



## 农业节水研究进展及未来发展战略\*

文 / 杨永辉 胡玉昆 张喜英

中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050021

**【摘要】** 世界大多数地区水资源短缺都与农业生产有关,作为用水大户,农业水资源高效利用对于解决区域水资源短缺和保障粮食生产可持续发展具有极其重要的作用。我国农业节水研究经过20多年来的发展,逐步实现了从最初以农田节水特别是强调农田工程节水为主向更注重改良作物遗传品质节水、农田节水与区域水资源管理节水并重,以及多水源综合利用节水的多学科节水研究体系,大大提高了我国农田节水的潜力。然而生产实践中,受我国社会经济发展水平特别是小农经济制约,我国的农田节水水平和农田水分利用效率还不高,急需通过政府、民间的多渠道投入,通过机制和管理创新,建立起适合各地区经济发展水平的从供水环节、田间节水到区域水资源管理的现代综合农田灌溉节水体系,保障我国未来粮食安全。

**【关键词】** 水资源短缺 水分利用 灌溉节水 生物节水 管理节水

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.04.008

### 1 我国水资源状况和农业用水

中国无论人均水资源还是亩均水资源都不富裕,特别是中国水资源分布严重不均,大量淡水资源集中在南方,广大的长江以北地区(包括海河流域、淮河流域、黄河流域、西北和东北地区),水资源总量只占全国

总量的19%,约为5460亿 $\text{m}^3$ 。

国际水管理研究所(IWMI)指出,世界上大多数国家和地区水资源短缺都与农业有关。根据文献<sup>[1]</sup>报告,如果全世界粮食生产中灌溉水能减少10%,就可以满足其他所有目的的人类用水;相反,如不能大幅提高农业用水效率,为满足2050年全球粮食需求,世界农业灌溉用水量会从目前的2700 $\text{km}^3$ 大幅增加到4000 $\text{km}^3$ ,农业水资源安全和高效利用是整个水资源研究领域的重中

\* 基金项目 国家 973 项目 2010CB951002 和科技部  
国际合作专项 2009DFA21690  
收稿日期 2012 年 5 月 17 日

之重。

农业用水占全社会总用水的比重最大,是区域水平衡和水资源可持续利用的最重要因素。以海河流域为例,20世纪50年代和60年代由于电力和机械条件限制,灌溉农田十分有限,当时地下水位浅,洪涝频繁。自上世纪70年代开始,华北平原北部一些子流域的径流就开始减少,这通常被归结为人类活动和气候变化的影响,我们最近的研究表明,径流量开始下降的主要时期是在1978—1984年间即中国农业土地改革初期,这与当时农民自主经营土地积极性的发挥以及机械和电力条件的改善有关<sup>[2]</sup>。如我们在滦沱河的研究表明,滦沱河流域地表径流80年代后减少了近50%,人类活动的影响达76%,而当时农业用水占总用水量的比例高达90%以上<sup>[3]</sup>。同时,大寨这一中国农业活动最剧烈的区域又是该区域地表径流下降最剧烈的区域。农业可能是目前大部分北方流域地表径流减少、河道枯竭的主要原因。

随着工业化、城市化进程的逐渐加快,农业用水占总用水量的比例不断下降,但总量减少并不大。如2010年,全国的农业用水量约为3 689亿 $\text{m}^3$ ,占总用水量的61.3%,而2000年的时候,这个比重为68.8%,用水量为3 784亿 $\text{m}^3$ 。根据我国《节水型社会建设“十二五”规划》,2015农业灌溉用水总量基本不增长,此时农业用水占总用水量的58%左右。另一方面,从区域分布格局来看,农业用水所占比例下降并不均衡,经济发达地区农业用水比例下降明显高于经济不发达地区,如广东省2000年农业用水占总用水量60.1%,2010年为49.5%,年均下降速度为1%,每10年下降10%,远远高于全国的平均下降水平。与之相对应,发达地区粮食增速减缓甚至粮食减产、耕地面积萎缩却是不争的事实,以广东省为例,2008年的粮食播种面积为4 398千公顷,而1980年为5 970千公顷。粮食增产的压力越来越集中到北方缺水地区,无疑进一步恶化了北方缺水地区水资源态势,如新疆和黑龙江农业用水都有增加的趋势。以华北为例,2003—2006年间华北平原每年地下水超

采40.6亿—75.7亿 $\text{m}^3$ <sup>[4]</sup>,地下水超采使该地区形成世界上最大的地下漏斗区,地下水位的急剧下降、河道断流以及流量的不断萎缩,都昭示着中国北方半湿润、半干旱和干旱地区的用水日趋紧张。

## 2 我国与先进国家节水灌溉体系的差距

农田节水对大众来讲,一般首先想到的是灌溉节水技术如滴灌、喷灌等。农田节水作为干旱、半干旱地区或者缺水地区传统的田间作业方式由来已久,并形成了独特的精耕细作抗旱保墒耕作技术体系,以最大限度地蓄住天上水,尽可能地保住土中墒,高效率地利用土中水,以此来减轻干旱威胁。

### 2.1 先进国家的灌溉体系

目前我国整体灌溉水的利用效率不高,其中损失最多的是输水过程中的渗漏和蒸发,输水过程中水分损失主要发生在地表水向地下水的转换渗漏,如果不与地下水中的咸水混合,渗漏水仍可被利用,因此国际上越来越不认同把渗漏水视作一种水分损失。但从动机和实际实践来讲,国际上都很注重尽可能少地减少输水过程中的水分损失,因为减少输水过程的水分损失可以直接提高水的灌溉利用效率,易于实现灌溉面积的增加。

以以色列为例,这个世界缺水最严重的国家,沙漠面积占国土面积的67%,人均水资源可利用量仅为271 $\text{m}^3$ ,其水源是位于约旦河上游叙以边境的太巴列湖,为了充分发挥该湖的效能,以色列投资数亿美元,修建了长达440多km的引水管道,依靠北高南低的地形把水送到中部和南部,形成覆盖国土60%的国家引水渠网络,保证了远距离调水的水分利用效率,该工程使以色列核心区域的沙漠平原成为旱涝保收的粮果基地。在田间灌溉方面,温室加滴灌的灌溉模式大大保证了灌溉水从支渠到田间到作物根系的灌水效率<sup>[5,6]</sup>。

美国注重输水过程的管道化,即使是沟灌和畦灌,大部分采用管道输水,水通过管道直送沟、畦。大面积集约式的作业方式保证了现代灌溉节水技术的应用和普及,目前生产中50%的面积采用喷灌包括固定式和移动式、43%为地面灌溉、6%

为滴灌、其他灌溉占1%,现代化水平很高。灌水时期的确定方面,大部分农田已实现精准控制,通过测定土壤水分、叶面温度等确定土壤墒情,实施灌溉,大大减少了灌水的无效损失,提高了灌溉水的利用率<sup>[7,8]</sup>。

## 2.2 我国的灌溉节水体系

我国依靠有限的财力,已建立起一套覆盖全国主要缺水地区,基于地表水和地下水利用的灌溉体系。1950—2008年间,灌溉农田面积从1 600万公顷扩大到5 800万公顷,利用占总耕地45%的灌溉面积,生产了75%以上的粮食,灌溉水利用系数(田间水量与取水口水量之比)从0.3提高到2000年的0.42和2008年的0.48。灌溉体系的建立和农业水利用效率的提高为我国成功解决巨大人口的粮食问题提供了保障。

但受经济发展水平和小农户式经营模式限制,我国灌溉节水体系建设还很不完善。大部分输水渠道还无法实现衬砌,2011年的中央一号文件提出发展水利事业,国家希望通过人力、财力、物力的投入,重点解决灌溉水利用效率过低的问题,在2030年前,通过适度扩大灌溉耕地面积,增加粮食产量,保障我国人口高峰时的粮食安全。

## 3 农业节水与农业水资源高效利用研究进展

经过多年的扩展,农业节水研究已远远超过了传统意义上农田灌溉节水的范畴,渗透到农业生产的各个环节,综合提高农业水资源的利用效率是农业节水研究的重要内容。

首先从尺度上讲,农业节水已远远超出了农田的概念,除了传统的农田节水研究,开始更加注重作物个体即植株的节水,以及大区域上根据区域水资源状况通过进行宏观尺度的水资源布局和农业结构调整实现节水,从植株-田间-区域3个尺度,研

究解决实现农业节水的理论、技术和水资源利用战略。其次,除了技术上的农业节水措施,管理节水也受到越来越多的重视。

### 3.1 生物节水

生物节水是指通过挖掘生物体自身的生理和基因潜力使作物利用有限的水获得尽可能多的农业产出。实践证明,作物高水效品种选育是提高作物水分利用效率的重要手段<sup>[9]</sup>。小麦是我国北方最重要的粮食作物之一,同时也是耗水较高的作物。围绕小麦控制水分利用效率基因的挖掘和品种选育,中科院农业水资源重点实验室最近开展了一系列工作,对比了上世纪60年代到2000年后不同时期培育的26个小麦品种的水分利用效率,结果显示,在相同种植条件下,水分利用效率从70年代开始有逐渐提高的趋势,单方水的粮食生产效率从1.0 1.2kg/m<sup>3</sup>逐渐升高到目前的1.4—1.5kg/m<sup>3</sup>,揭示了小麦品种选育中水分利用效率性状有增加的趋势<sup>[10]</sup>。通过大田试验和小麦遗传基因谱图技术,定位了一系列抗旱节水主效QTLs<sup>[11]</sup>,并应用到品种选育中,到目前为止已经选育出一批水分高效利用的冬小麦品种。

高水效品种的突破表现在:生物量向经济产量转化效率提高,在不增加生物量生产基础上,通过收获指数进一步提高来增加经济产量,实现农田耗水量不变条件下增产;另一个途径是通过遗传调控,提高作物生物量生产过程中的水分利用效率,用尽可能少的水生产更多的干物质,通过提高作物的光合效率,降低农田耗水量。这两个方面的突破将进一步带动农田高效用水的发展。

### 3.2 农田节水

农田依然是农业节水的关键环节。农田节水的核心是减少和有效控制水分,通过农田3个过程的传输与损失,这3个过程为:



中国科学院



土壤水蒸发、植物蒸腾和土壤水渗漏,其中最关键的是土壤水蒸发与植物蒸腾。农业节水基础理论研究正在不断走向多学科交叉,通过土壤科学、作物生理、营养施肥、遗传育种、水利灌溉等多学科合作来系统研究制约农田水分利用效率提高的因素。通过对农田土壤-植物-大气系统(SPAC)的研究,可以摸清农田土壤-大气界面、作物-大气界面、土壤-地下水界面间的能量与水分传输与转化过程;并围绕作物生理需水与耗水,通过研究水-土-植物关系、干旱条件下植物根系和气孔反应的机制、干旱胁迫对植物超补偿功能等问题,实现降水(灌溉水)、土壤水、植物水、光合作用、生物量、粮食产量转化过程的定量描述,建立提高各环节转化效率的节水调控理论,开展农业节水理论与技术创新。

以华北地区的小麦、玉米两熟耕作制度为例,通过SPAC系统水循环的长期定位试验表明,土壤棵间蒸发约占蒸散发(ET)总量的30%<sup>[12]</sup>,土壤棵间蒸发不参与粮食生产过程,因而减少土壤蒸发是减少农田水分无效损失的重要措施。以华北地区目前大面积推广的小麦-玉米秸秆覆盖节水技术为例,每年可减少蒸发量约90mm(亩均减少耗水60m<sup>3</sup>),占每年土壤蒸发量的1/3,具有很好的节水潜力。围绕减少土壤蒸发所发展的节水技术还包括地膜覆盖节水保墒、保护性耕作、隔行灌、渗灌等等。

作物蒸腾是保证作物光合作用,形成作物产量的基础。现代节水技术也同样强调如何通过调节作物蒸腾,实现单位作物蒸腾获取最大的作物产量。除了基因水平节水技术提高作物的单株蒸腾水的利用效率外,亏缺灌溉和精准实时灌溉也是减少作物奢侈蒸腾的有效手段。针对亏缺灌溉我国已开展了一系列研究,如针对西北干旱区作物亏缺灌溉开展了一系列研究,明确了不同作物的调亏灌溉时期<sup>[13]</sup>;明确了华北小麦玉米对于水分亏缺的关键阶段<sup>[9]</sup>。通过作物模型的模拟发现,在小麦返青期的3月份适当水分亏缺可以控制冬小麦生长,作物叶面积指数的适当下降会减少蒸

腾,实现利用作物特定时期水分亏缺对产量影响相对较少的特点,降低作物蒸腾耗水,在轻微减产的情况下,提高作物单方水的利用效率<sup>[14]</sup>。这种小麦返青期水分亏缺、吐穗和灌浆期保证充足供水的技术可使小麦生长季节节水约75mm(50m<sup>3</sup>/亩)。

### 3.3 工程节水

工程节水是农田节水得以实现的基础,农民是农田节水技术应用的主体,现阶段大多数农民还无法有意识地、自发地采用农田节水技术。实践表明,如果节水技术无法与农民的经济效益或劳动力投入结合,就无法刺激农民应用节水技术的积极性。节水技术在取得节水效益的同时,如何提高农民的经济效益、减少劳动力投入,是节水技术大面积推广应用的前提。

工程节水可以帮助实现以上目标,如中科院遗传与发育生物学所农业资源研究中心与河北省农机研究所在华北共同研制的小麦、玉米秸秆粉碎机械,将小麦、玉米的收获、秸秆粉碎、播种有机地结合在一起,使农民减少了秸秆收获、秸秆处理、播种的繁重体力劳动,粉碎的秸秆覆盖地表,使得节水的同时还可以增加土壤的肥力,提高水肥的利用效率,减少农民在农忙季节的劳动力投入,因此得到了大面积应用。

经过多年发展,我国已经形成了一大批具有自主知识产权的工程节水生产线和作业器械,这些技术包括滴灌、渗灌、喷灌(微喷)、秸秆粉碎作业机械、免耕和少耕机械等等,适应我国现阶段农业发展的节水需求。

### 3.4 区域节水与管理节水

区域农业节水主要探索不同区域农业生产变化(如生产结构和不同节水措施、耕作措施)与水平衡因素和作物耗水之间的定量关系,评估不同区域节水农业发展对区域水循环的影响,研究基于现代遥感技术、信息技术的区域农业耗水时空格局评估方法、区域农业水资源演变的主要驱动机制,提出适宜区域发展的农业水资源配置战略。

管理节水则强调从水权、水政策、水价等方面加强对水资源使用的监管,农业用水应实行总量控制与定额管理。要在区域水循环、水资源和区域节水研究的基础上,明确各区域农业用水总量和各生产单元的灌溉用水定额,各流域进行用水总量分配,地表水和地下水结合逐级分配用水指标,通过用水监测如用水或用电监控的IC卡,逐级落实节水控制目标,可尝试建立水市场机制,对超额用水累进加价,对节约用水进行有偿转让。这样才真正实现农业水资源的高效利用,保障国家水资源安全和粮食生产安全。我国正在落实的水资源管理红线,正是通过管理措施,实现缺水地区需水和供水之间平衡的关键措施。

### 3.5 节水技术的综合集成

现代节水技术越来越强调生物技术、农田节水技术、工程技术、区域节水和管理节水的多项技术集成和根据不同地区的实际特点发展推广适宜的节水模式。

以位于干旱区的新疆为例,应用棉花地膜滴灌技术,根据棉花不同阶段的生长需水提供低于棉花蒸发耗水的灌溉水量,该技术集亏缺灌溉技术和地膜覆盖技术于一身,大大提高了水分的田间利用率。该技术模式的大面积推广普及有赖于工程技术提供的滴灌产品以及机械技术提供的全自动铺设滴灌带、覆膜的作业机械。此外,地膜滴灌得以大面积推广的另外一个原因是西北干旱区大部分地区位于棉花生育期的下限,铺设地膜可以提高棉花生长早期的地温,延长棉花生长期,有利于棉花增产。

华北地区则根据自身秸秆无法处理、焚烧污染环境的特点,发展了基于秸秆覆盖节水、全自动秸秆粉碎覆盖与播种的联合作业机械,结合适度亏缺灌溉、节水品种种植、低压管道输水以及IC卡智能灌溉控制等多种

技术集成,实现了年亩节水 $60\text{m}^3$ 以上,该技术已大面积应用,取得了显著的节水效果和良好的社会、经济效益。

## 4 农田节水发展的未来挑战

### 4.1 加强节水灌溉设施建设、增加农田灌溉面积

灌溉体系的建立为我国粮食安全提供了重要保障。着眼未来,需要调动全社会对农田水利建设的积极性,在用好中央和地方投资的同时,发挥农民作为用水主体的积极作用。通过进一步完善我国灌溉体系,减少灌溉输水过程中的水分损失,保障乃至适当增加作物灌溉面积,才能大幅度提高缺水地区粮食总产,保障我国粮食安全。

同时也需要注意到,在我国半湿润、半干旱、干旱地区,由于农田灌溉水利用效率的提高,通过灌溉渗漏向下游河道、地下水补给的水资源量在逐渐减少,这也加剧了下游地区的缺水,因而,需加大上游节水对下游水资源的影响研究,在节水的同时,通过合理调配上下游水资源配置,促进流域上下游间的和谐发展。

### 4.2 搭建适宜各区域发展特点的农田节水发展技术集成模式

我国通过布局一系列的农田节水项目,在各个区域上,基本量化了农田水分损失的过程和途径,为摸清各个地区的农田节水潜力打下了坚实的理论基础,各地区还针对不同区域的水资源和气候特点、经济发展水平,建立了一些生产上行之有效的灌溉模式。如华北秸秆覆盖+亏缺灌溉为核心的综合节水模式、西北的地膜滴灌节水模式、南方水稻干湿交替灌溉模式等。我国现阶段大部分农村还处在一家一户的经营模式下,农民收入水平相对较低,农田节水的社会效益和生态效益虽然显著,但农民的经济效益一般相对较小,这些客观因素都限制了农田



中国科学院

节水技术的应用和普及。因而,我国农业节水的发展,需要不断根据不同地区的水资源特点、经济发展水平,通过加大对工程节水、农艺节水、生物节水和农田节水机理、技术和配套农机具的研发和技术集成,发展适合各地区农业经济发展水平的节水发展模式,通过减少农民劳动力投入、发展高附加值农业、实现节水增产增收,调动农民应用节水技术的积极性。

#### 4.3 扩源 是保障国家粮食安全的必然选择

在我国粮食生产越来越依靠北方,而北方水资源短缺越来越严峻的大背景下,节水即使潜力很大但也很难保障粮食生产最基本耗水的情况下,扩源 成为保障国家粮食安全的另一选择。

扩源 是指通过多种渠道增加各种水资源的供给,这些措施如正在实施的南水北调、远距离调水,同时更应该加强多种水资源的联合利用。如应该大力发展雨水资源的收集及节水灌溉技术、发展雨水利用及灌溉作业配套机械,增加雨水资源的利用率;发展微咸水、咸水资源的安全灌溉技术和作业配套机具,提高微咸水资源的利用效率;发展城市中水资源的安全灌溉技术和安全灌溉监控系统等等。目前我国城市中水的再利用水平较低,发展中水安全灌溉技术前景广阔。

#### 4.4 建立有效的调节机制,是国家粮食安全的必然选择

面对不断恶化的水资源态势,我国各大流域如黄河、石羊河、黑河、塔河等都开始利用水资源的强制调节机制,保障水资源供给的平衡。水利部最近又明确提出了我国水资源利用的三条红线,采取强制措施保障水资源供需的长期平衡。类似的调节机制在未来我国水资源管理中无疑将发挥极其重要的作用。

农业领域也如此,节水、扩源和用水调节是保障我国粮食生产和水资源安全的必然选择。现阶段我国在发展节水技术、对多水源的利用技术提高农业水资源的利用效率的前提下,还应该大力强化对水资源使用的监管,研究推出各地适用的

水权、水市场、节水补偿等政策,发挥经济杠杆的调节作业,研究在不影响农民种粮积极性和农民种粮收入前提下的水政策,通过刺激农民节水的积极性,真正实现农业的节水增产。

#### 主要参考文献

- 1 Rogers P. Water governance, water security and water sustainability. Water crisis: myth or reality? Eds: Peter P. Rogers, M. Ramón Llamas, Luis Martínez-Cortina, Taylor and Francis Group, London. 2006, 3: 35.
- 2 Yang Y H, Tian F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China. Journal of Hydrology, 2009, 374: 373-383.
- 3 Fan J, Tian F, Yang Y H et al. Quantifying the magnitude of the impact of climate change and human activity on runoff decline in Mian River Basin, China. Water Science and Technology, 2010, 62 (4): 783-791.
- 4 Moiwo J P, Yang Y H, Han S M et al. Comparison of GRACE with in situ hydrological measurement data shows storage depletion in Hai River basin, Northern China. Water SA, 2009, 35(5): 663-670.
- 5 李里特. 节水农业是我国农业发展的必由之路——以色列节水农业发展的启示. 农业工程学报, 1999, (3): 11-15.
- 6 山伦. 借鉴以色列节水经验发展我国节水农业. 水土保持研究, 1999, (1): 117-120.
- 7 吴连芹. 美国加州农业节水灌溉的启示. 水利天地, 2008, (10): 26-27.
- 8 Fereres E, Orgaz F, Villalobos F J. Water use efficiency in sustainable agricultural system. International Crop Science. Madison, USA. Crop Science Society, 1993, 95: 83-89.
- 9 Zhang X Y, Chen S Y, Liu M Y et al. Improved water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China Plain. Agronomy Journal, 2005, 97: 783-790.
- 10 Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y et al. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors. Field Crops Research, 2009, 114(1): 75-83.
- 11 Cao H X, Zhang Z B, Sun C X et al. Chromosomal Location of Traits Associated with Wheat Seedling Water and Phosphorus Use Efficiency under Different Water and Phosphorus Stresses, Inter-

- national Journal of Molecular Science. 2009, 10: 4 116-4 136.
- 12 Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by largescale weighting lysimeter and micro-lysimeter. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111: 109-120.
- 13 Du T S, Kang S Z, Sun J S et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China. Agricultural Water Management, 2010, 97: 66-74.
- 14 Yang Y H, Zhang X Y, Watanabe M et al. Optimizing irrigation management for wheat to reduce groundwater depletion in the piedmont region of the Taihang Mountains in the North China Plain. Agricultural Water Management, 2006, 82 25-44.

## Agricultural Water-saving: Recent Progress and Future Challenges

Yang Yonghui Hu Yukun Zhang Xiying

(Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, CAS 050021Shijiazhuang)

**Abstract** In most areas of the world, water shortage is caused by over use of water in agricultural sector. As the biggest user, improvement on water use efficiency (WUE) in agriculture is crucial for solving regional water shortage and securing food production especially for China, with the highest population in the world. After over 20 years' development, China's water-saving agricultural research has expanded from original mainly focusing on field water-saving to three scales: genetics level to improve WUE of single crop through crop breeding, field level to improve WUE by efficiently controlling water transfer in Soil-Plant-Atmosphere-Continuum (SPAC), and spatial or regional level to improve WUE by monitoring and managing agricultural water use and by regulating crop patterns. Meanwhile, studies on efficient use of multiply water resources such as brackish water, waste water, rainwater and even sea water are also carried out. Such studies have greatly increased the potential for keeping an acceptable food production under water shortage condition. However, present economic condition and especially individual small farm land limited the application of modern technologies and development of basic infrastructures for modern irrigation. Future efforts should more rely on governmental input to improve irrigation infrastructure to secure China's irrigation area and irrigation WUE. Meanwhile, in field level, water-saving will rely on farmers' incentive to adopt new technologies of water saving. And thus, development and application of suitable field water-saving technology, high WUE crops, technologies for spatial and farmer level water use monitoring, and water policies to regulate farmers' water use and saving are all important for a successful water-saving society in agriculture.

**Keywords** water shortage, water use efficiency, field water-saving, spatial water-saving, water policy

杨永辉 中科院遗传与发育生物学所农业资源研究中心副主任、研究员。日本千叶大学博士、中科院“百人计划”终期评估优秀获得者。现任中科院农业水资源重点实验室主任、中科院水资源研究中心副主任。曾在英国陆地生态研究所及日本国立环境研究所长期从事客座研究。先后主持承担了国家自然科学基金项目、973 项目、中科院知识创新重要方向性项目、科技部国际合作项目、中澳合作项目和中日合作项目等。在国内外知名杂志发表SCI 论文40 余篇。E-mail: yonghui.yang@sjziam.ac.cn



中国科学院