

旷野中最亮的星——野外台站巡礼

麦田底下藏着什么？ 科学家用它们记了 40 年水土账

■本报记者 冯丽妃

6 月上旬,山东禹城。正午的阳光把麦田晒得发烫,空气中弥漫着淡淡的麦草香气。李发东穿过金黄色麦垄,俯身掀开一个白色油漆已剥落的长方形铁盖子,转身踩着洞壁的铁梯向下爬。

“下来看看。”李发东说。他是中国科学院禹城综合试验站(以下简称禹城站)站长,中国科学院地理科学与资源研究所(以下简称地理资源所)研究员。

《中国科学报》记者跟着李发东往下去,很快感受到沁人的凉意。到底层,温度计显示:15 摄氏度——比地面低了 20 多摄氏度。“太凉快了!”



GAS 地上部分外观。



禹城站。

冯丽妃 / 摄

这不是地窖。两层楼高的地下空间里,矗立着一个巨大的金属装置——大型称重式蒸渗仪,表面的白色油漆已经泛黄。这个“大家伙”有一个方形底座,上面放置的圆形土柱高 5 米、重 36 吨,被 50 根钢缆牢牢吊起。李发东告诉记者,它就像一个巨大的秤,能像“曹冲称象”那样,精确捕捉土柱内水分蒸发、渗漏变化,称重精度高达 60 克。

“这是禹城站的‘传家宝’。”李发东说,自 1990 年建成至今,它已连续 36 年不间断记录土壤蒸发、作物蒸腾数据,形成一本本农田水土变化“账目”。

作为我国第一批国家野外科学观测研究站,禹城站的“传家宝”远不止这一个。40 余年来,一代代中国科学院人扎根这片旷野,建立了高空、地表、地下全城长期监测系统,将盐碱荒地变成“吨粮田”。从这里诞生的一项项技术已辐射到全国,乃至“一带一路”共建国家。

几代人的“传家宝”

从禹城市中心向南约 12 公里,一条乡间公路旁的麦田里,矗立着一座 60 米高的铁塔,如巨型“探针”直插苍穹。

这就是禹城站所在地。夏季金黄色的麦田里,高高低低的仪器设施错落排布。铁塔是“资历最深”的另一个传家宝。它修建于 1984 年,由老一辈科学家谢贤群、叶芳德等人筹建,分层布设传感器,连续监测大气边界层垂直变化,是当时国内农田生态系统最先进的观测设施。

李发东 2003 年第一次到访禹城站时,铁塔还没有自动化传输设备,科研人员要顶着夏日高温、冬日寒风,徒手攀爬记录数据。“铁塔是我们空中观测的起点。”他说,“无人机只能开展瞬时遥感观测,无法复刻铁塔积累的长期连续边界层数据。”

铁塔下的观测场同样承载着时光印记。气象观测场内的白色百叶箱里,干湿球温度计、地温计等一字排开;老一辈科学家设计的一台形似古老相机的日照时数观测仪,利用小孔成像在暗盒里描摹太阳轨迹——从 1979 年沿用至今,留存了近半个世纪的光照原始数据。1985 年建成的水面蒸发场,汇集了中、美、俄的 17 套蒸发设备——这是国内类型最多、观测历史最长的水面蒸发观测设施。“这是南水北调东线调研留下的科学遗产。”李发东说,“当年,老一辈科学家刘昌明等人做完调研,觉得这些设施来之不易,不舍得扔,就把它们搬到了禹城。”

在地下,除了大型称重式蒸渗仪之外,麦田一角玻璃房人口下还有一个“镇站之宝”——2020 年建成的地下水-农田生态系统关键过程综合试验模拟装置(GAS)。该装置建筑面积约 4500 平方米,整体下沉至地下 10 米,共 3 层楼高,每往下走一层,凉意便增添一分。站在廊道里,能看到不为人知的地下世界:16 个 5 米×10 米的大型封底土柱内的水土状态、根系生长情况。

这个“国之重器”的建设源于禹城站的科学家对区域地下水危机的科学预判。禹城站近 20 年的监测数据显示,黄河下游引黄灌区地下水位持续快速下降——冬小麦返青和抽穗期若叠加引黄水短缺,水位可短时降至 7 米以下。地下水持续下降会如何改变土壤结构?作物生长会作何响应?又会引发哪些生态环境效应?这些问题在自然条件下难以系统研究。

正是在这样的背景下,2012 年,时任站长欧阳竹和同事们提出建设一套能够精准控制地下水位的科学装置。如今,该装置已稳定运行 5 年多,通过模拟不同地下水位情景,科学家可以解析水位变化对农田返盐、固碳、作物生长的影响。

“以前只能复盘过去 40 年水土变化。”李发东说,“现在可以主动模拟未来几十年地下水管控、气候变化带来的农田演变。”

时间的力量

每天早上 7 点多,工作人员刘玉莲、隋秀兰会骑着电动摩托车准时抵达气象观测场和水面蒸发观测场,记录每台仪器上的数据;下午 2 点、晚上 8 点,还要各记录一次。

从 1979 年禹城站正式挂牌,1983 年获批准定名“中国科学院禹城综合试验站”,1999 年成为我国第一批国家野外科学观测研究站,这样的观测已持续 40 多年。工作

人员换了一茬又一茬,但观测却全年 365 天从未中断,风雨无阻、雷打不动。

“观测的意义在于发现。”禹城站执行站长、地理资源所研究员李静说,40 余年数据积累,是为了回答关乎粮食安全与环境安全的重大命题。

水是农业的生命线,也是禹城站研究的核心方向。长期观测数据表明,华北平原存在“蒸发悖论”——全球变暖温度升高,蒸发量理应增加,但实测数据却显示持续下降。李发东解释,除气温外,蒸发量还取决于到达地表的太阳辐射。由于工业化进程中排放的气溶胶像“遮阳伞”一样削弱了辐射,蒸发随之减少;但 2010 年以来大气治理成效显现,蒸发量又开始回升。

“蒸发悖论在华北的表现,本质上是人类活动改变大气成分,进而影响地表过程的真实写照。这个规律,没有 40 年的数据积累是看不出来的。这就是时间的力量。”李发东说。

地下水是另一个重要监测对象。“我们可以看一下,今天的地下水位是 3.94 米。”李发东指着水位测量设施上的数据说,长期数据表明,禹城地下水位整体呈下降趋势,通常在 1.5 米到 4.5 米之间波动,灌溉高峰期可短时降到 7 米以下。水位变化会直接影响农田生态。通过蒸渗仪、GAS 反复试验,研究团队确定了 2 到 4 米的安全水位区间——太浅会返盐,太深作物会受旱。

可喜的是,近几年在南水北调和地下水超采治理等综合作用下,当地水位开始缓慢回升。“这些观测指导了当地农户灌溉,形成的技术还推广到东北黑土地、山东东营滨海盐碱地。”李静说。

养分平衡的答案同样藏在时间里。1987 年设计的长期养分平衡试验场,制定了不施肥、缺氮、缺磷、缺钾、氮磷钾全施 5 种观测方案,39 年连续观测从未间断。现场可以看到,缺磷的地块麦子矮小发黄;零施肥的地块麦秆更矮,麦穗更小,而且长了芦苇等盐碱地植物。“这说明土壤在退化,反过来也证明施肥对维持农田生产力是必要的。”李发东说。

那么,长期施用化肥是否会造成生态崩溃?试验显示,施用 30 多年化肥后,土壤 pH 值从 9 降到了 7 左右,生态系统并没有崩溃。“但如果降到 5~6,那就麻烦了,所以我们一直在监测、调整。科学家不会等着生态崩溃,而是在掌握规律的基础上不断优化。”李发东说。

如今,禹城站已建成完善的长期定位监测体系,从水、土、气、生、遥感等多个维度,实现了上百项指标的精准监测,为农业科学研究、生产管理和生态环境保护提供决策支撑。

李发东常说:“单日的数据意义不大,但积累 10 年、30 年、100 年,就变得无比珍贵。就像英国洛桑试验站,1843 年建站,历经两次世界大战,监测从未中断,其 1 克土壤样本的价值堪比黄金。而禹城站 40 多年历史,我们的目标是做成‘百年老站’。”

这些平台也是人才培养的沃土。目前,禹城站在读博士生 24 人、硕士生 10 人,其中包括留学生 5 人,已累计培养 30 余名海外高层次人才。李发东在中国科学院大学(以下简称国科大)开设的“生态系统监测与实践”等课程,每年有 20 个到站实

一个广西人,在山东麦田里守了 16 年

■本报记者 冯丽妃

早上 6 点多从北京南站乘高铁,一个半小时到济南西,再驱车半个多小时,便到了中国科学院禹城综合试验站(以下简称禹城站)。这条路,李发东走了 16 年。“没高铁时,要坐半个小时火车。”他回忆说,“现在两个小时就到了,还能当天往返。”

路程虽然缩短了,但他与这片土地的联系却日渐深厚。

从没想过会来这里

李发东是广西阳朔人,却与山东的这片田野打了 20 多年交道。

1996 年从中国农业大学毕业后,他先

后考入中国科学院遗传与发育生物学研究所和中国科学院地理科学与资源研究所(以下简称地理资源所),在研究员杨永辉、中国科学院院士刘昌明指导下攻读硕士和博士,扎根生态研究领域。

2003 年,第一次到禹城站时,李发东还在地理资源所读博,当时是陪同工程师维护通量仪器。“那时从来没想到,有一天我会成为这个站的站长。”他回忆说。

2010 年,李发东从国外访学归来时,禹城站恰好需要一位做水同位素研究的科研人员,时任站长欧阳竹找到了他。那一年,李发东 38 岁。此后,他便与禹城站深度绑定——最初做副站长,2021 年成为第七任站长。

刚回国时,他就住在站上,生活“特别规律”——每天早上 6 点多起床、跑步,7 点半吃饭,8 点开始工作,经常和学生一起加班到晚上 10 点。过程虽然辛苦,但他觉得非常有成就感。

创新中传承

在禹城站,李发东经常慨叹老一辈科学家的巧思。

1979 年研制的日照时数观测仪,利用小孔成像在暗盒里描摹太阳轨迹,留下近半个世纪的光照原始数据;1985 年

建设的水面蒸发场,老一辈科学家自制千分尺,实现 0.05 毫米级高精度人工读数;1990 年建设的大型称重式蒸渗仪,36 吨土柱用 50 根钢缆吊起,通过定滑轮和动滑轮把力量分散,再通过机械刻度放大来读数。

“每一个装置都是当时条件下最聪明、最前沿的设计。”李发东说,“当时没有高精尖设备,他们就用智慧和巧干解决问题,这就是老一辈科学家的精神。”

如今,新的研究倒逼设备迭代升级。导师刘昌明叮嘱他:“实验是最重要的。一定要把禹城站的实验延续下去,还要不断创新。”

李发东也是这么做的,他和站上新一代科研人员不断开发新的设备:自主研发激光自动观测装置,实现分钟级动态水面蒸发数据收集,大幅提升观测的连续性;革新传统暗盒小孔成像人工记录方式,依托智能识别技术自动描摹太阳轨迹、统计日照时数,实现光照数据智能化采集;开发多光谱智能化物候成像系统,面向多种生态系统的植被物候开展野外长期连续观测……

当前,气候变化正在深刻改变华北平原的农业生产条件——极端天气事件频发,单次降雨超过 150 毫米的天数明显增多,持续干旱屡见不鲜。李发东心中有一张蓝图:持续完善禹城站从大气边界层到地下基岩的全域监测系统,打通空天地一体化的农田生态观测网,融入激光、智能识别

习名额,选课一经开放便“秒光”。此外,国科大还有 6 门主干课程依托禹城站野外平台开展实操教学。

来自中国科学院贵阳地球化学研究所的博士生黄爽锐,正在站上搭建监测设备,研究土壤与大气界面的水交换通量。“禹城站是平原农田的典型代表,科研基础很好,对校外研究者完全开放。”他说,这正是禹城站作为国家级野外台站的功能——不仅是地理资源所的科研阵地,更是全国科研工作者的共享平台。

经验辐射海内外

在距离禹城站 30 多公里的北丘洼,鸡、鹅、羊在圈里悠然觅食,周边是百亩麦田和蔬菜大棚——这里落地的正是禹城站开发的北丘生态循环农业模式。

“种植业为养殖业提供饲料,畜禽粪便与秸秆发酵转化为有机肥,再还田改良土壤,实现资源高效利用与环境保护的统一。”李静介绍,这一模式不仅吸引了周边地区企业和农业合作社前来考察学习,其经验和技术也被推广至全国其他地区。

“一定要把论文写在大地上。”去年首任站长唐登银重回禹城站,由青年科学家、地理资源所助理研究员李兆负责接待,对于前辈的这句嘱托李兆始终铭记于心。

禹城因大禹治水而得名,这片位于黄河下游的土地,是黄淮海平原农田生态系统的典型代表。当地 80 万亩耕地中,曾有半数旱、涝、碱、沙“四害”俱全,春天白茫茫一片,粮食亩产不足百公斤。1966 年,遵照周恩来总理指示,国家科委、中国科学院与山东省共同创建了禹城旱涝碱综合治理试验区。中国科学院百余名科研人员扎根于此,与禹城人民并肩作战、治沙改碱。1988 年,中国科学院启动“农业科技黄淮海战役”,至 1993 年,这片重灾低产产区粮食总产净增 56 亿公斤。“现在,高中地理课本里介绍的黄淮海平原中低产田改造,讲的就是我们这儿的事。”禹城站工作人员于延春自豪地说。

“禹城站的科研氛围很浓。”禹城市副市长李壮在接受《中国科学报》采访时说,黄淮海大开发是禹城三大文化名片之一,禹城人民对于这段历史心存感激。如今,昔日的盐碱地已蝶变为“吨粮田”,2025 年禹城市 10 万亩田地年亩产超 1500 公斤。市政府正在联合禹城站编撰《禹城农业综合开发志》,重温这段历史。

不止于此,禹城站技术已辐射到更远的地方:山东东营滨海盐碱地建起 4000 亩种养殖循环示范区;东北黑土区 2000 亩示范区开展旱地高标准农田建设;禹城站还与石河子大学合作,在新疆开展节水灌溉技术示范。技术输出还延伸到国外,落地莫桑比克、埃塞俄比亚、卢旺达、乌兹别克斯坦……

2024 年,禹城站获批“国家生态质量综合监测站”,实现了从农田生态系统观测到区域生态质量监测的跨越。对于未来,李发东目标清晰:“近期完成当前项目,中期建成有国际影响的台站,长期实现农业可持续发展。”

“老一辈把接力棒交到我们手上,我们要做的是把它们传承好,并在这个基础上创新,这是我们的责任。”李发东说。

等新技术,让老台站焕发新活力,保障粮食安全与生态安全,回答时代之问。

主动出击,迎接使命

李发东的研究方向是农田生态过程与环境响应。在禹城站,他依托长期观测数据,研究农田蒸发、地下水与土壤水的交换、养分运移等过程。2025 年,他主讲的“景观生态学”获评中国科学院大学本科生优秀课程。

但他并不满足于“守着一亩三分地”。从 2012 年开始,他带领团队赴非洲埃塞俄比亚、卢旺达开展水和粮食安全的国际合作。如今,他又将目光投向中亚,与乌兹别克斯坦合作,针对咸海流域周边的盐尘暴、耕地退化问题,输出全套节水控盐技术。他的团队里有来自乌兹别克斯坦、埃塞俄比亚、埃及等国的留学生。他还经常带着国外的专家参观禹城站的“传家宝”,介绍中国盐碱地治理路径。

如今,一年中,李发东有 1/3 的时间待在站上。其余时间在北京做研究、处理事务。高铁的便利上这种“双城生活”成为可能。“当天来当天回,这在以前是不敢想象的。”

只要在站上,他每天必定会绕着整个园区走一遍。傍晚时分,他最爱独自走在麦田间的小路,看落日余晖铺满这片田野。“要用眼睛发现问题,和大家一起解决问题。”他说。

记者手记

走进中国科学院禹城综合试验站(以下简称禹城站)地下大科学装置——地下水-农田生态系统关键过程综合试验模拟装置(GAS)的地下空间,映入眼帘是裸露混凝土的地面,就像一个没有装修的“毛坯房”。

国之重器为何如此“朴素”?禹城站站长李发东笑着解释:“好钢要用在刀刃上,该有的功能我们一样都不缺。”他们把有限的经费投向核心功能——调控水位、监测数据、支撑实验。站上的经费使用理念是,不搞花架子,每一分钱都要用在最需要的地方。

除了“抠门儿”,禹城站的科学家还擅长“硬扛”。在站上工作了 37 年的于延春告诉记者,当初建设大型称重蒸渗仪时,要挖深坑安装设备。因为地下水水位浅,施工极其困难,谁知道刚挖出雏形,一场大雨袭来,基坑完全坍塌,多日心血付诸东流,让老一辈科学家“欲哭无泪”,只能从头再来,最终建成这套精度极高、连续稳定运行 30 多年的设备。

建设 GAS 更是一场攻坚战。浅层地下水水位约 1.5 至 4.5 米,要挖 10 米深坑,必须同步打下 9 眼 20 米深降水井,24 小时不间断抽水 8 个月,才能保证基坑不塌陷。项目累计动用了土石方 2.6 万立方米。更艰难的是 16 个土柱分层回填——严格复刻 0 至 8 米天然土层结构,光是填土就耗时一年多。主体封顶后,他们又用两年联调联试,白天调试传感器,晚上对比几十年历史台账,反复修改电控程序。

这种拼劲,在今天的师生身上延续。2011 年,李静应聘禹城站岗位时,中国科学院院士、中国科学院地理科学与资源研究所研究员于贵瑞问她:“你知道禹城在哪里吗?吃得苦吗?”身为山东人的她干脆地回答:“离我家不远,能行。”10 多年过去,她扛了过来,成为执行站长。

每到夏季农忙,为了避开烈日,师生们早上 6 点下地,中午 11 点收工,下午 3 点再次下地,干到晚上七八点。干活累了,食堂里的两菜一汤就是最可口的食物,必须吃得饱饱的。学生们有个口头禅:“又黑又胖又强壮,一看就快毕业了!”

今天的禹城站,还留着当年起家时的一层小红楼,屋顶是蓝色的塑料顶棚,老一辈科学家就是从这里开始旱、涝、碱、沙治理,让盐碱地“转了性”,变成“吨粮田”。如今,这里已是功能完备的现代化野外科研平台,住宿条件更好了,观测仪器更新了,但一天两三班倒、雷打不动的观测始终没变。

“我希望建站 100 年的时候,后人还能用我们现在采的土样、记的数据,获得新的发现。”李发东望着麦田说。



李发东介绍大型称重式蒸渗仪。 冯丽妃 / 摄



水面蒸发观测场鸟瞰。

王体理 / 摄

『毛坯房』里的『国之重器』

冯丽妃