

ICS 07.060

CCS B 18

# 团体标准

T/CIDA 0019—2023

## 涡度相关系统监测农田蒸散发技术规范

Specifications for farmland evapotranspiration  
measurement by eddy covariance

2023-03-27 发布

2023-06-30 实施

中国灌区协会 发布

# 中国灌区协会团体标准发布公告

2023 年第 02 号（总第 12 号）

根据《中国灌区协会团体标准管理办法》规定，经中国灌区协会第六届常务理事会第九次会议表决通过，现发布以下标准：

序号	标准名称	标准编号	发布日期	实施日期
1	涡度相关系统监测农田蒸散发技术规范	T/CIDA 0019—2023	2023. 3. 27	2023. 6. 30
2	农田灌溉智慧管理系统技术规范	T/CIDA 0020—2023	2023. 3. 27	2023. 6. 30
3	灌溉工程铸造闸门技术条件	T/CIDA 0021—2023	2023. 3. 27	2023. 6. 30

现予公告。

中国灌区协会

2023 年 3 月 27 日

## 目 次

前言 .....	V
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 一般规定 .....	2
5 布设 .....	2
5.1 涡度相关系统架设场选址要求 .....	2
5.2 观测塔塔体安装 .....	2
5.3 观测塔探头安装 .....	2
6 数据采集 .....	3
6.1 采集周期 .....	3
6.2 采集频率 .....	3
7 数据质量控制 .....	3
7.1 数据筛选 .....	3
7.2 数据校正 .....	3
7.3 通量数据剔除 .....	3
7.4 数据插补 .....	3
7.5 数据质量控制 .....	4
8 维护与校正 .....	4
8.1 维护 .....	4
8.2 校正 .....	5
附录 A（规范性） 二次坐标旋转、频率修正、虚温订正和空气密度校正计算方法 .....	6
A.1 二次坐标旋转法的计算 .....	6
A.2 频率修正方法的计算 .....	6
A.3 虚温订正的计算 .....	7
A.4 空气密度变化校正方法的计算 .....	7

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本标准某些内容可能涉及专利。本标准的发布单位不承担识别专利的责任。

本标准由中国灌区协会提出并归口。

本标准起草单位：中国水利水电科学研究院、中国农业大学、中国农业科学院农田灌溉研究所、北京天诺基业科技有限公司、北京力高泰科技有限公司、河海大学、天津农学院。

本标准主要起草人：张宝忠、魏征、李思恩、王景雷、周曙东、徐俊增、彭致功、段萌、周青云、宋妮、洪明、丁日升、赵智、陈鹤、韩聪颖、王雅琦、刘笑吟、张小华、孙淑红、张晓涛、韩信、蔡甲冰、胡志宽、王林江。

本标准为首次发布。

# 涡度相关系统监测农田蒸散发技术规范

## 1 范围

本标准规定了农田蒸散发涡度监测的布设原则、数据采集及数据质量控制的方法及要求。

本标准适用于农田蒸散发监测。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本标准必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本标准；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB/T 31221—2014 气象探测环境保护规范 地面气象观测站

GB/T 35221—2017 地面气象观测规范 总则

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1

#### 涡度相关系统 eddy covariance system

基于湍流交换的空气动力学原理，通过测定和计算一定高度上湍流运动所产生物理量（如温度、二氧化碳浓度和水汽浓度等）的脉动和垂直风速脉动的协方差推算湍流输送量（湍流通量）的系统。

### 3.2

#### 蒸散发 evapotranspiration

蒸发蒸腾量或腾发量。由来自棵间蒸发和植物蒸腾组成的水分散失，影响蒸散速率的因素包括太阳辐射、空气温湿度、风速和土壤水分等，也称蒸发蒸腾量。

### 3.3

#### 通量 flux

在流体运动中，单位时间内流经某单位面积的物质质量，是表示属性量输送强度的物理量。在大气科学中，包含动量通量、热通量和物质通量等。

### 3.4

#### 虚温 virtual temperature

在气压相等的条件下具有和湿空气相等密度时的干空气具有的温度。

### 3.5

#### 超声虚温 ultrasound virtual temperature

通过三维超声风速仪测量得到的虚温。

### 3.6

#### 摩擦风速 friction velocity

湍流切应力与空气密度比值的平方根，具有速度量纲，是气流内部摩擦力（湍流切应力）和摩擦力做功（湍流切应力做功）的量度，是反映湍流强弱的一个指标。常作为湍流切应力作用的场合对各项湍流参数起支配作用的特征速度。

### 3.7

#### 野点 spike

测量过程中，严重偏离测量真值的数据。

## 4 一般规定

- 4.1 涡度相关系统运行管理，应满足实用、可靠、先进、经济、高效原则。
- 4.2 用于农田蒸散发的监测仪器，应采用国家认定的仪器质检部门检测合格的产品。
- 4.3 应定期对涡度相关系统进行标定与校准，并满足监测精度要求。
- 4.4 农田蒸散发涡度相关系统监测信息应根据监测需要及时进行资料整编和存储。

## 5 布设

### 5.1 涡度相关系统架设场选址要求

- 5.1.1 架设场选址应考虑地形、植被、气候、气象和水文等因素，具有区域代表性。
- 5.1.2 架设场四周应空旷平坦，避免建在陡坡、洼地或邻近有铁路、公路、工矿、烟囱和高大建筑物的区域，避开地方性雾、烟等大气污染严重的区域，地面气象观测场的环境条件应符合 GB/T 31221—2014 中 3.1.1.2 和 GB/T 35221—2017 中 5.1 和 5.3 规定的要求。
- 5.1.3 架设场下垫面应为同一作物，且播种、栽培、灌溉和施肥等管理措施以及作物品种和土壤条件均应与周边保持一致。
- 5.1.4 应考虑盛行风的方向和速度，宜架设到盛行风的下风方位。

### 5.2 观测塔塔体安装

- 5.2.1 观测塔的安装高度根据盛行风向的风浪区长度确定，风浪区长度与传感器最大安装高度之比不应小于 100:1。
- 5.2.2 最小安装高度宜为植被冠层高度的 1.5~2 倍，最低安装高度不应小于 1.5m。
- 5.2.3 观测塔塔身应保持铅直，横杆应保持水平。
- 5.2.4 根据安装高度，应在农田下垫面设置固定塔身的缆绳，且每间隔约 10m 高度宜设置一层缆绳。
- 5.2.5 观测塔塔身和底座应固定。
- 5.2.6 太阳能电池板宜朝南向，太阳能板安装角度计算方法应为当地纬度加 10°。
- 5.2.7 数据采集箱宜架在塔身的北面，高度宜为 1~1.5m。
- 5.2.8 观测塔应有防雷装置。

### 5.3 观测塔探头安装

- 5.3.1 红外二氧化碳水汽分析仪和三维超声风速仪应根据下垫面状况确定安装高度，且应指向主风向。当盛行风风向发生较大变化时，应进行调整。
- 5.3.2 辐射传感器应安装在 2~4m 高度，辐射传感器朝阳南面架设，感应面应保持水平，并且不应受到任何障碍物的影响。
- 5.3.3 土壤热通量板宜布设在土层 0.05m 和 0.15m 深度，布设时应先开挖垂向剖面，开挖的土壤按顺序放在一边，分层回填至原状。土壤热通量板应水平插入相应未扰动土壤剖面，按需配置土壤温度和土壤水分探头，对土壤热通量进行修正。
- 5.3.4 空气温湿度传感器应放置在防辐射罩内，安装时传感器宜与水平面垂直。
- 5.3.5 土壤水分传感器应与土壤紧密接触，传感器附近不应有石块、金属等物质。如果安装多个传感器，相邻传感器间应保持一定距离间隔，避免相互干扰。
- 5.3.6 空气温度传感器、空气湿度传感器、风速传感器、风向传感器、四分量辐射传感器、光合有效辐射传感器、红外表面温度传感器、气压传感器、三维超声风速仪、红外二氧化碳水汽分析仪的位

置安装误差不应超过 5cm，角度安装误差不应超过 5°。

5.3.7 土壤热通量板、土壤温度传感器、土壤水分传感器的安装误差不应超过 2cm。

## 6 数据采集

### 6.1 采集周期

通量平均时间步长宜为 10~60min，测量日变化宜设置为 10min，进行长期观测宜设置为 30min。

### 6.2 采集频率

6.2.1 脉动风速、超声虚温、水汽浓度和二氧化碳浓度的高频量采集频率不宜低于 10Hz。

6.2.2 通量采集频率不宜低于 10Hz。

## 7 数据质量控制

### 7.1 数据筛选

采集频率为 10Hz 的原始瞬时数据出现以下情况的应进行剔除：

- a) 仪器出现诊断错误标识的数据。
- b) 瞬时值或平均值超过物理上合理范围的数据。
- c) 方差检验时某点偏离平均值 $\geq 3.25$  倍标准差的数据。

### 7.2 数据校正

7.2.1 应使用倾斜修正（坐标旋转）方法消除仪器倾斜对通量观测的影响。

a) 当下垫面为均匀平坦时，应采用二次坐标旋转法进行修正。具体计算公式见附录 A.1。

b) 当下垫面复杂、非均匀，或设备安装平台晃动时，应采用平面拟合法修正，其方法如下：利用一段时间（宜选 5~10d）的三维风速资料，设平均风场在一个与测站地面平行的平面（ $x-y$  平面）内，拟合该平面，然后将每一个平均周期的三维风速资料旋转到此平面上。

7.2.2 应使用频率修正方法消除高低频损失对通量观测的影响，具体计算公式见附录 A.2。

7.2.3 应使用超声虚温订正方法消除空气湿度对通量观测的影响，具体计算公式见附录 A.3。

7.2.4 应使用空气密度变化校正方法（Webb - Peaman - Leuning，简称 WPL）校正热量和水汽通量对观测项的影响，具体计算公式见附录 A.4。

### 7.3 通量数据剔除

对于出现以下情况的通量数据应进行剔除：

- a) 某时次野点数据占比超出预定阈值（阈值一般设定为该时段数据总量的 10%），则该时次观测应作为异常剔除。
- b) 摩擦风速小于摩擦风速阈值的数据。
- c) 大于 5mm 降雨时期的观测数据。

### 7.4 数据插补

7.4.1 当观测数据缺失时段不大于 2h 时，宜采用线性插值法。

7.4.2 当观测数据缺失时段大于 2h、不大于 1d 时，宜采用 Priestley - Taylor 系数平均日变化法进行插补。

7.4.3 当数据缺失时段大于 1d 时，应建立通量数据与气象数据的关系进行插补。

## 7.5 数据质量控制

7.5.1 通量数据中无效数据的占比，不宜高于 30%；全生育期能量闭合度，不宜低于 75%。

7.5.2 湍流资料质量评价应通过分析风速、温度、湿度和二氧化碳的功率谱及协谱来判断涡度相关仪器对高频湍流的响应情况。

7.5.3 将观测时段分成若干个子时段，首先计算总体协方差，再分别计算各子时段的协方差及其均值，非平稳性指数应按照式 (1) 计算，如果  $IST < 30\%$ ，判定为大气湍流处于平稳状态。

$$IST = |(CV_i - CV_n) / CV_n| \quad (1)$$

式中：

$IST$ ——非平稳性指数；

$CV_i$ ——不同子时段的协方差， $i=1, 2, 3, \dots$ ；

$CV_n$ ——总体协方差， $n$  为总观测时段。

7.5.4 观测数据应进行充分性检验，总体湍流特征系数应按照式 (2) 表示：

$$ITC = \left| \frac{(\sigma_w / u_*)_{\text{model}} - (\sigma_w / u_*)_{\text{measurement}}}{(\sigma_w / u_*)_{\text{model}}} \right| \quad (2)$$

式中：

$ITC$ ——总体湍流特征系数；

$\sigma_w$ ——垂直速度的方差；

$u_*$ ——摩擦风速。

7.5.5 总体数据质量等级根据表 1 进行对应划分：

- 1~3 级为高质量数据，可用于基础研究。
- 4~6 级为中质量数据，可用于长期观测资料处理。
- 7~8 级为低质量数据，可作为长期观测资料的参考，也可舍弃。
- 9 级为低质量数据，应舍弃。

表 1 数据质量等级

总体质量等级	湍流平稳性 ( $IST$ )	湍流发展性 ( $ITC$ )	总体质量等级	湍流平稳性 ( $IST$ )	湍流发展性 ( $ITC$ )
1	0~15%	0~15%	6	101%~250%	101%~250%
2	16%~30%	16%~30%	7	251%~500%	251%~500%
3	31%~50%	31%~50%	8	501%~1000%	501%~1000%
4	51%~75%	51%~75%	9	>1000%	>1000%
5	76%~100%	76%~100%			

## 8 维护与校正

### 8.1 维护

8.1.1 应定期检查红外二氧化碳水汽分析仪的诊断数据或信号强度值，定期擦除红外二氧化碳水汽分析仪光路窗口表面灰尘和水渍，并应定期更换内部干燥剂，定期标定零点和跨度值。

8.1.2 应定期对三维超声风速仪的探头表面除尘，调整探头滤水膜。

8.1.3 对系统其他传感器与配件，应定期检查运行状态并及时维护。

## 8.2 校正

**8.2.1** 应定期对红外二氧化碳水汽分析仪的传感器进行零点和量程校正，精度应达到 $\pm 0.2\%$ 。应定期更换外部干燥剂及内部过滤器，不宜超过6个月。

**8.2.2** 应定期对超声风速仪中温度计进行校正，误差应在5%以内。

## 附录 A

(规范性)

## 二次坐标旋转、频率修正、虚温订正和空气密度校正计算方法

## A.1 二次坐标旋转法的计算

二次坐标旋转法宜采用式 (A.1) ~ 式 (A.8) 计算。

第一次旋转是将  $x-y$  平面绕  $z$  轴旋转, 使水平风速方向的平均风速为 0。旋转后新坐标系下的各个分量宜采用式 (A.1) ~ 式 (A.4) 计算:

$$u_1 = u \cos \alpha + v \sin \alpha \quad (\text{A.1})$$

$$v_1 = -u \sin \alpha + v \cos \alpha \quad (\text{A.2})$$

$$w_1 = w \quad (\text{A.3})$$

$$\alpha = \arctan(\bar{v}/\bar{u}) \quad (\text{A.4})$$

式中:

$u$ ——水平风速方向在  $x$  轴的风速分量;

$v$ ——水平风速方向在  $y$  轴的风速分量;

$w$ ——垂向风速方向, 即  $z$  轴方向的风速分量;

$u_1$ ——经过第一次旋转后的新坐标分量;

$\bar{u}$ ——水平风速的时间平均值;

$\bar{v}$ ——水平风速的时间平均值;

$\alpha$ ——旋转角角度。

第二次旋转为新的  $x-z$  平面绕  $y$  轴旋转, 使垂直风速方向的平均风速为 0, 旋转后的新坐标系中各个分量宜采用式 (A.5) ~ 式 (A.8) 计算:

$$u_2 = u_1 \cos \beta + w_1 \sin \beta \quad (\text{A.5})$$

$$v_1 = v_2 \quad (\text{A.6})$$

$$w_2 = -u_1 \sin \beta + w_1 \cos \beta \quad (\text{A.7})$$

$$\beta = \arctan(\bar{w}_1/\bar{u}_1) \quad (\text{A.8})$$

式中:

$\beta$ ——旋转角角度。

## A.2 频率修正方法的计算

频率修正方法宜采用式 (A.9) 计算:

$$F = \frac{\int_0^{\infty} Co_{ws}(f) df}{\int_0^{\infty} TF_{HF}(f) TF_{LF}(f) Co_{ws}(f) df} \quad (\text{A.9})$$

式中:

$F$ ——循环频率, Hz;

$f$ ——经过频率校正后的变量;

$TF_{HF}$ ——高通转移函数;

$TF_{LF}$ ——低通转移函数;

$Co_{ws}$ ——垂直风速和某标量的理论协谱。

### A.3 虚温订正的计算

涡度相关系统测量的感热通量进行虚温订正的公式宜采用式 (A.10) 计算:

$$H_a = \left[ H_s - 0.51 \rho_a C_P \frac{R_d (\bar{T})^2}{P} \frac{LE}{L_v} \right] \frac{\bar{T}}{\bar{T}_s} \quad (\text{A.10})$$

式中:

$H_a$ ——经超声虚温修正后的感热通量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$H_s$ ——超声虚温计算的感热通量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$\rho_a$ ——空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$C_P$ ——干空气定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$R_d$ ——干空气气体常数,  $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ;

$P$ ——气压,  $\text{hPa}$ ;

$LE$ ——潜热通量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$L_v$ ——蒸发潜热,  $\text{J}/\text{g}$ ;

$\bar{T}$ ——气温的平均值,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\bar{T}_s$ ——超声虚温的平均值,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### A.4 空气密度变化校正方法的计算

空气密度变化校正量的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  水汽通量, 宜采用式 (A.11) 和式 (A.12) 计算:

$$LE_{WPL} = (1 + \mu\sigma) \left( \overline{w' \rho'_v} + \frac{\overline{\rho'_v}}{\bar{T}} \overline{w' T'} \right) \quad (\text{A.11})$$

$$F_{\text{CO}_2 WPL} = \overline{w' \rho'_{\text{CO}_2}} + \mu \frac{\overline{\rho_{\text{CO}_2}}}{\overline{\rho_d}} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{\rho_{\text{CO}_2}}}{\bar{T}} \overline{w' T'} \quad (\text{A.12})$$

式中:

$LE_{WPL}$ ——经空气密度效应修正后的潜热通量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$\mu$ ——干空气与水汽分子量的比值;

$\sigma$ ——水汽密度与干空气密度的比值;

$w'$ ——垂直风速 ( $z$  轴) 的脉动量,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$\rho'_v$ ——水汽密度的脉动量,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;

$\overline{w' \rho'_v}$ ——垂直脉动风速和水汽密度的脉动量乘积的平均值,  $(\text{m} \cdot \text{g})/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;

$\overline{\rho_v}$ ——水汽密度的平均值,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;

$T'$ ——气温的脉动量,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\bar{T}$ ——气温的平均值,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\overline{w' T'}$ ——垂直脉动风速和气温脉动量乘积的平均值,  $(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{s}$ ;

$F_{\text{CO}_2 WPL}$ ——经空气密度效应修正后的二氧化碳通量,  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;

$\overline{\rho_{\text{CO}_2}}$ ——二氧化碳密度的平均值,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$\rho'_{\text{CO}_2}$ ——二氧化碳密度的脉动量,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$\overline{w' \rho'_{\text{CO}_2}}$ ——垂直脉动风速和二氧化碳的脉动量乘积的平均值,  $(\text{m} \cdot \text{mg})/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;

$\overline{\rho_d}$ ——干空气的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。