

基于无线传感网的毛竹林净初级生产力估算

汪 雪¹, 周国模¹, 徐小军¹, 于亚妮², 李 楠²

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 碳通量监测结果是评价森林生态系统碳收支的重要数据基础。涡度相关法作为目前最可靠的通量观测技术, 在精度上具有优势, 但观测范围局限于通量贡献区, 无法实现大区域的森林生态系统净初级生产力(net primary productivity, NPP)监测。为了研究无线传感网络在生态监测中的应用, 探寻一种大尺度净初级生产力估算的方法, 在安吉毛竹 *Phyllostachys edulis* 林通量观测塔附近部署无线传感网, 采集 2015 年 1 月至 9 月的太阳辐射、气温和湿度等气象数据。在对光能利用率(light use efficiency, LUE)模型的参数计算方法进行简化的基础上, 将无线传感网数据作为光能利用率模型的驱动变量, 实现基于无线传感网数据的毛竹林净初级生产力估算, 得到以下结果: ①利用无线传感网采集的气象数据与通量塔观测数据具有较高的一致性, 两者光辐射的决定系数为 0.77, 相关性较高。②基于无线传感网数据估算的毛竹林 NPP 与实测值相比, 在月尺度上两者的相对误差为 10.1%, 具有较高的精度以及一致的季节变化趋势。③随着数据合成时间尺度的增加, 估算值与实测值之间的误差降低, 其中以 10 d 尺度数据合成精度最高。无线传感网作为一种新型的监测手段, 能很好地实现对毛竹林生态系统的监测。图 7 表 1 参 21

关键词: 森林生态学; 净初级生产力; 无线传感网; 光能利用率

中图分类号: S718.55

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)01-0078-08

Estimating net primary productivity in a bamboo stand using a wireless sensor network

WANG Xue¹, ZHOU Guomo¹, XU Xiaojun¹, YU Yani², LI Nan²

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Information Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Estimation of carbon fluxes is an important data basis for assessing forest ecosystem carbon cycling with the most widely used and effective method of measurement, the eddy covariance method, having advantages in accuracy but being limited in the scope of observation as it has a greater error when estimating net primary productivity (NPP) over large areas of a forest ecosystem. To study the application of wireless sensor networks for ecological monitoring and to estimate net primary production on a large scale, a wireless sensor network was developed in the vicinity of a flux observation tower in a bamboo stand of Anji, Zhejiang. The continuous meteorological data of radiation, temperature and humidity was collected from January to September in 2015. According to the simplified algorithm of model parameter, data collected from the wireless sensor network was used as the driving variable of the model, and NPP was evaluated. Results showed that (1) the meteorological data collected by wireless sensor network were consistent with the observed data of the flux tower,

收稿日期: 2016-02-23; 修回日期: 2016-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31370637, 31500520); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ15C160003); 浙江农林大学科研发展基金人才启动项目(2014FR025)

作者简介: 汪雪, 从事森林资源监测与评价研究。E-mail: 413888707@qq.com。通信作者: 周国模, 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林经理、全球气候变化与森林碳汇等研究。E-mail: zhougum@zafu.edu.cn

the determination coefficient of the two light radiation is 0.77. (2) Compared with measured value, the NPP evaluation of the bamboo stand based on wireless sensor network has a more consistent seasonal tendency with a 10.1% relative error. (3) With the increasement of the time scale of data synthesis, the error between the estimated value and the measured value is reduced. Among them, the synthetic accuracy of scale data of 10 days was highest, the RMSE and Std Dev were lowest and the value of RMSE and Std Dev were ($0.048\ 7\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and ($0.041\ 8\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), respectively. Thus, as a new monitoring method, the wireless sensor network could be applied in a bamboo stand ecological system. [Ch, 7 fig. 1 tab. 21 ref.]

Key words: forest ecology; net primary productivity; wireless sensor networks; light use efficiency

陆地生态系统碳循环监测结果对未来气候情景预测起到至关重要的作用^[1]。目前,人们对北半球陆地生态系统碳源/汇空间分布了解仍有不足^[2]。自从 18 世纪的工业革命以来,环境问题日益加剧,如全球变暖和臭氧层空洞等^[3]。及时准确地估算陆地生态系统碳通量,对评价陆地生态系统碳循环及其对气候变化的影响具有非常重要的意义^[4]。现在使用最广泛的碳通量监测方法是涡度相关法,但是受限于通量塔的观测范围有限和价格昂贵,无法满足大区域的森林净初级生产力(net primary productivity, NPP)的估算需求^[5]。因此,借助生态系统模型结合通量观测数据,是一种重要而且被广泛应用的进行大区域 NPP 估算方法^[6-7]。光能利用率模型是基于冠层吸收太阳辐射与光合作用固碳量存在相关关系的光能利用率理论而开发的半经验生态模型。在日和季度时间尺度上,NPP 主要受光照、气温、水分等环境因素的影响,而在年尺度上主要取决于叶面积和光照时长。光能利用率模型由最大光能利用率、有效光合辐射、有效光合辐射吸收比率和最大光能利用率调节因子 4 部分组成。光能利用率模型在估算 NPP 上具有优势且已广泛应用于大尺度的森林 NPP 估算中^[8-12]。POTTER 等^[8]建立了 CASA(carnegie-ames-stanford approach)模型,实现了基于光能利用率理论的全球陆地 NPP 估算,取得了与其他研究方法一致的全球陆地 NPP 估算结果。国内一些学者对光能利用率模型进行改进,应用于中国陆地 NPP 估算,模拟结果得到了较高的精度^[13-15]。胡海清等^[16]基于光能利用率模型估算了大兴安岭火烧迹地的森林生态系统生产力,得到的结果准确地揭示了研究区植被覆盖情况以及火烧后的森林生态系统生产力空间分布。虽然光能利用率模型被广泛应用,但是驱动参数对估算结果会产生较大的误差。常用的驱动参数获取方法是利用遥感影像提供的归一化植被指数、太阳辐射、水分、气温等数据。一方面,遥感技术方法收集的数据不确定性较大,对估算结果带来很大的不确定性;另一方面,驱动参数来源于不同的遥感数据,数据之间存在时间和空间尺度的不一致性,给估算带来困难。然而,无线传感网作为一种新型的信息采集和处理方式,它通过分布式自组织及多跳方式采集、处理和传输信号,且其具有低成本,低功耗的优点,为陆地生态系统碳循环研究提供了新的数据获取技术^[17-18]。SURI 等^[19]利用无线传感网实现了对农作物生长状况的近距离持续观测。吕芸帙等^[20]提出一种利用无线传感网测量植被叶面积指数的方法,结果分析表明:无线传感网可以有效地测量植被叶面积指数。无线传感网的节点能够大面积布置,长时间实时获取不同空间位置同一时间的太阳辐射、气温和湿度等气象数据。同时,传感器节点在布置和拆除上都较为简易,可以移至不同区域进行测量。本研究提出一种针对森林 NPP 监测的无线传感网的部署方案,利用无线传感网在采集气象数据上的优势,将采集的气象数据输入到光能利用率模型中,开展植被的 NPP 估算研究,为获得大尺度森林 NPP 提供一种可行和便捷的估算方法。

1 方法

1.1 研究区概况

研究区为浙江省湖州市安吉县山川乡($30^{\circ}28'34.5''\text{N}$, $119^{\circ}40'25.7''\text{E}$),气候属于亚热带季风气候,四季分明,雨热同期,年平均气温为 $14.7\ ^{\circ}\text{C}$,降水量为 $1\ 700.0\ \text{mm}$,全年日照充足,水源充沛,竹子种类繁多,资源丰富。森林覆盖率为 88.8%,植被覆盖率达 91.3%,其中毛竹 *Phyllostachys edulis* 林占森林面积的 50.7%,空气质量 I 级,地表水 I 级,誉为“竹子之乡”。实验区内土壤为黄壤、黄红壤。毛竹林通量观测塔位于海拔 380 m 处,站点坡度为 $2.5^{\circ}\sim 14.0^{\circ}$ 。观测塔周围 1 000 m 范围主要植物类型以毛竹为主,为人工纯林,混有少量针阔混交林,极少量灌木和草本。通量观测塔塔高约为 40 m,具

体介绍见文献[21]。

1.2 无线传感网络部署

无线传感器节点由无线模块、光照、温湿度传感器、供电模块等组成,通过多跳自组织的方式构成无线传感器网络。传感器节点测量数据通过 Sink 节点发送到服务器端进行数据的处理和分析。

传感器节点布置在通量塔上及通量塔周围。该布置的目的在于获得多层数据,并且获取数据的区域与通量塔获取数据的区域一致。在没有通量塔的区域,可通过搭建相同高度支架进行布置。在第5层高约25 m处,放置节点,使节点光照传感器朝上,接收入射的光辐射。在第4层,约20 m处,放置节点,使节点光感应区正对地面,接收来自地面和竹林的反射光辐射。在塔底,以通量塔为圆心的10 m周长上的竹林中,均匀布置10个传感器节点,感应区朝上,接收透射过竹林冠层的光辐射。

无线传感网接收数据从2015年1月初至2015年9月底结束。传感器5 s返回1个数据。在每天上午10:00到下午14:00间,外界环境对光照强度的影响最小,植物进行光合作用也最稳定,为了减小估算的误差,因此,只获取该时间段的数据进行计算。除了光辐射数据,该传感器同时还收集温度和湿度数据。

1.3 有效光合辐射计算

毛竹林冠层的有效光合辐射收支采用式(1)计算^[1]:

$$R_{\text{APAR}} = R_{\text{PARdownwelling}} - R_{\text{PARreflected}} - R_{\text{PARtransmitted}} + R_{\text{PARground}} \quad (1)$$

式(1)中: R_{APAR} 表示植被吸收的光合有效辐射, $R_{\text{PARdownwelling}}$, $R_{\text{PARreflected}}$, $R_{\text{PARtransmitted}}$ 分别表示入射光辐射、冠层反射光辐射和冠层透射光辐射, $R_{\text{PARground}}$ 表示地面反射光辐射。由于 $R_{\text{PARground}}$ 太小,对 R_{APAR} 的影响极小,在本研究院中忽略不计。

吸收的有效光合辐射比率根据式(2)计算:

$$R_{\text{FPAR}} = R_{\text{APAR}} / R_{\text{APARdownwelling}} \quad (2)$$

1.4 光能利用率模型

植被在单位时间内通过光合作用将光能转换并固定下来的碳水化合物总量,即为该植被 NPP。光能利用率模型就是以这一生理过程为基础,以遥感数据、植被类型数据及气象数据为基础,对植被 NPP 进行模拟估算。

模型主要利用的参数为植被所吸收的光合有效辐射(R_{APAR})和光能利用率(ε)。模型算法如下:

$$P_{\text{NPP}}(x, t) = R_{\text{APAR}}(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (3)$$

式(3)中: x 表示数据来源的空间位置, t 表示时间,这里以月为单位。

光能利用率指的是植物通过光合作用将每单位的光能转化固定为碳水化合物的干物质总量。在最佳环境条件下,植被具有最大的光能利用率 ε^* ,但在实际环境条件下,它受到气温(T)和水分(W)等因子的限制,其表达式如式(4)表示:

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon^* \times T_{\varepsilon 1}(x, t) \times T_{\varepsilon 2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \quad (4)$$

式(4)中: ε^* 表示植被最大的光能利用率,本研究利用实测数据拟合,确定该值为 $0.472 \text{ mg} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。 $T_{\varepsilon 1}$, $T_{\varepsilon 2}$ 表示气温对光能利用率的胁迫作用,计算公式如式(5)和式(6)。

$$T_{\varepsilon 1}(x) = 0.800 \ 0 + 0.020 \ 0 T_{\text{opt}}(x) - 0.000 \ 5 [T_{\text{opt}}(x)]^2 \quad (5)$$

$$T_{\varepsilon 2}(x) = 1.181 \ 4 / \{ 1 + e^{0.2[T_{\text{opt}}(x) - 10 - T(x, t)]} \} / \{ 1 + e^{0.3[-T_{\text{opt}}(x) - 10 + T(x, t)]} \} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: $T_{\text{opt}}(x)$ 是适合植被生长的最适气温,本研究使用研究区最适植被生长月份7-8月的平均气温作为最适气温,取值 $26.29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

水分胁迫系数 W_{ε} 由式(7)计算:

$$W_{\varepsilon}(x, t) = 0.50 + 0.50 \times E_{\text{EET}}(x, t) / P_{\text{PET}}(x, t) \quad (7)$$

式(7)中: P_{PET} 为潜在蒸散量, E_{EET} 为估计蒸散量。 $E_{\text{EET}}(x, t) / P_{\text{PET}}(x, t)$ 的值小于 1.00。

这种计算方法涉及到植被蒸散和土壤水分等复杂因子。由于本研究使用的传感器无法采集这些数据,不能直接计算,因此,需要对参数进行简化。

1.5 基于无线传感网数据的参数简化

本研究使用的无线传感网络节点能采集相对湿度数据,水分胁迫系数是植物所能利用的有效水分对

光能利用率的影响。它随着环境中有效水分的增加逐渐增大。从式(7)计算它的取值范围为 0.50(在极端干旱条件下)到 1.00(非常湿润条件下)。由此推测：当相对湿度为 100%时，水分胁迫系数为1.00，而相对湿度为 0%时，它的值为 0.50，水分胁迫系数随着相对湿度的增加而变大，相对湿度与水分胁迫系数有正相关性。采用相对湿度值代替蒸散比，通过 2 个端点的固定值，采用线性、指数和抛物线等 3 种函数得到相对湿度与水分胁迫系数的关系(图 1)。

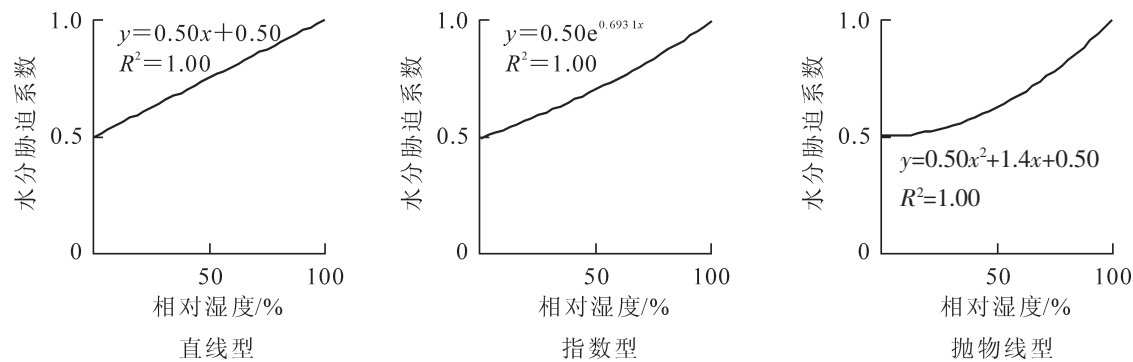


图 1 3 种相对湿度与水分胁迫系数的线性关系

Figure 1 Three kinds of Linear relationship between relative humidity and water stress coefficient

分别采用以上 3 种函数，对 NPP 进行拟合，线性、指数和抛物线等 3 种函数得到的决定系数分别为 0.403 6，0.318 4 和 0.321 9。3 种函数关系的相关性大小为直线型>抛物线型>指数型，从拟合结果上看，采用线性函数表达相对湿度与水分胁迫系数之间的关系，在估算 NPP 时具有更高的准确性。因此，本研究水分胁迫系数与相对湿度的相关关系采用线性函数，由式(9)表示：

$$W_s(x,t)=0.50+0.50H_{RH}。 \tag{9}$$

2 结果与分析

2.1 无线传感网数据测量结果

对无线传感网收集的光辐射、相对湿度和气温进行分析。光辐射数据分为总入射光辐射、透射光辐射和反射光辐射。从图 2 可见：太阳辐射变化曲线在晴天和雨天不同条件下起伏变化，变化幅度较大，总体上能反映太阳辐射真实变化情况。试验期间，光照总辐射的均值为 856.7 μmol·m⁻²·s⁻¹，随着季节变化呈先升后降的变化趋势，6–8 月达到峰值，最高值为 1 978.9 μmol·m⁻²·s⁻¹，从 9 月开始减少。太阳辐射透射值和反射值的季节性变化不大，均值分别为 233.4 μmol·m⁻²·s⁻¹ 和 102.4 μmol·m⁻²·s⁻¹。气温和湿度如图 3 所示，气温的月平均值范围在 6.37 ℃(1 月) 与 28.12 ℃(8 月)之间，其变化趋势与光照总辐射的变化趋势基本一致，而月平均相对湿度都在 50%以上。由于实验区处在多雨湿润区域，相对湿度的变化幅度不明显。

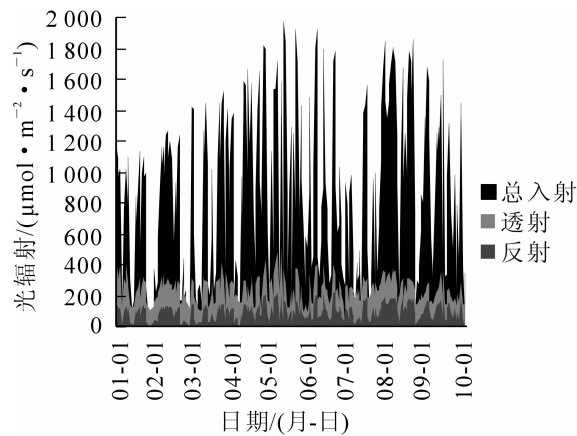


图 2 光辐射测量结果图

Figure 2 Measurement image of optical radiation

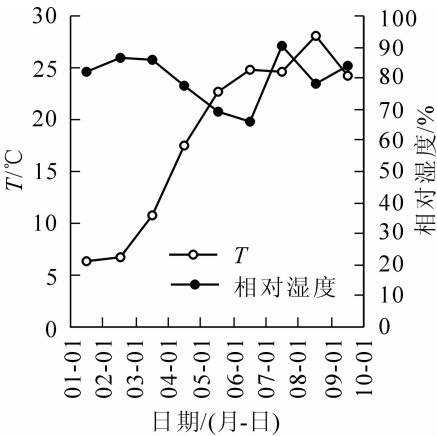


图 3 气温、相对湿度图

Figure 3 Image of temperature and relative humidity

2.2 数据有效性分析

由于无线传感网性能受到外界环境扰动较大,多个传感器节点接收到的数据存在差异,数值分布在一定区间范围内。因此,分别对每个传感器接收的数据进行处理,计算出所有传感器的月平均值,然后将其与通量塔获取的月平均值进行对比(图4)。结果表明:由多个传感器接收到的数据计算的太阳辐射月平均值变化趋势与通量塔数据趋势相一致。多个传感器测到的太阳辐射数据值分布在通量塔数据值可允许的误差范围内。无线传感器数据存在少量异常值,在计算时需要剔除,剔除异常值后,计算出无线传感网数据与通量塔数据的决定系数为0.770 0,相关性较高。数据对比分析表明无线传感器接收到的数据是具有可靠性。

2.3 估算结果与对比分析

将处理后的无线传感器接收到的数据输入到光能利用率模型中,对毛竹林 NPP 进行估算。估算结果得出试验区 1-9 月平均毛竹林 NPP 为 $0.115 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而通量观测塔实测值为 $0.128 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图5),两者相对误差为 10.1%。可见,通过无线传感网数据计算的结果具有较高的精度,达到 89.9%,但与实测值相比存在低估现象。估算结果与通量塔实测值在季节变化上具有一致性,毛竹林 NPP 呈双峰变化,分别在 4 月和 8 月出现峰值,这与毛竹林的展叶期和绿叶期生理特性相吻合。因此,采用无线传感网数据结合光能利用率模型进行毛竹林 NPP 估算是可行的。

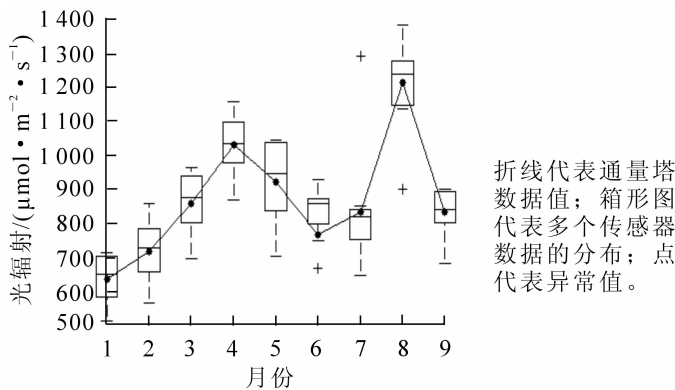


图4 数据有效性分析图
Figure 4 Data validation analysis chart

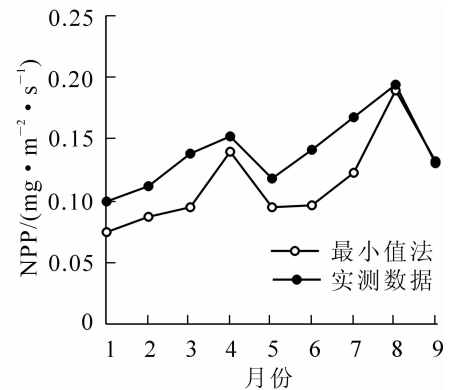


图5 净生产力估算结果的季节变化
Figure 5 Seasonal variation of the estimated results of net primary productivity

基于无线传感网数据估算的毛竹林 NPP 与通量观测塔实测值之间的散点图(图6)表明:毛竹林 NPP 的估算结果与实测值之间具有较高的相关性,决定系数为 0.403 6,两者拟合线接近 1:1 线,表明估算结果与实测值不存在严重的系统性偏差,但无线传感网估算结果稍低于通量观测塔实测值。分析低估的原因主要为无线传感器接收的数据存在较大的波动,并与模型参数权值分配的误差有一定关系。

2.4 不同时间尺度估算结果比较

考虑到利用传感器收集的数据估算日尺度的毛竹林 NPP 存在较大的波动性,在日尺度上存在较大的误差,为了分析不同时间尺度上无线传感网络估算的结果与碳通量观测塔实测值之间精度的变化,本研究将无线传感网络估算的日尺度数据以 2 d 为间隔,以 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 d 做取平均处理,在不同时间尺度上,对无线传感网络估算的毛竹林 NPP 进行分析(图7)。分析结果表明:时间尺度增大后,无线传感网络估算结果与实测值的相关性不断提高,估算结果负值出现的概率明显减少,与实测值更加一致。

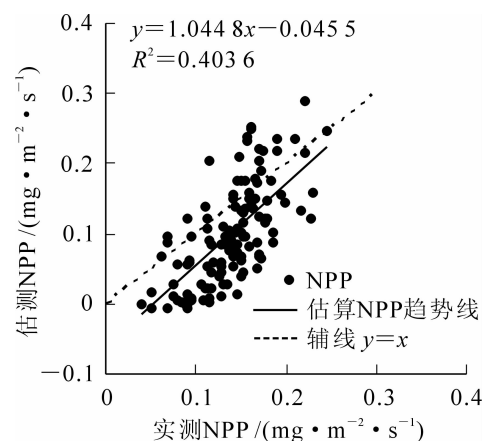


图6 NPP 估算值与实测值的线性回归分析图

Figure 6 Linear regression analysis image of NPP estimation and measurement

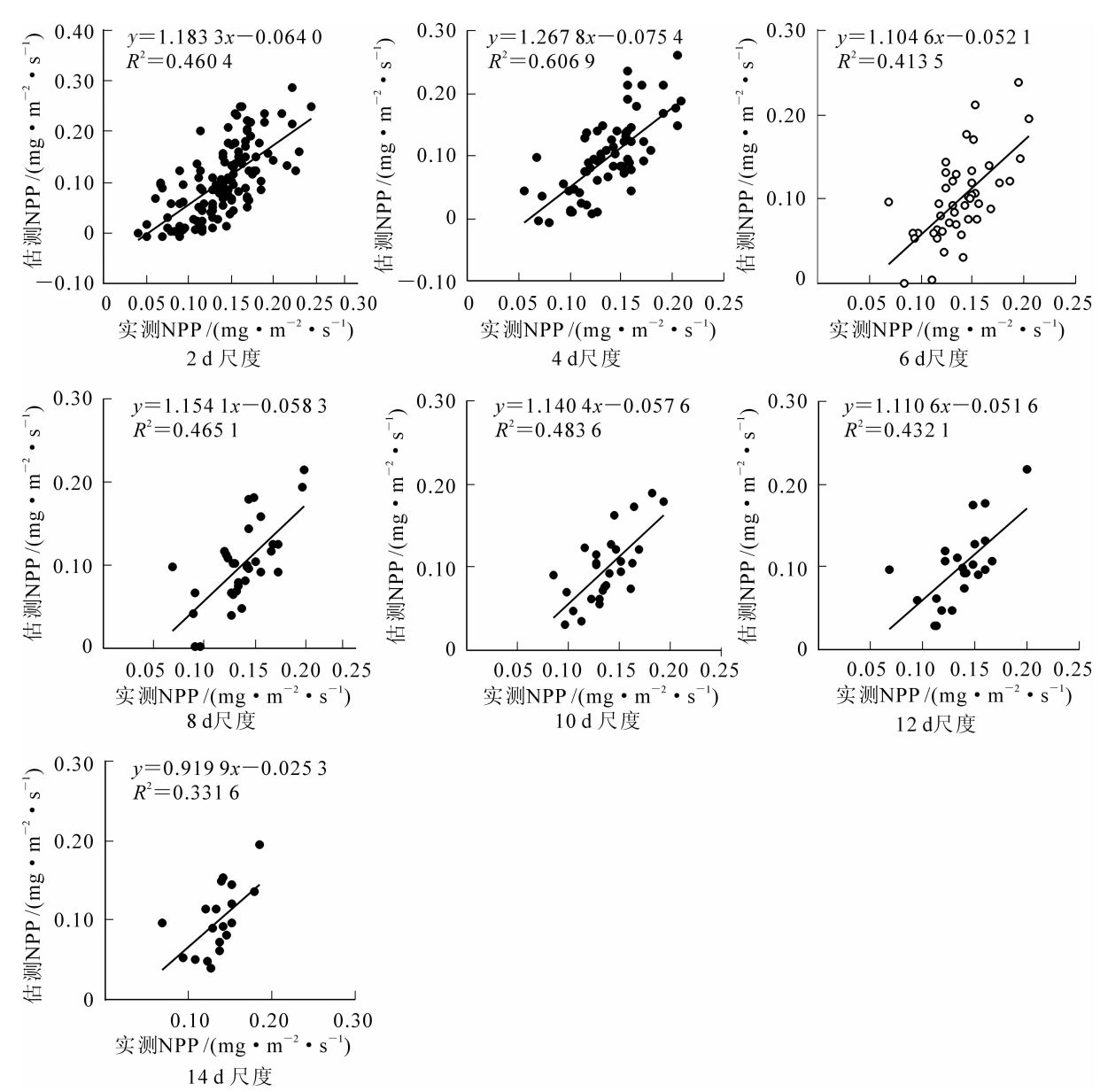


图 7 多种时间尺度的 NPP 估算
Figure 7 NPP estimations of different time scales

不同时间尺度无线传感网络估算结果与实测值之间精度评价(表 1)，随着时间尺度的增加，估算值与实测值之间的决定系数都要高于以 1 d 尺度估算结果，两者的均方根误差(E_{RMSE})不断降低，从 0.073 2 降低到 0.048 7，这说明以较大时间尺度来表征毛竹林 NPP 具有更高的可信度。随着时间尺度增大，估算结果的标准偏差逐渐减小，这说明尺度变大后数据的离散程度变小，估算值与实测值的偏差也减小，说明多天尺度数据的平均值能够消除日尺度数据所产生的误差(噪声)，得到更好的估算结果。在不同时间尺度分析中，以 10 d 为尺度得到的结果与实测值之间误差最小，因此，估算结果最优的时间尺度为 10 d。

表 1 多种时间尺度的估算验证结果			
Table 1 Estimation verification results of different time scales			
尺度/d	R^2	$E_{\text{RMSE}}/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	标准差/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.407 8	0.073 2	0.080 1
2	0.460 4	0.064 1	0.069 4
4	0.506 9	0.058 0	0.068 1
6	0.413 5	0.053 5	0.050 0
8	0.465 1	0.051 5	0.049 2
10	0.483 7	0.048 7	0.041 8
12	0.432 1	0.049 9	0.046 0
14	0.331 6	0.049 0	0.041 6

3 总结

将无线传感网收集的数据作为光能利用率模型的驱动参数,开展毛竹林净初级生产力(NPP)估算研究。研究得出以下几个结论:①无线传感器网络具有便捷、实时的优点,采集的太阳辐射、气温和湿度数据与实测值具有较高的一致性,说明无线传感器在监测气象因子上具有较高的可靠性和有效性。②利用相对湿度代替蒸散比计算光能利用率模型中的水分胁迫因子,不仅简化了水分胁迫系数计算的复杂过程,也为依靠无线传感网络数据计算水分胁迫因子提供一种可行的方法。③为了提高估算的精度,消除日尺度估算的不确定性,对不同时间尺度的估算进行分析,得出多天平均结果不仅降低估算结果的离散性,也降低了与真实值之间的偏差,当以10 d尺度取平均值时,估算结果最优。④采用无线传感网络数据驱动光能利用率模型估算的毛竹林NPP在月尺度上与通量观测塔实测数据之间具有较高的精度,达到89.9%,说明无线传感网络数据在估算毛竹林NPP上具有可行性。

4 参考文献

- [1] JENKINS J P, RICHARDSON A D, BRASWELL B H, *et al.* Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements [J]. *Agric For Meteorol*, 2007, **143**(1): 64 – 79.
- [2] BALDOCCHI D, FALGE E, GU Lianhong, *et al.* FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 2001, **82**(11): 2415 – 2434.
- [3] 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.
BAO Gang. *Evaluation on Vegetation Net Primary Productivity Using MODIS Data in Inner Mongolia* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2009.
- [4] 隋雪梅. 草甸草原光能利用率反演研究: 以呼伦贝尔市谢尔塔拉镇为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2013.
SUI Xuemei. *Estimation of Light Use Efficiency on Meadow-Steppe: With Xiertala in Hulunbuir as Example* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2013.
- [5] 王春林, 周国逸, 王旭, 等. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析[J]. 中国农业气象, 2007, **28**(3): 233 – 240.
WANG Chunlin, ZHOU Guoyi, WANG Xu, *et al.* Analysis of correction method on eddy flux measurement over complex terrain [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2007, **28**(3): 233 – 240.
- [6] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于CASA模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(4): 786 – 797.
ZHANG Feng, ZHOU Guangsheng, WANG Yuhui. Dynamics simulation of net primary productivity by a satellite data-driven CASA model in Inner Mongolian typical steppe, China [J]. *J Plant Ecol Chin Vers*, 2008, **32**(4): 786 – 797.
- [7] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, *et al.* Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science*, 1998, **281**(5374): 237 – 240.
- [8] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data [J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 1993, **7**(4): 811 – 841.
- [9] PRINCE S D, GOWARD S N. Global primary production: a remote sensing approach [J]. *J Biogeogr*, 1995, **22**(4/5): 815 – 835.
- [10] TURNER D P, RITTS W D, COHEN W B, *et al.* Scaling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation [J]. *Remote Sens Environ*, 2003, **88**(3): 256 – 270.
- [11] 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 Sens Environ*, 2004, **91**(2): 256 – 270.
- [12] ZHAO Maosheng, HEINSCH F A, NEMANI R R, *et al.* Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set [J]. *Remote Sens Environ*, 2005, **95**(2): 164 – 176.

- [13] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(5): 603 – 608.
PIAO Shilong, FANG Jingyun, GUO Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2001, **25**(5): 603 – 608.
- [14] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(3): 413 – 424.
ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *J Plant Ecol Chin Vers*, 2007, **31**(3): 413 – 424.
- [15] 孙睿, 朱启疆. 陆地植被净第一性生产力的研究[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(6): 757 – 760.
SUN Rui, ZHU Qijiang. Net primary productivity of terrestrial vegetation: a review on related researches [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, **10**(6): 757 – 760.
- [16] 胡海清, 苏志杰, 孙龙, 等. 基于光能利用率模型估算大兴安岭北部火烧迹地生产力[J]. 东北林业大学学报, 2013, **41**(5): 71 – 74.
HU Haiqing, SU Zhijie, SUN Long, *et al.* Estimating net primary productivity of Northern Daxing'an Mountain burned black based on light utility efficiency model [J]. *J Northeast For Univ*, 2013, **41**(5): 71 – 74.
- [17] 徐林, 莫路锋, 宣子蔚, 等. 基于 WSN 的土壤碳通量测量系统[J]. 林业科学, 2013, **49**(2): 122 – 126.
XU Lin, MO Lufeng, XUAN Ziwei, *et al.* System of measuring soil carbon flux based on wireless sensor network [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(2): 122 – 126.
- [18] TALZI I, HASLER A, GRUBER S, *et al.* Permasense: investigating permafrost with a wsn in the swiss alps [C]// EMNETS I V. *Proceedings of the 4th workshop on Embedded Networked Sensors*. Cork: [s. n.], 2007: 8 – 12.
- [19] SURI A, IYENGAR S S, CHO E. Ecoinformatics using wireless sensor networks: An overview [J]. *Ecol Inform*, 2006, **1**(3): 287 – 293.
- [20] 吕芸帙, 杨旭, 骆祖莹. 基于无线传感器网络的植被叶面积指数测量方法[J]. 计算机研究与发展, 2010, **47** (增刊): 1 – 4.
LÜ Yunzhi, YANG Xu, LUO Zuying. An approach of LAI measurement based on wireless sensor network [J]. *J Computer Res Dev*, 2010, **47**(supp): 1 – 4.
- [21] 孙成, 江洪, 周国模, 等. 我国亚热带毛竹林 CO₂ 通量的变异特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(10): 2717 – 2724.
SUN Cheng, JIANG Hong, ZHOU Guomo, *et al.* Variation characteristic of CO₂ flux in *Phyllostachys edulis* forest ecosystem in subtropical region of China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(10): 2717 – 2724.