[5], 增强冠层光能利用率^[6-7], 从而增强植被的光合作用^[2, 5, 8-12], 这也被称为散射辐射施肥效应^[13]. 因此, 植被冠层光合作用的精确模拟需要在模型中显式地加入散射辐射的影响, 但目前还很少有研究尝试区域尺度散射辐射影响的模拟. Mercado 等^[2]采用改进的 JULES 模型来模拟全球尺度散射辐射施肥效应, 结果表明 1960—1999 年期间散射比例的变化导致全球陆地碳汇增强了约 1/4. 我国目前关于散射辐射对生态系统碳收支的影响研究主要在站点尺度开展^[11-12, 14-17], 鲜有区域尺度散射辐射对生态系统碳收支的影响分析; 由于叶面积指数较高的陆地植被对散射辐射的增加更为敏感, 因此已有站点尺度的研究主要集中在森林生态系统类型, 对草地等其他生态系统类型的关注相对较少^[17]. ZHANG 等^[11-12]基于通量观测数据, 分析了散射辐射变化对我国东部典型森林生态系统碳吸收的影响, 结果表明适当的散射辐射比例能够增强森林冠层的碳吸收.

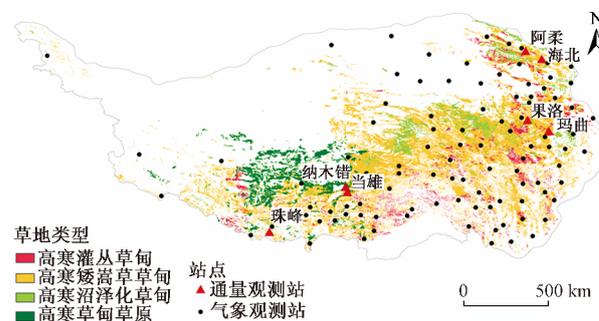
青藏高原是一个独特的地域单元, 具有独特的高原气候, 是受全球变化影响非常敏感的区域^[18], 被视为研究中国乃至全球气候变化的“天然实验室”^[19]. 高寒草地作为青藏高原地区广泛分布的植被类型, 不仅是亚洲中部高寒环境典型的生态系统类型之一, 而且在世界高寒地区中也极具代表性^[20]. 因此, 在该地区开展高寒草地生态系统生产力研究具有重要的科学意义. 范玉枝等^[14]研究表明散射辐射对当雄站(青藏高原西部)高寒草地生态系统碳收支影响较小; 而 BAI 等^[17]研究表明, 阴天情况下散射辐射的增加, 增强了阿柔站(青藏高原东部)高寒草地的净生态系统碳交换. 目前散射辐射对青藏高原区域尺度高寒草地生态系统生产力的影响尚鲜见报道. HE

等^[21]利用光能利用率模型估算了青藏高原高寒草地的 GPP (gross primary production, 总初级生产力), 并分析了其不确定性. 该研究的假设是考虑了散射辐射对 LUE (light use efficiency, 光能利用率) 的影响之后, 可以更准确地模拟青藏高原高寒草地 GPP, 其大小会有所增加, 不确定性会有所减小. 因此, 该研究在 HE 等^[21]研究的基础上, 改进光能利用率模型, 加入散射辐射对 GPP 影响的模拟, 重新估计模型关键参数; 在此基础上, 利用区域尺度气象数据和遥感数据, 模拟青藏高原高寒草地区域尺度 GPP, 并量化其不确定性; 进而分析考虑散射辐射之后 GPP 模拟值是否有所增加, 其不确定性是否有所减小, 验证该研究的理论假设是否成立, 以期青藏高原高寒草地 GPP 的精确估算提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究站点和区域

青藏高原气温显著低于同纬度的平原地区, 具有寒冷、少雨、干燥、多风、太阳辐射强、日照长等特点. 收集了位于该地区的 10 个高寒草地通量观测站点(见图 1), 站点具体信息见文献 [21-22]. 根据我国 1:1 000 000 草地植被类型图, 充分考虑已有观测站



注: 阿柔—AR; 海北—HBSH, HBKO 和 HBSW;
果洛—GLKO; 玛曲—MQSW; 纳木错—NMCST;
当雄—DXSW 和 DXST; 珠峰—ZFST.

图 1 青藏高原 4 种高寒草地及通量和气象观测站点空间分布

Fig.1 Spatial distribution of four alpine grassland types and flux and meteorological observation sites on the Tibetan Plateau

点的空间代表性,该研究聚焦于4个草地类型——高寒矮嵩草草甸(alpine kobresia meadow,KO)、高寒灌丛草甸(alpine shrub meadow,SH)、高寒沼泽化草甸(alpine swamp meadow,SW)和高寒草甸草原(alpine meadow steppe,ST),四者约占青藏高原总面积的28.8%,其中高寒矮嵩草草甸分布最广,高寒草甸草原分布最少。

1.2 研究基础数据

1.2.1 站点数据

站点数据包括8 d尺度的GPP、气温、PAR(photosynthetic active radiation,光合有效辐射)、EVI(enhanced vegetation index,增强型植被指数)、LSWI(land surface water index,陆地表面水分指数)数据。GPP、气温和PAR是利用涡度相关技术观测并经过质控、拆分和插补得到,EVI和LSWI是下载的MODIS产品。

1.2.2 区域尺度数据

区域尺度数据包括2003—2008年8 d尺度1 km分辨率的气温、PAR、EVI和LSWI。气温和PAR是以中国气象局站点(见图1)观测数据为基础,利用ANUSPLIN 4.4软件的薄盘样条函数插值得到,该软件不仅可以输出空间插值结果,还可以输出相应的误差文件^[23]。EVI和LSWI是利用MODIS地表反射率数据波段运算得到。

1.3 VPM模型改进

LUE(light use efficiency,光能利用率)模型由Monteith^[24]于1972年首次提出,该模型将植被生产力表达为APAR(Absorbed PAR,吸收的光合有效辐射)与植被LUE的乘积。LUE模型有两个基本假设:①假定生态系统生产力通过LUE与APAR直接相关,这里LUE定义为每单位APAR的碳累积量;②假定“实际LUE”可以通过环境胁迫因子(如温度、水分等)来修正“最大LUE”而得到^[25]。VPM(vegetation photosynthesis model)模型是XIAO等^[26]提出的模拟生态系统GPP的LUE模型,其模型结构见式(1)~(3),光能利用率用最大光能利用率与气温、水分和物候3个环境限制因子的乘积来表示,HE等^[21]对其中的水分限制因子进行了改进。

$$GPP = \varepsilon_g \times FPAR_{PAV} \times PAR \quad (1)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \times T_{scalar} \times W_{scalar} \times P_{scalar} \quad (2)$$

$$FPAR_{PAV} = a \times EVI \quad (3)$$

式中: ε_g 为光能利用率,g/mol(以C计); $FPAR_{PAV}$ 为光合植被吸收的光合有效辐射比例;PAR是光合有

效辐射,g/mol($m^2 \cdot d$); ε_0 为最大光能利用率,g/mol(以C计); T_{scalar} 、 W_{scalar} 和 P_{scalar} 分别是气温、水分和物候3个环境因子对 ε_0 的限制作用,具体表达形式参见文献^[21]。

为了探索散射辐射对GPP模拟的影响,需要在VPM模型中考虑散射辐射对植被光能利用率的影响。参考Turner等^[27]中的方法,笔者在HE等^[21]修正的VPM模型(记作VPM模型)基础上进行了进一步改进,添加了散射辐射模块,称为VPM_D模型。首先利用PAR和天文PAR计算云量指数(见式(4)),之后对云量指数进行标准化(见式(5)),最后将VPM模型中的 ε_0 用式(6)替换。

$$CI = 1 - \frac{PAR}{PAR'} \quad (4)$$

$$S_{CI} = \frac{CI - CI_{min}}{CI_{max} - CI_{min}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cs} + (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{cs}) \times S_{CI} \quad (6)$$

式中:CI为云量指数;PAR'为天文PAR,g/mol($m^2 \cdot d$),由于PAR'与天文总辐射(Q')的比例为40%,因此PAR'一般用 $0.4 \times Q'$ 来表示; Q' 利用地理纬度和太阳赤纬计算得到; S_{CI} 是标准化云量指数; CI_{max} 和 CI_{min} 是云量指数的最大和最小值; ε_{cs} 为晴天下的LUE; ε_{max} 为潜在最大LUE。

1.4 不确定性分析方法

采用MC(Monte Carlo,蒙特卡罗)数值模拟方法来量化GPP模拟的不确定性^[21,28]。MC数值模拟方法是一种计算机随机抽样方法,可以根据模型参数和驱动数据的不确定性随机抽取参数值和驱动数据值,该研究设定抽取1000个参数和驱动数据样本,从而利用模型模拟得到1000个GPP模拟值,通过计算其均值和标准差得到GPP的不确定性(定义为标准差与均值的比值,即变异系数)。

模型关键参数(ε_{cs} 和 ε_{max})本身的不确定性利用MCMC(Markov Chain Monte Carlo,马尔可夫链-蒙特卡罗)参数优化方法得到,具体是利用JAGS(Just Another Gibbs Sampler)软件包的Gibbs抽样实现,预热次数设定为 20×10^4 次,收敛后再抽样 5×10^4 次作为后验统计分析的样本。驱动数据气温和PAR的不确定性采用ANUSPLIN软件空间插值输出的误差文件;遥感数据的观测误差很难量化,参考已有研究^[21,29]假设EVI和LSWI误差落在 $\pm(0.02+0.02 \times \text{value})$ 范围内。

2 结果与讨论

2.1 模型参数化与验证

利用 MCMC 参数优化技术, 获取了 VPM 模型关键参数 (ε_0) 和 VPM_D 模型关键参数 (ε_{cs} 和 ε_{max}) 的估计值 (见表 1)。对于参数 ε_{cs} , 以高寒矮嵩草草甸为最高 (0.334 g/mol)、高寒草甸草原为最低 (0.244 g/mol), 高寒沼泽化草甸和高寒灌丛草甸居中, 分别为 0.324 和 0.296 g/mol; 对于参数 ε_{max} , 高寒灌丛草甸值最高 (0.643 g/mol), 高寒草甸草原最低 (0.392 g/mol), 高寒沼泽化草甸和高寒矮嵩草草甸居中, 分别为 0.473 和 0.467 g/mol。交叉验证结果表明 ε_{cs} 和 ε_{max} 这两个参数不仅在草地类型之间存在差异, 在同一草地类型内部也存在差异, 但类型内部差异明显小于类型之间的差异; 并且同一草地类型利用所有站点估计的参数值在交叉估计值的变化范围内, 说明利用多个站点估计的参数值更加健壮。

通过对比模型改进前后的参数优化结果, 发现考虑散射辐射之后的参数优化效果明显提升 (见表 1), 具体体现在: ①4 个高寒草地类型的 VPM_D 模型参数相比 VPM 模型参数的不确定性 (变异系数) 均明显降低, 高寒草甸草原的参数尤其明显, 由 22.2% 降至 5.4%; ②高寒矮嵩草草甸、高寒沼泽化草甸和高寒草甸草原的 VPM_D 模型参数交叉验证决定系数 (R^2) 在 0.779~0.956 之间, 而 VPM 模型仅为 0.161~0.718, 拟合效果明显提高; ③4 个高寒草地类型的 VPM_D 模型参数后验分布均符合正态分布 (见图 2), 而高寒草甸草原的 VPM 模型参数为偏态分布。这说明模型改进后, 由于考虑了散射辐射的影响, 模型参数能够被通量观测数据更好地约束。

表 1 青藏高原 4 种草地类型的 VPM_D 模型关键参数 (ε_{cs} 和 ε_{max}) 估计及交叉验证结果
Table 1 Leave-one-out and all-sites estimation of key parameters of VPM_D model (ε_{cs} and ε_{max}) for four alpine grassland types on the Tibetan Plateau

草地类型	站点	VPM 模型				VPM_D 模型						
		ε_0			R^2	ε_{cs}			ε_{max}			R^2
		平均值/ (g/mol)	标准差/ (g/mol)	变异系 数/%		平均值/ (g/mol)	标准差/ (g/mol)	变异系 数/%	平均值/ (g/mol)	标准差/ (g/mol)	变异系 数/%	
高寒矮 嵩草 草甸	GLKO & ARKO	0.346	0.016	4.742	0.718	0.352	0.008	2.324	0.386	0.009	2.392	0.840
	HBKO & ARKO	0.460	0.014	3.038	0.561	0.333	0.007	2.225	0.466	0.007	1.544	0.956
	HBKO & GLKO	0.423	0.016	3.723	0.682	0.358	0.013	3.575	0.516	0.010	1.886	0.818
	GLKO & ARKO & HBKO	0.425	0.013	2.953	—	0.334	0.007	2.185	0.467	0.007	1.508	—
高寒沼 泽化 草甸	DXSW & MQSW	0.533	0.047	8.839	0.653	0.340	0.022	6.462	0.422	0.017	3.945	0.917
	HBSW & MQSW	0.509	0.022	4.422	0.462	0.262	0.014	5.381	0.526	0.013	2.450	0.871
	HBSW & DXSW	0.503	0.021	4.16	0.428	0.374	0.015	3.970	0.448	0.012	2.616	0.911
	DXSW & MQSW & HBSW	0.522	0.021	4.092	—	0.324	0.013	3.978	0.473	0.011	2.326	—
高寒草 甸草原	ZFST & NMCST	0.207	0.11	53.228	0.161	0.251	0.068	26.956	0.408	0.051	12.458	0.852
	DXST & NMCST	0.184	0.041	22.126	0.231	0.243	0.035	14.374	0.397	0.022	5.606	0.779
	DXST & ZFST	0.233	0.056	24.147	0.216	0.228	0.035	15.523	0.391	0.022	5.577	0.879
	ZFST & NMCST & DXST	0.204	0.045	22.215	—	0.244	0.033	13.467	0.392	0.021	5.401	—
高寒灌 丛草甸	HBSH	0.443	0.012	2.709	—	0.296	0.012	3.873	0.643	0.015	2.393	—

利用参数优化后的 VPM 模型和 VPM_D 模型分别对 10 个通量观测站点的 8 d 尺度 GPP 进行模拟, 并与利用 NEE 观测数据拆分出来的 GPP 值进行比较, 结果如图 3 所示。改进后的 VPM_D 模型的 GPP 模拟值与观测值的相关性较高, 4 个草地类型的 R^2

均在 0.8 以上; 与改进前的 VPM 模型相比, 考虑散射辐射影响之后, 除了高寒沼泽化草甸, 其他类型模拟效果均更优。具体来讲, 高寒矮嵩草草甸和高寒草甸草原模拟效果得到提升, R^2 分别由 0.77 增至 0.86 和 0.84, RMSE 分别由 1.73 和 0.40 g/(m²·d) 降至

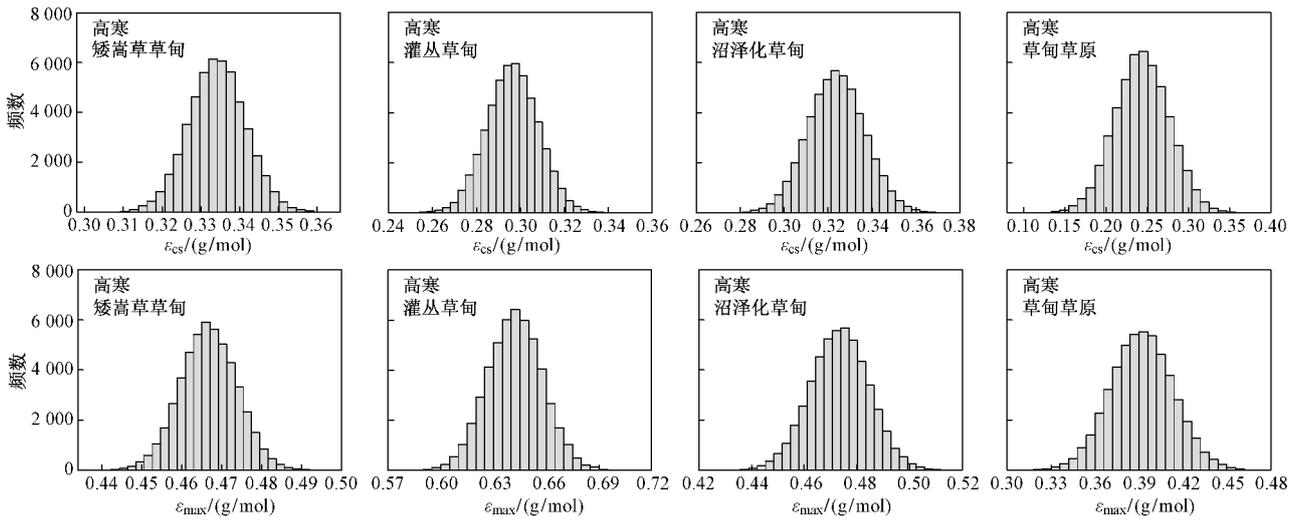


图2 青藏高原4种草地类型的VPM_D模型关键参数 ϵ_{cs} 和 ϵ_{max} 后验分布

Fig.2 Probability distributions of key parameters (ϵ_{cs} and ϵ_{max}) of VPM_D model for four alpine grassland types on the Tibetan Plateau

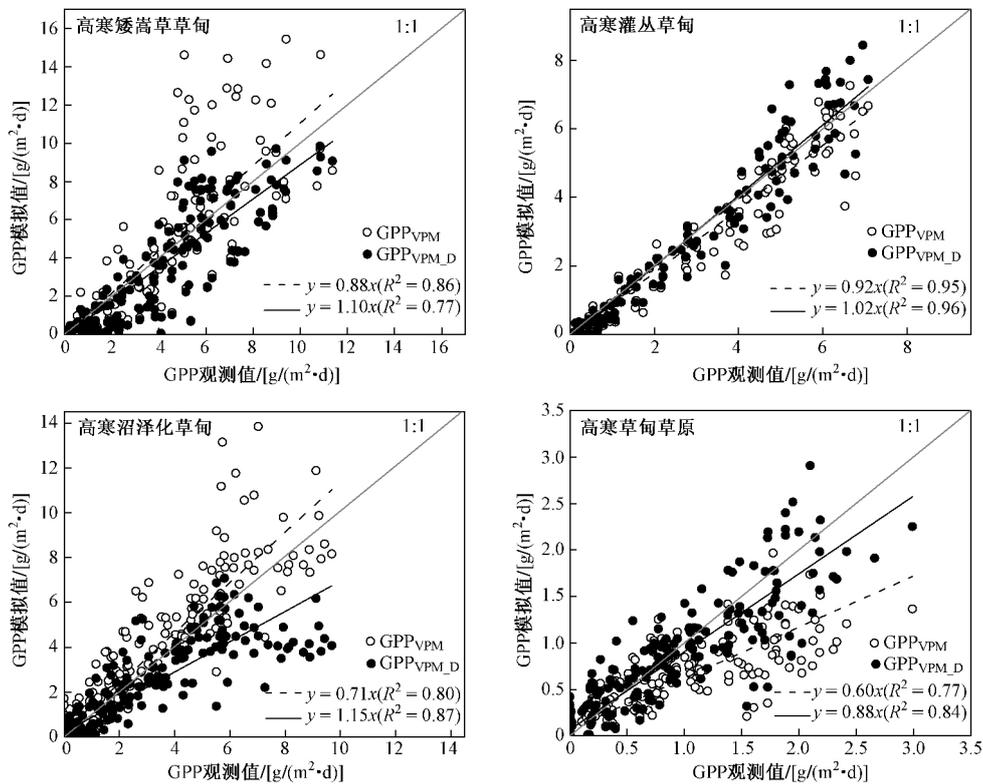


图3 青藏高原高寒草地4个草地类型的VPM模型与VPM_D模型的GPP模拟值与观测值散点图

Fig.3 Comparison between the observed and predicted GPP derived from the VPM and VPM_D model for four alpine grassland types on the Tibetan Plateau

1.11 和 0.27 $g/(m^2 \cdot d)$; 高寒灌丛草甸模拟效果略有提升 R^2 由 0.95 增至 0.96, RMSE 由 0.50 $g/(m^2 \cdot d)$ 降至 0.49 $g/(m^2 \cdot d)$; 高寒沼泽化草甸模拟效果稍有

下降 R^2 由 0.87 降至 0.80, RMSE 由 1.18 $g/(m^2 \cdot d)$ 增至 1.23 $g/(m^2 \cdot d)$. 这表明改进后的 VPM_D 模型总体上能够更好地模拟青藏高原高寒草甸的 GPP,

只有高寒沼泽化草甸这一种类型模拟效果稍有降低.

由于光能利用率模型假设 GPP 随辐射线性增加, 如果不考虑散射比例上升对 GPP 的贡献, 会导致 GPP 模拟值出现跷跷板现象, 即阴天时偏低、晴天时偏高. 因此, 改进前的 VPM 模型在云量指数较低时高估 GPP, 而在云量指数较高时低估 GPP, GPP 模拟值与观测值的残差与云量指数有一定的相关性, 而且表现出随云量指数增大而降低的特征(见图 4). 改进后的 VPM_D 模型由于考虑了散射辐射的影响, 减缓了 GPP 残差随云量指数的降低程度, 也降低了 GPP 残差与云量指数的相关性. 高寒矮嵩草草甸 GPP 残

差随云量指数的降低斜率由 -3.58 降至 -1.81, R^2 由 0.03 降至 0.01; 高寒灌丛草甸 GPP 残差随云量指数的降低斜率由 -5.38 降至 -0.95, R^2 由 0.30 降至 0.01; 高寒沼泽化草甸 GPP 残差随云量指数降低斜率由 -2.42 降至 -1.33, R^2 由 0.03 降至 0.01; 高寒草甸草原 GPP 残差随云量指数变化的斜率由下降 (-1.88) 转为略有上升 (0.22), R^2 由 0.20 降为 0. 可以看出, 改进后的 VPM_D 模型相对于 VPM 模型, 由于考虑了散射辐射的影响, GPP 残差与云量指数的相关性降低, 对晴天和阴天时的模拟效果也有所提升.

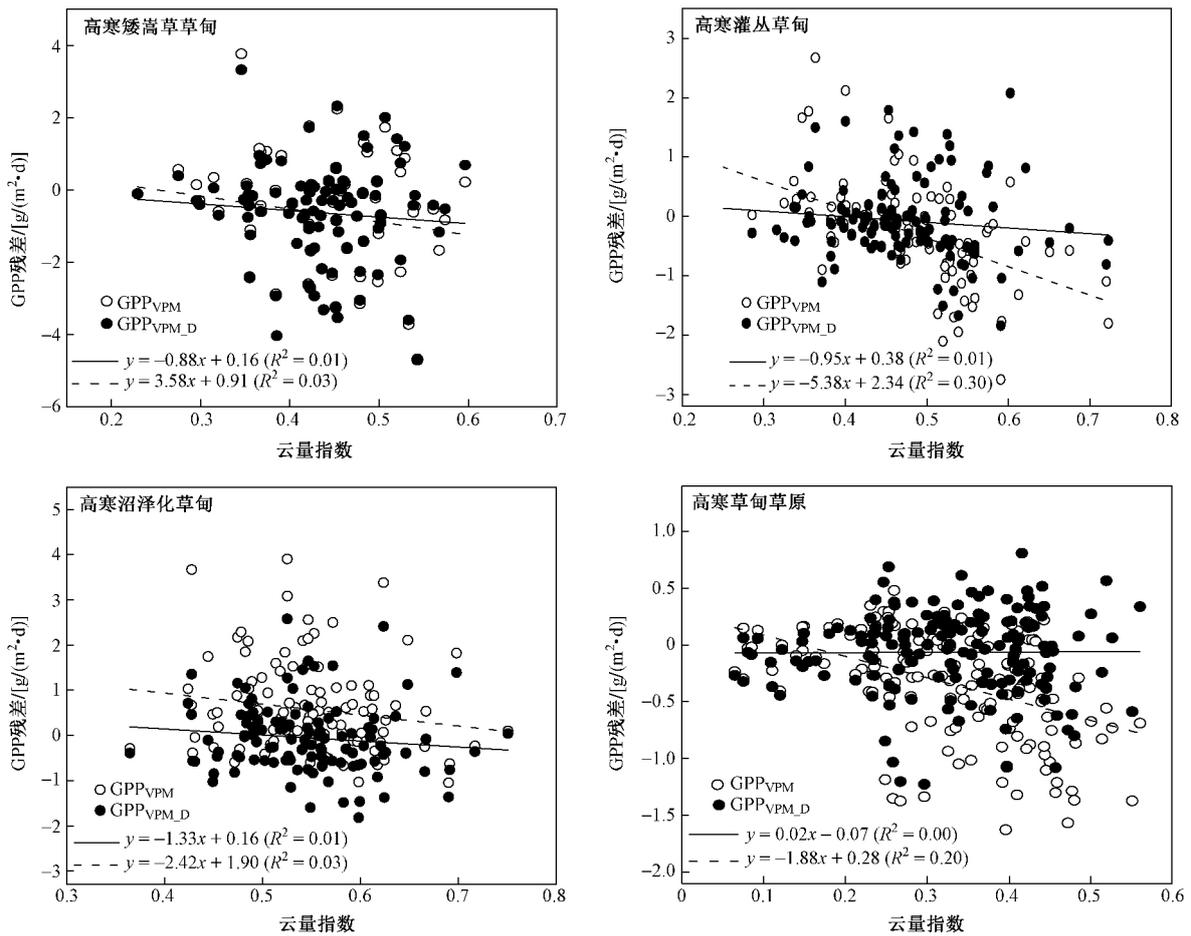


图 4 青藏高原高寒草地 4 个草地类型的 VPM 模型与 VPM_D 模型的 GPP 模拟值与观测值的残差随云量指数的变化

Fig.4 Relationship between the cloudiness index and the difference between observed GPP and simulated GPP modeled by VPM and VPM_D model for four alpine grassland types on the Tibetan Plateau

2.2 区域 GPP 空间分布和时间变异

在获取高寒矮嵩草草甸、高寒灌丛草甸、高寒沼泽化草甸和高寒草甸草原 4 种草地类型的关键参数估计值的基础上, 结合空间插值获取的区域气温和 PAR 数据, 以及 MODIS 的 EVI 和 LSWI 数据, 利用改

进前后的 VPM 和 VPM_D 模型, 获得了青藏高原高寒草地 2003—2008 年 8 d 尺度 GPP 的空间数据. VPM_D 模型模拟的 2003—2008 年 GPP 年均值空间分布如图 5 所示, 可以看出, 青藏高原高寒草地 GPP 有较大的空间异质性, 基本呈现东南部 GPP 较大、西

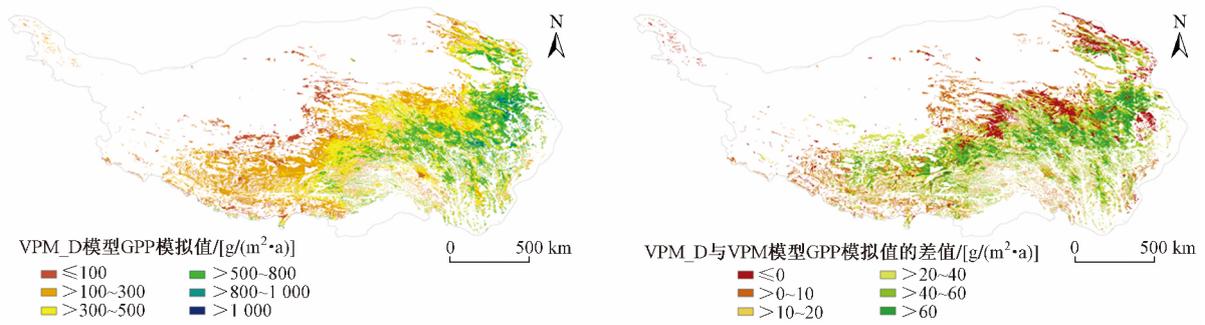


图5 青藏高原高寒草地 2003—2008 年 VPM_D 模型 GPP 模拟值及其与 VPM 模型模拟值差值的空间分布

Fig.5 The spatial distribution of annual GPP estimated by VPM_D model for the Tibetan alpine grasslands during 2003-2008 and the difference between GPP estimated by VPM_D and VPM model

北部 GPP 较小的空间格局,这与 VPM 模型结果一致,说明考虑散射辐射并不会影响 GPP 模拟值的空间格局. VPM_D 模型模拟的 2003—2008 年 GPP 多年均值为 $341.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,相比 VPM 模型模拟的 GPP 多年均值 ($312.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) 的增幅为 9.4% (见图 5) 这表明在青藏高原高寒草地的 GPP 模拟中不考虑散射辐射会低估生态系统生产力.

利用各草地类型的面积及 VPM_D 模型模拟的

GPP 空间数据计算得到各草地类型 GPP 模拟值总量的逐年变化(见表 2) 其中高寒矮蒿草草甸对整个区域的 GPP 贡献最大,高寒草甸草原贡献最小,高寒灌丛草甸和高寒沼泽化草甸居中,这与 VPM 模型模拟结果相一致.虽然高寒灌丛草甸单位面积 GPP 最大,但由于其面积远小于高寒矮蒿草草甸,因此 GPP 总量小于高寒矮蒿草草甸;高寒草甸草原无论是单位面积 GPP 还是 GPP 总量均为最小.

表 2 青藏高原高寒草地 4 种草地类型 2003—2008 年 VPM_D 模型模拟的 GPP 总量

Table 2 Annual GPP estimated by VPM_D model for four alpine grassland types on the Tibetan Plateau during 2003-2008 Tg/a

草地类型	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	多年平均值
高寒矮蒿草草甸	166.5	169.4	176.4	176.9	170.2	162.5	170.3
高寒灌丛草甸	38.2	38.3	40.2	40.0	40.0	37.5	39.0
高寒沼泽化草甸	25.6	26.6	28.7	28.4	27.3	26.0	27.1
高寒草甸草原	8.0	8.5	7.7	7.4	7.7	7.8	7.8
合计	238.3	242.7	253.0	252.7	245.3	233.8	244.3

改进后的 VPM_D 模型由于考虑了散射辐射的影响,相比 VPM 模型模拟结果,整个青藏高原高寒草地区域尺度的 GPP 模拟值由 223.3 Tg/a 增至 244.3 Tg/a . 其中高寒草甸草原 GPP 增加率最高,为 69.6% (由 4.6 Tg/a 增至 7.8 Tg/a); 其次是高寒灌丛草甸和高寒矮蒿草草甸,分别增加了 19.3% (由 32.7 Tg/a 增至 39.0 Tg/a) 和 10% (由 154.8 Tg/a 增至 170.3 Tg/a); 高寒沼泽化草甸 GPP 总量稍有下降,由 31.1 Tg/a 降至 27.1 Tg/a ,下降了约 12.9%,这是由于考虑散射辐射后高寒沼泽化草甸的参数估计值稍有下降所致.

通过计算每幅 8 d 尺度 VPM_D 模型模拟的 GPP 空间图中各类型的平均值,可以得到青藏高原高寒草地四种草地类型的 8 d 尺度 6 a GPP 季节变化情况

(见图 6). 可以看出,考虑了散射辐射的 VPM_D 模型很好地捕捉了青藏高原高寒草地 GPP 的季节变化特征.

2.3 区域 GPP 不确定性分析

基于 MCMC 技术估计得到的关键参数不确定性,ANUSPLIN 软件获取的气温和 PAR 空间不确定性,以及根据文献资料^[21, 29]确定的 EVI 和 LSWI 不确定性,利用 MC 数值模拟方法量化了 VPM 模型和 VPM_D 模型模拟的青藏高原高寒草地 GPP 的不确定性(定义为标准差与均值的比值). VPM_D 模型模拟得到的 GPP 标准差空间分布(见图 7)与 GPP 空间分布较为相似,也呈现西北部低东南部高的特点, GPP 值较大的地区其标准差也较大,这与 VPM 模型模拟结果相一致. VPM_D 模型模拟的 GPP 不确定性

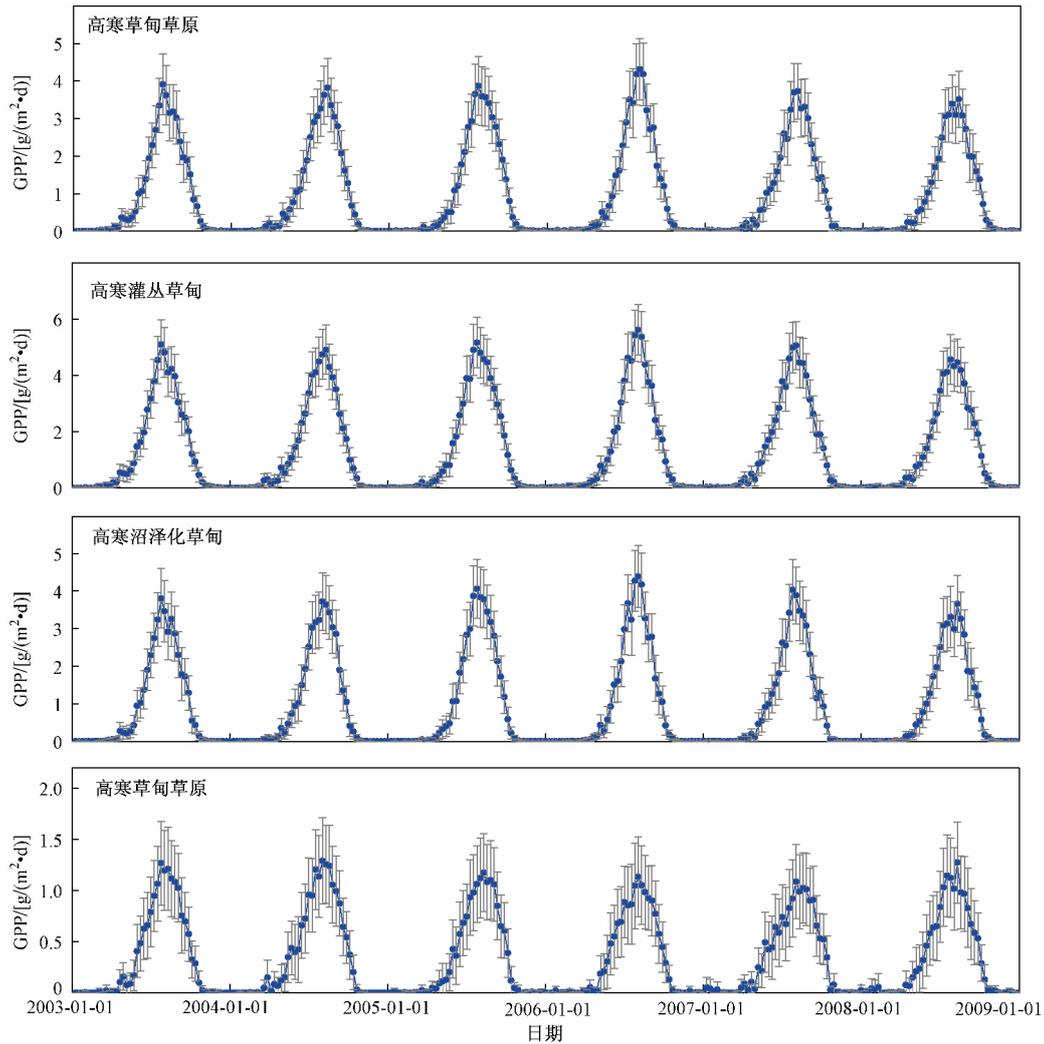


图 6 青藏高原 4 种高寒草地 2003—2008 年 VPM_D 模型 GPP 模拟值的季节变化
 Fig.6 The seasonal cycle of GPP estimated by VPM_D model from 2003 to 2008 for four alpine grassland types on the Tibetan Plateau

空间分布格局(见图 7)与 GPP 及其标准差的空间格局相反,呈现出东南部低西北部高的特点,GPP 值较小的区域其不确定性较大,这与 VPM 模型模拟结果一致.

VPM_D 模型 GPP 所有像元平均不确定性为 8.66% 相比 VPM 模型的 9.15% 降低了 5.36%,然而二者均明显高于 Jung 等^[30]估计的全球所有植被类型 GPP 不确定性均值(4.93%). Jung 等^[30]基于

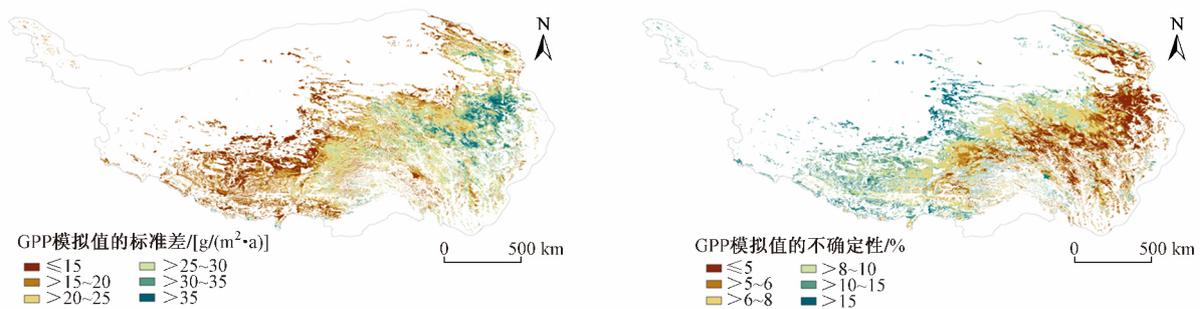


图 7 青藏高原高寒草地 2003—2008 年 VPM_D 模型 GPP 模拟值的标准差及不确定性的空间分布
 Fig.7 The spatial distribution of the standard deviation and uncertainty of GPP estimated by VPM_D model for the Tibetan alpine grasslands during 2003-2008

FLUXNET 通量站点观测数据,利用机器学习方法(model tree ensembles, MTE)得到全球尺度所有植被类型的 GPP 空间数据,其不确定性是用多个模型树(model tree)模拟值的标准差来表达。可见,由于与 Jung 等^[30]的研究区域和植被类型以及研究方法的不同,GPP 不确定性差异较大,但是量级相当。另外,青藏高原西北部地区 GPP 不确定性较大,可能是由于此区域气温和 PAR 的不确定性较大所致^[22-23, 28]。因为青藏高原西北部地区气象观测站点分布较为稀少,因此空间插值误差相对较大。

3 结论

a) 考虑散射辐射对 LUE 的影响之后,模型参数优化效果明显提升;GPP 模拟值与观测值的相关性较高,4 个草地类型均在 0.80 以上;与未考虑散射辐射影响的模型相比,除了高寒沼泽化草甸其他类型模拟效果均更优。说明考虑散射辐射影响后,模型能够更好地模拟青藏高原高寒草甸 GPP。

b) 青藏高原高寒草地 2003—2008 年 GPP 模拟值呈东南部较大、西北部较小的空间格局。GPP 多年平均值为 $341.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,散射辐射对高寒草地光合作用的增强作用达 9.4%。分植被类型来看,散射辐射对高寒草甸草原光合作用增强作用最大,高达 69.6%;其次是高寒灌丛草甸和高寒矮嵩草草甸,分别为 19.3%和 10%;高寒沼泽化草甸 GPP 总量稍有下降,降幅约为 12.9%。

c) 青藏高原高寒草地 GPP 不确定性的空间分布格局与 GPP 的空间格局相反,呈现出东南部低西北部高的特点,平均不确定性为 8.66%;与考虑散射辐射影响之前相比,不确定性空间分布格局一致,不确定性大小降低了 5.36%。

参考文献(References):

- [1] WILD M. Global dimming and brightening: a review [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009. doi: 10.1029/2008JD011470.
- [2] MERCADO L M, BELLOUIN N, SITCH S *et al.* Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink [J]. *Nature*, 2009, 458(7241): 1014-1017.
- [3] 祝昌汉. 我国散射辐射的计算方法及其分布 [J]. *太阳能学报*, 1984(3): 242-249.
ZHU Changhan. The calculation and distribution of diffuse radiation in China [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1984(3): 242-249.
- [4] REN Xiaoli, HE Honglin, MOORE D J P *et al.* Uncertainty analysis of modeled carbon and water fluxes in a subtropical coniferous plantation [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(4): 1674-1688.
- [5] URBAN O, JANOUS D, ACOSTA M *et al.* Ecophysiological controls over the net ecosystem exchange of mountain spruce stand: comparison of the response in direct vs. diffuse solar radiation [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 157-168.
- [6] FARQUHAR G D, RODERICK M L. Atmospheric science: Pinatubo, diffuse light, and the carbon cycle [J]. *Science*, 2003, 299(5615): 1997-1998.
- [7] KANNIAH K D, BERINGER J, NORTH P, *et al.* Control of atmospheric particles on diffuse radiation and terrestrial plant productivity: a review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2012, 36(2): 209-237.
- [8] GU L H, BALDOCCHI D, VERMA S B *et al.* Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002. doi: 10.1029/2001JD001242.
- [9] GU L H, BALDOCCHI D, WOFSY S C, *et al.* Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis [J]. *Science*, 2003, 299(5615): 2035-2038.
- [10] ALTON P B, NORTH P R, LOS S O. The impact of diffuse sunlight on canopy light-use efficiency, gross photosynthetic product and net ecosystem exchange in three forest biomes [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 776-787.
- [11] ZHANG Mi, YU Guirui, ZHANG Leiming, *et al.* Impact of cloudiness on net ecosystem exchange of carbon dioxide in different types of forest ecosystems in China [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(2): 711-722.
- [12] ZHANG Mi, YU Guirui, ZHUANG Jie, *et al.* Effects of cloudiness change on net ecosystem exchange, light use efficiency, and water use efficiency in typical ecosystems of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 803-816.
- [13] RODERICK M L, FARQUHAR G D, BERRY S L, *et al.* On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation [J]. *Oecologia*, 2001, 129(1): 21-30.
- [14] 范玉枝, 张宪洲, 石培礼. 散射辐射对西藏高原高寒草甸净生态系统 CO₂ 交换的影响 [J]. *地理研究*, 2009(6): 1673-1681.
FAN Yuzhi, ZHANG Xianzhou, SHI Peili. Influence of diffuse radiation on the net CO₂ exchange of alpine meadow ecosystem on Tibet Plateau [J]. *Geographical Research*, 2009(6): 1673-1681.
- [15] JING X, HUANG J, WANG G, *et al.* The effects of clouds and aerosols on net ecosystem CO₂ exchange over semi-arid Loess Plateau of northwest China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(17): 8205-8218.
- [16] 何学兆, 周涛, 贾根锁, 等. 光合有效辐射总量及其散射辐射比例变化对森林 GPP 影响的模拟 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(4): 619-634.
HE Xuezhao, ZHOU Tao, JIA Gensuo, *et al.* Modeled effects of changes in the amount and diffuse fraction of PAR on forest GPP [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(4): 619-634.
- [17] BAI Yongfei, WANG Jian, ZHANG Baocheng, *et al.* Comparing the impact of cloudiness on carbon dioxide exchange in a grassland and a maize cropland in northwestern China [J]. *Ecological Research*,

- 2012, 27(3): 615-623.
- [18] 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 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, *et al.* National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8.
- [19] 孙鸿烈, 郝度. 青藏高原的形成、演化及进化 [M]. 广州: 广州科技技术出版社, 1998.
- [20] XU Lingling, ZHANG Xianzhou, SHI Peili, *et al.* Response of canopy quantum yield of alpine meadow to temperature under low atmospheric pressure on Tibetan Plateau [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences* 2006, 49(2): 219-225.
- [21] HE Honglin, LIU Min, Xiao Xiangming *et al.* Large-scale estimation and uncertainty analysis of gross primary production in Tibetan alpine grasslands [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 2014, 119(3): 466-486.
- [22] 任小丽, 何洪林, 张黎, 等. 2001—2010 年三江源区草地净生态系统生产力估算 [J]. 环境科学研究, 2017, 30(1): 51-58.
REN Xiaoli, HE Honglin, ZHANG Li, *et al.* Net ecosystem production of alpine grasslands in the Three-River Headwaters Region during 2001-2010 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(1): 51-58.
- [23] 任小丽, 何洪林, 张黎, 等. 1981—2010 年中国散射光合有效辐射的估算及时空特征分析 [J]. 地理学报, 2014, 69(3): 323-333
REN Xiaoli, HE Honglin, ZHANG Li, *et al.* Estimation of diffuse photosynthetically active radiation and the spatiotemporal variation analysis in China from 1981 to 2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences* 2014, 24(4): 579-592.
- [24] MONTEITH J L. Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9(3): 747-766.
- [25] RUNNING S W, NEMANI R R, HEINSCH F A *et al.* A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production [J]. *Bioscience* 2004, 54(6): 547-560.
- [26] 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 of Environment* 2004, 91(2): 256-270.
- [27] TURNER D P, RITTS W D, STYLES J M *et al.* A diagnostic carbon flux model to monitor the effects of disturbance and interannual variation in climate on regional NEP [J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology* 2006, 58(5): 476-490.
- [28] REN Xiaoli, HE Honglin, ZHANG Li, *et al.* Spatiotemporal variability analysis of diffuse radiation in China during 1981-2010 [J]. *Annales Geophysicae* 2013, 31(2): 277-289.
- [29] LIN J C, PEJAM M R, CHAN E *et al.* Attributing uncertainties in simulated biospheric carbon fluxes to different error sources [J]. *Global Biogeochemical Cycles* 2011, 25(2): GB2018.
- [30] JUNG M, REICHSTEIN M, MARGOLIS H A *et al.* Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 2011. doi: 10.1029/2010JG001566.