

# 西北半干旱雨养农业区薯麦轮作 FACE 平台简介

赵 鸿<sup>1,2</sup>, 张 强<sup>1</sup>, 李耀辉<sup>1</sup>, 倾继祖<sup>1</sup>, 王润元<sup>1</sup>,  
杨启国<sup>1</sup>, 王鹤龄<sup>1</sup>, 仝乘风<sup>3</sup>, 魏 强<sup>3</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室, 兰州大学, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘 要:**在黄土高原半干旱雨养农业区薯麦轮作田地建立气象部门首家 FACE 系统(Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment), 即 CO<sub>2</sub> 浓度的控制和监测系统平台, 由中国气象局兰州干旱气象研究所建在定西半干旱生态环境与试验基地。该平台由 CO<sub>2</sub> 气体供应装置、控制系统、释放系统 3 大部分组成, 它是利用计算机网络系统对平台的 CO<sub>2</sub> 浓度进行监测控制, 根据作物冠层高度的 CO<sub>2</sub> 浓度、风向、风速、昼夜的变化调节 CO<sub>2</sub> 气体的释放速度及方向, 实现 FACE 圈的 CO<sub>2</sub> 浓度高于周围大气 CO<sub>2</sub> 浓度某一数值。该平台旨在研究雨养农业区 CO<sub>2</sub> 浓度升高及其与温度、水分、养分等耦合对农作物生长过程、生理生态特征、生物量、产量等的影响, 为该地区适应未来不同气候变化情景提供科学依据。

**关键词:**FACE(自由大气中 CO<sub>2</sub> 浓度富集)平台; 结构; 控制; 半干旱雨养农业区

**中图分类号:**S161.9

**文献标识码:**A

## 引 言

FACE(Free - Air CO<sub>2</sub> Enrichment, 自由大气中 CO<sub>2</sub> 浓度富集)系统是指在自由大气中增加 CO<sub>2</sub> 浓度, 即在近地面空气中增加 CO<sub>2</sub> 浓度。FACE 系统是一个模拟未来 CO<sub>2</sub> 增加的微生态环境, 根据冠层 CO<sub>2</sub> 浓度测定结果, 由控制系统实时调节 FACE 圈内的 CO<sub>2</sub> 浓度, 使之保持在高于对照的设定浓度值。由于 FACE 圈没有任何隔离设施, 气体可以自由流通, 因此系统内部通风、光照、温度、湿度等条件十分接近自然生态环境。在这一微生态环境条件下进行 CO<sub>2</sub> 增加的模拟试验, 获得的数据更接近于真实情况。

自 20 世纪 90 年代以来, 全球先后大约有 30 余家机构开展 FACE 研究<sup>[1-22]</sup>, 分布在美国、欧洲、澳大利亚、日本等 20 多个国家和地区。以美国最多, 共有 10 余家, 分布在伊利诺斯、威斯康星、加利福尼亚、内华达等地区。研究对象主要是森林、草地、作

物, 但开展作物研究的不足 10 家, 也主要集中在水稻、小麦、棉花、大豆等作物, 例如亚利桑那州的棉花研究, 伊利诺斯州的大豆研究。以上各家约有 1/3 使用了 FACE 系统, 其 FACE 圈直径在 12 ~ 20 m; 2/3 使用了 Mini - FACE 系统, 其 FACE 圈的直径在 1 ~ 4 m。

2001 年, 中国科学院南京土壤研究所与日本在江苏无锡建立了水稻—小麦轮作 FACE 实验系统<sup>[23]</sup>, 率先在国内开展了此项研究。他们使用的 FACE 系统有 3 个可以调节 CO<sub>2</sub> 浓度的 FACE 圈和 3 个常态的对照圈, 各个圈的直径为 12 m。FACE 圈内 CO<sub>2</sub> 浓度比对照圈平均高 200 ppm, 白天 FACE 圈内 CO<sub>2</sub> 浓度的偏差控制在 80% 的时间内小于 10%。2006 年中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所与澳大利亚墨尔本大学合作, 在北京昌平建立了国内第一个微型开放式 CO<sub>2</sub> 富集系统(Mini - FACE)<sup>[24-25]</sup>, 释放圈直径 4 m, FACE 圈内 CO<sub>2</sub> 目标浓度为 550 ppm, 80% 的时间内误差超

收稿日期:2010-11-16; 改回日期:2011-01-20

基金项目:国家公益性行业(气象)科研专项“(GYHY200806021)”, 甘肃省自然科学基金项目“(0710RJZA087)”及干旱气象科学研究基金(IAM201019), 甘肃省气象局项目(2007-15)共同资助

作者简介:赵鸿(1977-), 女, 甘肃临洮人, 副研究员, 在读博士, 主要从事气候变化与农业生态等方面的研究. E-mail: zhaohongt@126.com; hongzhlt@yahoo.com.cn

过 10%。经过调试后,先后开展了大豆、冬小麦对 CO<sub>2</sub> 浓度增高响应的试验研究。

继此之后,中国气象局兰州干旱气象研究所也于 2009 年建成了 FACE 平台,系国内气象部门首家 FACE 系统,旨在深入研究自由大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加对西北半干旱雨养农业区农作物的影响及其机理,下面就该平台作以详细介绍。

## 1 FACE 平台所在地气候背景

兰州干旱气象研究所 FACE 平台建在甘肃省定西干旱气象与生态环境试验基地,该基地地处黄土高原西部的甘肃省中部半干旱雨养农业区,坐落于全国首批国家级农业科技园区——甘肃定西国家农业科技园区内,地理位置为 104°37'E、35°35'N,海拔高度 1 896.7 m,下垫面属于典型的黄土高原丘陵沟壑,主要土地利用类型为农田。气候特点是光能较多,热量资源不足,雨热同季,降水少且变率大,气候干燥,气象灾害频繁。年日照时数为 2 433 h,其中日照时数在 200 h 以上的月份有 4、5、6、7、8 和 12 月,其余月份日照时数在 172 ~ 193 h 之间;年平均气温 6.7 °C,日平均气温 ≥ 0 °C 的积温为 2 998.3 °C,日平均气温 ≥ 10 °C 的积温为 2 360.5 °C;多年(1971 ~ 2000 年)年平均降水量 386.0 mm,降水主要集中在 5 ~ 10 月,占年降水量的 86.9%;平均无霜期 140 d,对黄土高原西部的生态环境、气候特征具有广泛的代表性。

## 2 FACE 平台组成结构

FACE 系统试验平台由 CO<sub>2</sub> 气体供应装置、控制系统、释放系统 3 大部分组成(图 1),设有 FACE 试验圈、对照圈和风向风速仪。本平台有 3 个 FACE 圈、3 个大气圈(对照圈)。FACE 圈和大气圈的直径均为 4 m。

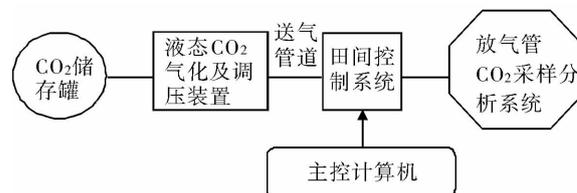


图 1 FACE 系统平台结构示意图

Fig. 1 The structure sketch map of the FACE

### 2.1 CO<sub>2</sub> 气体供应装置

供气装置如图 2 所示:

- (1) 罐体:容积为 10 m<sup>3</sup> 的 CO<sub>2</sub> 液体储存罐 1 个;
- (2) 气化装置:1 套,将储存罐中的高压液体 CO<sub>2</sub> 气化为气体,便于从送气管道输送和放气管道排放;
- (3) 压力调节器:1 套,起到减压和稳压的作用,保证从送气管道出来的是低压的 CO<sub>2</sub> 气体。
- (4) 送气管道:1 套,由 1 个总管道和 3 个分管道连接而成。



图 2 FACE 平台供气装置(罐体、气化器、减压阀)

Fig. 2 The CO<sub>2</sub> supply equipments of FACE, including store tank, gasification and pressure reducing valve

### 2.2 控制系统

(1)控制系统有 5 部分组成(图 3),具体如下:

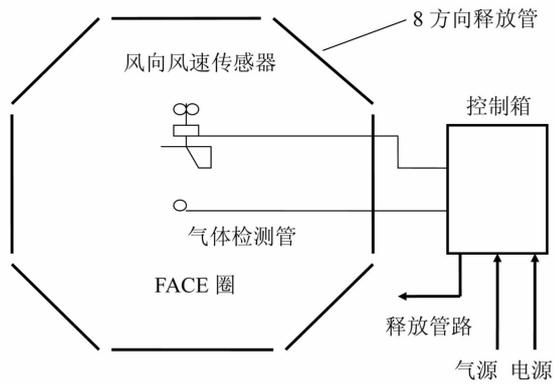


图 3 控制系统的组成

Fig. 3 The constitute of control system in FACE

- A. 计算机:整个 FACE 平台配有主控计算机 1 台;
- B. 电源箱:每个 FACE 圈配有电源箱 1 个,提供电源;
- C. 控制箱(图 4):每个 FACE 圈配有控制箱 1 个,箱体采用 2 面开门的形式,一侧为气体检测和控制系(图 5),另一侧为电控系(图 6),方便维护和检修,同时大大减小了控制箱的体积,控制箱内部安装的设备和功能见图 6。

电气控制侧安装有带有触摸 LCD 显示屏(图 7)的控制电脑、控制输出模块电路板、开关、电源以及电气连接端子等,控制电脑运行有测控软件,通过数据总线读取 CO<sub>2</sub> 和风速风向数据,经计算处理后,通过输出模块操作相应的电磁阀实现控制操作。



图 4 控制箱

Fig. 4 The control box of FACE

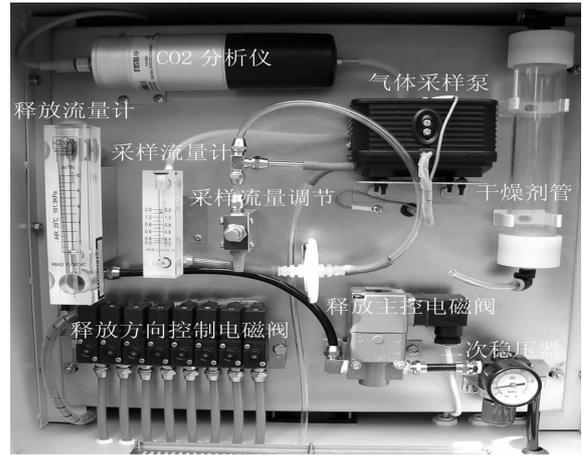


图 5 气体检测控制系统侧

Fig. 5 One side of control box

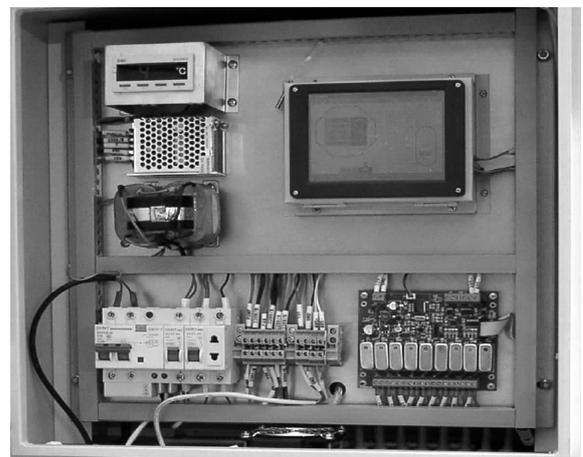


图 6 控制箱电气控制系统侧

Fig. 6 The other side of control box

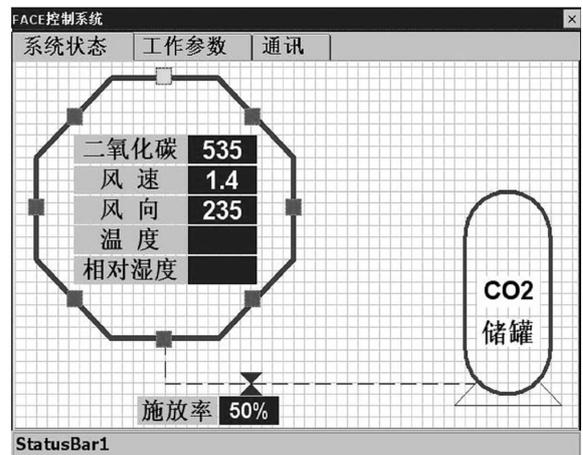


图 7 触摸 LCD 显示屏

Fig. 7 Touch LED display screen

控制箱的气体检测和控制系统一侧内安装有 CO<sub>2</sub> 分析仪、气体采样泵、干燥剂管、采样流量计和采样流量调节阀、CO<sub>2</sub> 气体释放方向控制电磁阀组和释放控制主阀、以及二次稳压调节器等。

为了确保系统的工作可靠,箱内安装有温度控制器和通风风扇,当箱体内部达到一定温度时,采用强制通风的方式进行冷却。

D. CO<sub>2</sub> 采样分析系统:1套,芬兰 Visala 公司的 GMP343 CO<sub>2</sub> 传感器 1 个,分别置于 FACE 圈的正中心位置;

E. 风向风速传感器:1套,为了控制 FACE 圈内的 CO<sub>2</sub> 浓度,首先必须考虑风向和风速。在每个 FACE 圈中心 2.5 m 高度上都安装一组测定风速和风向的传感器,当风速很小或无风时,FACE 圈的 8 根放气管以对边同时开放方式分为 2 组间隔轮流开放;当风速较大时,根据风向,上风处的 3 根放气管开放,释放纯 CO<sub>2</sub> 气体。

### (2) 系统工作原理

控制箱内的 CO<sub>2</sub> 检测仪通过气体检测管从 FACE 圈内采集气体进行 CO<sub>2</sub> 浓度的检测,并根据预置的 CO<sub>2</sub> 浓度设定值进行控制量的计算,然后调整主释放阀的开启度,适当增加或减少 CO<sub>2</sub> 气体的释放量,使圈内的 CO<sub>2</sub> 浓度保持在所要求的水平。

### 2.3 释放系统

放气管道:即 FACE 圈(图 8),共 3 个,每个 FACE 圈是一个对边距为 4 m、由 8 根释放 CO<sub>2</sub> 气体管带围成的正八角形,每根放气管(图 9)是长度约为 1.7 m 的不锈钢管,放气管面向圈内一面每隔 100 mm 有孔径约 0.5 mm 的小孔(采用激光打孔),放气管的高度可随作物生长高度调节在作物冠层上方 30~40 cm 处,以保证作物冠层上方有足够的高 CO<sub>2</sub> 浓度和气体扩散空间。圈内有 1 个 CO<sub>2</sub> 气体监



图 8 不锈钢管围成的释放圈

Fig. 8 The stainless steel pipe enclose into a circle



图 9 放气管道

Fig. 9 The stainless steel pipe from which CO<sub>2</sub> gas release into the air

测器,采集 CO<sub>2</sub> 气样供控制系统分析圈内 CO<sub>2</sub> 浓度分布。

## 3 目的与用途

利用 FACE 试验平台,在半干旱雨养农业区开展田间试验,以当地主要作物春小麦、马铃薯、玉米等农作物为研究对象,通过增加 FACE 圈内的 CO<sub>2</sub> 浓度,进行 CO<sub>2</sub> 浓度升高对农作物生长过程、生理生态特征、生物量、产量等的观测研究,认识高 CO<sub>2</sub> 浓度对作物影响的生理生态机制以及影响方式、影响规律、影响后果等,明确雨养作物生长及产量对 CO<sub>2</sub> 浓度增加的响应及其机理,通过观测增加试验数据用于改进或验证模型模拟,以增加模拟结果的可信度。另外,作物对气候变化的适应是一个极其复杂的过程<sup>[26-29]</sup>,因地区、作物及其品种而异,因此进行区域试验也是非常必要的。通过试验研究,为该地区适应未来不同气候变化情景提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] Ainsworth E A, Long S P. What we have learned from 15 years of free - air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta - analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub> [J]. *New Phytologist*, 2005 (165): 351 - 372.
- [2] Ainsworth E A, Leakey A D B, Ort D R, et al. FACE - ing the facts: Inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO<sub>2</sub>] impacts on crop yield and food supply [J]. *New Phytologist*, 2008 (179): 5 - 9.
- [3] Conley M M, Kimball B A, Brooks T J, et al. CO<sub>2</sub> enrichment increases water - use efficiency in sorghum [J]. *New Phytologist*,

- 2001(151):407-412.
- [4] Drake B G, Gonzfflez - Meler M A, Long S P. More efficient plants, a consequence of rising atmospheric carbon dioxide[J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol. , 1997(48):609-639.
- [5] Fuhrer J. Agro - ecosystem responses to combination of elevated CO<sub>2</sub>, ozone, and global climate change[J]. Agriculture Ecosystems & environment, 2003,97:1-20.
- [6] Hymus G. J, Baker N R, Long S P. Growth in elevated CO<sub>2</sub> can both decrease and increase photochemistry and photoinhibition of photosynthesis in a predictable manner. *Dactylis glomerata* grown in two levels of nitrogen nutrition[J]. Plant Physiology, 2001(127):1204-1211.
- [7] Indermühle A, Stocker T F, Joos F A, et al. Holocene carbon - cycle dynamics based on CO<sub>2</sub> trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica[J]. Nature, 1999(398):121-126.
- [8] Isopp H, Frehner M, Long S P, et al. Sucrose - phosphate synthase responds differently to source - sink relations and to photosynthetic rates; *Lolium perenne* L. growing at elevated CO<sub>2</sub> in the field[J]. Plant, Cell & Environment, 2000(23):597-607.
- [9] Kimball B. A. , Pinter J. P. J. , Garcia R. L. , et al. Productivity and water use of wheat under free - air CO<sub>2</sub> enrichment. *Global Change Biology*, 1995,1:429-442.
- [10] Kimball B A, Kobayashi K, Bindi M. Responses of agricultural crops to free - air CO<sub>2</sub> enrichment[J]. *Advances in Agronomy*, 2002(77):293-368.
- [11] Leakey A D B, Ainsworth E A, Bernacchi C J, et al. Elevated CO<sub>2</sub> Effects on Plant Carbon, Nitrogen and Water Relations: Six Important Lessons From FACE[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009,60(10):2859-2876.
- [12] Leakey A D B, Fangxiu Xu, Kelly M. et al. Genomic basis for stimulated respiration by plants growing under elevated carbon dioxide[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009,106(9):3597-3602.
- [13] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. Food for thought: lower expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations[J]. *Science*, 2006(312):1918-1921.
- [14] Long S P, Ainsworth E A, Bernacchi C J, et al. Long term responses of photosynthesis and stomata to elevated [CO<sub>2</sub>] in managed systems[A]. In: *Managed ecosystems and CO<sub>2</sub>: Case studies, processes and perspectives*[C]. Nosberger J, Long S P. editors. Heidelberg, Germany: Springer, 2006. 253-270.
- [15] Long S P, Ainsworth E A, Rogers O D R. Rising atmospheric carbon dioxide; plants FACE the future[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2004(55):591-628.
- [16] Norby R J, Sholtis J D, Gunderson C A, et al. Leaf dynamics of a deciduous forest canopy: no response to elevated CO<sub>2</sub>[J]. *Oecologia*, 2003(36):574-584.
- [17] Peng S, Huang J, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. *P Natl Acad Sci USA*, 2004(101):9971-9975.
- [18] Poorter H. Inter - specific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO<sub>2</sub> concentration[J]. *Vegetation*, 1993(104):77-97.
- [19] Tubiello F N, Ewert F. Simulating the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops: approaches and applications for climate change[J]. *Eur J Agron*, 2002(18):57-74.
- [20] Tubiello F N, Amthor J A, Boote K, et al. Crop response to elevated CO<sub>2</sub> and world food supply[J]. *Eur J Agron*, 2007(26):215-223.
- [21] Wall G. W. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> alleviates drought stress in wheat. *Agriculture*[J]. *Ecosystems and Environment*, 2001(87):261-271.
- [22] 崔向慧, 李昊, 卢琦, 等. 全球 FACE 实验的进展与展望[J]. *世界林业研究*, 2007,20(5):1-6.
- [23] 刘刚, 韩勇, 朱建国, 等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制[J]. *应用生态学报*, 2002,13(10):253-1258.
- [24] 谢立勇, 马占云, 高西宁, 等. 二氧化碳浓度增高对作物影响研究方法(FACE)的问题与讨论[J]. *中国农业大学学报*, 2008,13(3):23-28.
- [25] 韩雪, 林而达, 全乘风, 等. FACE(FreeAir Carbon dioxide Enrichment)系统的结构与控制[A]. *中国气象学会 2007 年年会论文集*[C]. 广州, 2007.
- [26] 罗哲贤. 有关二氧化碳倍增问题的一些研究[J]. *干旱气象*, 1992(3):16-20.
- [27] 罗哲贤. 二氧化碳浓度增加对气候和经济的影响[J]. *干旱气象*, 1992(1):1-7.
- [28] 李裕, 张强, 王润元, 等. 气候变化对食品安全的影响[J]. *干旱气象*, 2009,27(4):367-372.
- [29] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响[J]. *干旱气象*, 2010,28(1):1-7.

## Introduction of Potato – wheat Rotation FACE Platform at IAM, CMA

ZHAO Hong<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, LI Yaohui<sup>1</sup>, QING Jizu<sup>1</sup>,

WANG Runyuan<sup>1</sup>, YANG Qiguo<sup>1</sup>, WANG Heling<sup>1</sup>, TONG Chengfen<sup>3</sup>, WEI Qiang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. MOE Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) System for potato and spring wheat rotation was established in the semi – arid rainfed area of Loess Plateau in northwest China. It is composed by CO<sub>2</sub> gas supply device, control equipment and gas release equipment. Elevated CO<sub>2</sub> concentration was controlled above ambient by computer system platform according to ambient CO<sub>2</sub> concentration variation, wind direction, wind speed, canopy height and daylight changing etc. The platform aimed at the studies such as the impact of elevated CO<sub>2</sub> concentration or coincidence with temperature, water and nutrition, etc. on growth, ecophysiological characteristics, biomass and yield of crops, which can provide some science basis for adaptation the different climate change scene in local area.

**Key words:** free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE); potato and wheat rotation; platform structure; control; semi – arid rainfed area

## 《干旱气象》影响因子 2009 年度显著提升

2010 年版《中国期刊引证报告(扩刊版)》显示:《干旱气象》2009 年影响因子为 1.443, 总被引频次 544, 引用刊数 129, 影响因子和总被引频次都较 2008 年度(分别为 0.992 和 393)有大幅提升。2009 年在全部统计源期刊(6021 种)中,《干旱气象》影响因子排名第 133 名, 总被引频次排名第 2283 名;在大气科学(气象学)(28 种)刊物中影响因子排名第 8 名, 总被引频次排名第 13 名。影响因子超过了《热带气象学报》、《应用气象学报》、《气象科技》等刊物。从 2003 年改刊以来,《干旱气象》的学术质量、编校质量、印刷质量不断提升,得到了专家学者、作者、读者的充分肯定和广泛好评。欢迎广大气象科技工作者关注《干旱气象》的发展,踊跃投稿《干旱气象》!