

引用格式: Shen Qian, Zhou Yanlian, Shan Liang. Comparison of Ecosystem Respiration Models based on Remote Sensing Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(2): 435-447. [沈倩, 周艳莲, 单良. 基于遥感和站点观测数据的生态系统呼吸模型比较[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 435-447.]  
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.2.0435

## 基于遥感和站点观测数据的生态系统呼吸模型比较

沈倩, 周艳莲, 单良

(南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 生态系统呼吸(Ecosystem respiration,  $Re$ )是陆地生态系统碳收支的重要组成部分, 准确模拟 $Re$ 对研究碳循环具有重要意义。利用3种典型的遥感模型, C-flux(The carbon flux model)、ReRSM(Ecosystem respiration Remote Sensing Model)和TPGPP(Temperature Precipitation Gross Primary Production)模型, 基于不同时间尺度(1 d和8 d尺度)的通量观测和遥感数据, 对包含5种植被类型(农作物CROP、落叶阔叶林DBF、常绿针叶林ENF、草地GRASS和混交林MF)的24个站点(52个站年)的 $Re$ 进行了模拟。结果表明: 不同模型模拟结果的差异较大, C-Flux模型模拟结果 $R^2$ 和RMSE的范围为0.72~0.96  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 和0.30~3.47  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , ReRSM模型 $R^2$ 与RMSE的范围为0.70~0.98  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 和0.45~6.07  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , TPGPP模型 $R^2$ 与RMSE的范围为0.76~0.97  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 和0.41~2.45  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ; 1 d和8 d尺度, TPGPP模型模拟效果最好, 分别73%和67%的站年的TPGPP模型模拟结果的 $R^2$ 高于其他两种模型, 65%和50%的站年的TPGPP模型模拟结果的RMSE低于另两种模型。大部分站年(分别为75%和77%)ReRSM模型模拟的 $Re$ 与观测 $Re$ 之间的 $R^2$ 明显高于C-flux模型, 然而大部分站年(79%和77%)的RMSE高于C-flux模型, 这表明ReRSM模型结构合理, 能较好地模拟 $Re$ 的季节变化趋势但模型参数有待改进。ReRSM模型中, 年均生长季平均LSWI(Mean annual growing season of Land surface water index,  $LSWI_m$ )与其他站年相比过低, 会导致模拟的 $Re$ 高估, 反之则低估。

**关键词:** 生态系统呼吸; C-Flux模型; ReRSM模型; TPGPP模型

**中图分类号:** TP79   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1004-0323(2020)02-0435-13

### 1 引言

从20世纪70年代后期开始, 全球碳循环研究受到人类的普遍关注<sup>[1]</sup>, 而 $Re$ 是全球碳循环中最重要碳通量组分之一<sup>[2]</sup>。每年由光合作用固定的碳有80%通过呼吸作用回到大气中<sup>[3-4]</sup>, 所以,  $Re$ 在全球碳收支中占较大的比重, 对生态系统的碳循环起着决定性作用<sup>[5]</sup>。准确模拟 $Re$ 不仅有利于有效管理温室气体、评估区域和全球碳循环状况、合理积极应对气候变化, 同时也是生态系统与全球变化科学发展的科技任务, 具有非常重要的现实与科学

意义<sup>[6]</sup>。

传统研究 $Re$ 有两种比较常用的观测方法, 分别是涡度相关法和静态箱/气相色谱法。这两种观测方法虽然可以对 $Re$ 进行直接观测, 但是箱式观测法费时费力<sup>[7]</sup>, 并且还会受到箱内外温差和箱内气压状况等因素的限制<sup>[8]</sup>, 同时难以获得连续的时间和空间数据, 会导致 $Re$ 观测的不确定性<sup>[9]</sup>。同时, 涡度相关法只能在有限的站点进行观测。这两种观测方法均不适用于区域乃至全球的 $Re$ 估算, 在这种情况下, 通过模型模拟 $Re$ 成为了一种较为可行的方法。

收稿日期: 2018-11-07; 修订日期: 2020-02-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600202), 国家自然科学基金项目(41671343)。

作者简介: 沈倩(1994-), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事遥感数据的碳通量模拟研究。E-mail: 1344611702@qq.com

通讯作者: 周艳莲(1980-), 女, 湖北应城人, 副教授, 主要从事陆地生态系统碳水循环模拟以及生态环境遥感研究。E-mail: zhouyl@nju.edu.cn

传统估算  $Re$  的模型可以分为 3 类:统计模型、参数模型和过程模型<sup>[10]</sup>。但是传统的模型均存在各种缺点,例如统计模型 Chikugo 模型,虽然计算简单实用,但因缺乏植物生态学的理论基础而导致估算结果误差大;过程模型 CENTURY 和 BIOME-BGC 模型,虽然过程机理清楚,但模型结构过于复杂<sup>[11]</sup>。随着遥感和 GIS 技术的快速发展,遥感模型成为估算区域  $Re$  的新方法。

卫星遥感观测不但能够以固定的频率对生态系统要素进行采样,实现重复观察,获得连续的时间和空间数据,还可以实时实地、大范围直观地反映植被  $Re$  的时空变化,观测范围能够覆盖区域乃至全球<sup>[12-13]</sup>,是模拟  $Re$  的有效途径。在  $Re$  模型中引入遥感参数,可以简化计算,并且减少了大量的试验工作,避免了研究者对研究对象的直接干扰<sup>[14]</sup>。除此之外,相比于其他模型,遥感模型可以应用于模拟区域乃至全球尺度上的  $Re$ 。所以基于遥感数据的观测范围广、时空分辨率高和周期性等特点,遥感模型在模拟不同区域的  $Re$  方面发挥着重要的作用<sup>[13]</sup>。

现有的遥感模型主要有 VPRM 模型、C-fix 模型、DCFM 模型、C-Flux 模型、ReRSM 模型和 TP-GPP 模型等。VPRM 模型的优点是结构简单,参数较少,将  $Re$  表示为空气温度的线性函数,但是没有考虑土壤水分等因子对  $Re$  的影响<sup>[15]</sup>。虽然这样的简化有利于利用遥感数据来实现  $Re$  的区域计算,但是没有考虑其他生物非生物因素的影响,只是简单地将  $Re$  和温度建立线性关系,这样做不可避免地存在着很大的误差<sup>[15-16]</sup>。C-Fix 模型适用于各个空间尺度的  $Re$  模拟,在国内外的研究中均得到广泛运用,但 C-Fix 模型中计算  $Re$  的表达式结构复杂,并且估算精度不高<sup>[14]</sup>。DCFM 模型综合考虑了土壤温度、树龄和人类活动等因子对  $Re$  的影响,缺点是没有考虑土壤水分的影响,从而导致模拟结果精度不高<sup>[17]</sup>。相比于 VPRM 模型、C-fix 模型和 DCFM 模型考虑影响因素不全面、估算精度不高等缺点,C-Flux、ReRSM 和 TP-GPP 模型所考虑的影响因子较为全面,且结构简洁过程清楚,所需参数较少,但是目前这 3 种模型只在有限的站点模拟  $Re$ ,并未应用于全球更多的站点。因此,本研究利用全球通量网观测数据和卫星遥感数据,选取不同植被类型的站点,用 C-Flux、ReRSM 和 TP-GPP 模型分别对不同站点的  $Re$  进行模拟,比较 3 种模型的模拟结果,

分别分析 3 种模型的优缺点。

## 2 数据和方法

### 2.1 研究站点

C-Flux 模型、ReRSM 模型和 TP-GPP 模型共模拟了 24 个站点(52 个站年),包括 5 种植被类型:农作物(CROP)、落叶阔叶林(DBF)、常绿针叶林(ENF)、草地(GRASS)和混交林(MF)。表 1 为研究站点的详细信息。

表 1 研究站点信息

Table 1 Information of flux sites

站点 ID	国家	纬度/°	经度/°	植被类型	年份
BE-Lon	Belgium	50.6	4.7	CROP	2005~2006
DE-Kli	Germany	50.9	13.5	CROP	2006
CA-TP4	Canada	42.7	-80.4	ENF	2003~2005
FI-Hyy	Finland	61.8	24.3	ENF	2004、2006
NL-Loo	Italy	42.4	11.9	ENF	2003~2005
US-Me2	US	44.5	-121.6	ENF	2004~2005
US-NR1	US	40.0	-105.5	ENF	2002~2003
AT-Neu	Austria	47.1	11.3	GRASS	2004~2006
CN-Cng	China	44.6	123.5	GRASS	2008~2010
CN-Du2	China	42.0	116.3	GRASS	2008
CN-Ha2	China	37.6	101.3	GRASS	2003~2005
CN-HaM	China	37.6	101.3	GRASS	2003
RU-Ha1	Russia	54.7	90.0	GRASS	2002~2004
US-Arc	US	35.5	-98.0	GRASS	2005
US-IB2	US	41.8	-88.2	GRASS	2006~2007
IT-Col	Italy	41.8	13.6	DBF	2005~2006
US-MMS	US	39.3	-86.4	DBF	2003~2004
US-WCr	US	45.8	-90.1	DBF	2004~2006
US-Wi8	US	46.7	-91.3	DBF	2002
BE-Vie	Belgium	50.3	6.0	MF	2004~2006
CA-Gro	Canada	48.2	-82.2	MF	2004~2005
CA-Oas	Canada	53.6	-106.2	MF	2003~2005
CA-Obs	Canada	54.0	-105.1	MF	2003~2005
CN-Cha	China	42.4	128.1	MF	2003

### 2.2 数据

#### 2.2.1 卫星遥感数据

MODIS 网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov>)的 MOD15A2H 产品(空间分辨率 500 m,时间分辨率 8 d)为本研究站点叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)的数据源,采用三次样条函数对 MODIS LAI 产品数据进行平滑<sup>[18]</sup>,消除其因云层影响而导致的明显数据短期波动现象。利用 MOD09A2 产品的地表反射率数据(空间分辨率 500 m,时间分辨率 8 d)计算陆地表面水分指数(Land Surface Water In-

dex,LSWI),LSWI的计算公式如下:

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (1)$$

其中: $\rho_{nir}$ 是近红外波段的反射率, $\rho_{swir}$ 是短波红外波段的反射率。

### 2.2.2 站点观测数据

从 fluxnet 网站下载站点数据 (<http://fluxnet.ornl.gov/>), 站点气象数据包括日均空气气温  $T_a$  (°C)、最低空气气温  $T_{amin}$  (°C)、总光合有效辐射 PAR、日均饱和水汽压差 VPD (hPa)、土壤温度  $T_{soil}$  (°C)、土壤含水量 SW (%) 和降水量  $P$  (mm), 站点通量数据包括总初级生产力 GPP ( $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) 和  $Re$  ( $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), 其中,  $Re$  使用 Lolyd & Taylor 方法进行夜间生态系统呼吸速率缺失数据的插补和白天  $Re$  的估算<sup>[19]</sup>。

$$R_e = R_{ref} \times e^{\frac{E_0}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0}} \quad (2)$$

其中: $R_{ref}$ 为参考温度  $T_{ref}$  (°C) 下呼吸速率 ( $\text{g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),  $E_0$  为活化能 ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ); 参考温度  $T_{ref}$  取为 10 °C;  $T_0$  为温度试验常数, 取 -46.02 °C;  $T$  为空气温度 (°C)。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 C-Flux 模型

C-Flux 模型综合考虑了温度、水分和土壤有机碳对  $Re$  的影响。将  $Re$  分为自养呼吸  $R_a$  和异养呼吸  $R_h$ ,  $R_a$  分为维持呼吸  $R_m$  和生长呼吸  $R_g$ :

$$R_m = R_{m\_base} \times Q_{10}^{\frac{T_{air}-20}{10}} \times \frac{1}{(-k)} \times (\log(1-FPAR)) \quad (3)$$

$$R_g = (GPP - R_m) \times R_{g\_frac} \quad (4)$$

其中: $R_{m\_base}$ 表示维持呼吸基础呼吸速率, $Q_{10}$ 取值 2.0,  $T_{air}$ 表示天平均气温 (°C),  $k$ 为辐射衰减系数, 取值 0.5, FPAR 表示植被上层吸收的光合有效辐射 (%),  $R_{g\_frac}$ 表示可用于生长呼吸的碳分量, 取值 0.33<sup>[20]</sup>。异养呼吸 ( $R_h$ ) 表示如下<sup>[20-22]</sup>:

$$R_h = R_{h\_base} \times S_{StH} \times S_{SWH} \times S_{SAH} \times FPARh \quad (5)$$

$$S_{StH} = e^{R_{h\_coef\_a} \times T_{soil}} \quad (6)$$

$$S_{SWH} = \frac{1-b \times e^{(-c \times SW)}}{d} \quad (7)$$

$$S_{SAH} = a [0.5 + b \times e^{(c \times age)} + 0.5 \times (1-d^{age})] \quad (8)$$

其中: $R_{h\_base}$ 表示异养呼吸基础速率, $S_{StH}$ 表示土壤温度的影响, $S_{SWH}$ 表示土壤可获得水分的影响, $S_{SAH}$ 表示站点年龄的影响。 $R_{h\_coef\_a}$ 不同植被类型取值不同, $T_{soil}$ 表示土壤温度;对于所有植被类型  $b=0.86$ ,  $c=-1.26$ ,  $d=0.7486$ , SW 表示土壤可获得水分百分比 (0~1), 当  $SW > 0.5$  时表示水分无影响;  $a=0.379$ ,  $b=2.14$ ,  $c=-0.158$ ,  $d=0.9824$ ,  $age$  表示

树龄<sup>[21]</sup>。

所以, C-Flux 模型模拟  $Re$  的公式如下:

$$R_e = R_{m\_base} \times Q_{10}^{\frac{T_{air}-20}{10}} \times \frac{1}{(-k)} \times (\log(1-FPAR)) + (GPP - R_m) \times R_{g\_frac} + R_{h\_base} \times S_{ST} \times S_{SW} \times S_{SA} \times FPAR \quad (9)$$

### 2.3.2 ReRSM 模型

ReRSM 模型将  $Re$  分为 5 个部分<sup>[23]</sup>: 生长呼吸 ( $R_g$ )、维持呼吸 ( $R_m$ )、根际微生物呼吸 ( $R_{rhi}$ )、微生物呼吸 ( $R_{res}$ ) 和土壤有机质分解 ( $R_{SOM}$ )。生长呼吸 ( $R_g$ ) 和根际微生物呼吸 ( $R_{rhi}$ ) 与  $GPP$  关系密切:

$$R_{GPP} = R_g + R_{rhi} = a \times GPP \quad (10)$$

维持呼吸 ( $R_m$ )、微生物呼吸 ( $R_{res}$ ) 和土壤有机质分解 ( $R_{SOM}$ ) 与温度的相关性很大, 三者之和被定义为生态系统有机质呼吸 ( $R_{EOM}$ )。

$$R_{EOM} = R_m + R_{res} + R_{SOM} = R_{ref} \times e^{\frac{E_0}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T+273.15-T_0}} \quad (11)$$

其中:经研究发现,温度可以使用遥感指数  $LST$  表示,且  $T_{ref}$  为 288.15 K (15 °C), 且  $T_0$  设置为 227.13 K (-46.02 °C),  $E_0$  取值为 308.56 K。因此,  $Re$  可以表示为:

$$R_e = R_{GPP} + R_{EOM} = a \times GPP + R_{ref} \times e^{\frac{E_0}{61.02 - LST + 46.02}} \quad (12)$$

$$a = (-1.2759 \times LSWI_{sm} + 0.5079) \times (0.1346 \times LST_{n\_am} + 2.7522) \quad (13)$$

$$R_{ref} = 0.7566 \times LSWI_{sm} + 0.0874 \quad (14)$$

### 2.3.3 TPGPP 模型

TPGPP 模型综合考虑了温度和水分等因素对  $Re$  的影响。

$$R_e = R_{ref} \times f(T_A) \times f(P) \quad (15)$$

$$f(T_A) = e^{\frac{E_0}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T_A-T_0}} \quad (16)$$

其中: $R_{ref}$ 是参考温度下,不受水分限制的  $Re$ ;  $f(T_A)$  是  $Re$  对空气温度的响应函数,  $E_0$  表示  $Re$  对温度的敏感性,  $T_{ref}$  设置为 288.15 K (15 °C),  $T_0$  取值为 227.13 K (-46.02 °C)。

$$f(P) = \frac{ak + P(1-\alpha)}{k + P(1-\alpha)} \quad (17)$$

其中: $f(P)$ 是  $Re$  对水分的响应函数,  $k$  (mm) 是双曲线关系的半饱和常数,  $P$  是降水量 (mm),  $\alpha$  是无降水时,  $Re$  对水分的响应。

TPGPP 模型中  $Re$  的模拟公式如下:

$$R_e = (R_{LAI=0} + a_{LAI} \times LAI_{max} + k_2 \times GPP) \times e^{\frac{E_0}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T_A-T_0}} \times \frac{ak + P(1-\alpha)}{k + P(1-\alpha)} \quad (18)$$

其中,不同植被类型的参数不同<sup>[24]</sup>,见表2。

表2 TPGPP模型在不同植被类型中的参数<sup>[24]</sup>  
Table 2 Parameters of the TPGPP model in different vegetation types<sup>[24]</sup>

PFT	$R_{LAI=0}$	$a_{LAI}$	$k_2$	$E_0/K$	$a$	$K/mm$
CROP	0.25	0.40	0.244	129.498	0.934	0.035
ENF	1.02	0.42	0.478	124.833	0.604	0.222
GRASS	0.41	1.14	0.578	101.181	0.670	0.765
DBF	1.27	0.34	0.247	87.655	0.796	0.184
MF	0.78	0.44	0.391	176.542	0.703	2.831

2.4 评价指标

利用C-Flux、ReRSM和TPGPP模型分别模拟52个站年1 d和8 d尺度的 $Re$ ,并计算 $Re$ 模拟值与实测值之间的决定系数( $R^2$ )和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。 $R^2$ 和RMSE计算公式如下:

$$R^2 =$$

$$\left[ \frac{\sum_{k=1}^n (Re_{obs}(k) - \overline{Re_{obs}})(Re_{sim}(k) - \overline{Re_{sim}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (Re_{obs}(k) - \overline{Re_{obs}})^2 \sum_{k=1}^n (Re_{sim}(k) - \overline{Re_{sim}})^2}} \right]^2 \quad (19)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Re_{obs}(k) - Re_{sim}(k))^2} \quad (20)$$

3 结果

3.1 各站年模拟结果

3种模型模拟结果的 $R^2$ 均大于0.6,且除US-ARc\_2005和AT-Neu\_2006站年外, RMSE都小于

4 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>(图1(a))。在3种模型中,TPGPP模型模拟结果的 $R^2$ 与RMSE的波动范围最小,分别为0.69~0.95 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>和0.42~2.42 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, ReRSM模型模拟结果的 $R^2$ 与RMSE的波动范围最大,分别为0.61~0.94 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>和0.49~6.29 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, C-Flux模型模拟结果 $R^2$ 和RMSE的范围为0.63~0.91 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>和0.38~3.59 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>。38个(73%)站年的TPGPP模型模拟结果的 $R^2$ 高于其他两种模型,34个(65%)站年的TPGPP模型模拟结果的RMSE低于另两种模型,39个(75%)站年的ReRSM模型模拟结果的 $R^2$ 不低于C-Flux模型,41个(79%)站年的C-Flux模型模拟结果的RMSE低于ReRSM模型。

3种模型模拟结果的 $R^2$ 均大于0.65,且除US-ARc\_2005和AT-Neu\_2006站年外, RMSE都小于4 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>(图1(b))。在3种模型中,TPGPP模型模拟结果的 $R^2$ 与RMSE的波动范围最小,分别为0.76~0.97 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>和0.41~2.45 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, ReRSM模型模拟结果的 $R^2$ 与RMSE的波动范围最大,分别为0.70~0.98 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>和0.45~6.07 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, C-Flux模型模拟结果 $R^2$ 和RMSE的范围为0.72~0.96 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>和0.30~3.47 gCm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>。35个(67%)站年在TPGPP模型模拟结果的 $R^2$ 高于另两种模型,26个(50%)站年在TPGPP模型模拟结果的RMSE低于其他两种模型,40个(77%)站年的ReRSM模型模拟结果的 $R^2$ 不低于C-Flux模型,40个(77%)站年的C-Flux模型模拟结果的RMSE低于ReRSM模型。

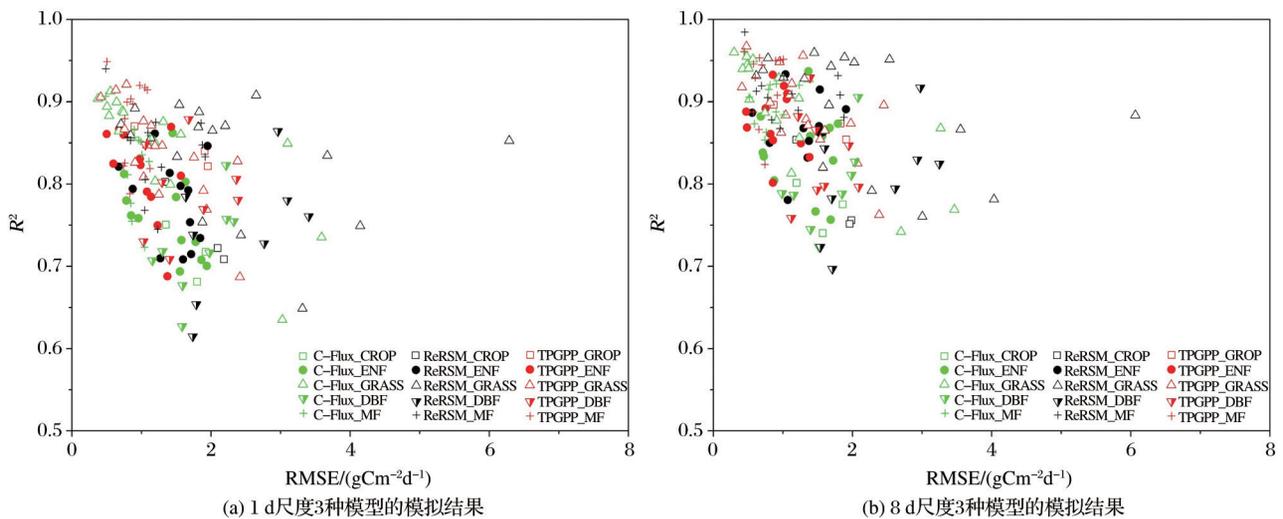


图1 1 d和8 d时间尺度C-Flux、ReRSM和TPGPP模型模拟结果图  
Fig.1 Simulations of the C-Flux, ReRSM and TPGPP model at daily and 8-day scales

1 d 尺度和 8 d 尺度,3 种模型模拟结果的  $R^2$  差异不大(图 2(a)和图 2(c)),而 RMSE 的差异较大(图 2(b)和图 2(d))。图 2(b)表明,在天尺度, RMSE 差异最大的站年是 US-ARc\_2005, ReRSM 模型的 RMSE 为  $6.29 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , C-Flux 和 TPGPP 模型的 RMSE 分别是  $1.32$  和  $1.30 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 差异百分比分别为  $376.52\%$  和  $383.85\%$ 。差异最小的站年是 DE-Kli\_2006, ReRSM 模型模拟的 RMSE 是  $2.10 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , C-Flux 和 TPGPP 模型模拟的 RMSE 分别是  $1.92$  和  $1.95 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 差异百分比分别为  $9.40\%$  和  $7.70\%$ 。其他站年的 RMSE 差异百分比范围是  $9.79\% \sim 376.39\%$ 。在 8 d 尺度, RMSE 差异

最大的站年是 RU-Ha1\_2004, ReRSM 模型模拟的 RMSE 是  $2.54 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , C-Flux 和 TPGPP 模型模拟的 RMSE 分别是  $0.48$  和  $0.95 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 差异百分比分别为  $429.17\%$  和  $167.37\%$ 。差异最小的站年是 DE-Kli\_2006, ReRSM 模型的 RMSE 是  $1.96 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , C-Flux 和 TPGPP 模型的 RMSE 分别是  $1.86$  和  $1.91 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 差异百分比分别为  $5.38\%$  和  $2.62\%$ 。其他站年的 RMSE 差异百分比范围为  $10.11\% \sim 392.41\%$ 。

### 3.2 不同植被类型模拟结果

从图 3 可以看出,1 d 尺度结果中,在 CROP 类型, TPGPP 模型的  $R^2$  最高(0.82), RMSE 最低

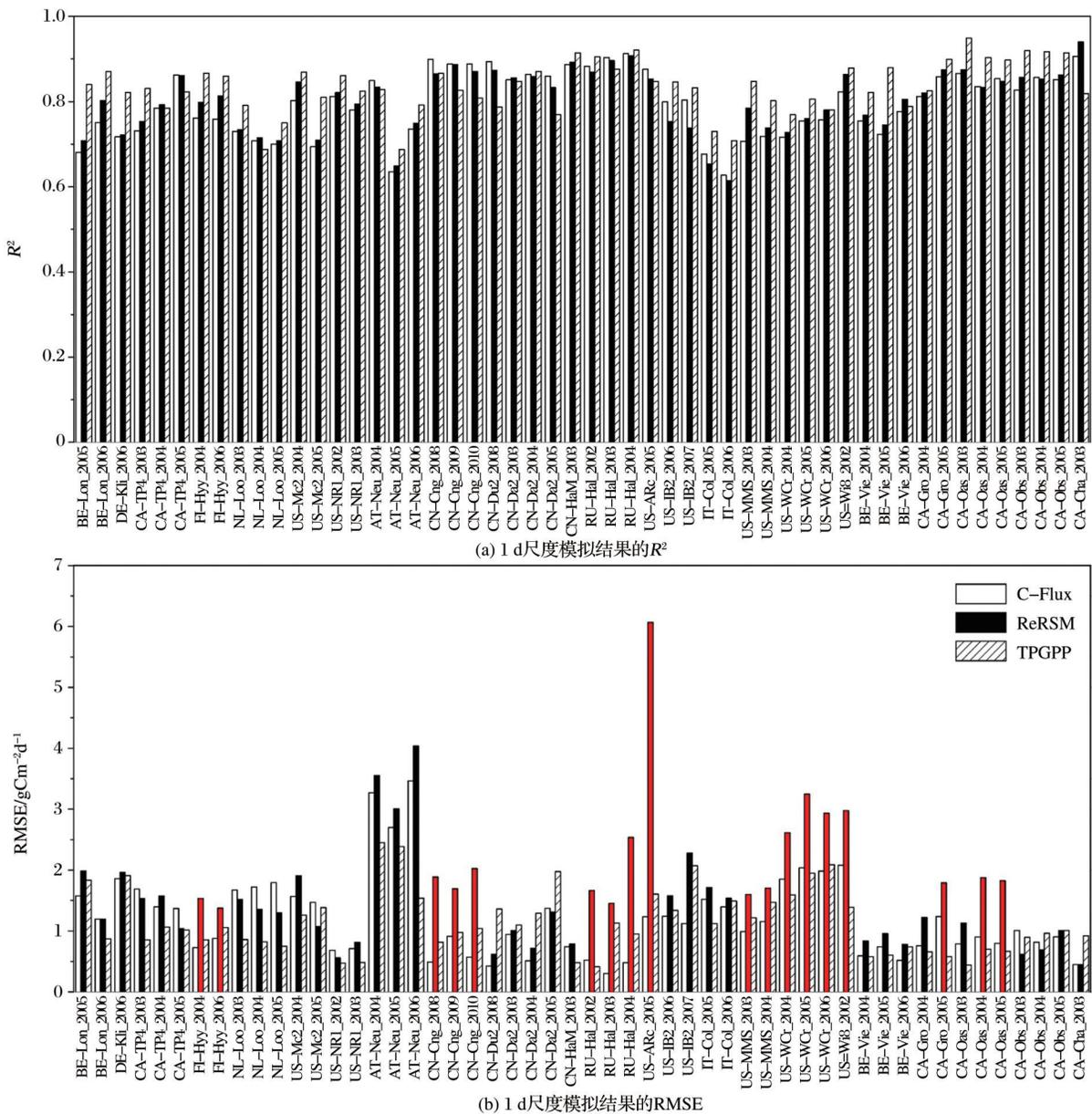


图 2 3 种模型在不同站年的  $R^2$  与 RMSE 柱状图

Fig.2  $R^2$  and RMSE histograms of the three models in 52 site years at daily and 8-day scales

续图2

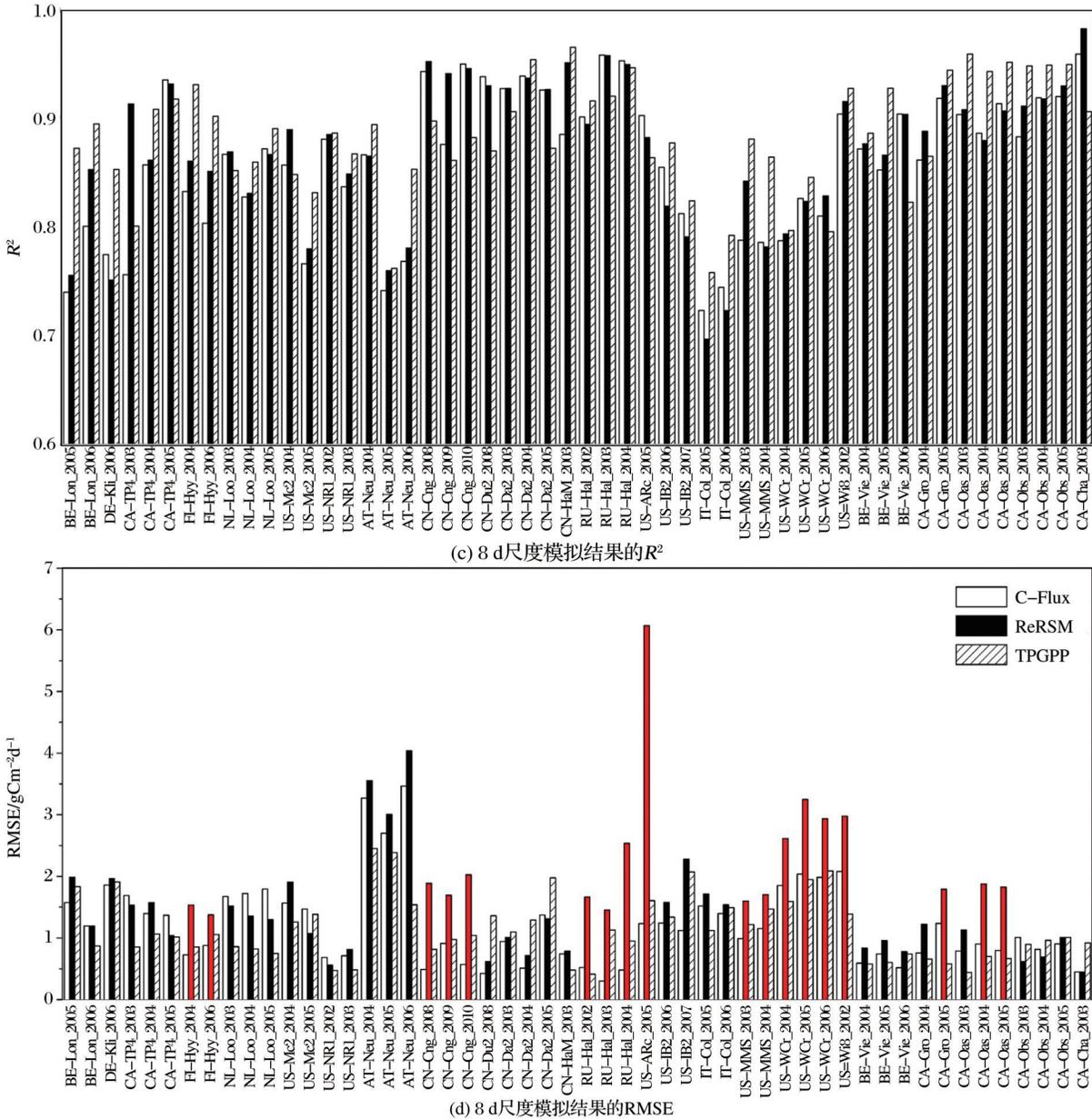


图2 3种模型在不同站年的 $R^2$ 与RMSE柱状图

Fig.2  $R^2$  and RMSE histograms of the three models in 52 site years at dailh and 8-day scales

( $1.66 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), 但  $Re$  的模拟存在低估的现象; ReRSM 模型  $R^2$  (0.74) 高于 C-Flux 模型, RMSE 最高 ( $1.91 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), 存在高估  $Re$  的现象; C-Flux 模型  $R^2$  最低 (0.69), RMSE ( $1.71 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) 低于 ReRSM 模型, 没有明显的高估或低估  $Re$ ; 在 ENF 植被类型中, ReRSM 模型的  $R^2$  (0.69) 低于其他两种模型, TPGPP 模型的 RMSE ( $1.08 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) 低于其他两种模型; C-Flux 模型的  $R^2$  (0.76) 与 TPGPP 模型 (0.76) 相近, 存在  $Re$  低估的现象; 在 GRASS 植被类型中, C-Flux 模型低估  $Re$  现象严重, TPGPP 模型没有明显的高估或低估  $Re$ , 且该模型的  $R^2$  最高

(0.84), RMSE 最低 ( $1.41 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ); 在 DBF 植被类型中, ReRSM 模型的  $R^2$  最低 (0.48), RMSE 最高 ( $2.50 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), 低估  $Re$  现象严重; 另外两种模型中, TPGPP 模型的  $R^2$  (0.65) 略高于 C-Flux 模型 (0.61), RMSE ( $1.73 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) 略低于 C-Flux 模型 ( $1.85 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ); 当  $Re$  大于  $8 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$  时, 两种模型均有一定的低估  $Re$  现象; 在 MF 类型中, ReRSM 模型的  $R^2$  最低 (0.74), RMSE 最高 ( $1.29 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), 有低估  $Re$  现象; 另两种模型没有明显高估或低估  $Re$ , 且 TPGPP 模型的  $R^2$  最高 (0.85), RMSE 最低 ( $0.89 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ).

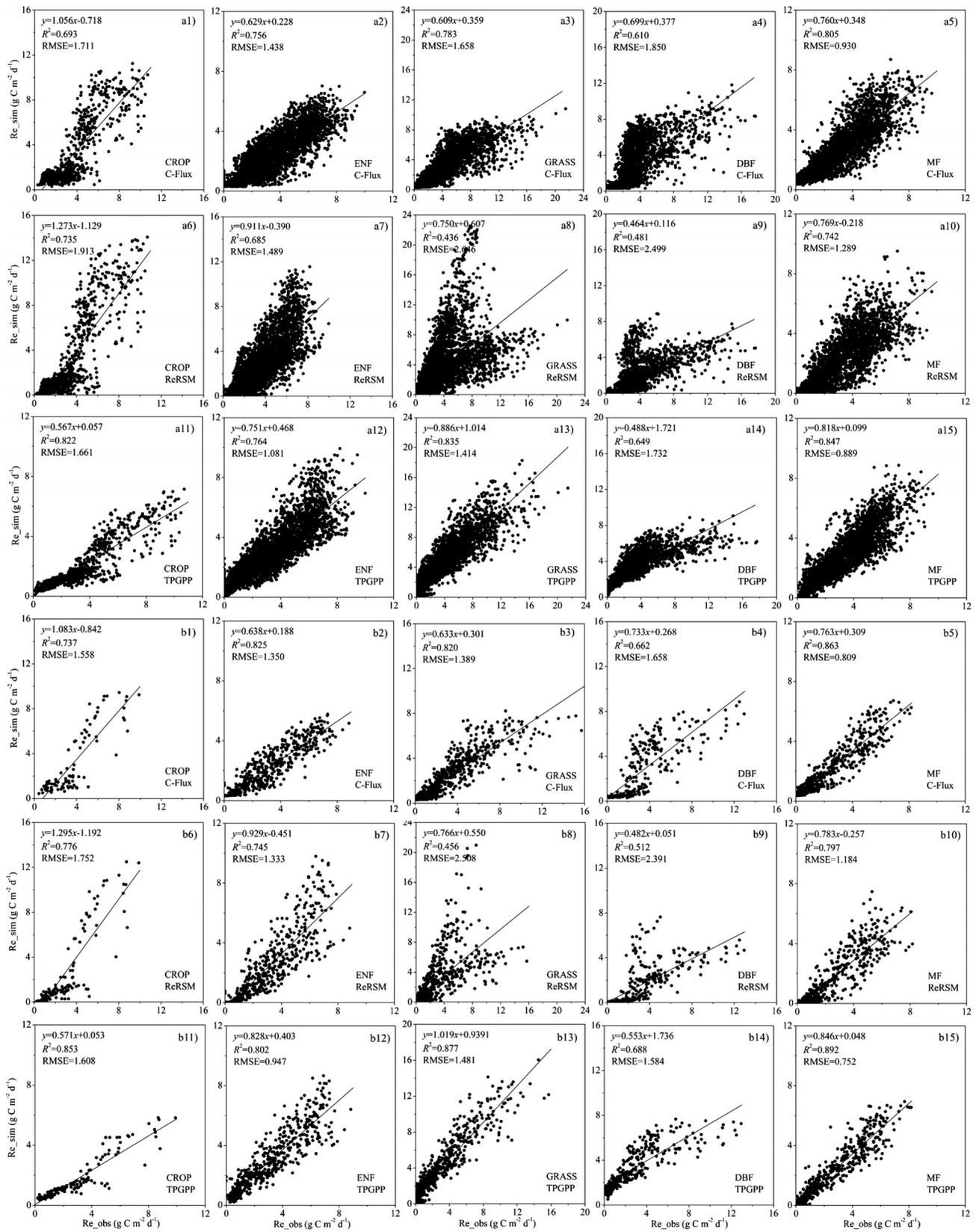


图 a1~a15 为 1 d 尺度、图 b1~b15 为 8 d 尺度

图 3 5 种植被类型在 3 种模型中 Re 模拟值与观测值的散点图

Fig.3 Scatter plots of Re simulated and observed values of five vegetation types with the three models at daily scales

图3的8 d尺度结果中,在CROP植被类型,TPGPP模型的 $R^2$ 最高(0.85), $Re$ 模拟存在明显的低估现象;ReRSM模型 $R^2$ (0.78)低于TPGPP模型(0.85),RMSE(1.75  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ )高于TPGPP模型(1.61  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),存在高估 $Re$ 的现象;C-Flux模型 $R^2$ (0.73)和RMSE最低(1.56  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),没有明显的高估或低估 $Re$ ;在ENF植被类型中,ReRSM模型的 $R^2$ (0.75)低于其他两种模型,略微低估 $Re$ ;C-Flux模型的 $R^2$ (0.83)与TPGPP模型(0.80)相近,但是存在 $Re$ 低估的现象;在GRASS植被类型中,C-Flux模型RMSE最低(1.39  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),但明显低估 $Re$ ;TPGPP模型 $R^2$ 最大(0.87),没有明显的高估或低估 $Re$ ;在DBF植被类型中,ReRSM模型的 $R^2$ 最低(0.51),RMSE最高(2.39  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),低估 $Re$ 现象严重;另外两种模型中,TPGPP模型 $R^2$ (0.69)略高于C-Flux模型(0.66),均有一定的低估 $Re$ 现象;在MF模型中,ReRSM模型的 $R^2$ 最低(0.80),RMSE最高(1.18  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),有低估 $Re$ 现象;另两种模型没有明显高估或低估 $Re$ ,且TPGPP模型的 $R^2$ 和RMSE与C-Flux模型相近。

### 3.3 模型总体比较

图4(a),3种模型中,TPGPP模型模拟 $Re$ 的 $R^2$ 的最大值最高,为0.95,其次是ReRSM模型,为0.94,C-Flux模型最低,为0.91。TPGPP模型模拟 $Re$ 的 $R^2$ 的中位数最高,为0.83,其次是ReRSM,为0.82,C-Flux最低,为0.80。TPGPP模型模拟 $Re$ 的 $R^2$ 的平均值最高,为0.83,ReRSM和C-Flux均为0.80。结果表明,TPGPP模型 $R^2$ 最高,其次是ReRSM,C-Flux最低。从图4(b)中可以看出,TPGPP模型模拟 $Re$ 的RMSE的最大值最低,为2.42  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,其次是C-Flux模型,为3.59  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,ReRSM模型最高,为6.29  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。TPGPP模型模拟 $Re$ 的RMSE的中位数最低,为1.08  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,其次是C-Flux模型,为1.19  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,ReRSM模型最高,为1.72  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。TPGPP模型模拟 $Re$ 的

RMSE的平均值最低,为1.20  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,其次是C-Flux模型,为1.33  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,ReRSM模型最高,为1.84  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。结果表明,TPGPP模型RMSE最低,其次是C-Flux模型,ReRSM模型最高。

从图4(c)中可以看出,ReRSM模型模拟 $Re$ 的 $R^2$ 的最大值最高,为0.98,其次是TPGPP模型,为0.97,C-Flux模型最低,为0.96。TPGPP模型模拟 $Re$ 的 $R^2$ 的中位数最高,为0.89,其次是ReRSM,为0.88,C-Flux最低,为0.87。TPGPP模型模拟 $Re$ 的 $R^2$ 的平均值最高,为0.88,ReRSM模型次之,为0.87,C-Flu模型最低,为0.86。结果表明,TPGPP模型 $R^2$ 最高,ReRSM模型和C-Flux模型的 $R^2$ 比较接近。从图4(d)中可以看出,TPGPP模型模拟 $Re$ 的RMSE的最大值最小,为2.45  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,其次是C-Flux模型,为3.47  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,ReRSM模型最高,为6.07  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。TPGPP模型模拟 $Re$ 的RMSE的中位数最低,为1.04  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,其次是C-Flux模型,为1.12  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,ReRSM模型最高,为1.54  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。TPGPP模型模拟 $Re$ 的RMSE的平均值最低,为1.14  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,其次是C-Flux模型,为1.21  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ,ReRSM模型最高,为1.70  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。结果表明,TPGPP模型RMSE最低,其次是C-Flux模型,ReRSM模型最高。

## 4 讨论

### 4.1 ReRSM模型结果差异分析

ReRSM模型中, $R_{GPP}$ 是 $Re$ 重要组成部分, $R_{GPP}$ 用系数 $a$ 乘以GPP来表示,其中,系数 $a$ 的表达式由两部分组成:与 $LSWI_{sm}$ 负相关的线性表达式,乘以与 $T_{n,am}$ 正相关的线性表达式(公式13)。图5中, $a$ 值较高的站年,1 d和8 d的模拟结果高估,明显高估的站年有:Ru-Hal(2002~2004年)、US-ARc(2005年)和CN-Cng(2008~2010年); $a$ 值较低的站年,天和8天模拟结果低估,明显低估的站年有:FI-Hyy(2004、2006年)、US-MMS(2003~2004年)、US-

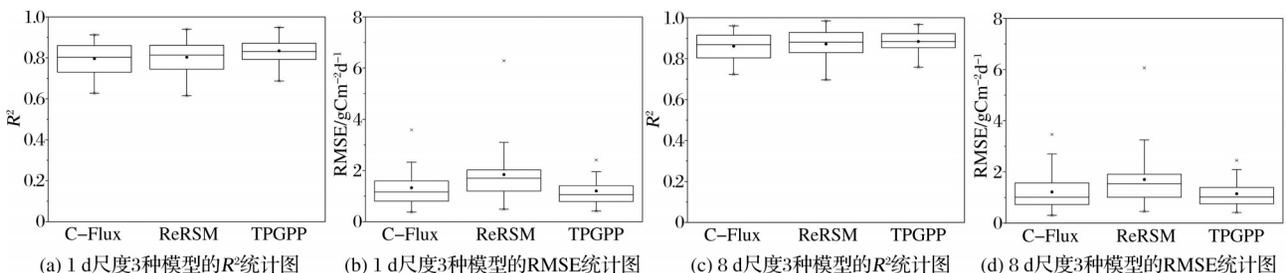


图4 C-Flux、ReRSM和TPGPP模型模拟结果的 $R^2$ 和RMSE箱形图

Fig.4  $R^2$  and RMSE box-plots of simulations of the C-Flux, ReRSM and TPGPP model at daily scales

表 3 1 d 和 8 d 尺度各模型模拟结果统计表

Table 3 Simulations of the three models at daily and 8-day scale

统计值	$R^2(1\text{ d})$			RMSE(1 d) ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )			$R^2(8\text{ d})$			RMSE(8 d)( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )		
	C-Flux	ReRSM	TPGPP	C-Flux	ReRSM	TPGPP	C-Flux	ReRSM	TPGPP	C-Flux	ReRSM	TPGPP
最大值	0.91	0.94	0.95	3.59	6.29	2.42	0.96	0.98	0.97	3.47	6.07	2.45
最小值	0.63	0.61	0.69	0.38	0.49	0.42	0.72	0.70	0.76	0.30	0.45	0.41
中位数	0.80	0.82	0.83	1.19	1.72	1.08	0.87	0.88	0.89	1.12	1.54	1.04
平均值	0.80	0.80	0.83	1.33	1.84	1.20	0.86	0.87	0.88	1.21	1.70	1.14

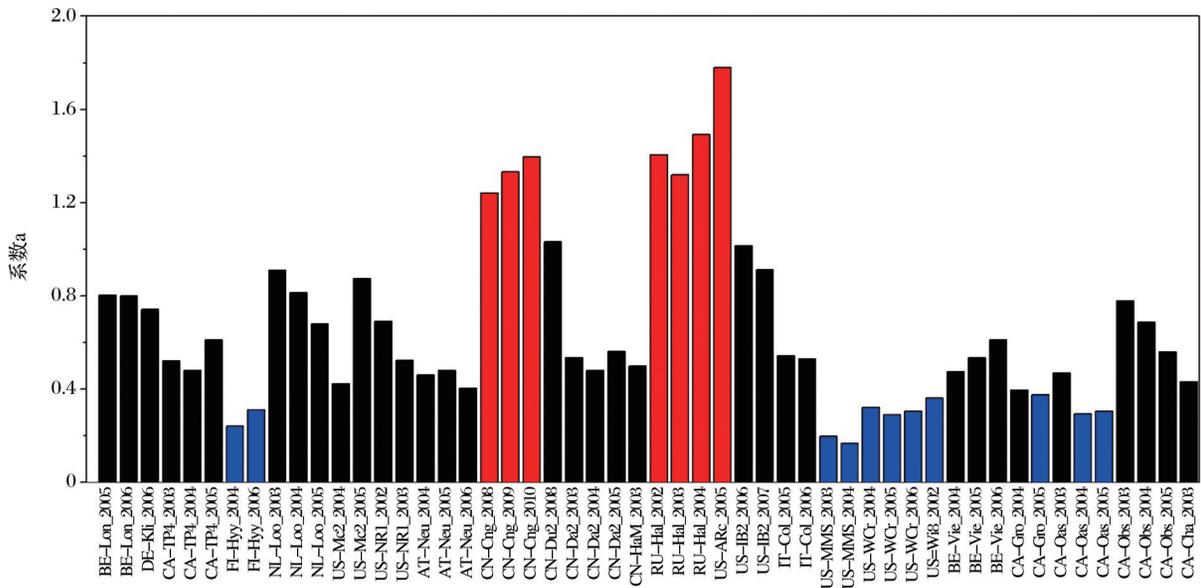


图 5 各站年的 a 值柱状图

Fig.5 a values at all site years

Wcr(2004~2006年)、US-Wi8(2002年)、CA-Gro(2005年)和CA-Oas(2004~2005年),这些模拟结果高估的站年,与图3(b)和3(d)中ReRSM模拟结果的RMSE高的站年一致。

进一步分析  $a$  值过高或过低的原因,发现与  $LSWI_{sm}$  和年均夜间温度( $T_{n,am}$ )有关。图6中,  $LSWI_{sm}$  与其他站年相比过低,这样就会造成  $a$  值过高,从而模拟的  $Re$  高估,如站年US-ARc(2005年)( $LSWI_{sm}=0.10$ )、RU-Ha1(2002~2004年)( $LSWI_{sm}=0.04, 0.05$ 和 $0.05$ );CN-Cng(2008~2010年)( $LSWI_{sm}=0.11, 0.07$ 和 $0.09$ )。  $LSWI_{sm}$  与其他站年相比过高,这样会造成  $a$  值过低,从而模拟的  $Re$  低估,如站年FI-Hyy(2004和2006年)( $LSWI_{sm}=0.34$ 和 $0.32$ )、US-Wcr(2004~2006年)( $LSWI_{sm}=0.32, 0.33$ 和 $0.33$ )、US-Wi8(2002年)( $LSWI_{sm}=0.33$ )、CA-Gro(2004~2005年)( $LSWI_{sm}=0.29$ 和 $0.31$ )和CA-Oas(2003~2005年)( $LSWI_{sm}=0.27, 0.32$ 和 $0.32$ )。无论是高估或低估  $Re$ ,都会导致RMSE增大,因此上述18个站年在ReRSM模型中RMSE高

于另两种模型。由此可见,  $LSWI_{sm}$  与其他站年相比过低,会导致模拟的  $Re$  高估,反之则低估,这与Gao的结论相吻合<sup>[23]</sup>。

4.2 模型的不确定性

C-Flux、ReRSM 和 TPGPP 模型都包含了温度对  $Re$  的影响,温度与  $Re$  之间建立的关系结构可分

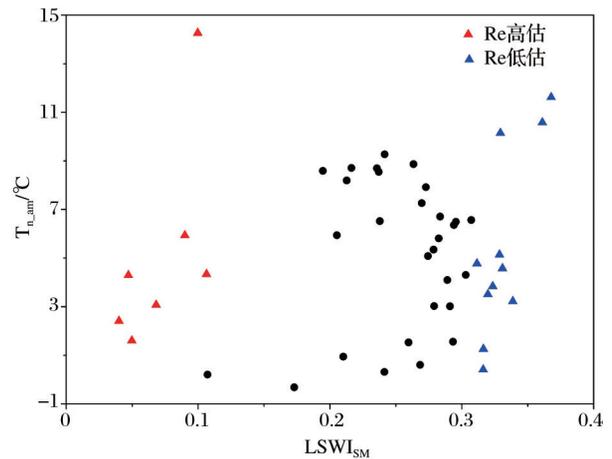


图 6 所有站年的  $LSWI_{sm}$  与  $T_{n,am}$  散点图

Fig.6 Scatter plots of  $LSWI_{sm}$  and  $T_{n,am}$  for all site years

为2种:  $Q_{10}$ 模型指数关系和 Arrhenius型方程指数关系<sup>[24]</sup>。其中, C-Flux模型属于  $Q_{10}$ 模型指数关系, 不同模型的  $Q_{10}$ 取值不同。C-Flux模型的  $Q_{10}$ 取值为2.0, 但是, 对于不同的植被类型,  $Q_{10}$ 的取值始终为同一个常数, 这样不可避免地存在误差。ReRSM和TPGPP模型使用了 Arrhenius型方程指数关系, 这与  $Q_{10}$ 模型相比, 结构更为合理, 能更好地反映温度对  $Re$ 的影响。

C-Flux、ReRSM和TPGPP模型都考虑了水分对  $Re$ 的影响, 但各模型所运用的水分因子各不同。C-Flux模型考虑了土壤可获得水分对  $Re$ 的影响, ReRSM模型使用  $LSWI_{sm}$ 来表征水分的影响, TPGPP模型使用降水量数据表征水分因子的影响。对于模拟水分对  $Re$ 影响准确度的角度, 土壤可获得水分是最直接的影响因素<sup>[24]</sup>, 所以C-Flux模型考虑的水分变量更合理, 但是土壤可获得水分数据不易测量, 难以推广到大尺度的模型模拟。TPGPP模型使用降水量数据来表征水分因子的影响, 降水量数据相比土壤可获得水分数据更易获得, 在大尺度使用上实现的可能性更大。但ReRSM模型使用的遥感指数  $LSWI$ , 比降水量数据更易获得, 且可推广到区域甚至全球尺度上。同时, ReRSM模型使用  $LSWI_{sm}$ 来表征水分影响, 可以较好地模拟  $Re$ 的季节变化趋势, 说明ReRSM模型结构合理, 但是, ReRSM模型的模拟结果会因为  $LSWI_{sm}$ 的变化而出现高估或低估现象, 表明ReRSM模型在考虑水分因子方面的参数有待改进。

很多  $Re$ 模型认为呼吸与总初级生产力(GPP)之间存在线性关系<sup>[25-26]</sup>, 这一理论在C-Flux、ReRSM和TPGPP模型中都有体现。C-Flux模型在模拟生长呼吸时考虑GPP的影响, 且GPP的系数设为定值0.33<sup>[20]</sup>, 虽然这样可以使得参数明确, 简化模型结构, 但是不根据植被类型的不同, 分别考虑GPP的影响, 会导致模拟结果存在误差, 这也是C-Flux模型模拟精度低于其他两种模型的原因之一。ReRSM模型考虑GPP的影响时, 其系数由  $LSWI_{sm}$ 和  $LST_{n_{am}}$ 决定, 充分考虑了不同区域的水热条件影响, 结构合理, 但具体参数还有待改进。TPGPP模型根据不同植被类型, GPP的系数不同, 从表2中可以看出, 不同植被类型参数差距较大, 在考虑植被差异的同时, 也加大了模型参数的不确定性。

3种遥感模型都考虑了水分和温度对  $Re$ 的影

响。并且C-Flux和ReRSM模型还考虑了土壤有机碳的影响, 但TPGPP模型未考虑土壤有机碳的影响, 在这方面, 可以对TPGPP模型进一步地改进, 使得该模型包括更多  $Re$ 的影响因子, 提高模拟精度。同时, 3种模型均未考虑地形因素的影响, 而实际上地形是会对  $Re$ 产生影响的, 比如在地形垂直分布的地形会造成山地小气候、土壤中的水分也会因为地形而产生侧向移动等<sup>[27]</sup>。

遥感模型是融入数理统计方法的半经验模型, 同时也考虑了生态系统呼吸的过程机理。在估算大尺度  $Re$ 方面, 遥感模型随着遥感观测技术的发展将大有潜力。不过, 目前遥感模型还是存在一些问题, 比如基于数理统计拟合出的系数, 依赖于有限的观测站点的实测数据, 当选择参考的实测数据不同时, 系数会产生很大的变化, 比如在TPGPP模型中, 植被类型ENF中  $E_0$ 的取值为124.833 K, 而在相似结构的DCF模型中, 在ENF中  $E_0$ 的取值为68.78 K<sup>[17]</sup>。所以, 尽管TPGPP模型已经根据不同植被类型, 将系数由站点尺度, 归纳到区域尺度上估算  $Re$ , 但这种误差仍是不可避免的。所以, 如何将由有限站点拟合得到的系数, 归纳分析后应用到区域甚至全球范围, 这是当前需要解决的问题。

#### 4.3 不同时间尺度模型表现差异

同一站年在不同模型中, 模拟结果存在差异, 计算每站年模型间  $R^2$ 和RMSE差异的最大值(模拟结果最大值减去最小值), 并分别从不同时间尺度(1 d和8 d尺度)进行差值比较。从图7(a)中可以看出, 1 d尺度模拟结果中, RMSE差值最大的是US-ARc\_2005(4.99  $gCm^{-2}d^{-1}$ ), 最小的为CA-Obs\_2005(0.11  $gCm^{-2}d^{-1}$ ); 8 d尺度模拟结果中, RMSE差值最大的是US-ARc\_2005(4.83  $gCm^{-2}d^{-1}$ ), 最小的是DE-Kli\_2006(0.05  $gCm^{-2}d^{-1}$ )。1 d和8 d尺度RMSE的差值间区别很小, 变化范围为0.00~0.41  $gCm^{-2}d^{-1}$ 。

图7(b), 1 d尺度模拟结果中,  $R^2$ 差值最大的是BE-Lon\_2005(0.16), 最小的是CA-TP4\_2004(0.00); 8 d尺度模拟结果中,  $R^2$ 差值最大的是CA-TP4\_2003(0.16), 最小的是US-NR1\_2002(0.00)。1 d和8 d尺度模拟结果的  $R^2$ 的差值差异较大, 变化范围为0~0.08, 所以不同时间尺度的  $R^2$ 差距变化较大, 且8 d尺度模型间的结果差异小于1 d尺度的模拟结果差异。

3种模型在不同站年的模拟结果表现各不相同。当模拟的时间尺度不同时, 同一模型的模拟结

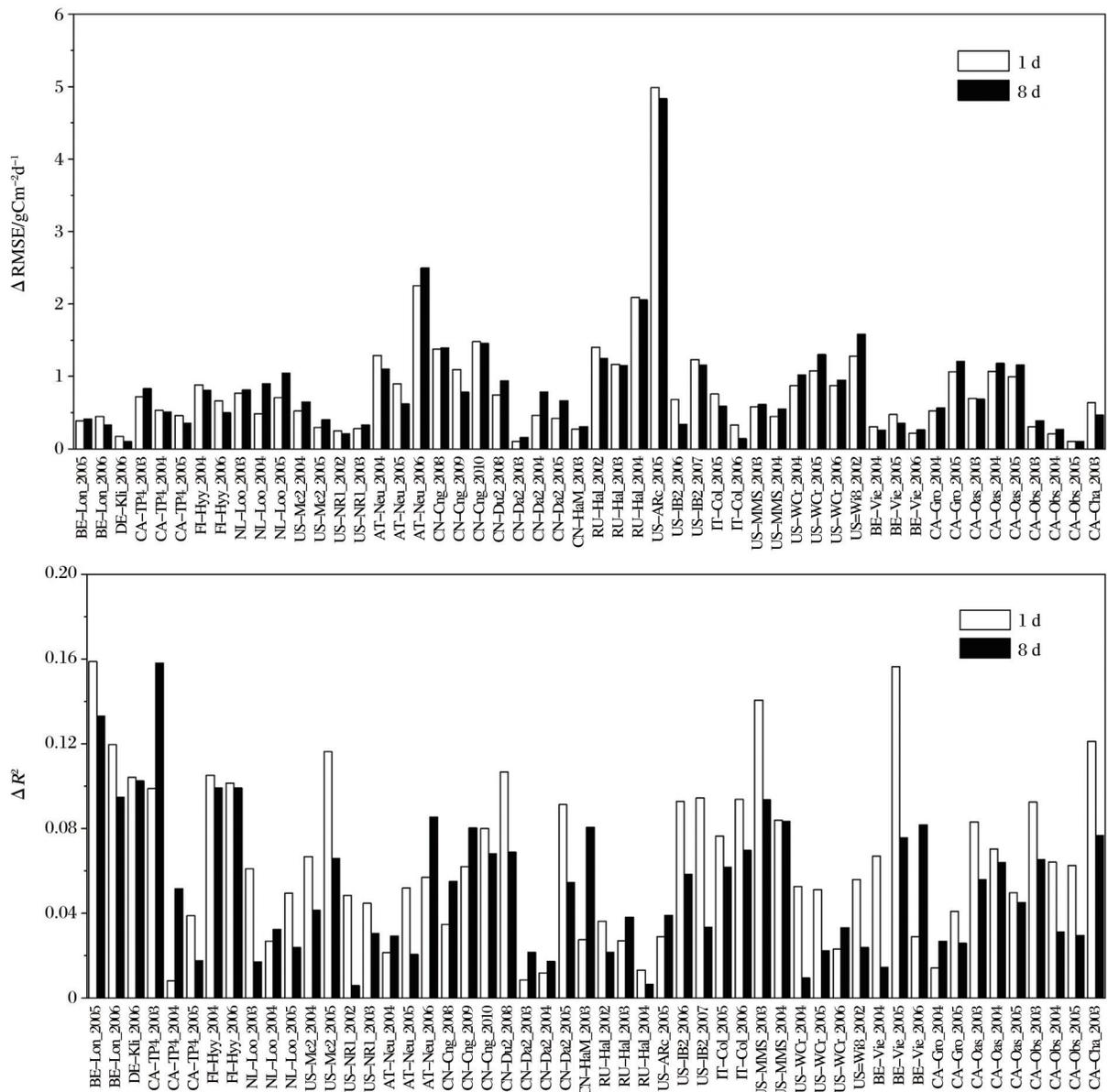


图 7 1 d 和 8 d 尺度模型间  $R^2$  和 RMSE 差值图

Fig.7  $\Delta R^2$  and  $\Delta RMSE$  of simulations of the C-Flux, ReRSM and TPGPP model at daily and 8-day scales

果也会存在差异,这既与模型本身的结构有关,也与不同时间尺度导致的数据量不同相关。不同时间尺度模拟结果的比较,可以更全面地展现不同模型模拟  $Re$  的特点与不足,以得到进一步地改进。

### 5 结 论

通过对 3 种模型模拟结果的比较,得到以下结论:对于植被类型为 CROP 的站年,1 d 和 8 d 尺度,ReRSM 模型的模拟结果明显高估,TPGPP 模型明显低估,C-Flux 模型在 3 种模型中表现最好;对于植被类型为 ENF 的站年,1 d 和 8 d 尺度,C-Flux 模型的模拟结果明显低估,ReRSM 和 TPGPP 模型不

存在明显的高估或低估,但 TPGPP 模型的  $R^2$  高于 ReRSM 模型,且 RMSE 更低,所以 TPGPP 模型更适合模拟植被类型为 ENF 的站年;对于植被类型为 GRASS 的站年,1 d 和 8 d 尺度,C-Flux 模型的模拟结果明显低估,ReRSM 模型模拟结果最差,TPGPP 模型的模拟结果最好;对于植被类型为 DBF 的站年,1 d 和 8 d 尺度,3 种模型均存在低估现象,其中,ReRSM 模型的模拟结果低估最严重,效果最差,当  $Re$  大于  $8 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$  时,C-Flux 和 TPGPP 模型均有一定的低估  $Re$  现象,TPGPP 模型比 C-Flux 模型的表现较好一点;对于植被类型为 MF 的站年,天和 8 天尺度,3 种模型均没有明显的高估或低估,TP-

GPP模型表现最好,C-Flux模型次之,ReRSM模型最差。1 d和8 d尺度的所有站年,TPGPP模型模拟效果最好,分别有73%和67%的站年的TPGPP模型模拟结果的 $R^2$ 高于其他两种模型,65%和50%的站年的TPGPP模型模拟结果的RMSE低于另两种模型。所有站年的1 d和8 d尺度站年,分别有75%和77%站年的ReRSM模型模拟的 $Re$ 与观测 $Re$ 之间的 $R^2$ 明显高于C-flux模型,然而79%和77%的站年RMSE高于C-flux模型,这表明ReRSM模型结构合理,能较好地模拟 $Re$ 的季节变化趋势,但模型参数有待改进。ReRSM模型中,LSWI<sub>sm</sub>与其他站年相比过低时,会导致模拟的 $Re$ 高估,反之则低估。

本文主要比较3种模型在站年尺度上模拟 $Re$ 的表现,3种模型都有各自的特点与不足。对于不同植被类型,每种模型的模拟表现均有差异。本文通过46个站年的模拟结果比较,TPGPP模型在1 d和8 d尺度上的模拟效果最好,分别有73%和67%的站年的TPGPP模型模拟结果的 $R^2$ 高于其他两种模型,65%和50%的站年的TPGPP模型模拟结果的RMSE低于另两种模型。从模型结构、数据获取难易程度和模拟精度等角度综合考虑,TPGPP模型比其他两种模型,更适合模拟区域甚至全球尺度上的 $Re$ ,但针对TPGPP模型存在的不足,例如未考虑土壤有机碳和地形因素对 $Re$ 的影响,需要进一步研究加以改进。

**致谢:** 本文所用通量数据由Fluxnet和Chinaflux提供,在此表示感谢!

#### 参考文献(Reference):

- [1] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, *et al.* The Biota and the World Carbon Budget [J]. *Science*, 1978, 199 (4325):141-146.
- [2] Erica D, Ivana J, Luo Y. On the Variability of Respiration in Terrestrial Ecosystems: Moving Beyond  $Q_{10}$  [J]. *Global Change Biology*, 2010, 12(2):154-164.
- [3] Byrne K A, Kiely G. Partitioning of Respiration in an Intensively Managed Grassland [J]. *Plant & Soil*, 2006, 282(1/2): 281-289.
- [4] Law B E, Falge E, Gu L, *et al.* Environmental Controls over Carbon Dioxide and Water Vapor Exchange of Terrestrial Vegetation [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015, 113(1):97-120.
- [5] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, *et al.* Respiration as the Main Determinant of Carbon Balance in European Forests [J]. *Nature*, 2000, 404(6780):861-865.
- [6] Zhu X J, Yu G M, Wang Q F, *et al.* The Interaction between Components of Ecosystem Respiration in Typical Forest and Grassland Ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21):6925-6934.[朱先进, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(21):6925-6934.]
- [7] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and Annual Respiration of a Ponderosa Pine Ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2010, 5(2):169-182.
- [8] Liang N S, Nakadai T, Hirano T, *et al.* In Situ Comparison of Four Approaches to Estimating Soil CO<sub>2</sub> Efflux in a Northern Larch (*Larix kaempferi* Sarg.) Forest [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2004, 123(1):97-117.
- [9] Zheng Z M, Yu G R, Sun X M, *et al.* Comparison of Eddy Covariance and Static Chamber/gas Chromatogram Methods in Measuring Ecosystem Respiration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):290-298.[郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2):290-298.]
- [10] Feng X F, Liu G H, Chen S P, *et al.* Study on Process Model of Net Primary productivity of Terrestrial Ecosystems [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3):369-378.[冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 等. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(3):369-378.]
- [11] Bao G. Remote Sensing Estimation of Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation in Inner Mongolia based on MODIS Data [D]. Huhehot: Inner Mongolia Normal University, 2009.[包刚. 基于MODIS数据的内蒙古陆地植被净第一性生产力遥感估算研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2009.]
- [12] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1):74-88.
- [13] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, *et al.* Satellite Remote Sensing of Primary Production: an Improved Production Efficiency Modeling Approach [J]. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3):239-255.
- [14] Zhang D Y, Feng Z K, Li Y Q, *et al.* Remote Sensing Estimation of Forest Net Primary Productivity in Heilongjiang Province with C-FIX Model [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(7):13-19.[张冬有, 冯仲科, 李亦秋, 等. 基于C-FIX模型的黑龙省森林植被净初级生产力遥感估算[J]. *林业科学*, 2011, 47(7):13-19.]
- [15] Mahadevan P, Wofsy S C, Matross D M, *et al.* A Satellite-based Biosphere Parameterization for Net Ecosystem CO<sub>2</sub> Exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(2). doi:10.1029/2006GB002735.
- [16] Hilton T W, Davis K J, Keller K, *et al.* Improving Terrestrial CO<sub>2</sub> Flux Diagnosis Using Spatial Structure in Land Surface Model Residuals [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(7):4607-4625.
- [17] Xiao J, Davis K J, Urban N M, *et al.* Upscaling Carbon Fluxes from Towers to the Regional Scale: Influence of Parameter

- Variability and Land Cover Representation on Regional Flux Estimates[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G3):115-132.
- [18] Chen J M, Deng F, Chen M. Locally Adjusted Cubic-spline Capping for Reconstructing Seasonal Trajectories of a Satellite-derived Surface Parameter [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44(8):2230-2238.
- [19] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D *et al.* On the Separation of Net Ecosystem Exchange into Assimilation and Ecosystem Respiration: Review and Improved Algorithm [J]. *Global Change Biology*, 2010, 11(9):1424-1439.
- [20] 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 & Physical Meteorology*, 2006, 58(5):476-490.
- [21] Turner D P, Ritts W D, Wharton S, *et al.* Assessing FPAR Source and Parameter Optimization Scheme in Application of a Diagnostic Carbon Flux Model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(7):1529-1539.
- [22] King D A, Turner D P, Ritts W D. Parameterization of a Diagnostic Carbon Cycle Model for Continental Scale Application [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(7):1653-1664.
- [23] Gao Y, Yu G, Li S, *et al.* A Remote Sensing Model to Estimate Ecosystem Respiration in Northern China and the Tibetan Plateau[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 304:34-43.
- [24] Migliavacca M, Reichstein M, Richardson A D, *et al.* Semiempirical Modeling of Abiotic and Biotic Factors Controlling Ecosystem Respiration Across Eddy Covariance Sites[J]. *Global Change Biology*, 2015, 17(1):390-409.
- [25] Evanb D, John D, Richardb T, *et al.* Forest Carbon Use Efficiency: Is Respiration a Constant Fraction of Gross Primary Production[J]. *Global Change Biology*, 2010, 13(6):1157-1167.
- [26] Chen J M, Liu J, Cihlar J, *et al.* Daily Canopy Photosynthesis Model Through Temporal and Spatial Scaling for Remote Sensing Applications[J]. *Ecological Modelling*, 1999, 124(2-3):99-119.
- [27] Li Ainong, Yin Gaofei, Jin Hua'an, *et al.* Principles and Methods for the Retrieval of Biophysical Variables in Mountainous Area [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(1):1-11.[李爱农, 尹高飞, 靳华安, 等. 山地地表生态参量遥感反演的理论、方法与问题[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(1):1-11.]

## Comparison of Ecosystem Respiration Models based on Remote Sensing Data

Shen Qian, Zhou Yanlian, Shan Liang

(School of Geography and Ocean Science, Nanjing university, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** Ecosystem respiration ( $Re$ ) is an important component of terrestrial ecosystem carbon budget, and it was important to simulate  $Re$  accurately. In this study,  $Re$  was simulated at daily and 8-day time scales at 24 flux sites (52 site years) including 5 vegetation types by using three typical ecological models established based on remote sensing data, C-flux (the carbon flux model), ReRSM (Ecosystem respiration Remote Sensing Model) and TPGPP (Temperature Precipitation Gross Primary Production) model. Results showed that the three models had different performances. At 52 site years, the ranges of  $R^2$  and RMSE were 0.72~0.96 and 0.30~3.47  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$  for the C-flux model, 0.70~0.98 and 0.45~6.07  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$  for the ReRSM model, and 0.76~0.97 and 0.41~2.45  $\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$  for the TPGPP model. The TPGPP performed best compared with the other two models.  $R^2$  simulated with the TPGPP model was higher than the other two models at most site years with proportions of 73% and 67% at daily and 8-day scale, respectively. At daily and 8-day scale,  $R^2$  simulated with the ReRSM model was higher than that with the C-flux model at most site years with proportions of 75% and 77%, while RMSE with ReRSM model was higher than that with the C-flux model at most site years with proportions of 79% and 76%, respectively. Results indicated that the ReRSM model could simulate the trends of seasonal variations of  $Re$  while model parameters had some uncertainties. One important parameter in the ReRSM model,  $\text{LSWI}_{sm}$  (Mean annual growing season of land surface water index), which was much lower would result in overestimation of  $Re$ , and higher  $\text{LSWI}_{sm}$  would result in  $Re$  underestimation.

**Key words:** Ecosystem respiration; C-flux model; ReRSM model; TPGPP model