

DOI: 10.5846/stxb201305030909

孙成明, 孙政国, 刘涛, 王力坚, 陈瑛瑛, 郭斗斗, 田婷, 李建龙. 基于 MODIS 的中国草地 NPP 综合估算模型. 生态学报, 2015, 35(4): 1079-1085.

Sun C M, Sun Z G, Liu T, Wang L J, Chen Y Y, Guo D D, Tian T, Li J L. Comprehensive estimation model of grassland NPP based on MODIS in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1079-1085.

基于 MODIS 的中国草地 NPP 综合估算模型

孙成明^{1,*}, 孙政国², 刘涛¹, 王力坚¹, 陈瑛瑛¹, 郭斗斗¹, 田婷¹, 李建龙³

1 扬州大学农学院江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点, 扬州 225009

2 南京农业大学动物科技学院, 南京 210095

3 南京大学生命科学学院, 南京 210093

摘要: 草地生态系统是陆地生态系统分布最广的生态系统类型之一, 其碳储量的估算在全球变化中的作用越来越受到重视。为了快速、便捷地实现中国草地净初级生产力(NPP)的估算, 在获取野外调查资料与同期遥感影像数据的基础上, 利用归一化植被指数(NDVI)以及气候数据, 构建了草地 NPP 综合估算模型。模型包括叶面积指数(LAI)和光合累积量(PA)两个子模型, 其中 LAI 子模型利用了遥感数据 NDVI, PA 子模型利用了温度、降水和辐射等气候数据。通过建模以外独立的实测数据的验证, 模拟值与实测值之间有很好的相关性, R^2 为 0.8519, 相关性达到极显著水平。RMSE 和 RRMSE 均较小, 表明模型的模拟结果比较可靠。同时模拟值与实测值之间的平均相对误差仅为 1.97%, 模拟结果的准确度较高, 因此利用上述模型估算中国草地 NPP 是可行的。以上结果为中国草地 NPP 估算提供了新的方法。

关键词: 草地 NPP; NDVI; 月平均温度; 月降水量; 估算模型; 中国

Comprehensive estimation model of grassland NPP based on MODIS in China

SUN Chengming^{1,*}, SUN Zhengguo², LIU Tao¹, WANG Lijian¹, CHEN Yingying¹, GUO Doudou¹, TIAN Ting¹, LI Jianlong³

1 Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2 College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

3 College of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Grassland ecosystem is one of the most widely distributed types in the terrestrial ecosystems. Estimating carbon storage in grassland ecosystem has been a central focus of global change researches. In order to estimate the grassland net primary productivity (NPP) quickly and reliably, based on the field survey data and the remote sensing image data of the same period, the comprehensive estimation model of grassland NPP in China was developed by using normalized difference vegetation index (NDVI) and climate data. According to the basic principles of grassland genetic and the relationship between the single factor and the NPP, through statistical analysis, the model structural factors were put forward, and then integrated together. The comprehensive model included two sub models of leaf area index (LAI) and photosynthetic accumulation (PA), and it was $NPP = LAI \times PA$. The remote sensing data NDVI was used as a driving factor for constructing LAI sub model and it was $LAI = \ln(5.79 \times NDVI + 5.91) / (2.73 - 2.46 \times NDVI)$. The climate data such as temperature, precipitation, and radiation were used as driving factors to construct PA sub model. In the PA sub model, there was a logarithmic relationship between the grassland NPP and mean monthly temperature, and the correlation

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB950702); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(2011-05); APN 全球变化基金项目(ARCP2011-06CMY-LI)

收稿日期: 2013-05-03; 网络出版日期: 2014-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cmsun@yzu.edu.cn

coefficient $r=0.4382$ ($P<0.01$, $n=95$). There was a linear positive correlation between the grassland NPP and monthly rainfall, and the correlation coefficient $r=0.6626$ ($P<0.01$, $n=95$). There was an exponential relationship between the grassland NPP and radiation, and the correlation coefficient $r=-0.7047$ ($P<0.01$, $n=95$). So PA sub model was described as $PA=\ln(2+T/18.1)\times\text{Sqrt}(W/89.3)\times110/\text{Exp}(R/603-0.8)$, where T was mean monthly temperature, W was monthly rainfall, and R was monthly radiation. The model was validated by independent measured data which was not used for constructing the model. There was a good correlation between the simulated and observed NPP values, and the R^2 was 0.8519 ($P<0.01$). The root mean square error (RMSE) and the relative root mean square error (RRMSE) were 59.955 gC/m^2 and 0.358, respectively. The small values of RMSE and RRMSE indicated that the model was reliable. The average relative error between the simulated and measured values was only 1.97%, and the model can accurately predict NPP. So it was feasible to estimate grassland NPP in China by using this model, and this model provided a new method for estimating of grassland NPP in China.

Key Words: grassland NPP; NDVI; mean monthly temperature; monthly rainfall; estimation model; China

草地生态系统是陆地生态系统中最重要、分布最广的生态系统类型之一,在全球碳循环和气候调节中起重要的作用^[1]。我国拥有极为丰富的草地资源,分布自东北平原,越过大兴安岭,经辽阔的内蒙古高原,而后经鄂尔多斯高原、黄土高原,直达青藏高原南缘,绵延约 4500 km,南北跨越 23 个纬度^[2]。草地不仅是我国分布面积最广的生态系统类型之一,而且对发展畜牧业、维持生物多样性、保持水土和维护生态系统平衡方面有着重大的作用^[3]。因此,正确地估算我国草地植被净初级生产力(NPP),对合理开发草地资源以及研究我国陆地生态系统的碳循环具有重要意义。植被 NPP 是衡量植物群落在自然环境条件下生产能力的重要指标, NPP 的变化直接反映了生态系统对环境气候条件的响应,因此可以作为生态系统功能对气候变化响应的研究指标^[4]。掌握草地 NPP 年际间的变化规律,分析和研究指标 NPP 与气候间的相互关系,对评价陆地生态系统的环境质量、调节生态过程以及估算陆地碳汇具有重要的理论和实际价值^[5-6]。

草地 NPP 估算方法很多,以建立模型进行估算为主,特别是在全球或区域性等大尺度研究中,模型估算方法表现出其他方法不能比拟的优点,以至成为草地宏观生态研究的一种重要方法。因此,一些草地研究者利用草地 NPP 估算模型进行草地 NPP 的动态监测和预测,以期对草地生态的改善和恢复提供理论和技术上的支持^[7]。国内外的许多学者对气候变化条件下全球草地生产力、草地 C 循环等生态系统过程的影响做了大量分析研究,也有许多学者对国家或区域尺度的草地 NPP 进行了模拟^[8-14]。近年来,随着遥感和 GIS 技术的飞速发展,特别是 MODIS 数据的应用,为快速科学估算区域植被 NPP 提供了新的途径,将卫星遥感参数导入估算模型成为主要的研究方法,被越来越多的研究者接受和使用^[15-17]。本文利用我国气候资料,并结合同期的遥感影像,建立了基于遥感数据的我国草地植被 NPP 综合估测模型,旨在为我国草地生态系统有效管理以及碳储量的动态变化研究提供新的手段。

1 材料与方法

1.1 数据获取与处理

1.1.1 NPP 实测数据

于 2010 年、2011 年 6 月在贵州、四川以及 7 月在新疆、内蒙等地进行实地调查,总计取样 190 个(其中 95 个用于建模,95 个用于验证)。每处选取有代表性样地设置 1 个大样方($10\text{ m}\times10\text{ m}$),在大样方四角及中心位置各设置 1 个小样方($1\text{ m}\times1\text{ m}$),共计 5 个,调查每个小样方内的地上生物量及经纬度等信息。鲜草带回后在 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱里烘干 48 h 后测量干重。5 个小样方的干重求平均,按每 2.2 g 干重约等于 1 g 碳换算^[1],得到每个样地的草地 NPP,统一以碳(gC/m^2)的形式表示。

1.1.2 气候数据

2010—2011 逐月平均温度、逐月总降雨量和逐月太阳辐射来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>) 752 个地面观测站。利用地理信息系统(GIS)的插值工具,根据各气象站点的经纬度信息,对气象数据进行 Kriging 插值。然后将通过插值获得的图像进行投影变换,并按调查点相应的经纬度提取气候数据信息。

1.1.3 遥感数据

本文所用 MODIS-NDVI 数据来自美国宇航局(NASA)网站,时间分辨率为 16d,空间分辨率为 500m。数据有 4 个光谱数据图层,产品覆盖全球,采用正弦投影,按照 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的地理范围分割成单独文件。它以减少云的影响和降低成像几何观测条件的差异为目的,可以反映植被光谱和季节物候曲线特征^[18]。然后利用最大合成法提取月 NDVI 值,此方法假设每旬中 NDVI 值最大的那一天是“晴空”,为了排除受到云和大气影响的像元,此时逐像元地比较每个月每旬的几张 NDVI 图像并提取最大的 NDVI 值为合成后的 NDVI 值^[19]。然后提取与地面取样点相同经纬度并且在同一月份的 NDVI 值作为研究所用数据。

1.2 分析方法

1.2.1 数据分析

利用 MODIS 投影转换工具 MRT(MODIS Reprojection Tool)进行拼接,并由正弦曲线投影(是一种等面积的伪圆柱投影,纬距不等)转换为等面积方位投影(又称兰勃特等积方位投影,图上面积和相应的实际地面面积比值相等),通过最近邻方法进行像素重采样,用矢量化的中国行政区划图进行裁剪,提取本研究的 NDVI 分布区域。

1.2.2 建模方法

根据草地发生学的基础原理,利用单个因子与 NPP 之间的相关性,提出模型结构因子,然后对上述因子进行组合,形成综合模型,最后利用实测数据确定模型的参数值。根据实验数据的分析结果可知,NDVI 与 LAI 之间以及温度、降雨、辐射与光合累积量之间存在相关关系,因此可利用它们进行模型因子的构建。

1.2.3 模型验证

为了验证模拟结果的可靠性,采用 RMSE(均方根误差)和 RRMSE(相对均方根误差),利用预留用于检验的实测数据对模型的模拟效果进行检验和评价。

2 结果与分析

2.1 草地 NPP 综合估算模型构建

草地 NPP 是指草地在单位面积上、单位时间内所累积的有机物数量,是光合作用所固定的有机碳总量和自养呼吸消耗量之差。因此,草地 NPP 估算可由草地叶面积和单位叶面积光合累积量两个因子表示,其估算公式模拟如下:

$$NPP = LAI(x, t) \times PA(x, t) \quad (1)$$

式中, $LAI(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份的草地叶面积指数; $PA(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份的光合累积量($gC/m^2/月$)。

2.1.1 $LAI(x, t)$ 的估算

根据 Beer-Lambert 定律,参照已有的研究^[20],叶面积指数 LAI 可以表示为:

$$LAI(x, t) = \frac{\ln(a_1 \times NDVI(x, t) + b_1)}{a_2 \times NDVI(x, t) + b_2} \quad (2)$$

式中, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为方程的待定系数。

2.1.2 $PA(x, t)$ 的估算

草地单位面积的光合累积量受到多种因素的影响,特别是水、热等的影响,因此 PA 的估算综合考虑了月

均降水、月均温度和月辐射 3 个主要气象因子。

(1) 温度与 NPP 的关系

根据野外调查 NPP 的经纬度值提取相应的温度数据,其对应关系列于图 1。由图 1 可知,全国月平均温度与草地 NPP 之间存在对数关系,回归方程为 $y = 185.46 \ln(x) - 351.19$, 相关系数 $r = 0.4382^{**}$ ($n = 95$, 置信度为 99% 时,拟合方程有意义的 r 值低限为 0.263, 实际 r 值高于该限值 66.62%), 达到了极显著水平, 因此可用对数方程表示温度对 NPP 的影响。

(2) 降雨与 NPP 的关系

根据野外调查 NPP 的经纬度值提取相应的降雨量数据,其对应关系列于图 2。由图 2 可知,月降水量与草地 NPP 存在线性正相关关系,回归方程为 $y = 1.7972x - 3.4116$, 相关系数 $r = 0.6626^{**}$ ($n = 95$, 置信度为 99% 时,拟合方程有意义的 r 值低限为 0.263, 实际 r 值高于该限值 151.94%), 达到了极显著水平, 因此可用线性方程表示降水对草地 NPP 的影响。

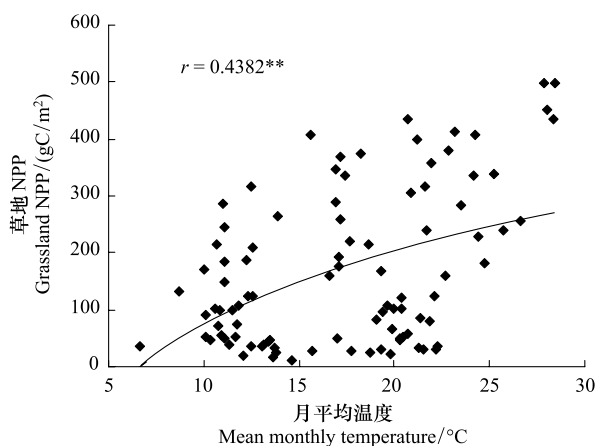


图 1 月平均温度与草地 NPP 的关系

Fig.1 The relationship between mean monthly temperature and grassland NPP

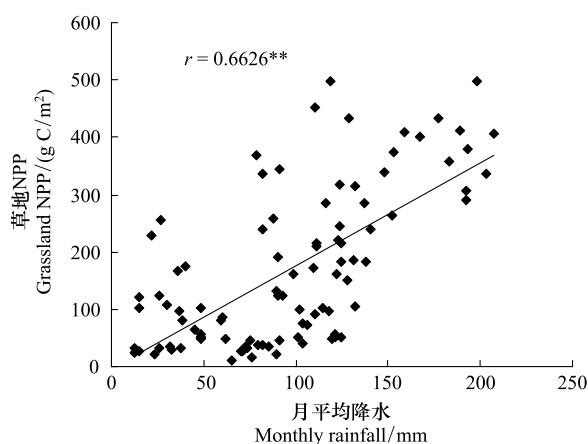


图 2 月降水量与草地 NPP 的关系

Fig.2 The relationship between monthly rainfall and grassland NPP

(3) 辐射与 NPP 的关系

本研究中所用辐射数据为逐月太阳总辐射量 (MJ/m^2), 将其与草地 NPP 的对应关系列于图 3。由图 3 可知, 辐射与草地 NPP 之间存在指数关系, 且呈负相关, 回归方程为 $y = 311627e^{-0.013x}$, 相关系数 $r = -0.7047^{**}$ ($n = 95$, 置信度为 99% 时, 拟合方程有意义的 r 值低限为 -0.263, 实际 r 值高于该限值 167.95%), 达到了极显著水平, 因此可用指数方程表示辐射对草地 NPP 的影响。

(4) $PA(x, t)$ 构成

上述分析表明, 草地 NPP 与温度、降雨呈正相关, 而与辐射量呈负相关。同时考虑直接使用温度作为方程的因子时, 结果变异较大, 而且对低于零度的数据无法处理, 因此引入温度调节系数, 其形式可描述为: $\ln$

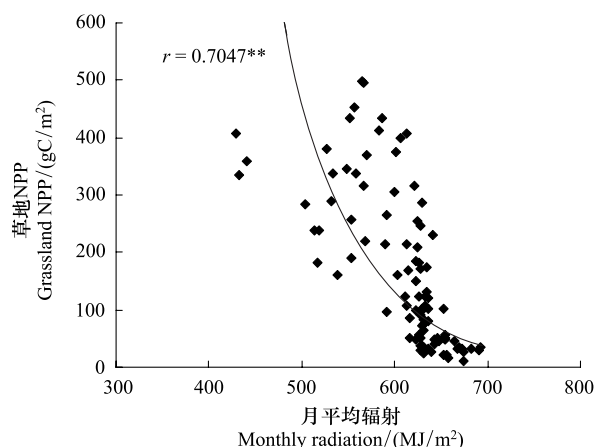


图 3 月辐射量与草地 NPP 的关系

Fig.3 The relationship between monthly radiation and grassland NPP

($2 + T/t_1$)。同样为了避免直接使用降水和辐射数据导致结果变异太大, 分别引入降水调节系数和辐射调节系数, 其形式可描述为: $\text{SQRT}(W/w_1)$ 以及 $\exp(R/r_1 - 0.8)$ 。最终的 $PA(x, t)$ 可表示如下:

$$PA(x, t) = \frac{\ln(2 + T/t_1) \times \sqrt{W/w_1}}{\exp(R/r_1 - 0.8)} \times K \quad (3)$$

式中, T 表示像元 x 所在位置的月平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), t_1 为温度调节系数; W 表示像元 x 所在位置的月降水量 (mm), w_1 为降水调节系数; R 表示像元 x 所在位置的月辐射量 (MJ/m^2), r_1 为辐射调节系数; K 为模型调整系数。

2.2 模型参数确定

采用 Matlab 编程, 利用 2010 年部分实测数据对模型的参数进行求算。模型各参数的值列于表 1。

表 1 模型参数值
Table 1 Parameter values of NPP forecasting model

参数 Parameter	a_1	b_1	a_2	b_2	t_1	w_1	r_1	K
数值 Value	5.79	5.91	-2.46	2.73	18.1	89.3	603	110

进一步分析可知, t_1 、 w_1 、 r_1 的取值有一定的生物学意义。本研究中温度调节系数 t_1 的值为 18.1, 与草地 NPP 最高的月份全国平均温度比较接近(全国草地 NPP 最高月份一般为 7 月, 此时全国月平均温度为 20.98°C , 而最低的 1 月份为 -5.85°C), 因此可以认为 t_1 代表了草地生长的最适温度。降水调节系数 w_1 的值为 89.3, 与草地 NPP 最高的月份全国平均降水量比较接近(7 月份全国月平均降水量为 90.67 mm , 而 1 月份为 5.99 mm), 因此可以认为 w_1 代表了草地生长的最适降水量。辐射调节系数 r_1 的值为 603, 其生物学意义与 t_1 、 w_1 相同(7 月份全国平均辐射量为 $612.61\text{ MJ}/\text{m}^2$, 而 1 月份为 $282.62\text{ MJ}/\text{m}^2$), 因此可以认为 r_1 代表了草地生长的最适辐射量。当然, 如果研究区域发生了变化, t_1 、 w_1 、 r_1 的取值也要作相应的调整, 应分别与研究区最适宜草地生长的温度、降水和辐射相对应。

最终的模型可以表示为:

$$NPP = \frac{\ln(5.79NDVI+5.91)}{2.73-2.46NDVI} \times \frac{\ln(2+T/18.1) \times \sqrt{W/89.3}}{\exp(\frac{R}{603}-0.8)} \times 110 \quad (4)$$

2.3 模型验证

利用 95 个样点的实测值及对应点的模拟值的比较列于表 2。由表 2 可知, 实测值与模拟值比较接近, 平均实测值在 $168\text{ gC}/\text{m}^2$ 左右, 平均模拟值在 $175\text{ gC}/\text{m}^2$ 左右, 二者相差 $6.948\text{ gC}/\text{m}^2$, 根均方差为 $59.955\text{ gC}/\text{m}^2$, 结果比较可靠。

将上述结果的 1:1 关系列于图 4, 由图 4 可知, 实测值与模拟值比较接近, 二者之间有很好的相关性, R^2 为 0.8519 ($n=95$, 置信度为 99% 时, 拟合方程有意义的 r 值低限为 0.263 , 实际 r 值为 0.923), 达到了极显著水平。模拟根均方差 RMSE 为 $59.955\text{ gC}/\text{m}^2$, 相对根均方差为 0.358 , 均较小, 上述结果说明以遥感模型估算草地 NPP 是可行的。同时从模型的模拟值与实测值的 1:1 关系图可以看出, 二者之间的趋势一致。

表 2 模拟值与实测值的比较

Table 2 Comparison between simulation and observation values

类型 Type	样本数 Sample amount	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean value	标准差 Standard error	均方根差 Root Mean Square Error (RMSE)
实测值 Observation/ (gC/m^2)	95	498.236	11.136	168.564	14.090	59.955
模拟值 Simulation/ (gC/m^2)	95	557.640	22.983	175.412	15.817	

为了进一步验证该模型的精度, 本文计算了草地 NPP 估算结果的平均相对误差。根据模拟结果与对应位点实测的独立数据, 得到 NPP 模拟值与实测值之间的平均相对误差仅为 1.97% , 这说明该模型的平均估算

精度可以达到 98.03%, 因此该模型具有一定的普适性, 有可能推广到以 MODIS-NDVI 数据估算我国西北地区草地 NPP 的相关应用中。

3 结论与讨论

在植被 NPP 的模拟研究中, 前人多使用了单一的模型, 综合考虑多种因素的较少。本研究结合“天地”资料, 构建了基于遥感植被指数 NDVI、温度、降水及辐射等因子的草地 NPP 估算综合模型。从草地生长及光合利用的角度出发将模型分为两个部分, 一部分用于模拟草地叶面积指数, 另一部分用于模拟单位叶面积的光合累积量。通过不同年份独立的实测 NPP 数据的验证, 模拟值与实测值之间的相关性达到了极显著水平, 且 RMSE 和 RRMSE 均较小, 表明模型的模拟结果比较可靠。因此可以利用上述生态遥感综合模型实现对全国草地 NPP 的有效估算。

碳储量遥感估算的主要优点是遥感技术可以提供植被和环境不同时间的空间连续数据, 比如以遥感多波段数据计算的植被指数(NDVI、EVI 等)^[21-22]。本文以 NDVI 作为草地 NPP 估算模型的遥感驱动因子, 并证实该估算模型对于特定区域表现较优。由于没有充分测试采样点选址、测定误差、参数准确性、输入变量有效性等因素对估算精度的影响, 该模型的普适性可能还需要以更多样区的实验数据检验。

太阳辐射是植物进行光合作用的条件之一, 不同植物光合作用对光照强度的要求不同, 光合速率随着光照强度的增加而增强, 超过一定范围后, 光合速率随着光强增加反而减弱^[23-24]。本研究表明, 在全国大部分地区, 随着辐射的增强, 草地 NPP 呈下降的趋势。当然本研究在模拟过程中也发现, 温度和降水等气候因子对草地 NPP 起到很重要的作用, 只是在不同的子区域, 主导气候驱动因子存在一定的差异。同时, 由于气温和降水在促进草地植被生长的同时, 也会提高植被的暗呼吸速率, 导致 NPP 的降低。因此, 气温和降水所起的积极促进作用或者消极作用都是在一定的限度范围内, 超过了某一限度范围, 所起的作用可能相反^[21]。确定气温、降水等气象因子对草地 NPP 产生正、负影响的具体阈值, 有可能成为这类模型研究的一个重要方向。

参考文献(References):

- [1] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [2] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 谢高地, 张德镒, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [4] 谷晓平, 黄玫, 季劲钧, 吴战平. 近 20 年气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响. 自然资源学报, 2007, 22(2): 251-259.
- [5] 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究. 应用生态学报, 2000, 11(1): 47-52.
- [6] 侯英雨, 柳钦火, 延昊, 田国良. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1546-1553.
- [7] 施新民, 黄峰, 陈晓光, 尚永生, 伍一萍, 郑鹏辉. 气候变化对宁夏草地生态系统的影响分析. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 65-69.
- [8] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, Schimel D S, Hall D O. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. Global Change Biology, 1995, 1(1): 13-22.
- [9] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, Moore III B. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. Science, 1997, 278(5339): 870-872.
- [10] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 1998, 393(6682): 249-252.
- [11] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.

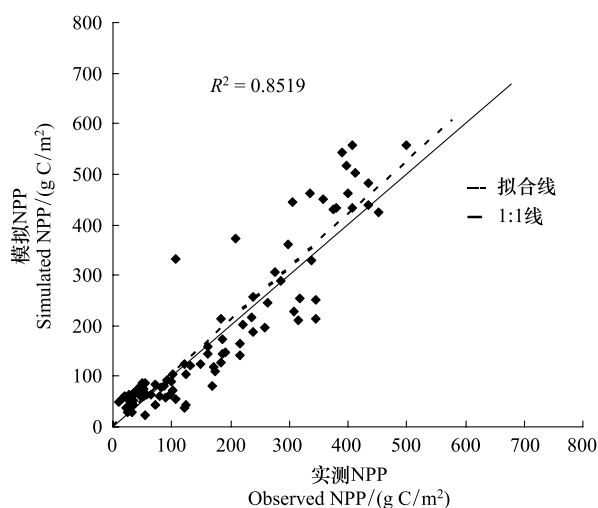


图 4 草地 NPP 模拟值与实测值的比较

Fig.4 Comparison between simulation and observation values of grassland NPP

- [12] 孙睿, 朱启疆. 气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究. 遥感学报, 2001, 5(1): 58-61.
- [13] 朴世龙, 方精云. 1982-1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化. 自然资源学报, 2002, 17(3): 373-380.
- [14] 李刚, 周磊, 王道龙, 辛晓平, 杨桂霞, 张宏斌, 陈宝瑞. 内蒙古草地 NPP 变化及其对气候的响应. 生态环境, 2008, 17(5): 1948-1955.
- [15] 孙成明, 刘涛, 田婷, 郭斗斗, 王力坚, 陈瑛瑛, 李菲, 李建龙. 南方 3 种类型草地上生物量的光谱估测模型. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2012, 33(4): 51-55.
- [16] 何勇, 董文杰, 郭晓寅, 丹利. 基于 MODIS 的中国陆地植被生长及其与气候的关系. 生态学报, 2007, 27(12): 5086-5092.
- [17] Chen J, Jonsson P, Tamura M, Gu Z H, Matsushita B, Eklundh L. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3-4): 332-344.
- [18] 罗玲, 王宗明, 毛德华, 娄彦景, 任春颖, 宋开山. 松嫩平原西部草地净初级生产力遥感估算与验证. 中国草地学报, 2011, 33(6): 21-29.
- [19] 赵鲁青. 雅鲁藏布江中下游区域植被绿期和净初级生产力时空格局及其对气候变化的响应 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011: 17-18.
- [20] 谭昌伟, 王纪华, 黄义德, 黄文江, 刘良云. 运用光谱技术改进 Beer-Lambert 定律的定量化及其应用研究. 中国农业科学, 2005, 38(3): 498-503.
- [21] 何红艳. 青藏高原森林生产力格局及对气候变化响应的模拟 [D]. 北京: 中国林业科学院, 2008.
- [22] Dong J R, Kaufmann R K, Myneni R B, Tucker C J, Kauppi P E, Liski J, Buermann W, Alexeyev V, Hughes M K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 393-410.
- [23] 冉慧. 基于 CASA 模型的吉林省区域 NPP 遥感研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [24] 刘世荣, 郭泉水, 王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. 生态学报, 1998, 18(5): 478-483.