

第一章

现代节水农业发展概况与展望

第一节 节水农业的意义与任务

一、节水农业的意义

1. 水是农业的基本要素

地球上如果没有水就没有生命，水是生命的赋予者；没有水也就没有农业，水是农业的命脉，是发展农业生产的基本要素。作为农业基本要素的水，其主要生理生态功能在于：与二氧化碳同作为地球上最重要的化学反应——光合作用的基本原料；一切植物组织的组成成分，维持膨压——植物得以正常生长的驱动力；维持蒸腾耗水——植物被动吸水的动力来源，并稳定植物体的温度。水还是植物生长、发育、繁殖所依赖的最重要的生态因子之一。无论在植物生产、动物生产中，还是在生态环境建设中，水都是一个基本要素。

“有收无收在水”，这一传统经验道出了水是农业基本要素的实质。正如专家们所强调的，人类面临的第一个生态问题就是水的亏缺。在各种灾害中，旱灾居于首位。据统计，在世界范围内，干旱缺水对农业和社会造成的损失相当于其他各自然灾害造成损失之总和。我国自公元前 1766 年至 1937 年，共发生各种自然灾害达 5 258 次，其中旱灾为 1 074 次，占 20.5%，发生次数最多。新中国成立后 1950~1995 年间，全国平均每年受旱面积为 2 130 万 hm^2 ，占耕地面积的 22%，成灾面积达 930 万 hm^2 ，成灾率 43%，每 3 年就有 1 年发生重旱。近年来，旱灾又有增加趋势，达到年均 2 600 万 hm^2 。如 2000 年，全国先后有 20 多个省（自治区、直辖市）发生了不同程度的干旱，受旱面积已达 3 066 万 hm^2 ，其中严重受旱面积约一半，绝收面积达 467 万 hm^2 。因缺水草场载畜能力下降，导致 60.8 万头牲畜死亡。按一般经验，中度干旱造成农业产量显著下降，严重干旱则造成大幅度下降，世界各国莫不如此。例如，1982 年是澳大利亚严重干旱年份之一，小麦产量下降到 890 万 t，只相当于正常年份的 40%；1983 年南非遭遇严重干旱，谷物产量从 2 340 万 t 降至 930 万 t；美国中西部玉米带，是世界上生产较稳定的旱农区之一，严重干旱也可使一些地方产量下降 50% 左右。据作者所做的分析，我国黄土高原水土流失区，

从目前粮食产量波动范围来看，丰水年、一般年和严重干旱年的相对产量水平大致为 100%、75%、50%。

作为农业基本要素的水，对于农业生产的重要性不仅表现为水在很大程度上决定着生物生产力和作物产量，另一方面，水与温度共同决定着不同区域的植被类型、栽培植物种类以及整个农业结构，而这些都是制定合理农业区划和发展规划的基本依据。雨量充沛的湿润地区广泛分布着茂密的森林，而在降水量低（250~500 mm）且分配不均匀的半干旱地区则不可能形成大面积连片中生林木，如黄土高原半干旱丘陵区大面积造林往往形成既不死也难以成林、成材的所谓“小老头树”，主要原因是水的容量不够，但这类地区却能大面积种植牧草和灌木，故半干旱地区成功的农业结构往往是农牧结合型的。至于年降水量低于 250 mm 的干旱地区则只能生长一些旱生植物，在荒漠地区甚至寸草不生。就栽培作物的分布而言，同样在相当程度上取决于水分的供应，如水稻属湿生性植物，只要有充足的水分供应可以在世界各地广泛种植，如在我国，北从黑龙江、南至海南，种植水稻都可以获得高产。广东、福建等地虽属水稻适宜种植区，但在这些省份的丘陵山区，由于缺水，也就只能种些玉米、甘薯之类的旱地作物了。可见，水对一个地区作物组成所起的决定性作用。

在干旱和半干旱地区，水是限制农业生产和整个国民经济发展的第一自然因素。人们一般将干旱与半干旱地区相提并论，其实，虽然这两类地区都缺水，但应当严格加以区分，它们属于两种完全不同的农业类型。在干旱地区，没有灌溉就没有农业。半干旱地区则是一个水土流失和干旱并存、生态环境十分脆弱的地区，这里可以进行旱地农业耕作，具备农牧综合发展的条件，但生产力低下，风险性大，由于人口压力，往往盲目开垦扩大耕地，导致植被破坏，加剧水土流失，形成恶性循环。我国黄土高原的大部是典型的水土流失半干旱地区，该地区的环境整治和农业发展关键是在一个“水”字上，但主要不是依靠灌溉水，而是自然降水。只要将自然降水充分保持住了，并实现了高效利用，黄土高原的发展就大有希望。

生态环境用水，是指为使一个地区的生态环境保护和经济建设同步发展所需要消耗的水资源量。近年来由于环境恶化，生态用水日益显得重要，包括干旱地区营造农田防护林网、半干旱区的植被建设和基本农田建设、风沙区的水力治沙造田、河流输沙用水、回补超采地下水用水，以及城市绿地用水等，都要消耗大量的水资源。例如，黄河年均径流总量 580 亿 m^3 ，其中以输沙减淤为主的生态用水就占去了约 200 亿 m^3 。据中国工程院组织的“中国可持续发展水资源战略研究”项目所做的分析估计，我国维护生态环境现状所需用水总量为 843 亿 m^3 左右。这部分耗水虽不是直接用于生产，但对于改善生态系统、保持工农业生产可持续发展至关重要，不可缺少，这从另一个方面说明了水作为农业命脉和基本要素的不可替代性。

2. 为缓解日趋严重的用水供需矛盾发展节水农业是必然选择

随着人类社会的进步，经济的发展，人口的剧增，加之水资源浪费与污染，全世界耗水量在快速增长。20 世纪初，世界年耗水量约 600 km^3 ，世纪末增加到 5 500 km^3 以上，增长大于 8 倍。特别是近几十年来，全球用水增长速度是人口增长速度的 3 倍。当前，占世界人口总量 40% 的 80 个国家缺水，其中 26 个国家严重缺水。由于缺水，20% 草场退

化, 渔业产量衰减 8%, 耕地增长已接近为零。1997 年 9 月在加拿大蒙特利尔召开的第九次世界水大会上, 专门讨论了作为世界粮食保障决定因素的缺水问题, 认为粮食生产是一项耗水量很大的产业。人们取自河流、湖泊和地下水层中的水, 有 $2/3$ 被灌溉农业消耗掉了。专家估计, 目前世界 $1/4$ 的粮食贸易是由缺水牵动的。当人均占有水量小于 1700 m^3 时, 其粮食将依赖进口。1998 的联合国文件预言, 21 世纪第一位的问题是人口问题, 第二位的是水问题。到 2050 年, 预计将有 30 亿人居住在缺水国家, 那时, 因人口增长而需要增加的粮食供应量, 其中的大部分需通过增加灌溉面积来解决。但自 20 世纪 80 年代以来, 世界人均灌溉农田已有下降趋势, 而且由于建设大量引水工程已造成世界范围的河流干枯, 地下水超采, 包括我国华北地区, 现状已令人担忧。因此, 今后在水资源日趋紧缺情况下再大量发展常规农业灌溉已不可能, 故从现在起就应采取有针对性的重大措施, 并争取在农业供水高新技术方面有所突破, 不然从地区性水危机发展成为全球性水危机将是难以避免的。

关于我国的水资源状况和农业用水存在的问题。据原水利电力部《中国水资源评价》报告中的资料 我国水资源总量为 28124 亿 m^3 , 低于巴西、俄罗斯、加拿大, 接近或略高于美国和印度尼西亚, 居世界前列。由于我国人口居世界之首, 人均每年占有水资源量仅为 2220 m^3 , 为世界平均的 $1/4$, 排在 121 位; 耕地面积占有水资源量约为世界平均水平的 $4/5$, 属贫水国家。除人均水资源占有量低以外, 我国水资源还存在时空分布不均、水污染严重等方面的问题。据有关资料, 全国 80% 的水资源集中分布在长江及其以南地区, 而长江以北广大地区 人口占全国的 47%, 耕地占全国的 65%, 工业产值占全国的 43%, 而水资源量仅占全国的 20%, 特别是华北地区人均水资源量低于 500 m^3 , 其中海滦河流域更低。故有专家提示, 要慎用全国人均占有水资源量的数字。我国北方地区的供水危机正在变成一个比以往任何时候都更加现实的问题。我国水资源年际年内变化也很大, 长江以南河流最大年径流量与最小年径流量之比, 约 5 倍, 北方可到十几倍。如北京地区的潮白河, 最大年径流量与最小年径流量之比高达 19 倍, 宁夏 1956~1979 年的 24 年中, 出现 1969~1976 年连续 8 年的枯水期。另外, 水污染加重是造成缺水、促使水危机到来的一个重要因素。据水利部门调查, 全国 5000 km 长的重要河道中有近一半的河流受到水污染, 主要湖泊的 26% 已达到富营养化程度, 有近一半饮用水源不符合生活饮用水卫生标准, 致使许多地区出现了因污染而缺水的局面。

上述原因使我国许多地区面临严重缺水。水利部门 2001 年估算, 目前全国有 $1/4$ 的国土面积缺水, $1/10$ 地区的水资源仅能满足人类生存的基本要求, 不少地方连起码的需求也不能满足。全国每年缺水量近 400 亿 m^3 , 其中灌区缺水 300 亿 m^3 , 农业平均每年因旱受灾减产粮食 200 多亿 kg 。城市、工业缺水 60 亿 m^3 , 每年直接影响工业产值 2300 多亿元 。农村有 2400 多万人 饮水困难。在全国 668 座城市中, 有 400 多座缺水, 其中 100 多座严重缺水。由于缺水, 还造成河水断流, 湖泊干涸。如流域面积 79.5 万 km^2 的黄河, 是我国西北、华北地区的重要水源, 担负着约 1.4 亿人口、 1.6 亿 hm^2 耕地、50 多座大中城市、晋陕宁接壤地区能源基地及中原、胜利油田的供水任务。黄河水资源本来就较贫乏, 多年平均年径流量 580 亿 m^3 , 仅占全国径流总量的 2% 流域人均水量 593 m^3 , 为全国人均水量的 25%; 耕地每公顷水量 4860 m^3 (亩均水量 324 m^3) 仅为全国耕地每公顷

水量的 17%。20 世纪 70 年代以来，黄河下游就频繁出现断流，1972~1998 年的 27 年间，有 21 年出现断流。断流严重的 1997 年，山东利津水文站全年断流 13 次，累计 226 天，330 天无黄河水入海。近年来由于对黄河用水实行了统一调度，情况有了好转，但流域内缺水问题并未得到根本解决。中国科学院地学部 1998 年考察后认为，黄河断流加剧，有自然因素，也有人为因素，而以人为因素为主。在人为因素中，引用水量超过黄河的负载能力是断流的直接原因，而引用水量中，农业灌溉用水占到 92%。因此，今后随着人口增长，工农业发展，城市化进程加快，将使得人均水资源占有量进一步减少，而用水量却进一步增加，水资源供需矛盾会更加突出。如何解决这一矛盾？出路不外乎两条：一是开源，二是节流。所谓开源，主要是指兴建拦蓄和跨流域调水工程以使水资源得以重新合理分配，以及提高雨水的就地利用率，对工业废水、微咸水、劣质水进行处理和有效利用。而从 20 世纪 90 年代以来所发表的大量有关解决用水供需矛盾的文献来看，几乎一致认为，节流——节约利用和保护好水资源应作为解决当前我国水资源紧张的首要途径，这也是从根本上解决水危机的前提和基础。节约用水，潜力最大的当属农业，因为农业是第一用水大户，其用水量相当总用水量的 70% 以上。农业不但用水量大、浪费严重，而且从农业科学用水角度上分析也不大有潜力可挖。因此，改变农业用水观念，更新农业用水方式，大力发展节水农业，就成为一种必然的选择了。

3. 节水农业是现代农业的组成部分

“节水农业”是我国的特有提法。其实，节水农业的实质就是充分利用降水和高效利用灌溉水。发展节水农业不仅仅是由于水资源紧缺，同时也是建设现代农业本身的需要，是与农业现代化配套的多种措施中的重要组成部分。水土资源的高效利用，经济、生态、社会效益的紧密结合是可持续农业所追求的一个目标，而根据水资源状况和作物需水规律所实施的节水灌溉便是达到这一目标的重要一环。为此，我们必须打破传统的农业用水观念，建立起一个适应现代社会和现代农业发展需求的农业供水体制。从这个意义上说，节水农业就是现代农业，节水灌溉就是科学灌溉。比如，传统灌溉推行的是充分灌溉制度，而节水灌溉则提倡按需供水，强调直接给植物补水，不是为了湿润整个土壤层，因而出现了喷灌、滴灌、局部灌溉等先进灌水技术，并提出了实施精确灌溉的供水依据与原则；传统灌溉主要追求当年当季高产，节水灌溉除了产量目标外，同时追求生态目标，重视农业水资源利用的可持续性及其农业效益的整体性。另外，推行节水农业不仅需要改变一些传统观念，而且需要更新一些科学概念，如作物需水量的概念、水资源平衡的观念、土壤水在水资源组成中的地位，以及稻田灌溉原则等。这些概念或原则的进一步完善必将促进农业的进步和农业科技的发展。

因此，可以认为，推行节水农业既是解决我国水资源不足、缓解用水紧张的首要途径，又是促进我国农业现代化的一个关键步骤，因而它是保障我国整个国民经济持续稳定发展的一项重大战略措施。

二、节水农业的任务

1. 节水农业的概念与类型

节水农业系指充分利用自然降水和高效利用灌溉水的农业。节水农业适宜于在所有从

事农业生产的地区推行，但推行的重点是在半干旱和半湿润地区。节水农业要解决的中心问题是：如何提高农业生产中水的利用率和利用效率；在灌溉农业中如何做到节约大量灌溉用水的同时实现作物高产，在旱作农业中如何做到对降水的充分利用或增加少量补充供水以达到显著增产。这里所说的水的利用率包括两个概念：一是指从水源处到田间输水过程中的水量扣除由于蒸发与渗漏损失的水量与输水总量之比，一般称为渠系水利用系数；二是指田间耗水量（包括作物蒸腾和土面蒸发）与降水量或进入田间的灌溉量之比。从灌溉水利用率角度，则将后者解释为渗入土壤根层中的水量与进入田间灌溉量之比。水的利用效率也包括两个概念：一是指作物消耗单位水所获得的产量；二是指单位灌溉水量所能增加的产量。故水的利用率和利用效率的高低构成了全面衡量农业节水效果的标准。

在倡导节水农业之初，对于节水农业的内涵还存在不同看法，例如，有些专家认为，节水农业应限于灌溉农业的范畴。现在从专家到政府文件认识已基本一致，即：节水农业应理解为在农业生产过程中的全面节水，既包括灌溉农业，也包括旱作农业；既包括工程节水，也包括农艺节水和生物节水。根据我国实际情况，可将节水农业划分为以下三种主要类型。

(1) 节水灌溉农业。这是当前节水农业的主体，一般指为节约水资源，尽量减少灌溉水输送过程中的水分渗漏和蒸发，同时不断改进灌溉技术，优化灌溉制度，减少灌溉定额，以尽量满足作物各生育阶段对水分的需求，实现高产的一种灌溉农业类型。

(2) 旱作农业。在无补充灌溉水源的地区，采用防止水土流失、减少土面蒸发、挖掘土壤深层储水、提高作物自身抗旱性和水分利用效率的技术，以及各种集雨措施，以实现对自然降水的高效利用，达到有限增产，一般称之为旱作节水农业。

(3) 有限灌溉农业。缺水地区根据水资源状况和作物需水规律，在充分利用自然降水的基础上进行低限补充供水的一种农业类型。有限灌溉仅能部分满足作物对水分的需求，可视为旱地栽培与有限供水结合的一种作物管理制度。

需要着重说明的是，由于水资源进一步紧缺，缺水地区大规模发展常规灌溉已不可能，现有灌溉方式也受到挑战；由于人口增长和提高生活水平的需求，旱作地区也出现了对补充灌溉的需求，如何解决这一矛盾？我们认为，随着科学技术的进步，采取旱地农业与补充灌溉相结合的供水制度——有限灌溉制度将成为可能，一个灌溉农业技术与旱作农业技术紧密结合并融为一体的新的农业技术发展方向也会逐步形成。

2. 发展节水农业的目标与任务

概括而言，在不断提高水的利用率和利用效率的基础上，在保持农业以正常速度增长的同时，维持水资源的可持续利用和区域平衡，大幅度节约农业用水，应作为我国节水农业的一个总目标。所谓“大幅度”地节约、降低农业用水，其主要着眼点是把所有地区农田单位面积用水量及农业用水在整个用水中的比率降下来。由于工业发展和城市化步伐加快，因此在一个时期降低农业用水比重将是不可避免的，为此必须主动地做好这方面的准备，既要节水，又要保持增产，是否可能？惟一的办法是实现水的高效利用，因此有些专家提出，节水农业的准确表述应当是“节水高效农业”，这是很有道理的。

建设节水高效农业的任务，包括建设节水高效现代灌溉农业与现代旱作农业两个方面。按照中国工程院咨询项目（2001）所作分析，在未来 30 年内，我国人口将达到 16

亿,需要粮食 7 亿 t 左右,粮食播种面积单产应达到 $5\ 250\ \text{kg}/\text{hm}^2$,而农业供水只能保持在目前 $4\ 000\ \text{亿}\ \text{m}^3$ 的水平上。为满足增产需求,灌溉面积应从目前的 $0.51\ \text{亿}\ \text{hm}^2$ (7.6 亿亩)扩大到 $0.60\ \text{亿}\ \text{hm}^2$ (9 亿亩)左右,为基本保证 $0.60\ \text{亿}\ \text{hm}^2$ 灌溉农田的实现,灌溉水利利用系数需由现在的 0.45 提高到 $0.6\sim 0.7$,每立方米灌溉水生产粮食从现在的 $1.1\ \text{kg}$ 提到 $1.5\sim 1.8\ \text{kg}$ 。这当然是一个粗略估算。根据国际发展经验及我国农田灌溉目前现状及存在的潜力,经过努力,实现这一目标任务是有可能的。加之我国在旱地生产即雨水利用方面还有相当潜力可挖,因此,建设节水高效农业的前景是看好的。

确定 2010 年前的目标应当说更为现实。根据水利部门初步规划到 2010 年,全国平均每公顷灌溉用水量由 $6\ 600\ \text{m}^3$ 降到 $6\ 000\ \text{m}^3$ 左右,灌溉水利利用系数由 0.45 提高到 0.55;万元农业产值用水量由约 $1\ 600\ \text{m}^3$ 降到 $1\ 000\ \text{m}^3$ 左右。在农业用水量基本不增加的情况下,通过节水挖潜,为全国新增 $333.33\ \text{万}\ \text{hm}^2$ 灌溉面积提供水源,同时使原有灌溉设施保证程度、服务功能有所提高,旱作节水农业技术推广覆盖率达 70%,天然降水利用率由 45%提高到 55%。为达到上述规划目标,应使灌溉设施节水改造面积由“九五”末的 $1\ 666.67\ \text{万}\ \text{hm}^2$ (2.5 亿亩)增加到 $4\ 333.33\ \text{万}\ \text{hm}^2$ (6.5 亿亩)。完成半数左右大型灌区续建配套和节水改造;严重缺水地区的灌溉农田基本完成节水改造,旱作农业普及雨水高效利用技术;水稻种植区实行节水控制灌溉;西北内陆河流域与黄淮海平原地下水超采区,实施以节水生态保护为主的综合治理。同时,应建立科学的农业节水管理体系,包括:完善农业用水政策法规,推进农业用水水价改革,建立政府扶持、农民参与的农业节水发展机制,以及增加农业节水投入、广泛开展农业节水宣传等。

科学技术是实现节水农业目标和任务的支撑与保证,加强节水农业的科学研究,切实解决节水农业中存在的一系列关键科技问题,应当说也是我们面临的一项重要任务。

第二节 节水农业发展态势

一、发展节水农业的国际经验

1. 概况

据估算,在 20 世纪人类每年提取的 $3\ 800\ \text{km}^3$ 水资源中,农业用水占到约 70%,主要消耗于灌溉,其次是畜牧业。目前全世界灌溉面积占耕地面积的 16%,但其粮食生产量占到世界粮食总产量的 40%。近 30 年来,世界灌溉面积以每年 $2\%\sim 3\%$ 的速度增长,对保证粮食每年增长 3%起了关键作用。但自 20 世纪 90 年代以来,世界灌溉面积增长速度明显减缓,平均下降到 1.1%。专家预计,由于未来城市和工业用水将大量增加,农业用水受到限制,再大幅度扩大灌溉面积是很困难的。但由于人口不可逆地继续增长,而耕地增长已接近于零(增长值与减少值相当),因此客观上对灌溉的需水加大,这显然是一个巨大的挑战。

在推行农业节水方面,国际上已取得的成就和经验可简要归结如下:

(1) 发展节水灌溉,首先实行渠道衬砌和管道输水。节水灌溉包括各个环节,是一项综合技术,但一般从解决输水过程中水的损失入手易见成效。目前,许多国家对输水渠道

多采用混凝土衬砌，如美国的混凝土渠道约占全部渠道长度的 52%，罗马尼亚占 70%~80%，意大利几乎全为混凝土渠道。近年来随着化学工业的发展和机械化施工技术的进步，膜料衬砌的比例日益增大。值得重视的是，灌溉渠系管道化在一些国家取得很大成效，已成为今后解决输水过程中水损失的最重要的发展趋向。目前，美国约有一半大型灌区实行了管道输水；日本土地有限，为减少渠道占地，非常重视推行管道输水，20 世纪 80 年代以来新建灌溉渠系的一半以上实现了管道化；以色列是一个缺水国家，其农业节水首先实行的是输水和配水系统的管道化；前苏联规定新灌区都要采用管道输水；罗马尼亚的灌溉系统中，农渠以下全部采用管道输水技术。由于重视了渠道防渗和管道输水，目前发达国家的渠系利用系数达到 0.7 左右，有的达到 0.9 以上。

(2) 采用先进的灌溉设备和灌溉技术。喷灌、微灌是当今世界上先进的灌水技术。20 世纪 60 年代以来，喷灌技术一直被作为机械化大面积解决灌溉问题的最主要技术，近年来又在多用途综合利用以及降低能耗、改进施水方式等方面取得新的突破。目前，欧洲国家 80% 的灌溉土地应用喷灌技术，美国、前苏联等也有较大面积。微灌技术是从 20 世纪 80 年代发展起来的，近 10 余年来增长很快，如以色列，除了大田粮食作物很少应用外，滴灌和微灌几乎应用到各类作物，取得显著效益。喷、微灌技术有很大的发展潜力，专家认为，其研究开发方向是进一步节能节水及综合利用。由于各种原因，目前全世界喷、微灌面积不足全部灌溉面积的 10%，美国的喷、微面积也仅占全部灌溉面积的一半，以色列以实施滴灌为主，可视为一个特例，今后发展先进的地面灌溉技术仍具有十分重要的意义。包括地下灌溉、波涌灌溉、隔行灌溉以及激光平地技术等应积极推行。

(3) 重视农艺节水技术。农艺节水技术不但是提高灌溉水利用率，而且是提高自然降水利用率和利用效率的重要措施之一，某种意义上讲，它是农业节水的基础。美国和前苏联等国家在这方面做了大量的研究，提出了许多行之有效的技术措施，如地面覆盖保墒技术、施入大量有机物增强土壤蓄水保水能力技术、进行作物布局调整减少高耗水作物等，都收到明显成效。我国农业有精耕细作习惯，在农艺节水方面积累了许多宝贵经验，近期推行的与地膜覆盖相结合的节水灌溉技术对缺水地区很有意义，对农田节水是一个新的推动。但总的看，近期国际上在农艺节水方面尚无新的重大进展。

(4) 劣质水资源化已成为现实。在水资源日趋紧缺的情况下，为了节约用水并减轻排水对环境造成的不良影响，开发利用包括生活污水、工业废水、微咸水在内的劣质水在一些国家已成为现实。例如，美国十分重视排水的再利用和城市生活污水的处理技术，1979 年城市污水再利用量为 9.4 亿 m^3 ，现达到 60 亿 m^3 以上，已建成 3400 多座污水再利用工程。印度 20 世纪 80 年代以来每年用于农田灌溉的污水占城市污水量的 50% 以上。日本、以色列的城市污水利用率也很高，以色列目前污水利用率已达 70% 以上，居世界首位，其中 $1/3$ 用于棉花等非食用作物的灌溉。利用微咸水作为灌溉补充水源近年来也受到普遍重视，如美国利用农田排水沟中排出的咸水灌溉棉花、小麦等作物取得成功，一些国家包括中国在内，利用地下咸水进行灌溉也取得好的效果。但这方面要谨慎行事，根据不同作物、土壤状况制定出严格的标准，并采取科学的灌水方法。总之，利用经处理的污水和微咸水进行农田灌溉将成为今后农业用水的重要水源之一。

(5) 在发展灌溉农业的同时，重视发展旱地农业。目前世界上大部分耕地靠降雨为水

源。在北美和西欧，年平均降水量大体与我国农区相当，但灌溉面积一般低于总耕地面积的 12%，因而他们的农业用水量低于总用水量的一半。这一状况是由多种因素形成的，包括粮食供应状况，种植结构（水稻面积少，不同于亚洲国家）特点，以及效益、环境因素等，但同时也是为了节约大量农业用水。如上所述，就世界范围而言，发展灌溉农业对解决人口增长所需要的粮食起了十分重要的作用，但应当看到，灌溉农业增产是应用综合技术的结果，除了保证水的充足供应外，其他技术条件（如种子、肥料、管理等）优于旱作也是重要因素。在当前技术条件下，在半湿润地区一般年份获得旱作高产是可以做到的，但在半干旱地区还存在许多困难。20 世纪 30 年代以来，美国在中西部地区所实施的保护性耕作技术，澳大利亚在其南部和西部推行的粮草轮作制度，以及新中国成立以来中国实行的基本农田建设，都对提高半干旱地区的农业生产起到了重要作用。另外，中东各国、墨西哥、印度等建立微型集水区、发展集水农业的经验也为干旱、半干旱地区农业的进一步发展带来了希望。总之，国际经验表明，加强旱地农业研究，不断提高旱地农业生产水平，应作为农业节水的一条重要途径。

另外，加强农业用水管理是成功实施农业节水的—个前提，包括法律法规制定、行政措施的加强、科学管理技术的采用和宣传教育的普及等，许多国家在这方面积累了十分宝贵的经验。

2. 若干国家的经验

(1) 以色列。以色列人口约 600 万，国土狭小，约一半土地属于干旱地区。全国年平均降水量 300 mm，北部降水量高，可达 700~800 mm，中部沿海平原 500 mm 左右，西南近一半国土低于 150 mm。以色列是一个严重缺水国家，年水资源总量 16 亿 m³，人均 300 m³，仅为世界平均的 1/30，约为我国平均的 1/8。在如此不利条件下，他们在水资源持续高效利用和发展农业生产方面取得了令世人瞩目的成就。在农业节水技术上，他们的具体做法是：

建设管道输水工程 以色列水资源时空分布不均 其北部水资源占全国水资源总量的 80%，可供灌溉土地仅占全国的 35%。为了解决南北供需不平衡问题，从 1953 年开始建设全国性水网工程，历时 11 年，共建 400 个扬水站，输水主管道与分管道长达 5 000 km，每年通过管道输水 13.5 亿 m³，占全国用水量的 60% 水的输送率达到 95% 北部水源主要是加利利湖及山区和地中海平原地区的地下蓄水层 加利利湖的水储量 43 亿 m³，是以色列最主要的水源。通过“北水南调”促进了南部平原地区农业的快速发展。

推行滴灌技术：以色列 20 世纪 60 年代创立的以滴灌为代表的微灌技术，是对传统灌溉技术的一次革命性突破，现已推向全世界。80 年代中期，以色列喷、微灌分别占灌溉面积的 2/3 和 1/3；90 年代初，喷、微灌分别占到总灌溉面积的 30% 和 70%。目前已有 80% 的灌溉农田应用滴灌。根据作物种类和土壤类型设置了科学的滴灌系统，使田间用水效率显著提高。由于管道输水和滴灌技术取得的成功，节约了大量农业用水，从而使以色列的灌溉面积从 16.5 万 hm² 增加到 25 万 hm²。

调整用水结构，利用工业废水：以色列目前农业用水占到总用水量的 75%，随着工业和城市发展势必进一步加剧供需矛盾，考虑到这一点，他们已在逐步压缩农业用水，努力开发对工业废水、城市污水及微碱水的利用，并加强了对海水淡化的研究。据实地考察

察了解到的情况，以色列目前经处理的工业废水和微碱水用于农业灌溉的分别为 2 亿 m^3 和 1 亿 m^3 ，计划到 2010 年，工业废水利用量将达到 5.4 亿 m^3 。60% 的生活污水也将用于灌溉，而淡水用于灌溉的量将从 11 亿 m^3 下降到 5.0 亿 m^3 ，即农业灌溉用水的一半左右将由经处理的劣质水来满足。看来，加重实现工业和城市废水的再利用已成为以色列 21 世纪初期进一步保持水资源平衡和高效持续利用的一个主攻目标。

以往在介绍以色列的农业节水经验时，多半强调其应用高新技术实施滴灌和农业工厂化方面的成就，这是他们经验的精华部分；另一方面，与此相结合的农业结构调整也是以色列农业节水经验的重要组成部分，应予以重视。目前以色列的土地利用状况是：耕地占 21.5%，永久牧场（植被稀疏的牧荒地）40.24%，森林和林地 5.71%，其他 32.55%，这反映了干旱半干旱地区土地利用的一般特征。在占总土地面积 21.5% 即 44 万 hm^2 耕地中，灌溉面积占 58.4%，其余为旱地。近年来，耕地中的蔬菜、果树、花卉等高收入经济植物发展较快，已占到耕种面积的 31%。另外我们通常作为经济作物的棉花、向日葵、花生等种植面积也占到耕种面积的 24%，两者加起来已达到全部耕种面积的 55%。这一经调整的土地利用结构适合以色列的现状及国际市场需求，有力地支撑了其农业节水技术的推行与农业现代化。以色列整个农业产值约 55 亿美元，其中种植业（包括果木）占 36.9%、畜牧业占 63.1%，符合干旱半干旱地区农业经营的一般规律。

以色列推行农业节水的另一条成功经验是重视法规的制定。以色列虽然是一个私人经济十分发达的国家，但却将水资源的管理和使用权牢牢地控制在国家手中，即使一些公民拥有土地所有权，该地的水资源仍归国家，这一点已为广大公众所接受。以色列先后制定了《水法》、《水计量法》、《水井控制法》等一系列法规并严格执行。另外设立国家水委员会，统一管理，实行水资源开发许可证和使用配额制。这些管理措施的推行保证了以色列农业节水目标的顺利实现。

(2) 美国。美国是一个高度市场化的国家，市场驱动机制无所不在，包括水资源的管理在内。据中国工程院水资源考察团 2001 年的报告，在美国，水资源属于州所有，拥有河流经过的土地所有者有可继承的水权，水权可以交易，也可以跨地区购置。美国的水资源实行国家级分管，地方级综合管理的体制。联邦政府对水资源管理是一种分段管理的体制，如地表水和地下水由两个政府部门管理，涉及有关水管理部门高达 5 个，但是地方政府实行的是水的综合管理，基本管理单位是水务局，包括地表、地下、废水、生态用水、城市用水、工业用水等。水务局不是一个政府部门，而是一个公众代理机构，由自愿加入的市级和社区的水务机构组成。水资源市场机制的运营促进了产业结构的调整，如由于农田灌溉用水成本增加使灌溉用水逐渐减少，工业和城市用水比例增加，农业结构也向高产值方向调整。从 1980 年到 1995 年 15 年间，全国总用水量（开发的供水量）从 8.70 亿 m^3/d 下降到 7.95 亿 m^3/d ，主要是灌溉用水与工业取水的下降，而城乡生活用水则一直缓慢增加。目前，美国灌溉用水仍占总用水量的 66%，90% 的工业和生活污水得到了处理，而且处理后的污水得到了合理利用。

美国中西部大平原属于缺水的半干旱地区，也是主要的农业区，谷类作物灌溉面积约占谷类作物总种植面积的 12%。该地区在灌溉地节约用水和旱地高效用水方面取得了许多成功经验，可归结为以下几点：

应用高效能灌水技术。如利用激光调控平整灌溉地，将激光发生器安置在农田中的固定点，平地机上装有激光接受器，这样就可以在很高的精确度下（上下几毫米之差）将任何坡度的一大块土地整平，或整成各种坡度。这一技术对任何采用漫灌、沟灌的地方都可以极大地提高效率，节省用水及提高产量。再如，设计出自动喷灌系统，其中最常见的是中心喷灌系统，主要用于玉米和苜蓿，其特点是采用新式的喷嘴，将水喷在作物群体叶部以下，因而大量减少了蒸发损失。该系统价格较昂贵，不仅可以用于水灌溉，还能有效地用于施肥、喷药等。波涌灌溉，又称间歇灌溉，是近 10 余年来兴起的一种适于旱作农业的节水节能型灌水方法，基本做法是放水与停水交替进行，目前已在美国广泛推广应用，它具有水流推进速度快、灌水均匀、省水省时、深层渗漏少、田间水利用率高，并且可以有效利用小定额进行灌水的优点，因而被认为是当代地面灌水技术研究的一个突破，是先进的地面灌水技术。目前，波涌灌溉配套设备已得到解决，为推行该技术，美国农业部曾颁布《国家灌溉指南技术要点之五——波涌灌溉田间指南》。

推行有限灌溉制度。20 世纪 80 年代初期，美国一些研究者为适应生产者降低成本的要求和地下水资源日趋减少的状况，为半干旱地区提供了一种新的旱地栽培与有限供水相结合的作物管理制度——有限灌溉旱地制度，并得以在中西部大平原实施，收到良好效果。如在大平原降水量 480 mm 地区，连续实行旱地耕作是可行的，但如在各类作物授粉期或籽粒灌浆初期进行 150 mm 的补充灌溉则可使产量提高 60%~120%，灌水利用效率高出充分灌溉农田的 1 倍以上，达到了节水与增产的双重目的。有限灌溉制度的建立具有普遍意义，但同时应强调因地制宜，力求精确、及时。

实行夏闲制和保护耕作。美国大平原的旱地耕作是世界闻名的，最成功的两项是：夏季休闲和保护耕作。夏闲耕作制的主要形式是将两年的降雨用于一季作物，即头一年的降雨蓄集在无杂草土壤中，用于第二年在同一块田中种植作物。但实际情况要复杂得多，因为蓄集足够一季作物需要的水量的时间随降水量、除草方式和耕作方式的不同而异，因而休闲的长短就不同，不一定总是一年，有些地方可施行三年两熟，或是一年一熟。有学者认为，在美国大平原年降水量 500 mm 地区，夏闲制是整个文明的基石，在那些无灌溉地区，两年只种一季作物，但却变成一个真正的粮仓。保护耕作是与夏闲制结合实施的，它包括两项基本内容：少耕、免耕和残茬、秸秆覆盖。近几十年来，美国大平原耕作技术的发展趋势是：由多耕到少耕，由表层松土覆盖到残茬、秸秆覆盖，由机械除草到化学除草，使保水效果不断增加，旱作产量逐步提高。据典型区观测结果：耕作次数已由 1930 年前的 7~10 次，减少到 0~1 次，休闲地蓄水量从 102 mm 增加到 183 mm，由占降水量的 19% 提高到 40% 以上，小麦产量从 1.07 t/hm² 增加到 2.69 t/hm²。美国在半干旱地区所实行的保护性耕作制度已为世界许多国家同类地区所采用，取得良好效果。

(3) 澳大利亚。澳大利亚国土面积 760 万 km²，人均水资源量较丰富，达 18 743 m³，但由于国土辽阔，且地处热带、亚热带地区，因此又是相对缺水的国家。该国平均年降水量约为 460 mm，但由于地区间、年际间及年内分布不均，所以水分不足是其农业发展的主要限制因素。据焦爱华等（2000）考察资料，1995~1996 年，澳大利亚水资源利用情况为：畜牧业用水占 35%、种植业用水占 27%~28%、工业用水占 26%、城市用水占 12%。澳大利亚在水管理和农业节水方面有着丰富的经验，资料所限，列举以下两点：

在水管理方面，强调流域管理是澳大利亚水资源管理的一个重要特色。如墨累—达令河流域是其最大的流域，该流域包括三个州，严重的水资源矛盾迫使他们必须共商水资源治理开发问题，早在 1902 年就达成分水协议。经过长期发展，1993 年三州政府通过流域法案，进行了有效的统一规划和管理，使流域水资源得到合理的开发和利用，其农业产值占到全国农业总产值的 41%，成为澳大利亚经济最发达的地区之一。在灌溉工程管理方面，该国已逐步实施由政府管理转为私人企业管理，并计划通过 15 年的努力，使工程具备独立生存的能力。在水价问题上，澳大利亚政府要求供水水价能回收供水的实际成本，近年来水价平均每年涨幅在 10% 左右。另外，排污基本服务费较用水基本服务费高出许多，说明他们十分注重环境保护和水资源利用的可持续性。

澳大利亚十分重视旱作农业经营，特别是在降水量 300~600 mm 地区，南澳、西澳小麦—养羊业地带所取得的成就为世界所瞩目。该地区旱作农业的基本特点是：单位面积产出较低，整体生产效益较高，土地物质循环强度低，降水资源得到合理利用，并保持了基本平衡，因而使农业生产走上了可持续发展之路。这是一种符合澳大利亚自然和社会经济条件的选择。具体做法是：全部实行一年一作制，而且还存在相当面积的全年长休闲地，其中最成功的技术是采用小麦与一年生可隔年自繁的苜蓿实行轮作，并对苜蓿施用磷肥。他们认为，正是这两项技术措施“挽救了南澳的农业”。近年来重视了对氮肥的施用，同时结合推行保护性耕作及扩大豆科作物的种植面积，使单产有了提高，但为了维持水土资源的可持续利用及较高的产投比，单产的提高仅作为其农业经营的目标之一。

另外值得一提的是，长期以来澳大利亚的农业和生物学方面的科技工作者将农业高效用水和培育抗旱节水品种作为一个十分重要的研究方向，如在旱区农作制选择、农业非充分灌溉理论与高新技术研究及节水抗旱品种选育等方面都已取得显著成就，并已应用于生产。

二、我国节水农业发展概况

1. 发展历程

1949 年新中国成立以来，我国大力开发水资源，发展农田灌溉，取得了举世瞩目的成就。2001 年出版的《中国农业需水与节水高效农业建设》一书，将 1949 年以后我国农田灌溉的发展划分为若干个阶段。总体上，20 世纪 50 年代至 20 世纪 70 年代末，农田灌溉发展以外延为主，灌溉面积年均增加 100 万 hm^2 以上。围绕提高灌溉用水效率，主要进行了计划用水、渠道防渗、改进沟畦灌溉等工作。在此期间，建立了一大批灌溉试验站，提出了主要农作物的灌溉制度，为灌溉工程设计、灌区灌溉管理、编制计划用水方案等提供了依据。但在这一时期，节水技术研究范围较窄，推广规模不大，灌溉管理比较粗放，用水效率较低。到 20 世纪 70 年代末，估算灌溉水利用系数为 0.3 左右，平均每公顷灌溉用水量约为 7 950 m^3 ，每立方米水量生产粮食为 0.6kg 左右。20 世纪 80 年代，一个时期内由于水利建设投入资金大量减少，致使工程老化失修，效益衰减，全国灌溉面积减少了 60 万 hm^2 。但由于工农业用水逐年增加，干旱缺水对农业生产的威胁增大，加之经济发达地区传统农业向现代农业转变的进程加快，对灌溉提出了新的、更高的要求，节水灌溉逐渐引起了重视。全国普遍推行了泵站与机井节能节水技术改造，制定颁布了一系列有利于节水管理的办法；研究推广了喷灌、微灌技术；开展了低压管道输水灌溉技术的研究与

推广；农民在生产实践中创造的坐水种和膜上灌技术得到逐步完善，在一些地区得到了大面积推广。不足之处是，节水灌溉技术的研究与推广多偏重于单项技术，先进的灌溉方法（如喷灌、微灌等）发展不快。到 20 世纪 80 年代末，估算灌溉水利用系数为 0.35 左右。

在此应着重指出的是，在 20 世纪 80 年代期间，我国北方旱作农业生产有了快速发展，10 年间单产水平提高了约 1 倍，这主要是由于在兴建基本农田的基础上加大化肥使用量所取得的成效，按试验结果进行估算，在此期间所采取的旱地综合措施中化肥对增产的贡献占到了一半左右。根据我们研究结果，在黄土高原半干旱地区低产条件下合理增施化肥的主要作用在于提高了对土壤水的利用率和利用效率，因而得出“产量提高 1 倍的主要限制因素是肥，而不是降水不足”的结论。在此基础上产量要进一步提高，正常的土壤供水已不能满足需要，解决的办法有两条：一是广泛推行覆盖技术，二是通过雨水集流技术发展集雨补灌农业。实践证明，这两项技术在 20 世纪 90 年代中期以后对我国北方旱地农业发展起到了积极推动作用。以上简述试图说明一个问题，即：我国北方地区的降水生产潜力还未得到充分发挥，在推行节水灌溉的同时决不能忽视旱地农业建设，就是在灌溉农业中也要首先做到对自然降水的充分有效利用。因而提出，也应将旱作农业作为节水农业的一个重要组成部分，但在一个时期内学术界对此存在不同看法。目前，观点已基本趋于一致。

到 20 世纪 90 年代，节水灌溉进入了一个新的发展阶段。“九五”期间，节水农业技术的研究与示范被列为国家科技攻关项目，从节水灌溉技术、节水灌溉制度、水资源合理利用、节水灌溉设备等方面进行了深入与综合研究；“十五”开始后又将“现代节水农业技术体系及新产品研究与开发”列为国家重大专项课题。国家加大了扶持力度，提供了大量专项节水贴息贷款，建设了一批节水增产重点县，进行了大型灌区续建配套与节水改造。1998 年，全国节水灌溉工程面积达到 1533.3 万 hm^2 ，灌溉水利用系数达到了 0.4~0.45。在中国共产党第十五届三中全会作出的《中共中央关于农业和农村工作若干重大问题的决定》中明确提出“大力发展节水农业，把推广节水灌溉作为一项革命性措施来抓”的要求，目前正在根据这一要求编制和实施“全国农业节水发展纲要”，有理由相信，在 21 世纪我国的农业节水事业将步入一个新的关键时期，必将取得更快更有效的发展。

2. 成就与经验

目前全国 1.33 亿 hm^2 （20 亿亩）左右的耕地面积中，水地、水浇地有 0.53 亿 hm^2 （8.2 亿亩）约占 40%，而生产的粮食却占到全国粮食总产量的 2/3。到 1998 年，节水灌溉工程面积已达到 1553 万 hm^2 ，主要包括渠道防渗衬砌的农田面积 866 万 hm^2 ，管道输水灌溉面积 513 万 hm^2 ，喷、滴灌面积 153 万 hm^2 。另外，农业措施对农田节水也起了重要作用，不完全统计已达到 1300 万 hm^2 。目前，我国农田灌溉用水量占总用水量的比重，已由新中国成立初期的 92% 下降至 70% 左右，单位面积用水量从 7410 m^3/hm^2 回落到 6885 m^3/hm^2 ，平均灌溉水利用率从不足 30% 提高到 43%，每立方米灌溉水生产的粮食也有明显提高，达到 1.1 kg。

在实现节水增产的同时，在科学技术研究与运用上也取得了很大成绩。近 20 年来，特别是在“九五”以后，我国在大中型灌区节水改造、节水灌溉与旱作节水示范、节水农

业前沿与关键技术研究、节水农业关键设备与重大产品研发及产业化等方面取得了较大进展；“十五”期间，在科技部组织的节水农业重大专项把节水农业技术研究推进到了新的水平。尤其近 5 年来，我国在节水农业领域实施了一系列重大研发项目，提高了我国节水农业的应用基础理论研究水平，推广了先进实用的技术，开发出一系列节水农业新产品与新材料，并实现了产业化生产。

在节水农业应用基础及前沿与关键技术领域，较为系统地揭示了土壤—植物—大气连续体水分、养分迁移规律和调控理论，以及作物非充分灌溉理论与模式，特别是在农田水分转化规律、根冠信息传递与信号振荡、水分养分传输动态模拟、作物需水规律与计算模型及抗旱节水机理等方面取得了重大的突破，为节水农业技术的研发提供了有力的基础理论支持。取得了水资源的合理开发利用技术、高效输配水技术、田间节水灌溉技术、灌溉用水管理技术、农田高效用水技术、保水保肥的农田耕作制度、节水抗旱作物栽培管理技术、作物抗旱特性改良与利用技术等一系列科技成果，并在农业生产中加以组合应用，产生了明显的节水增产效益。

在节水农业关键设备与重大产品研发及产业化方面取得的一批科技成果已完成产业化开发，批量生产了行走式局部施灌机、旱地蓄水保墒耕作机具、轻小型喷灌机组、喷微灌设备、波涌灌溉设备、农田量水设备、各类输水专用管材和管件、防渗材料与防渗施工机械、抗旱节水生化制剂、液体地膜等，为节水农业技术的规模化应用提供了一定的技术支撑。

在节水农业技术体系集成模式与示范方面，在水资源合理开发利用、高效输配水技术、田间节水灌溉技术、用水管理技术、农田高效用水技术、保水保肥的耕作制度、作物抗旱特性改善和利用技术等一系列技术取得的科技成果基础上，初步建立了节水农业技术集成体系，并在农业生产实际中得到了大面积应用，产生了明显的节水增产效果。

近 5 年来，我国在节水农业领域实施了一系列重大研发项目，主要包括国家重大科技专项、国家科技重点攻关项目、国家自然科学基金重大项目、国家重大科技产业工程项目等。这些项目的开展或完成对提高我国节水农业的应用基础理论研究水平、推广先进实用技术、开发节水农业新产品与新材料并实现产业化起到了非常重要的推动与促进作用，推动了节水农业领域的科技进步，使其形成了鲜明的特色和一定的优势，主要表现为：

(1) 大田作物非充分灌溉、调亏灌溉及作物控制性根系分区交替灌溉理论与技术研究领域居国际领先地位，并在生产实际中得到了大面积的应用，取得了明显的节水高产效果，对推动节水农业的发展起到了重要的作用。20 世纪 80 年代以后，我国学者率先开展了水稻水分生产函数与非充分灌溉制度的研究，揭示了水稻在水分胁迫条件下蒸发蒸腾量“滞后”及水稻在生育的早、中期受旱再恢复灌溉后，耗水与植株生长“反弹”的机理，并提出了充分利用此效应的节水、丰产原理与方法。系统研究了水稻缺水敏感指数的时空变异规律。“水稻浅、湿、薄、晒节水灌溉技术推广”、“水稻水分生产函数及水稻非充分灌溉原理研究”、“水稻控制灌溉技术”等成果在广西、江苏、安徽、湖北、河北、宁夏等地得到了成功的应用，其推广的规模和取得的效益在国际上还少见。

华北、西北等地科研单位通过田间试验观测和优化分析，研究提出以节水增产为目标的冬小麦优化灌溉制度，按照作物生长期灌水的最佳效应，以提高单位水的生产效率为目标，从灌水次数和灌水量上进行调控，尽可能减少非关键性的灌水次数与灌水量，达到既

省水又增产的目的。这种优化后的冬小麦灌溉制度，比常规每公顷节水 $1\ 200\sim 1\ 500\text{m}^3$ ，是缓解北方冬小麦产区水资源短缺的重要途径之一。

调亏灌溉 (regulated deficit irrigation, 即 RDI) 是国际上 20 世纪 70 年代中后期以来出现的一种新的节水灌溉技术，其基本思想就是基于作物的生理生化作用受到遗传特性或生长激素的影响，在作物生长发育的某些阶段主动地施加一定的水分胁迫（即人为地让作物经受适度的缺水锻炼），从而影响其光合产物向不同组织器官的分配，达到提高其经济产量而舍弃营养器官的生长量及有机合成物的总量，同时因营养生长减少还可提高作物种植密度，提高总产量，减少棉花、果树等作物的剪枝工作量，改善产品品质。国际上有关调亏灌溉的研究主要是针对果树和番茄等蔬菜作物，对大田作物的研究较少。我国学者探索了大田作物调亏灌溉技术的节水增产机理，总结出了一套适合不同地区条件采用的大田调亏灌溉综合技术模式。建立的玉米、小麦、棉花等大田作物的最佳调亏灌溉综合技术体系，已在山西、陕西、甘肃、新疆、河北等地大面积推广应用。

我国科技人员提出的控制性作物根系分区交替灌溉 (controlled alternate partial root-zone irrigation, APRI) 节水新技术体系，强调交替控制部分根系区域干燥、部分根系区域湿润，以利于交替地使不同区域的根系经受一定程度的水分胁迫锻炼，刺激根系吸收补偿功能，诱导作物部分根系处于水分胁迫时的木质部汁液 ABA 浓度的升高，以调节气孔保持最适宜开度，达到以不牺牲作物光合产物积累、大量减少其奢侈蒸腾耗水、提高作物水分利用效率的目的。同时，还可减少再次灌水间隙期间裸间土壤湿润面积，减少裸间蒸发损失；因湿润区向干燥区的侧向水分运动而减小深层渗漏。控制性作物根系分区交替灌溉在田间可通过水平和垂直方向交替给局部根区供水来实现，主要适于果树和宽行作物及蔬菜等。该项成果是多学科相关领域交叉渗透后产生的新生长点，突破了传统的作物用水方式和节水理念，实现了节水理论与技术的创新，促进了从传统的均匀灌水或固定区域局部灌水方式走出来，由仅考虑时间上的调亏或水量的优化分配转变为把根系空间湿润方式与作物节水联系起来，为旱区农业节水开辟了新的有效途径。该成果大面积应用后取得了明显的节水效果，丰富与发展了农业节水的理论与实践，对推动农业节水研究将会产生重要的作用。辣椒根系分区交替滴灌比固定局部区域滴灌在灌水增加不显著的条件下水分利用效率增加 15.82%；与两边根区同时滴灌的减少灌水 40.91%，水分利用效率增加 69.33%。垂向根系分区交替灌溉玉米水分利用效率比常规单纯地下灌溉和地表灌溉平均增加 11.87% 和 19.02%。控制性玉米根系分区隔沟交替灌溉方式，经在甘肃民勤沙漠绿洲区年降水量 110 mm 的地区推广应用，玉米生育期灌溉定额仅为 $2\ 100\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ，作物水分生产效率达 $2.93\ \text{kg}/\text{m}^3$ （是常规畦灌的 1.7 倍，常规沟灌的 1.3 倍），产量达 $12\ 750\sim 13\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，节水 40% 左右。

(2) 节水灌溉新技术与新产品研发能力提升较快，在干旱区膜下滴灌设备开发和应用技术体系、行走式抗旱节水机具与轻小型喷灌机组、低压管道输水灌溉技术研究与应用等领域形成了鲜明的特色，为构建具有中国特色的节水农业技术体系提供了新的内容。在节水灌溉技术与产品研发方面，我国自行研制的各种喷灌机具、微灌设备、滴灌材料等，已广泛应用于生产。喷灌设备的系列化、标准化更加完善，大中小型喷灌机组已形成系列，管材、管件配套齐全，各种形式的喷灌系统设计、施工、运行管理已积累了整套比较成熟的技术。

现在喷灌设备的制造,全国已有一批定点生产厂家,并建成了产品质量监测站,对质量进行监控。风力对喷灌的影响、坡地喷灌的技术参数等项研究,也取得了新成果。轻小型喷灌机组、人工移动式小型喷灌机组、移动式抗旱节水机具等形成了鲜明的特色。喷灌技术与设备成果已得到了广泛的应用,到 2000 年底全国喷灌面积累计为 245.9 万 hm^2 ,其中,仅“九五”期间就新发展 145 万 hm^2 ,使喷灌面积比重由 1995 年占节水灌溉工程面积的 8.12% 增长到 16.87%,5 年增加了 8.75 个百分点。

自 20 世纪 90 年代中期以来,我国开展了以坐水种为特色的播种机械的研究,开发了穴播穴灌、条播条灌机械设备,解决了春播出苗的困难。另外,国内微小型行走机具近年来得到了一定的发展,主要是由农机厂生产的小型拖拉机拖动的简易设备。

微灌设备产品研制成绩显著,形成了灌水器、管材与管件、净化过滤设备、施肥设备、控制阀及安全阀等五大类设备产品系列,配套比较齐全,品种规格较多。灌水器的品种规格不断增加,由单一的滴头发展到微灌管(带)、微喷头、小管出流器、渗灌管等产品,部分产品初步形成系列;管材、管件的材质和制造工艺有较大改进和提高,品种规格大幅度增加,比较齐全;净化设备种类和品种规格有了较大进展,由单一的筛网式过滤器,发展到叠片式、离心式水砂分离器、砂石过滤器等产品;施肥设备产品种类及品种规格不断增加,由单一的压差式施肥罐发展到文丘里施肥器和注入式施肥装置等产品;控制调节阀基本配套;微灌工程用自动化控制装置研制成功并开始应用。微灌工程管网计算与设计方法研究有所突破。特别是微灌工程设计软件成果,不仅提高了我国微灌工程设计质量水平和工作效率,而且科学合理地降低了工程投资。微灌技术应用研究与设备研制成果得到了较大面积应用推广,到 2000 年底全国微灌面积已达 23.6 万 hm^2 (其中“九五”期间新发展 14.53 万 hm^2),取得了较大的经济效益和社会效益。

管道化灌溉技术有新的发展,低压管道输水灌溉技术经过攻关研究和试验示范,其技术成果获得部门和国家的奖励。这项技术从规划、设计到设备制造,已形成系列,其中关键技术设备,如薄壁塑料管、双壁塑料管及混凝土管现场浇筑制管机具的研制,都具有开创性。从 1981 年来的 20 多在我国得到了大面积的发展,到 2000 年底全国灌溉用输水管道累计长度约为 88.5 万 km ,灌溉面积已达 590 万 hm^2 。主要分布在黄河以北地区的河北、山东、河南、北京、天津等平原井灌区和部分稻田灌区,近几年山西、内蒙古、陕西、新疆等也有了较大面积的发展。

新疆在地膜覆盖作物上进行膜上灌溉试验,取得了节水、增产的效果,目前已大面积推广应用;膜下滴灌也作为灌溉技术的一场革命,引起学术界和政府部门的高度重视。膜下滴灌目前已在新疆干旱区应用 10.67 万 hm^2 。

(3) 雨水集蓄利用技术发展较快,已初步形成了具有中国特色的雨水集蓄利用技术体系,是我国干旱缺水地区人民改善农业生产条件,提高粮食单产,保护生态环境,发展经济脱贫致富的重要手段。我国从 20 世纪 50 年代开始,人们就利用窖水点浇玉米、蔬菜等,突破了原来只用窖水作为生活饮用水的观念。在 80 年代后期,这一思路得到迅速发展,人们将收集的雨水用于发展庭院经济和大田作物需水关键期的补充灌溉。1988 年以来,甘肃省在中东部干旱缺水地区开展了雨水利用试验示范研究,并将其成果进行推广;1995 年在甘肃干旱半干旱地区实施了“121 雨水集流工程”,1997 年制定并出版了《甘肃

省雨水集蓄利用工程技术标准》。同一时期，宁南山区实施“窑窖农业”，内蒙古自治区在准格尔旗和清水河县进行了“112 集雨节水灌溉工程”试验示范研究，陕西、山西、河南、河北、江苏、浙江、贵州等省亦进行了雨水利用试验研究。“九五”期间，国家攻关计划中设立了“人工汇集雨水高效利用技术”和“集雨节水高效农业产业化发展研究”课题，并在国家重大科技产业工程项目中设立“半干旱山区天然降水高效富集利用技术集成与创新研究”课题，在雨水集蓄利用系统中集流面的集雨效率、蓄水工程的形式和结构、雨水集蓄系统的应用模式、水质问题、节水灌溉方式、非充分灌溉和有限灌溉理论的研究和应用及灌溉制度和效益等问题上都取得了大量成果。2001 年我国正式编制出版了国家行业标准《雨水集蓄利用工程技术规范》（SL267—2001）。这是世界上在此方面的第一部正式技术法规。

据有关部门的统计，从 20 世纪 80 年代后期到目前为止，全国已建成水窖、水池、小塘坝等微型工程 1 200 万处，蓄水 160 亿 m^3 ，初步解决 3 600 万人的饮用水问题，为近 266.7 万 hm^2 旱作农田提供了补充灌溉水源，使近 3 000 万人有了较稳定的水利条件，开始摆脱干旱缺水的束缚和困扰。这项技术已经产生了显著的社会、经济和环境效益。目前，经过数十年的发展，雨水集蓄利用已不单单是一项普通的微型水利工程，而成为干旱缺水地区人民改善农业生产条件、提高粮食单产、保护生态环境、发展经济脱贫致富的重要手段。

我国雨水集蓄利用工程发展速度极快，规模空前。我国自 20 世纪 80 年代末期开始对雨水集蓄利用技术进行系统研究，大致经历了试验研究、试点示范、推广应用三个阶段。雨水利用方式主要以就地、叠加和异地利用为主，其中异地利用方式在近年来占主导地位。比较常见的有“集流场+存储设施+利用方式”所组合而成的集流灌溉系统，而集流场目前最常见的则是水泥路面、柏油马路，以及其他各种硬化地面。我国的雨水利用，随着经济发展和人们生活水平提高，开始由传统的雨水利用技术，向高技术的应用和工业化生产发展。在集雨材料方面，更加注重环保型材料和生物材料的利用。在储水技术与材料方面，强调现代工业技术的应用与产业化生产。雨水利用技术，以局部集蓄与局部利用为主，强调因地制宜和多元化发展，在对雨水收集利用的同时，更加强调水环境的协调和可持续发展，特别关注上下游水资源的协调与平衡问题。

我国农业节水所取得的成就还表现在认识上的提高和观念上的转变。例如，从应用单一的工程节水技术发展运用到运用综合技术，从只注重灌区节水发展到灌区与旱地并重，从重视技术的改进到更加重视节水管理及法规的制定，以充分供水为依据建立的灌溉制度开始向非充分灌溉方向转变。农业节水无疑是国家的战略目标，如何将国家目标转换为农民目标、群众目标，以及如何与社会主义市场经济相适应，从而建立起符合中国民情的农业节水体系等方面，也做了许多有益的探索。所有这些将对我国未来水资源的合理利用及节水高效农业的形成产生深远影响。

国家的高度重视和农民的积极参与是我国节水农业取得成就的根本原因。在实施过程中，从科学技术角度获得了许多有益的经验与启示。主要包括：节水灌溉首先应充分利用当地水资源，主要指天然降水，也包括浅层地下水及工业和城镇污水的再利用；节水灌溉工程建设的重点在渠灌区，这是由于渠灌区占到全部灌溉面积的 75%，渠系渗漏

损失水量大，田间工程不配套，灌水方法落后，改造成为渠井结合的灌溉方式后可充分发挥其潜力；目前地面灌溉面积占到总灌溉面积的 97%，要积极发展喷灌和滴灌，但这是有条件的，应主要用于高附加值的作物，微灌作为一种局部灌溉适用于干旱缺水地区，膜下滴灌在新疆棉花产区得到大面积发展是一次突破；农业节水技术在减少农田水分蒸腾蒸发和提高产量方面发挥直接作用，潜力有待挖掘，应加强研究与推行；近期节水灌溉发展的重点地区应放在工农业生产发达、人口较集中、水资源又最为紧缺的华北（包括山东等）以及干旱缺水又具发展潜力的西北；⑥在旱作农业方面，以基本农田建设和培肥地力为基础的成功经验仍应继续坚持，同时大力发展保水耕作技术、覆盖技术及雨水集蓄利用技术是当前发展旱作农业节水技术的重点，在干旱缺水地区建立利于高效利用有限水资源的作物布局和种植制度方面也有成功经验，应加以倡导。

3. 问题与瓶颈

在总结成绩的同时也应看到存在的问题。首先，与发达国家相比，在灌溉水利用率和生产效率及作物本身水分利用效率方面都还存在较大的差距，农业用水上的浪费还相当严重。先进灌溉技术应用的比例还很小，灌溉材料设备生产规模小、缺乏龙头企业，市场处于无序状态，质量有待提高。在水资源紧缺情况下水污染未得到有效治理，工业和城市废水回收利用率低，加剧了用水紧张程度。在节水管理和建立有关法律法规方面已引起重视，还需认真落实。农业节水不仅是一个技术问题，也是一个社会和经济问题，是一项系统工程。中国农业大学石元春院士最近提出进一步搞好农业节水必须解决好两个问题（科技日报，2002-06-17）：一个是突出农民的主体地位和节水与增收的互通；一个是突出节水科技产业和技术的改进与突破。是很有道理的。另外，节水农业的科技行动应重视核心科技问题的突破和规范化节水技术体系的建立，不要过于追求节水指标和示范面积，也要避免对已有知识和技术搞重复研究。

我国节水农业领域研究的基础条件还比较落后，全国性和区域性的试验研究网络还未形成，发达国家特别注重对诸如作物需水量、灌溉水利用系数等基本数据的连续、定位观测和积累，有的试验连续坚持几十年，而我国在这方面还很不够。

我国的节水农业技术虽然具备一定的基础积累，取得了一些在生产中发挥重要作用的科技成果，但仍存在许多重大的技术瓶颈，尚不能为建设现代节水高效农业提供强有力的支撑，主要表现为：

(1) 缺乏节水农业发展的基础数据资料积累和对农业用水状况的有效监测与控制。我国对农业节水的应用基础研究未给予足够重视，农业节水工作还缺乏科学的应用基础理论指导和前沿技术储备。对诸如节水引起的区域水循环与水平衡改变是否会加剧西北旱区内陆河流域下游的环境退化？喷灌节水还是浪费水？渠道防渗标准是否越高越好？如何通过作物区域耗水分异规律科学确定区域节水型农作结构？等等，与农业和生态节水有关的问题还缺少建立在科学试验基础上的探索；对不同区域的灌溉水利用率、渠系水利用率、田间水利用率、降水有效利用率、作物水分利用效率等参数还缺少准确的确定方法和多年的基础数据积累；特别是对不同植物群体在不同水文年份、不同灌水技术条件和不同的亏水灌溉水平下的耗水规律及区域变化还缺少科学数据的积累。由于没有有效的农业用水状况监测体系，对不同地区、不同灌区的用水水平和节水状况不能有效监督和控制。上