

森林碳通量核算系统测试方法实验报告

一、实验目的

详细介绍关于森林碳通量核算系统测试方法中所需准备的设备和材料、测试过程的实验方法、数据处理过程等，以便于指导测试工作。通过实验研究，验证制定的《森林碳通量核算系统测试方法》的适用性、可靠性和合理性。

二、实验条件和测试指标

2.1 实验条件

环境条件要求环境温度（-25-45）℃，相对湿度<95%（非冷凝）。

测试用仪器设备中高精度温室气体分析仪要求 CO₂ 测量范围(0-1000) ppm，分辨力为 0.01 ppm，最大允许误差为±0.1 ppm。超声风速仪要求风速测量范围（0-65） m/s，分辨力为 0.1 m/s，风速 15 m/s 及以下最大允许误差为±0.5 m/s，风速 15 m/s 以上最大允许误差为±3%。温度传感器要求温度测量范围(-80-60)℃，分辨力为 0.1℃。涡动协方差系统要求 CO₂ 浓度测量范围（0-3000） ppm，准确度 1%；风速测量范围（0-65） m/s，分辨率 0.01 m/s，准确度 1.5%；风向测量范围（0-359）°，分辨率 0.1°，准确度 2°。

2.2 测试指标

测试指标如表 1 所示。

表 1 测试指标

参数	示值误差	相关系数	标准化平均偏差	均方根误差
CO ₂ 浓度	不超过 10 ppm	≥0.65	≤10%	≤20 ppm
风速	不超过 1.5 m/s	≥0.60	≤80%	≤2.0 m/s
温度	不超过 1.5 °C	≥0.80	≤10%	≤2.5 °C
碳通量	不超过 3.5 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	≥0.75	≤20%	≤10 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹

备注：清查法仅参考碳通量的示值误差。

三、测试实例

以某区域森林为例，该森林面积为 1200 km²，利用生态系统模型法对该森林进行碳通量核算，对该森林碳通量核算系统进行测试。

3.1 环境条件和设备

环境条件：环境温度为 15.3~41.6℃，相对湿度为 30%~94%。

测试用计量器具包括高精度温室气体分析仪(Picarro G2401 气体浓度分析仪、超声风速仪 (WindMaster)、温湿度传感 (HMP155A)、涡动协方差系统 (LI-7500DS)。

3.2 准备工作

根据表 2 的测试点位数量规定和森林实际情况, 选取适合的 2 个浓度站、2 个气象站和 1 个通量站, 安装高精度温室气体分析仪、超声风速仪、温度传感器和涡动协方差系统。电缆线的接插件应接触良好, 确保各仪器均能稳定正常工作。连续监测时间为一个月。

表 2 测试点位数量

核算区域面积 (A)	浓度站数量	气象站数量 (包括风速和温度)	通量站数量
$A \leq 100 \text{ km}^2$	0	≥ 1	≥ 1
$100 \text{ km}^2 \leq A \leq 2500 \text{ km}^2$	≥ 2	≥ 2	≥ 1
$2500 \text{ km}^2 \leq A$	≥ 2	≥ 2	≥ 2

3.3 测试过程

3.3.1 CO₂ 浓度

(1) 示值误差

采用生态系统模型法或大气反演法时, 将高精度温室气体分析仪连续监测的 CO₂ 浓度和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的 CO₂ 浓度值, 按公式

(1) 计算 CO₂ 浓度示值误差。

$$\Delta C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{m,i} - C_{o,i}| \quad (1)$$

ΔC ——CO₂ 浓度示值误差, ppm;

$C_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻 CO₂ 浓度值, ppm;

$C_{o,i}$ ——高精度温室气体分析仪监测*i*时刻 CO₂ 浓度值, ppm;

n——小时总数, 建议不少于 720 小时。

(2) 相关系数

采用生态系统模型法或大气反演法时, 将高精度温室气体分析仪连续监测的 CO₂ 浓度和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的 CO₂ 浓度值, 按公式

(2) 计算 CO₂ 浓度相关系数。

$$R_C = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{m,i} - \bar{C}_m)(C_{o,i} - \bar{C}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{m,i} - \bar{C}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{o,i} - \bar{C}_o)^2}} \quad (2)$$

R_C ——CO₂ 浓度相关系数；

$C_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点 i 时刻 CO₂ 浓度值，ppm；

$C_{o,i}$ ——高精度温室气体分析仪监测 i 时刻 CO₂ 浓度值，ppm；

\bar{C}_m ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点 CO₂ 浓度平均值，ppm；

\bar{C}_o ——高精度温室气体分析仪监测 CO₂ 浓度平均值，ppm；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

(3) 标准化平均偏差

采用生态系统模型法或大气反演法时，将高精度温室气体分析仪连续监测的 CO₂ 浓度和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的 CO₂ 浓度值，按公式

(3) 计算 CO₂ 浓度标准化平均偏差。

$$NMB_C = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{m,i} - C_{o,i})}{\sum_{i=1}^n C_{o,i}} \times 100\% \quad (3)$$

NMB_C ——CO₂ 浓度标准化平均偏差；

$C_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点 i 时刻 CO₂ 浓度值，ppm；

$C_{o,i}$ ——高精度温室气体分析仪监测 i 时刻 CO₂ 浓度值，ppm；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

(4) 均方根误差

采用生态系统模型法或大气反演法时，将高精度温室气体分析仪连续监测的 CO₂ 浓度和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的 CO₂ 浓度值，按公式

(4) 计算 CO₂ 浓度均方根误差。

$$RMSE_C = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{m,i} - C_{o,i})^2}{n}} \quad (4)$$

$RMSE_C$ ——CO₂ 浓度均方根误差；

$C_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点 i 时刻 CO₂ 浓度值，ppm；

$C_{o,i}$ ——高精度温室气体分析仪监测 i 时刻 CO₂ 浓度值，ppm；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

3.3.2 风速

(1) 示值误差

采用生态系统模型法或大气反演法时,将超声风速仪连续监测的风速和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的风速,按公式(5)计算风速示值误差。

$$\Delta v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_{m,i} - v_{o,i}| \quad (5)$$

Δv ——风速示值误差, m/s;

$v_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻风速, m/s;

$v_{o,i}$ ——超声风速仪监测*i*时刻风速, m/s;

n ——小时总数, 建议不少于 720 小时。

(2) 相关系数

采用生态系统模型法或大气反演法时,将超声风速仪连续监测的风速和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的风速,按公式(6)计算风速相关系数。

$$R_v = \frac{\sum_{i=1}^n (v_{m,i} - \bar{v}_m)(v_{o,i} - \bar{v}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{m,i} - \bar{v}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{o,i} - \bar{v}_o)^2}} \quad (6)$$

R_v ——风速相关系数;

$v_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻风速, m/s;

$v_{o,i}$ ——超声风速仪监测*i*时刻风速, m/s;

\bar{v}_m ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点风速平均值, m/s;

\bar{v}_o ——超声风速仪监测风速平均值, m/s;

n ——小时总数, 建议不少于 720 小时。

(3) 标准化平均偏差

采用生态系统模型法或大气反演法时,将超声风速仪连续监测的风速和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的风速,按公式(7)计算风速标准化平均偏差。

$$NMB_v = \frac{\sum_{i=1}^n (v_{m,i} - v_{o,i})}{\sum_{i=1}^n v_{o,i}} \times 100\% \quad (7)$$

NMB_v ——风速标准化平均偏差；

$v_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻风速，m/s；

$v_{o,i}$ ——超声风速仪监测*i*时刻风速，m/s；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

(4) 均方根误差

采用生态系统模型法或大气反演法时，将超声风速仪连续监测的风速和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的风速，按公式（8）计算风速均方根误差。

$$RMSE_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{m,i} - v_{o,i})^2}{n}} \quad (8)$$

$RMSE_v$ ——风速均方根误差；

$v_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻风速，m/s；

$v_{o,i}$ ——超声风速仪监测*i*时刻风速，m/s；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

3.3.3 温度

(1) 示值误差

采用生态系统模型法或大气反演法时，将温度传感器连续监测的温度和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的温度，按公式（9）计算温度示值误差。

$$\Delta T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_{m,i} - T_{o,i}| \quad (9)$$

ΔT ——温度示值误差，℃；

$T_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻温度，℃；

$T_{o,i}$ ——温度传感器监测*i*时刻温度，℃；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

(2) 相关系数

采用生态系统模型法或大气反演法时，将温度传感器连续监测的温度和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的温度，按公式（10）计算温度相关系数。

$$R_T = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{m,i} - \bar{T}_m)(T_{o,i} - \bar{T}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{m,i} - \bar{T}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{o,i} - \bar{T}_o)^2}} \quad (10)$$

R_T ——温度相关系数；

$T_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻温度，℃；

$T_{o,i}$ ——温度传感器监测*i*时刻温度，℃；

\bar{T}_m ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点温度平均值，℃；

\bar{T}_o ——温度传感器监测温度平均值，℃；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

(3) 标准化平均偏差

采用生态系统模型法或大气反演法时，将温度传感器连续监测的温度和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的温度，按公式（11）计算温度标准化平均偏差。

$$NMB_T = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_{o,i})}{\sum_{i=1}^n T_{o,i}} \times 100\% \quad (11)$$

NMB_T ——温度标准化平均偏差；

$T_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻温度，℃；

$T_{o,i}$ ——温度传感器监测*i*时刻温度，℃；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

(4) 均方根误差

采用生态系统模型法或大气反演法时，将温度传感器连续监测的温度和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的温度，按公式（12）计算温度均方根误差。

$$RMSE_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_{o,i})^2}{n}} \quad (12)$$

$RMSE_T$ ——温度均方根误差；

$T_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻温度，℃；

$T_{o,i}$ ——温度传感器监测*i*时刻温度，℃；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

3.3.4 碳通量

(1) 示值误差

对选中的站点布设区域,将涡动协方差系统连续监测的碳通量值和利用核算方法计算该区域的碳通量值,按公式(13)计算碳通量示值误差。

$$\Delta F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_{m,i} - F_{o,i}| \quad (13)$$

ΔF ——碳通量示值误差, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

$F_{m,i}$ ——核算该区域*i*时刻碳通量值, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

$F_{o,i}$ ——涡动协方差系统监测*i*时刻碳通量值, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

n——采用生态系统模型法或大气反演法时使用小时总数,建议不少于 720 小时。

(2) 相关系数

采用生态系统模型法或大气反演法时,将涡动协方差系统连续监测的碳通量和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的碳通量,按公式(14)计算碳通量相关系数。

$$R_F = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{m,i} - \bar{F}_m)(F_{o,i} - \bar{F}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_{m,i} - \bar{F}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_{o,i} - \bar{F}_o)^2}} \quad (14)$$

R_F ——碳通量相关系数;

$F_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻碳通量, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

$F_{o,i}$ ——涡动协方差系统监测*i*时刻碳通量, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

\bar{F}_m ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点碳通量平均值, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

\bar{F}_o ——涡动协方差系统监测碳通量平均值, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

n——小时总数,建议不少于 720 小时。

(3) 标准化平均偏差

采用生态系统模型法或大气反演法时,将涡动协方差系统连续监测的碳通量和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的碳通量,按公式(15)计算碳通量标准化平均偏差。

$$NMB_F = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{m,i} - F_{o,i})}{\sum_{i=1}^n F_{o,i}} \times 100\% \quad (15)$$

NMB_F ——碳通量标准化平均偏差；

$F_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻碳通量， $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；

$F_{o,i}$ ——涡动协方差系统监测*i*时刻碳通量， $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

(4) 均方根误差

采用生态系统模型法或大气反演法时，将涡动协方差系统连续监测的碳通量和对应生态系统模型法或大气反演法模拟该站点的碳通量，按公式（16）计算碳通量均方根误差。

$$RMSE_F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{m,i} - F_{o,i})^2}{n}} \quad (16)$$

$RMSE_F$ ——碳通量均方根误差；

$F_{m,i}$ ——生态系统模型法或大气反演法模拟选定站点*i*时刻碳通量， $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；

$F_{o,i}$ ——涡动协方差系统监测*i*时刻碳通量， $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；

n ——小时总数，建议不少于 720 小时。

3.4 测试结果

3.4.1 CO₂ 浓度

表 3 CO₂ 浓度测试结果

站点 1						
时刻	模拟值 (ppm)	标准值 (ppm)	示值误差 (ppm)	相关系数	标准化平均 偏差	均方根误差 (ppm)
1	438.18	439.18	9.66	0.95	1.62%	11.16
2	437.97	438.04				
3	439.06	439.36				
4	442.00	445.54				
5	446.64	456.01				
6	449.66	462.54				
7	457.64	482.49				
8	458.73	485.43				
9	447.68	461.70				

10	434.05	436.70				
11	426.60	422.69				
12	421.55	415.51				
13	420.47	417.11				
14	419.21	416.05				
.....				
739	410.00	403.57				
740	415.03	414.32				
741	417.62	415.67				
742	420.68	419.28				
743	421.50	420.26				
744	425.17	424.66				
站点 2						
时刻	模拟值 (ppm)	标准值 (ppm)	示值误差 (ppm)	相关系数	标准化平均 偏差	均方根误差 (ppm)
1	431.24	430.67	9.62	0.96	-1.42%	11.30
2	440.44	435.99				
3	428.53	432.49				
4	437.11	437.56				
5	447.46	443.06				
6	463.31	450.54				
7	464.65	456.08				
8	467.96	454.31				
9	455.08	446.43				
10	444.55	438.05				
11	436.56	433.02				
12	432.34	428.62				
13	425.01	423.07				
14	415.18	417.13				
.....				
739	396.52	410.62				
740	396.13	411.29				
741	395.72	411.78				
742	394.96	413.94				
743	391.39	413.26				
744	388.83	413.35				

3.4.2 风速

表 4 风速测试结果

站点 1						
时刻	模拟值 (m/s)	标准值 (m/s)	示值误差 (m/s)	相关系数	标准化平均 偏差	均方根误差 (m/s)
1	2.62	1.00	1.47	0.83	78.18%	1.89

2	2.62	1.00				
3	2.59	1.00				
4	2.52	0.90				
5	2.46	0.90				
6	2.43	1.00				
7	2.36	0.70				
8	2.50	0.80				
9	2.97	1.20				
10	3.40	1.80				
11	3.97	1.90				
12	4.55	2.30				
13	4.92	2.50				
14	5.19	2.50				
.....				
739	5.15	2.90				
740	4.52	1.80				
741	3.70	2.20				
742	3.30	2.60				
743	3.53	2.20				
744	3.59	1.90				
站点 2						
时刻	模拟值 (m/s)	标准值 (m/s)	示值误差 (m/s)	相关系数	标准化平均 偏差	均方根误差 (m/s)
1	2.46	1.50	0.97	0.60	11.11%	1.27
2	2.45	2.60				
3	2.44	1.50				
4	2.46	2.90				
5	2.59	2.30				
6	2.74	1.80				
7	2.65	1.90				
8	3.21	2.50				
9	3.79	2.30				
10	3.94	2.60				
11	4.10	2.70				
12	4.23	3.10				
13	4.33	3.80				
14	4.44	4.00				
.....				
739	4.12	0.60				
740	3.21	1.10				
741	3.03	1.40				
742	2.68	1.40				
743	2.48	0.50				

744	2.37	0.90				
-----	------	------	--	--	--	--

3.4.3 温度

表 5 温度测试结果

站点 1						
时刻	模拟值 (°C)	标准值(°C)	示值误差 (°C)	相关系数	标准化平均偏 差	均方根误差 (°C)
1	26.56	26.10	1.36	0.91	1.53%	1.76
2	25.85	25.40				
3	25.20	25.20				
4	24.77	24.20				
5	24.51	24.00				
6	24.29	23.40				
7	24.47	23.10				
8	26.61	24.70				
9	27.95	28.00				
10	29.24	29.40				
11	30.33	30.80				
12	31.23	32.60				
13	31.93	32.80				
14	32.45	33.30				
.....				
739	30.53	30.30				
740	29.61	29.80				
741	28.61	27.90				
742	27.90	26.80				
743	27.43	26.50				
744	27.03	26.20				
站点 2						
时刻	模拟值 (°C)	标准值(°C)	示值误差 (°C)	相关系数	标准化平均偏 差	均方根误差 (°C)
1	26.66	26.20	1.26	0.95	-2.85%	1.65
2	25.70	26.10				
3	25.41	25.20				
4	25.25	25.50				
5	25.20	25.80				
6	25.13	25.60				
7	25.10	25.50				
8	25.96	25.60				
9	26.84	25.70				
10	27.84	26.20				
11	28.70	27.80				
12	29.46	30.30				

13	30.05	31.30				
14	30.29	31.30				
.....				
739	26.04	28.40				
740	25.00	27.00				
741	24.33	25.70				
742	23.81	24.80				
743	23.36	24.50				
744	22.94	23.70				

3.4.4 碳通量

表 6 碳通量测试结果

站点 1						
时刻	模拟值 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	标准值 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	示值误差 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	相关系数	标准化平均偏差	均方根误差 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
1	1.71	3.74	3.14	0.81	1.40%	4.97
2	1.69	2.30				
3	1.68	2.33				
4	1.68	1.40				
5	1.68	0.48				
6	1.68	2.47				
7	1.68	4.47				
8	-3.81	0.44				
9	-6.25	-1.59				
10	-8.34	-16.73				
11	-9.63	-13.80				
12	-12.25	-13.71				
13	-14.39	-14.38				
14	-12.85	-10.39				
.....				
739	-2.81	-2.74				
740	1.46	4.25				
741	1.42	1.76				
742	1.39	1.68				
743	1.37	3.73				
744	1.35	2.86				

四、实验结论

以上简述了森林碳通量核算系统测试方法准备的设备和材料、实验方法和数据处理过程等，并以一个实际测试的例子说明测试过程。对森林碳通量核算系统测试的数据能够符合规范规定的测试指标，表明本规范计量技术要求的技术指标规定合理，达到了预期目标，满足了森林碳通量核算系统测试需求。