**基于机器学习的网格化温室气体微型空气站在线校准规范实验报告**

# 一、实验目的

详细介绍基于机器学习的网格化温室气体微型空气站在线校准所需准备的设备和材料、校准过程的实验方法、数据处理过程等，以便于指导校准工作。通过实验研究，验证制定的《基于机器学习的网格化温室气体微型空气站在线校准规范》的适用性、可靠性和合理性。

# 二、实验条件和计量特性指标

## 2.1 实验条件

环境条件要求环境温度为（-10～45）℃，相对湿度为（5～95）%，大气压为（40～120） kPa，供电电源电压为（220±22） V，频率为（50±1） Hz，且工作环境应无影响仪器正常工作的电磁场及干扰气体。

校准用计量器具高精度温室气体分析仪要求CO2标称区间为（350~600）μmol/mol，CO2测量5分钟平均浓度精密度（2小时内）≤0.025 μmol/mol；CH4标称区间为（1300~4000）nmol/mol，CH4测量5分钟平均浓度精密度（2小时内）≤0.025 nmol/mol。

## 2.2 计量特性指标

利用高精度温室气体分析仪对基于机器学习的温室气体微型空气站进行校准，根据测量结果计算示值误差和示值重复性。基于机器学习的微型空气站温室气体小时浓度示值相对误差一般不超过±15%，日均浓度示值相对误差一般不超过±5.0%。基于机器学习的微型空气站温室气体小时浓度示值重复性一般不大于3.0%，日均浓度示值重复性一般不大于1.0%。

# 三、校准实例

以某城市基于机器学习的网格化温室气体微型空气站为例，使用高精度温室气体分析仪对基于机器学习的温室气体微型空气站的二氧化碳浓度进行校准。

## 3.1 环境条件和设备

环境条件：环境温度为21.4℃~28.3℃，相对湿度为52%~80%。

校准用计量器具：高精度温室气体分析仪使用Picarro G2401气体浓度分析仪。

被校仪器：网格化温室气体微型空气站型号均为SCAD-300，来自汉威科技集团股份有限公司。

## 3.2 机器学习算法

对网格化温室气体微型空气站采用多元线性回归、随机森林、支持向量回归和XGBoost四种机器学习算法分别进行校准。四种机器学习算法原理如下所示。

### 3.2.1 多元线性回归

多元线性回归是一种基于统计学原理的预测建模方法，用于探究多个自变量（解释变量）与一个因变量（响应变量）之间的线性关系。其核心目标是通过建立最优线性组合，量化解释变量对响应变量的影响程度。其数学表达式为：

其中，Y为因变量，（j=1,2,...,p）为自变量，为截距项，为偏回归系数，为随机误差项，服从的正态分布。参数估计采用普通最小二乘法，通过最小化残差平方和求解最优参数估计值。

### 3.2.2 随机森林

随机森林是一种基于决策树的集成学习方法，通过构建多棵决策树进行预测并取平均结果，有效解决了单一决策树易过拟合的问题。其核心思想是利用Bootstrap抽样和特征子集随机选择，通过降低模型方差提升泛化能力。其核心原理包括：

（1）自助采样：从原始数据集进行B次Bootstrap抽样，生成B个训练子集，剩余未被选中的样本构成袋外数据，用于模型性能评估；

（2）特征随机选择：节点分裂时，从全部p个特征中随机选取m个，以最优分裂准则（如Gini指数、均方误差）构建树结构，增加决策树之间的多样性；

（3）结构风险最小化：通过多棵决策树的集成预测，降低模型方差，同时保持对复杂模式的捕捉能力。最终预测结果由所有树的预测值加权平均（回归任务）或投票表决（分类任务）得出。对于回归任务，预测函数表示为：

其中，为第b棵树的预测值，B为树的数量。随机森林的优势体现在：通过集成降低方差，增强噪声鲁棒性；支持高维数据处理与缺失值容忍；特征重要性可通过节点分裂贡献度量化。

### 3.2.3 支持向量回归

支持向量回归是一种基于统计学习理论的非线性回归方法，通过引入核函数与-不敏感损失函数，在高维特征空间中构造最优超平面，以实现对复杂数据关系的鲁棒性拟合。其核心思想是通过控制模型复杂度与拟合误差的平衡，提升泛化能力。对于样本集，SVR的目标函数如下所示：

约束条件为：

其中，为权重向量，为偏置项，为核映射函数，为惩罚系数，和为松弛变量，定义预测误差的容忍范围。

### 3.2.4 XGBoost

XGBoost 是一种基于梯度提升树（Gradient Boosting）的集成学习算法，通过迭代生成多棵决策树，并将结果加权求和以提升预测性能。其核心思想是通过最小化目标函数（包含损失函数和正则化项）逐步优化模型，其目标函数由损失函数和正则化项组成：

其中损失函数用于衡量预测值与真实值的差异。回归任务常用均方损失函数：

正则化项用于控制模型复杂度，防止模型的过拟合：

其中为叶子节点数；为叶子节点权重；，和分别控制树的复杂度、L2正则（Ridge）和L1正则（Lasso）。

## 3.3 准备工作

该网格化微型空气站共包括50个基于机器学习的温室气体微型空气站，编号依次为1到50，微型空气站均能正常工作，根据表1网格化微型空气站抽样数量及原则进行抽样，选中编号为7、15、22、30、46号的微型空气站。

表1 网格化微型空气站抽样数量及原则

|  |  |
| --- | --- |
| 微型空气站总数量（个） | 抽样数量（个） |
| ≤50 | 5 |
| ＞50 | 抽样比例≥10% |

## 3.4 校准过程

以7号微型空气站校准为例，将高精度温室气体分析仪与7号温室气体微型空气站并排放置并保持相同高度，随后通电预热，保持正常工作状态。

### 3.4.1 示值误差

基于交叉验证，将训练集数据随机分为6等份，每次选取其中5等份数据，利用机器学习算法构建相关模型，重复六次，共得到六个不同的模型。将选定的微型空气站新收集的温室气体原始监测数据分别输入各模型，输出6组基于机器学习的微型空气站温室气体浓度值。按公式（1）计算基于机器学习微型空气站温室气体浓度的示值误差。

 （1）

——第*k*个选定的微型空气站第*j*个样本浓度误差，%；

——第*k*个选定的微型空气站第*j*个样本6次基于机器学习结果的算术平均值，μmol/mol；

——第*k*个选定的微型空气站对应的高精度温室气体分析仪第*j*个样本浓度测量值，μmol/mol。

### 3.4.2 示值重复性

根据6组基于机器学习的微型空气站温室气体浓度值，按照公式（2）计算基于机器学习微型空气站温室气体浓度的重复性。

 （2）

——第*k*个选定的微型空气站第*j*个样本浓度重复性；

——第*k*个选定的微型空气站第*j*个样本6次基于机器学习结果的算术平均值，μmol/mol；

——第*k*个选定的微型空气站第*j*个样本的第次基于机器学习结果，μmol/mol；

*n*——计算次数。

## 3.5 校准结果

### 3.5.1 多元线性回归

采用多元线性回归算法，计算基于机器学习的二氧化碳浓度值的示值误差和重复性，结果如表2所示。7号微型空气站基于多元线性回归的二氧化碳小时浓度值的相对误差在-5.74%~5.88%范围内，小时浓度相对误差不超过±15%；日均浓度值的相对误差为0.67%，不超过±5.0%。7号微型空气站基于多元线性回归的二氧化碳小时浓度值的重复性在0.08%~0.19%范围内，小时浓度重复性不超过3.0%；日均浓度值的重复性为0.11%，不超过1.0%。

### 3.5.2 随机森林

如表3所示，7号微型空气站基于随机森林的二氧化碳小时浓度值的相对误差在-5.80%~6.22%范围内，小时浓度相对误差不超过±15%；日均浓度值的相对误差为-0.32%，不超过±5.0%。7号微型空气站基于随机森林的二氧化碳小时浓度值的重复性在0.16%~1.43%范围内，小时浓度重复性不超过3.0%；日均浓度值的重复性为0.14%，不超过1.0%。

### 3.5.3 支持向量回归

如表4所示，7号微型空气站基于支持向量回归的二氧化碳小时浓度值的相对误差在-6.50%~5.92%范围内，小时浓度相对误差不超过±15%；日均浓度值的相对误差为-0.53%，不超过±5.0%。7号微型空气站基于支持向量回归的二氧化碳小时浓度值的重复性在0.07%~1.56%范围内，小时浓度重复性不超过3.0%；日均浓度值的重复性为0.18%，不超过1.0%。

### 3.5.4 XGBoost

如表5所示，7号微型空气站基于XGBoost的二氧化碳小时浓度值的相对误差在-7.76%~5.30%范围内，小时浓度相对误差不超过±15%；日均浓度值的相对误差为-1.19%，不超过±5.0%。7号微型空气站基于XGBoost的二氧化碳小时浓度值的重复性在0.10%~1.06%范围内，小时浓度重复性不超过3.0%；日均浓度值的重复性为0.07%，不超过1.0%。

综上所述，基于多种机器学习算法（包括多元线性回归、随机森林、支持向量回归和XGBoost）的微型空气站小时浓度值的相对误差不超过±15%，日均浓度值的相对误差不超过±5.0%，小时浓度值的重复性不超过3.0%，日均浓度值的重复性不超过1.0%，符合规范的技术要求。

# 四、实验结论

以上简述了基于机器学习的网格化温室气体微型空气站在线校准所需准备设备和材料、实验方法和数据处理过程等，并以一个实际校准的例子说明校准过程。对基于机器学习的温室气体微型空气站进行在线校准的数据能够符合规范规定的计量技术指标，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，满足了基于机器学习的温室气体微型空气站的量值溯源需求。

表2 7号微型空气站基于多元线性回归的二氧化碳浓度值的示值误差和重复性

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样本号 | 温度（℃） | 相对湿度（%） | 基于机器学习的微型空气站浓度值（μmol/mol） | 高精度分析仪浓度（μmol/mol） | 示值误差（%） | 相对标准偏差（%） |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均值 |
| 小时值 | 8月27日1时 | 22.8  | 63  | 425.74  | 425.19  | 424.34  | 425.80  | 425.51  | 425.84  | 425.40  | 443.78  | -4.14  | 0.13  |
| 8月27日2时 | 22.7  | 65  | 438.51  | 437.35  | 436.49  | 438.49  | 438.01  | 438.30  | 437.86  | 448.31  | -2.33  | 0.18  |
| 8月27日3时 | 22.3  | 66  | 435.61  | 434.58  | 433.73  | 435.61  | 435.17  | 435.47  | 435.03  | 440.79  | -1.31  | 0.17  |
| 8月27日4时 | 21.8  | 68  | 439.67  | 438.45  | 437.59  | 439.64  | 439.14  | 439.44  | 438.99  | 465.71  | -5.74  | 0.19  |
| 8月27日5时 | 21.6  | 68  | 435.61  | 434.58  | 433.73  | 435.61  | 435.17  | 435.47  | 435.03  | 461.04  | -5.64  | 0.17  |
| 8月27日6时 | 21.4  | 69  | 432.12  | 431.27  | 430.41  | 432.15  | 431.76  | 432.07  | 431.63  | 421.67  | 2.36  | 0.16  |
| 8月27日7时 | 21.6  | 69  | 434.45  | 433.48  | 432.62  | 434.45  | 434.03  | 434.34  | 433.90  | 419.42  | 3.45  | 0.17  |
| 8月27日8时 | 22.6  | 67  | 432.12  | 431.27  | 430.41  | 432.15  | 431.76  | 432.07  | 431.63  | 407.67  | 5.88  | 0.16  |
| 8月27日9时 | 24.3  | 58  | 413.55  | 413.59  | 412.75  | 413.69  | 413.58  | 413.94  | 413.52  | 402.17  | 2.82  | 0.10  |
| 8月27日10时 | 24.4  | 59  | 408.90  | 409.17  | 408.33  | 409.08  | 409.03  | 409.40  | 408.99  | 403.17  | 1.44  | 0.09  |
| 8月27日11时 | 24.6  | 62  | 408.32  | 408.62  | 407.78  | 408.50  | 408.47  | 408.83  | 408.42  | 418.00  | -2.29  | 0.09  |
| 8月27日12时 | 26.2  | 54  | 416.45  | 416.35  | 415.51  | 416.58  | 416.42  | 416.77  | 416.35  | 395.50  | 5.27  | 0.10  |
| 8月27日13时 | 27.3  | 52  | 403.68  | 404.20  | 403.36  | 403.89  | 403.92  | 404.30  | 403.89  | 395.75  | 2.06  | 0.08  |
| 8月27日14时 | 27.4  | 54  | 404.84  | 405.30  | 404.47  | 405.04  | 405.06  | 405.43  | 405.02  | 396.00  | 2.28  | 0.08  |
| 8月27日15时 | 28.0  | 53  | 403.10  | 403.64  | 402.81  | 403.31  | 403.35  | 403.73  | 403.33  | 398.00  | 1.34  | 0.08  |
| 8月27日16时 | 28.3  | 54  | 404.26  | 404.75  | 403.92  | 404.46  | 404.49  | 404.87  | 404.46  | 397.50  | 1.75  | 0.08  |
| 8月27日17时 | 28.0  | 55  | 406.00  | 406.41  | 405.57  | 406.19  | 406.19  | 406.57  | 406.16  | 397.58  | 2.16  | 0.09  |
| 8月27日18时 | 27.9  | 57  | 396.71  | 397.57  | 396.74  | 396.97  | 397.10  | 397.50  | 397.10  | 398.33  | -0.31  | 0.09  |
| 8月27日19时 | 26.2  | 62  | 407.74  | 408.06  | 407.23  | 407.92  | 407.90  | 408.27  | 407.85  | 400.83  | 1.75  | 0.09  |
| 8月27日20时 | 25.0  | 67  | 404.84  | 405.30  | 404.47  | 405.04  | 405.06  | 405.43  | 405.02  | 397.17  | 1.98  | 0.08  |
| 8月27日21时 | 23.8  | 73  | 408.90  | 409.17  | 408.33  | 409.08  | 409.03  | 409.40  | 408.99  | 397.58  | 2.87  | 0.09  |
| 8月27日22时 | 22.7  | 76  | 407.16  | 407.51  | 406.68  | 407.35  | 407.33  | 407.70  | 407.29  | 399.33  | 1.99  | 0.09  |
| 8月27日23时 | 22.0  | 80  | 411.81  | 411.93  | 411.09  | 411.96  | 411.87  | 412.23  | 411.82  | 409.50  | 0.57  | 0.09  |
| 8月27日24时 | 21.6  | 82  | 418.19  | 418.01  | 417.16  | 418.31  | 418.12  | 418.47  | 418.04  | 414.43  | 0.87  | 0.11  |
| 日均值 | 8月27日 | 24.4  | 64  | 416.60  | 416.49  | 415.65  | 416.72  | 416.56  | 416.91  | 416.49  | 413.72  | 0.67  | 0.11  |

表3 7号微型空气站基于随机森林的二氧化碳浓度值的示值误差和重复性

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样本号 | 温度（℃） | 相对湿度（%） | 基于机器学习的微型空气站浓度值（μmol/mol） | 高精度分析仪浓度（μmol/mol） | 示值误差（%） | 相对标准偏差（%） |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均值 |
| 小时值 | 8月27日1时 | 22.8  | 63 | 417.40  | 416.66  | 421.34  | 418.30  | 416.79  | 417.74  | 418.04  | 443.78  | -5.80  | 0.41  |
| 8月27日2时 | 22.7  | 65  | 416.33  | 424.42  | 422.53  | 428.01  | 418.20  | 431.53  | 423.50  | 448.31  | -5.53  | 1.36  |
| 8月27日3时 | 22.3  | 66  | 435.76  | 440.04  | 434.27  | 434.31  | 441.04  | 434.98  | 436.73  | 440.79  | -0.92  | 0.69  |
| 8月27日4时 | 21.8  | 68  | 440.94  | 431.45  | 442.87  | 443.84  | 430.75  | 444.35  | 439.03  | 465.71  | -5.73  | 1.43  |
| 8月27日5时 | 21.6  | 68  | 435.76  | 440.04  | 434.27  | 434.31  | 441.04  | 434.98  | 436.73  | 461.04  | -5.27  | 0.69  |
| 8月27日6时 | 21.4  | 69  | 428.75  | 435.05  | 434.46  | 435.00  | 429.58  | 435.28  | 433.02  | 421.67  | 2.69  | 0.69  |
| 8月27日7时 | 21.6  | 69  | 437.10  | 438.07  | 437.97  | 437.84  | 437.76  | 434.71  | 437.24  | 419.42  | 4.25  | 0.29  |
| 8月27日8时 | 22.6  | 67  | 428.75  | 435.05  | 434.46  | 435.00  | 429.58  | 435.28  | 433.02  | 407.67  | 6.22  | 0.69  |
| 8月27日9时 | 24.3  | 58  | 422.53  | 420.34  | 420.57  | 420.44  | 420.54  | 420.37  | 420.80  | 402.17  | 4.63  | 0.20  |
| 8月27日10时 | 24.4  | 59  | 405.96  | 405.77  | 405.86  | 405.93  | 404.11  | 406.02  | 405.61  | 403.17  | 0.61  | 0.18  |
| 8月27日11时 | 24.6  | 62  | 402.55  | 400.46  | 401.90  | 401.26  | 405.95  | 401.04  | 402.19  | 418.00  | -3.78  | 0.49  |
| 8月27日12时 | 26.2  | 54  | 413.98  | 406.07  | 415.98  | 413.66  | 415.87  | 413.57  | 413.19  | 395.50  | 4.47  | 0.88  |
| 8月27日13时 | 27.3  | 52  | 403.11  | 405.60  | 403.76  | 403.21  | 402.19  | 400.30  | 403.03  | 395.75  | 1.84  | 0.43  |
| 8月27日14时 | 27.4  | 54  | 391.87  | 390.94  | 391.68  | 391.97  | 390.36  | 394.71  | 391.92  | 396.00  | -1.03  | 0.38  |
| 8月27日15时 | 28.0  | 53  | 399.98  | 399.98  | 399.42  | 400.03  | 398.75  | 400.56  | 399.79  | 398.00  | 0.45  | 0.16  |
| 8月27日16时 | 28.3  | 54  | 409.88  | 409.97  | 410.84  | 410.19  | 409.24  | 408.23  | 409.72  | 397.50  | 3.08  | 0.22  |
| 8月27日17时 | 28.0  | 55  | 397.30  | 399.03  | 396.94  | 396.70  | 396.64  | 396.90  | 397.25  | 397.58  | -0.08  | 0.23  |
| 8月27日18时 | 27.9  | 57  | 386.50  | 385.95  | 387.00  | 386.07  | 384.58  | 385.81  | 385.99  | 398.33  | -3.10  | 0.21  |
| 8月27日19时 | 26.2  | 62  | 404.00  | 400.95  | 400.76  | 402.70  | 400.82  | 399.00  | 401.37  | 400.83  | 0.13  | 0.43  |
| 8月27日20时 | 25.0  | 67  | 391.87  | 390.94  | 391.68  | 391.97  | 390.36  | 394.71  | 391.92  | 397.17  | -1.32  | 0.38  |
| 8月27日21时 | 23.8  | 73  | 405.96  | 405.77  | 405.86  | 405.93  | 404.11  | 406.02  | 405.61  | 397.58  | 2.02  | 0.18  |
| 8月27日22时 | 22.7  | 76  | 399.59  | 402.06  | 397.68  | 399.68  | 399.36  | 399.96  | 399.72  | 399.33  | 0.10  | 0.35  |
| 8月27日23时 | 22.0  | 80  | 394.23  | 408.17  | 407.41  | 407.14  | 407.73  | 407.26  | 405.32  | 409.50  | -1.02  | 1.34  |
| 8月27日24时 | 21.6  | 82  | 407.27  | 406.10  | 407.33  | 406.20  | 406.93  | 405.48  | 406.55  | 414.43  | -1.90  | 0.18  |
| 日均值 | 8月27日 | 24.4  | 64  | 411.56  | 412.45  | 412.79  | 412.90  | 411.76  | 412.87  | 412.39  | 413.72  | -0.32  | 0.14  |

表4 7号微型空气站基于支持向量回归的二氧化碳浓度值的示值误差和重复性

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样本号 | 温度（℃） | 相对湿度（%） | 基于机器学习的微型空气站浓度值（μmol/mol） | 高精度分析仪浓度（μmol/mol） | 示值误差（%） | 相对标准偏差（%） |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均值 |
| 小时值 | 8月27日1时 | 22.8  | 63  | 421.13  | 420.09  | 424.07  | 422.11  | 420.46  | 422.21  | 421.68  | 443.78  | -4.98  | 0.34  |
| 8月27日2时 | 22.7  | 65  | 426.99  | 431.96  | 437.02  | 436.41  | 422.51  | 437.08  | 432.00  | 448.31  | -3.64  | 1.41  |
| 8月27日3时 | 22.3  | 66  | 428.49  | 431.57  | 432.21  | 432.47  | 429.32  | 432.36  | 431.07  | 440.79  | -2.21  | 0.40  |
| 8月27日4时 | 21.8  | 68  | 432.13  | 436.05  | 441.73  | 441.80  | 426.57  | 444.36  | 437.11  | 465.71  | -6.14  | 1.56  |
| 8月27日5时 | 21.6  | 68  | 428.49  | 431.57  | 432.21  | 432.47  | 429.32  | 432.36  | 431.07  | 461.04  | -6.50  | 0.40  |
| 8月27日6时 | 21.4  | 69  | 431.54  | 432.17  | 432.46  | 431.69  | 431.60  | 431.25  | 431.79  | 421.67  | 2.40  | 0.10  |
| 8月27日7时 | 21.6  | 69  | 431.00  | 432.61  | 432.23  | 432.84  | 432.38  | 432.94  | 432.33  | 419.42  | 3.08  | 0.16  |
| 8月27日8时 | 22.6  | 67  | 431.54  | 432.17  | 432.46  | 431.69  | 431.60  | 431.25  | 431.79  | 407.67  | 5.92  | 0.10  |
| 8月27日9时 | 24.3  | 58  | 409.82  | 409.39  | 408.30  | 409.99  | 410.16  | 408.85  | 409.42  | 402.17  | 1.80  | 0.18  |
| 8月27日10时 | 24.4  | 59  | 402.43  | 402.19  | 401.63  | 400.98  | 402.31  | 402.32  | 401.98  | 403.17  | -0.29  | 0.14  |
| 8月27日11时 | 24.6  | 62  | 401.21  | 401.32  | 400.87  | 399.87  | 401.27  | 400.73  | 400.88  | 418.00  | -4.10  | 0.14  |
| 8月27日12时 | 26.2  | 54  | 413.54  | 411.42  | 411.90  | 413.41  | 411.97  | 409.91  | 412.03  | 395.50  | 4.18  | 0.33  |
| 8月27日13时 | 27.3  | 52  | 398.63  | 399.88  | 398.03  | 398.98  | 397.40  | 398.70  | 398.60  | 395.75  | 0.72  | 0.21  |
| 8月27日14时 | 27.4  | 54  | 398.29  | 399.86  | 398.38  | 398.30  | 396.84  | 398.00  | 398.28  | 396.00  | 0.58  | 0.24  |
| 8月27日15时 | 28.0  | 53  | 398.67  | 399.68  | 397.78  | 399.13  | 397.70  | 398.75  | 398.62  | 398.00  | 0.16  | 0.19  |
| 8月27日16时 | 28.3  | 54  | 398.47  | 399.92  | 398.21  | 398.67  | 397.06  | 398.41  | 398.46  | 397.50  | 0.24  | 0.23  |
| 8月27日17时 | 28.0  | 55  | 398.30  | 399.76  | 398.83  | 397.86  | 397.27  | 397.46  | 398.25  | 397.58  | 0.17  | 0.23  |
| 8月27日18时 | 27.9  | 57  | 389.76  | 389.98  | 389.97  | 389.18  | 389.76  | 389.77  | 389.74  | 398.33  | -2.16  | 0.07  |
| 8月27日19时 | 26.2  | 62  | 400.12  | 400.63  | 400.20  | 398.97  | 400.13  | 399.33  | 399.90  | 400.83  | -0.23  | 0.15  |
| 8月27日20时 | 25.0  | 67  | 398.29  | 399.86  | 398.38  | 398.30  | 396.84  | 398.00  | 398.28  | 397.17  | 0.28  | 0.24  |
| 8月27日21时 | 23.8  | 73  | 402.43  | 402.19  | 401.63  | 400.98  | 402.31  | 402.32  | 401.98  | 397.58  | 1.11  | 0.14  |
| 8月27日22时 | 22.7  | 76  | 399.25  | 400.15  | 399.63  | 398.32  | 399.00  | 398.28  | 399.10  | 399.33  | -0.06  | 0.18  |
| 8月27日23时 | 22.0  | 80  | 407.99  | 407.37  | 405.93  | 407.29  | 406.85  | 408.36  | 407.30  | 409.50  | -0.54  | 0.21  |
| 8月27日24时 | 21.6  | 82  | 416.70  | 413.12  | 414.07  | 416.35  | 414.32  | 413.97  | 414.76  | 414.43  | 0.08  | 0.35  |
| 日均值 | 8月27日 | 24.4  | 64  | 411.05  | 411.87  | 412.01  | 412.00  | 410.21  | 411.96  | 411.52  | 413.72  | -0.53  | 0.18  |

表5 7号微型空气站基于XGBoost的二氧化碳浓度值的示值误差和重复性

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样本号 | 温度（℃） | 相对湿度（%） | 基于机器学习的微型空气站浓度值（μmol/mol） | 高精度分析仪浓度（μmol/mol） | 示值误差（%） | 相对标准偏差（%） |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均值 |
| 小时值 | 8月27日1时 | 22.8  | 63  | 415.05  | 414.19  | 418.07  | 418.22  | 416.60  | 418.09  | 416.70  | 443.78  | -6.10  | 0.42  |
| 8月27日2时 | 22.7  | 65  | 410.93  | 414.13  | 413.43  | 416.27  | 411.65  | 414.63  | 413.51  | 448.31  | -7.76  | 0.48  |
| 8月27日3时 | 22.3  | 66  | 425.89  | 432.04  | 426.24  | 426.40  | 433.05  | 426.12  | 428.29  | 440.79  | -2.84  | 0.77  |
| 8月27日4时 | 21.8  | 68  | 445.89  | 434.47  | 442.45  | 443.41  | 435.59  | 443.23  | 440.84  | 465.71  | -5.34  | 1.06  |
| 8月27日5时 | 21.6  | 68  | 425.89  | 432.04  | 426.24  | 426.40  | 433.05  | 426.12  | 428.29  | 461.04  | -7.10  | 0.77  |
| 8月27日6时 | 21.4  | 69  | 425.95  | 430.46  | 430.55  | 430.27  | 427.19  | 431.20  | 429.27  | 421.67  | 1.80  | 0.50  |
| 8月27日7时 | 21.6  | 69  | 432.36  | 432.04  | 432.47  | 432.63  | 433.05  | 433.16  | 432.62  | 419.42  | 3.15  | 0.10  |
| 8月27日8时 | 22.6  | 67  | 425.95  | 430.46  | 430.55  | 430.27  | 427.19  | 431.20  | 429.27  | 407.67  | 5.30  | 0.50  |
| 8月27日9时 | 24.3  | 58  | 415.18  | 413.41  | 415.07  | 414.33  | 413.92  | 413.48  | 414.23  | 402.17  | 3.00  | 0.19  |
| 8月27日10时 | 24.4  | 59  | 402.03  | 401.38  | 401.33  | 400.71  | 400.87  | 401.58  | 401.32  | 403.17  | -0.46  | 0.12  |
| 8月27日11时 | 24.6  | 62  | 400.52  | 398.75  | 399.13  | 399.54  | 400.87  | 397.96  | 399.46  | 418.00  | -4.43  | 0.27  |
| 8月27日12时 | 26.2  | 54  | 410.64  | 406.04  | 412.66  | 410.74  | 412.46  | 410.07  | 410.44  | 395.50  | 3.78  | 0.58  |
| 8月27日13时 | 27.3  | 52  | 398.88  | 400.57  | 399.41  | 398.57  | 397.83  | 396.53  | 398.63  | 395.75  | 0.73  | 0.35  |
| 8月27日14时 | 27.4  | 54  | 392.70  | 392.43  | 391.77  | 392.18  | 391.15  | 394.14  | 392.39  | 396.00  | -0.91  | 0.26  |
| 8月27日15时 | 28.0  | 53  | 396.65  | 397.00  | 396.44  | 397.22  | 395.53  | 396.53  | 396.56  | 398.00  | -0.36  | 0.15  |
| 8月27日16时 | 28.3  | 54  | 399.19  | 400.57  | 401.19  | 401.63  | 398.93  | 398.93  | 400.07  | 397.50  | 0.65  | 0.30  |
| 8月27日17时 | 28.0  | 55  | 396.42  | 396.98  | 395.04  | 395.21  | 394.76  | 395.09  | 395.58  | 397.58  | -0.50  | 0.23  |
| 8月27日18时 | 27.9  | 57  | 386.82  | 385.41  | 387.21  | 385.72  | 384.22  | 385.50  | 385.81  | 398.33  | -3.14  | 0.28  |
| 8月27日19时 | 26.2  | 62  | 400.52  | 398.75  | 398.14  | 399.54  | 398.51  | 397.24  | 398.78  | 400.83  | -0.51  | 0.29  |
| 8月27日20时 | 25.0  | 67  | 392.70  | 392.43  | 391.77  | 392.18  | 391.15  | 394.14  | 392.39  | 397.17  | -1.20  | 0.26  |
| 8月27日21时 | 23.8  | 73  | 402.03  | 401.38  | 401.33  | 400.71  | 400.87  | 401.58  | 401.32  | 397.58  | 0.94  | 0.12  |
| 8月27日22时 | 22.7  | 76  | 397.00  | 398.75  | 396.42  | 397.48  | 397.86  | 397.27  | 397.46  | 399.33  | -0.47  | 0.20  |
| 8月27日23时 | 22.0  | 80  | 394.79  | 405.22  | 403.49  | 403.96  | 404.30  | 403.95  | 402.62  | 409.50  | -1.68  | 0.96  |
| 8月27日24时 | 21.6  | 82  | 405.47  | 404.89  | 406.90  | 404.95  | 406.71  | 404.76  | 405.61  | 414.43  | -2.13  | 0.24  |
| 日均值 | 8月27日 | 24.4  | 64  | 408.31  | 408.91  | 409.05  | 409.11  | 408.64  | 408.85  | 408.81  | 413.72  | -1.19  | 0.07  |