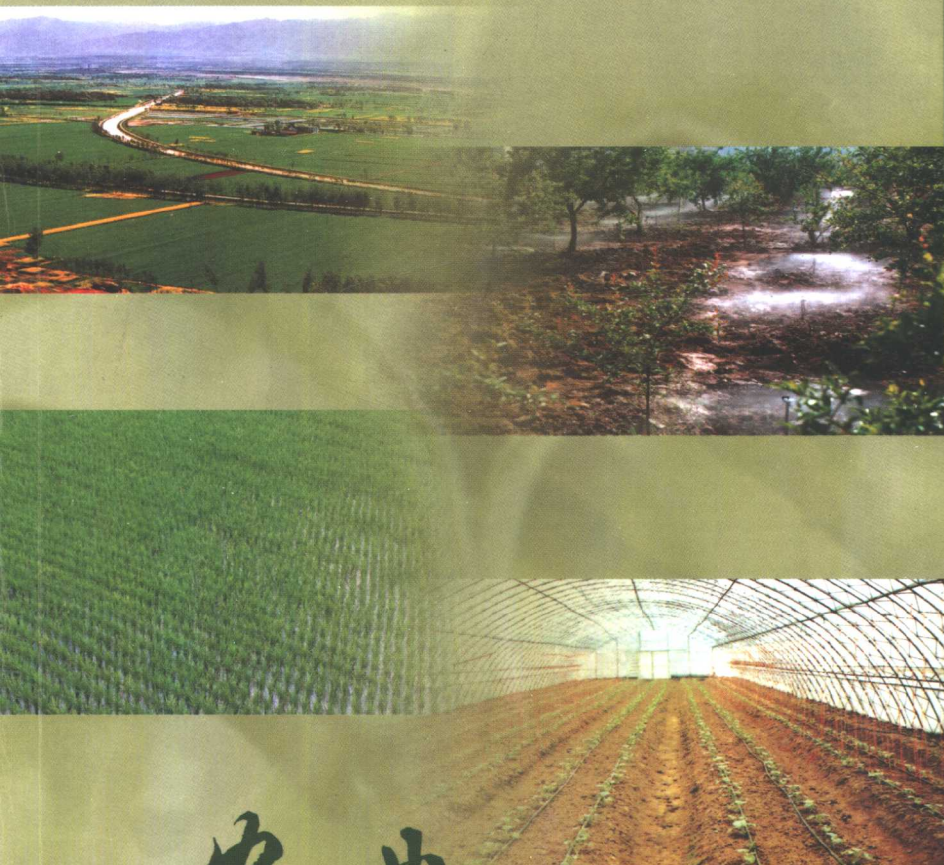




农业非工程 节水技术

杜贞栋 谷维龙 王华忠 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

农业非工程节水技术

杜贞栋 谷维龙 王华忠 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

农业非工程节水技术/杜贞栋等著. —北京: 中国水利水电出版社, 2004

ISBN 7-5084-2099-3

I. 农... II. 杜... III. 农业—节约用水—研究
IV. S27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 062282 号

书 名	农业非工程节水技术
作 者	杜贞栋 谷维龙 王华忠 等 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 7 印张 192 千字
版 次	2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—3600 册
定 价	18.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

序

进入 21 世纪，水资源紧缺、洪涝灾害、水环境恶化三大问题仍然十分突出，水资源紧缺已经成为制约山东省国民经济发展的“瓶颈”，缓解水资源供需矛盾，一靠开源，二靠节流，农业节水是节流的重中之重，是节水型社会建设的重点。胡锦涛总书记在 2004 年中央人口资源环境座谈会上强调：要把节水作为一项必须长期坚持的战略方针，把节水工作贯穿于国民经济发展和群众生产生活的全过程。温家宝总理也指出：要大力发展农业节水灌溉，加快灌区改造，切实提高灌溉用水利用效率。山东省农业节水发展迅速，截至 2002 年，共发展节水灌溉面积 173.3 万 hm^2 ，有效地缓解了水资源供需矛盾，促进了区域水资源的优化配置和经济可持续发展。关于农业节水技术的研究，山东省水利科技人员一直在不断地探索，不仅对地面灌水技术进行了系统研究，而且对喷灌、微灌等高效节水技术进行了研究；不仅对工程技术进行全面研究，而且对非工程节水措施进行了研究，取得了一系列高

水平的科研成果，如“农业节水模式的研究与示范”研究成果获得国家科技进步二等奖，“水库灌区节水灌溉管理模式研究与应用”研究成果获省科技进步一等奖，是山东省“十大”科技成果之一。

农业节水是一个完整的节水技术体系，农业非工程节水技术是农业节水技术体系的重要组成部分，研究和应用农业非工程节水技术，有利于提高水分生产率，对缓解山东省水资源供需矛盾，促进山东省水利工作树立和全面落实科学的发展观，促进山东省经济可持续发展有重要意义。本书就是基于这种背景下完成的，在调研国内外农业节水非工程节水技术的同时，既认真借鉴了前人的成果，又展示了山东省近几年的节水灌溉管理和农艺节水研究新成果。我们相信，本书的出版，对指导山东省及其类似地区的农业节水的研究和推广有重要现实意义，并将进一步推动山东省农业综合节水技术的发展。

陈继峰
2004年4月

前言

进入 21 世纪，随着我国国民经济的快速发展，水资源紧缺引起了全社会的广泛关注和高度重视，农业是用水大户，大力发展农业节水是缓解水资源供需矛盾的有效途径。党的十五届三中全会提出：“要大力发展节水农业，把推广节水灌溉作为一项革命性措施来抓。”这充分说明了发展农业节水的重要性、必要性和紧迫性。农业节水作为一个完整的技术体系，包括工程节水技术、农艺节水技术、管理节水技术。对于工程节水技术，如渠道防渗、管道灌溉、喷灌、微灌、田间工程等，已经有了较多的研究成果；对农业非工程节水技术（包括农艺节水、管理节水技术），由于重视程度较低，深入研究较晚，成果较少。为了全面推进农业非工程节水技术的应用，大力发展高效优质农业，作者在搜集了国内外大量的技术资料和研究成果的基础上，结合自己多年的研究成果和技术积累，重点对近几

年山东省的最新研究成果进行了总结，以期为类似地区发展农业非工程节水技术提供参考。

本书由山东省水利科学研究院杜贞栋、谷维龙、王昕、冯质刚、徐征和、吕宁江、陶遵丽、马媛，山东省水利厅外经项目办公室王华忠、卞玉山等同志编写。在编写过程中，得到了何庆海研究员、李龙昌研究员、李永顺研究员的大力支持，在此一并致谢。由于作者水平有限，难免存在错误和不足之处，恳请提出宝贵意见。

作 者

2004 年 4 月

序

前言

第一章 国内外水资源和农业节水发展现状·····	1
第一节 世界水资源现状·····	1
第二节 我国水资源状况·····	2
第三节 山东省水资源状况和特点·····	4
第四节 国外农业节水发展动态·····	6
第五节 我国农业节水发展现状·····	12
第六节 山东省农业节水状况·····	20
第七节 农业节水概念辨识·····	28
第二章 农艺节水技术·····	33
第一节 耕作保墒技术·····	33
第二节 覆盖保墒技术·····	37
第三节 增施有机肥与秸秆还田·····	49
第四节 水肥耦合技术·····	50
第五节 调整作物布局和选用节水型品种·····	64
第六节 化学调控节水技术·····	69
第七节 充分开发利用土壤水的综合农艺节水 技术·····	80
第八节 耕作与覆盖机具·····	85
第九节 旱地农业高效用水技术体系·····	93
第三章 管理节水技术·····	95
第一节 概述·····	95
第二节 工程技术类管理节水·····	98
第三节 社会经济类管理节水·····	189
主要参考文献·····	215

第一章

国内外水资源和农业节水发展现状

第一节 世界水资源现状

地球上水的储量很大，但淡水只占 2.5%，其中易供人类使用的淡水不足 1%。据专家最新估计，全球陆地上可更新的淡水资源约 42.75 万亿 m^3 ，其中易于使用的约 (12.5~14.5) 万亿 m^3 。按 1995 年人口统计，全球人均淡水资源约 7450 m^3 ，其中易于使用的淡水人均约 2180 ~ 2440 m^3 ，由此可见，地球上的淡水资源是有限的。水的需求随人口增长和经济发展而迅速增加。1940~1990 年，全球总用水量增加了 4 倍。1995 年全球用水总量已达 36000 亿 m^3 ，人均用水 628 m^3 ，约占易于使用的淡水资源量的 27%~30%。据联合国调查，全球约有 4.6 亿人生活在用水高度紧张的国家或地区内，还有 1/4 人口即将面临严重用水紧张的局面。水资源紧缺已成为世界各国普遍关注的重要问题。

自从 1977 年第一次联合国水资源大会以来，水资源已成为世界性的热点问题。目前，已有 26 个联合国机构参与了与水有关的事务。影响较大的国际会议有：1992 年巴西里约热内卢联合国环境和发展会议；1997 年摩洛哥马拉喀什第一次世界水论坛；1998 年巴黎水与可持续发展国际会议；2000 年海牙第二次世界水论坛等。在 2002 年于南非召开的可持续发展会议上，全体代表一致通过将水危机列为未来 10 年人类面临的最严重挑战之一。联合国环境署在 2002 年发布的《全球环境展望》中指出：“目前全球一半



的河流水量大幅减少或被严重污染,世界上 80 个国家或占全球 40% 的人口严重缺水。如果这一趋势得不到遏制,今后 30 年内,全球 55% 以上的人口将面临水荒。”在国际会议和联合国有关机构的组织推动下,世界各国的水资源工作有了较大的进展。如:在全球范围内开展了水资源评价、对水资源的评价方法进行了理论探讨和实验研究。在水资源规划研究中,由于竞争性用水问题的突出,导致了投资竞争。水资源在地区间、部门间和多目标用水间的合理分配问题已成为缺水地区在发展进程中各种矛盾的焦点,因而,各国相继开始致力于流域和区域的规划研究。

自 20 世纪 80 年代以来,水质与水环境恶化趋势加剧,已威胁到人群健康,水环境问题成为研究的热点。各国都制定了地表水和地下水的水质标准,建立了河流、湖泊与水库的各类水质模型,并试图将水质研究与水量研究联系起来,以实现水资源学科中水量与水质的统一数学描述。在可持续发展观的指导下,从发展模式已认识到:水资源开发利用和经济发展的相互关系,水资源利用与保护的相互关系,经济发展和生态环境保护的相互关系,管理在水资源开发、利用、保护中的作用,水资源管理中需水管理、供水管理、水质管理和水价管理的相互关系,以及水资源管理中的经营机制、法律机制和行政机制的作用。对上述关系的再认识和理解,导致了面向可持续发展的水资源价值观和方法论的提出与初步形成,标志着水资源学科开始步入初步成熟阶段,为缓解世界水资源紧缺的矛盾、保护水资源奠定了基础。

第二节 我国水资源状况

我国水资源总量不算少,但时空分布极不均匀,全国河川多年平均径流量约 2.7 万亿 m^3 , 地下水约 0.82 万亿 m^3 , 全国多年平均水资源总量约 2.8 万亿 m^3 , 但由于人口众多,人均水资源占有量为 2330 m^3 , 亩均水资源量相当于世界平均亩均的



1/2⁽²¹⁾。据有关资料⁽²³⁾，预测到2030年我国人口增至16亿时，人均水资源将下降到1760 m³。国际上一般认为，当人均水资源少于1700 m³时，将成为用水紧张的国家。因此，我国未来水资源的形势十分严峻。

另外，我国水资源时空分布很不均衡，水土资源分布不相匹配，全国十个流域可以划分为南方、北方及西北三个明显不同类型区。南方片：包括长江、珠江、华东华南沿海、西南诸河四个流域，属于人多、地少，经济发达，水资源相对丰富地区。北方片：包括长江以北的松、辽、黄、淮、海五个流域，属于人多、地多，经济发达，而水资源严重短缺地区。西北片，除额尔齐斯河外都属于内陆河流域，土地面积337万 km²，约占全部国土的35%，属于地广人稀，气候干旱，生态环境脆弱地区；该地区人均水资源不算少，但水资源的开发利用受到生态环境的严重制约。各类型区水资源状况见表1-1。

表 1-1 全国分片水资源状况

分 区	占 全 国 比 重 (%)				人均水资源	亩均水资源
	水资源	人口	耕地	GDP	(m ³)	(m ³)
南方片	80.4	53.6	35.2	55.5	3481	4317
北方片	14.7	44.3	59.2	42.8	747	471
其中黄淮海流域片	7.7	34.7	39.1	32.4	500	400
西北片	4.6	2.1	5.7	1.7	4876	1589

黄淮海平原是我国最大的平原，黄、淮、海三河总流域面积约144万 km²。2000年人口4.37亿人，占全国34.8%；GDP 3.13万亿元，占全国32.3%；灌溉面积2307万 hm²，占全国42%；农业产出，约占全国40%。20世纪80年代初，京、津、冀第一次出现水危机，2000年，京、津、冀再次出现水危机。80~90年代持续干旱、水资源衰减造成华北严重缺水和生态环境恶化。80年代，海河、山东半岛来水明显偏少。90年代，黄河、海河、山东半岛来水均明显偏少。1980~1999年，黄淮海



平原人口由 3.34 亿增加到 4.3 亿,增幅 29%;人口增长和经济高速发展,用水由 1980 年的 1274 亿 m^3 增加到 1999 年的 1429 亿 m^3 。在用水增长、来水减少的状况下,主要依靠超采地下水、增量利用黄河水、引用不达标的污水满足工农业生产用水、生活用水。水资源供需矛盾和水环境恶化问题十分突出。

第三节 山东省水资源状况和特点

一、山东省水资源状况

按 1956~1999 年实测降水资料分析,山东省多年平均降水量 676.5mm,折合水量 1037 亿 m^3 , 50%、75%、95% 水平年年降水量分别为 665.5、571.1、451.6mm。山东省多年平均河川径流量为 222.9 亿 m^3 ; 50%、75%、95% 水平年年径流量分别为 193.9 亿、120.4 亿、51.3 亿 m^3 。地下水资源计算分山丘区与平原区进行。平原区以总补给量扣除井灌回归补给量作为地下水资源量,平原区多年平均地下水资源量为 89.98 亿 m^3 ,资源模数为 16.1 万 m^3/km^2 ; 山丘区多年平均地下水资源量为 67.42 亿 m^3 ,资源模数为 8.6 m^3/km^2 ; 扣除山丘区与平原区 4.83 亿 m^3 的重复计算量,全省多年平均地下水资源量为 152.57 亿 m^3 。全省多年平均淡水资源总量为 305.82 亿 m^3 。

二、山东省水资源特点

(一) 水资源总量不足

山东省水资源总量仅占全国水资源总量的 1.1%,人均水资源占有量 344 m^3 ,仅为全国人均占有量的 14.7%,为世界人均占有量的 4%,位居全国各省倒数第三位,属于人均占有量小于 500 m^3 的严重缺水地区。按 2000 年末耕地面积计算,亩均占有水资源量 307 m^3 ,仅为全国平均亩占有量的 16.7%。水资源总量不足,是造成全省水资源供需矛盾突出的主要原因。

(二) 水资源年际年内变化剧烈,开发利用难度大

山东省各地降水量存在明显的丰枯交替现象,连续丰水年与



连续枯水年交替出现,年际之间降水差别较大,1964年丰水年降水量1169.3mm,年径流量690亿 m^3 ,而1981年枯水年降水量仅445.5mm,年径流量53.9亿 m^3 。长系列资料分析表明:山东省具有60年左右的丰枯变化周期。水资源年内分配还具有明显的季节性,全年降水量70%以上集中在汛期(6~9月),春秋季节干旱少雨,春灌期仅占全年降水量的14%,秋灌期仅占8%。天然径流量90%集中在汛期,主要集中在7、8月。鲁西北平原地区缺少拦蓄雨水条件,汛期易涝,而胶东半岛降雨量虽大,但源短流急,难以拦蓄利用。年际和年内水资源丰枯不均、变化剧烈的特点是造成山东省洪涝、干旱等自然灾害的根本原因,给水资源利用带来很大困难。

(三) 水资源地区分布不均

山东省各地区之间降水量、径流量差别大,水资源分布不均。总的趋势是山脉南麓大于北麓,山丘区大于平原区,从东南沿海向鲁西北内陆递减,从胶东半岛东南部向半岛西北部递减。多年平均降水量从鲁东南沿海的850mm向鲁西北递减到550mm,从胶东半岛800mm向莱州湾递减到600~650mm,降水的高值区比低值区大60%以上。地区之间年径流的变化更突出,东南沿海及泰沂山南麓多年平均径流深在260~300mm之间,高值区达350mm以上,而鲁西北、鲁西南平原,多年平均径流只有30~60mm。

(四) 黄河水可用不可靠

黄河水是鲁西北和鲁西南平原区农业的主要水源,黄河水的高效利用将关系到今后山东省水资源能否可持续利用。黄河水的开发利用为山东省国民经济和社会发展发挥了巨大作用。由于流域内降水减少,中上游的开发加快,进入20世纪80年代以来,黄河经常断流,1997年利津站断流达226天,尽管2000年以来,由于采取了多种措施,黄河山东段未发生断流,但随着黄河上中游引水量大幅度的增加,山东黄河取水量将继续减少,每年分配的70亿 m^3 引黄水量难以保证,黄河水“可用而不可靠”



的状况日趋明显。

第四节 国外农业节水发展动态

世界上各国农业发展情况大致可分为四种类型。第一种类型以美国、澳大利亚等西方经济发达、水资源比较丰富的发达国家为代表；第二种类型以经济发达、水资源紧缺的以色列为代表；第三种类型为经济不发达、水资源比较丰富的发展中国家；第四种类型以中国、印度等经济欠发达而水资源紧缺的国家为代表。由于各国经济、水资源及管理方式的不同，农业节水发展进程也各有差别。美国以雄厚的国力及得天独厚的自然地理条件，使与农业相关的诸多领域处于世界领先地位；澳大利亚人少地多，虽然降雨量较少，年降雨量仅 470mm，但人均水资源占有量较丰富，农业节水水平处于世界领先地位；以色列是世界少雨极度干旱的国家，农业节水发展的特色对于世界干旱地区农业发展具有借鉴作用；印度的人口、水资源、气候条件与我国相似，农业的发展与我国具有可比性。

一、水资源开发利用状况

各国用水量及各部门用水量见表 1-2。

表 1-2 各国用水量与用水结构对比

国 家	人均用水量 [m ³ /(人·年)]	水资源 开发利用 率 (%)	单位 GDP 用水量 (m ³ /万元)	占总用水量比重 (%)			
				农业	工业	生活	其他
中 国	458	19.8	1041	75.3	20.2	4.5	
印 度	630	29	2448	83	3.3	5	8.7
以 色 列	328	95	27	72	5	16	
美 国	1719	18.8	80	42	46	12	
澳大利亚	800	4.3	54	73	2	25	

注 数据来源：ICID: watersave scenario, FAO 数据库 (1997), 《中国可持续发展水资源战略研究》。



由表 1-2 数据可分析出以下结论：美国、中国、印度人均用水量为 $458 \sim 1719 \text{m}^3/\text{年}$ ，而以色列人均用水量为 $328 \text{m}^3/\text{年}$ ，澳大利亚人均用水量为 $800 \text{m}^3/\text{年}$ ，美国人均用水量是中国的 4 倍，而水资源可开发率却基本接近，中国、美国水资源开发率分别为 19.8%、18.8%。美国的水资源非常丰富，有非常大的开发潜力，而以色列水资源开发率已达到 95%，利用程度之高，世界上绝无仅有。印度水资源开发利用率达到 29%，高出我国 50%，澳大利亚水资源开发率仅 4.3%。除美国农业用水占总用水量的 42% 以外，其余各国都是以农业用水为主，农业用水量为 72%~83%。单位国民经济生产总值耗水量，印度最高，中国次之，中国是美国的 13 倍、澳大利亚的 19 倍、以色列的 38 倍、印度的 1/2。由此可以看出，中国目前仍处于水资源消耗的发展阶段，主要表现在农业上，印度农业用水则更加浪费。

二、农业产出效率及灌溉发展状况

各国农业产出效率及灌溉发展状况见表 1-3、表 1-4。

表 1-3 农业产出效率的对比分析

国 家	农业总产值 (亿美元)	农业总产值 占国民生产 总值的比重 (%)	人均农业产值 (美元/人)	农业用水量 (亿 m^3)	单位农业产值 耗水量 ($\text{m}^3/\text{美元}$)
中 国	1716	26.6	141	4191	2.44
印 度	833	28	87	5021	5.88
以色列	34	4	5764	13.7	0.40
美 国	1404	2	5172	1961	1.39
澳大利亚	120	3.7	6653	106	0.88

注 中国的农业产值数据来源于《中国农业年鉴》(1998)。

由表 1-3 可知，发达国家农业总产值仅占国民生产总值的 2%~4%，而中国、印度却占到 27% 左右，是发达国家的 13 倍。但发达国家人均农业产值均在 5000 美元以上，是中国人均产值的 40 倍以上，是印度的 60 倍以上。其中重要原因是发达国



家种植结构中粮食作物所占比例仅为 21.8%~35.1%，另外，人口相对较少也是主要原因。发达国家单位农业产值耗水量为 $0.4\sim 1.39\text{m}^3/\text{美元}$ ，而中国为 $2.44\text{m}^3/\text{美元}$ ，印度更高；中国粮食作物水分生产率仅 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 左右，印度为 $0.4\text{kg}/\text{m}^3$ ，而以色列则为 $2.3\text{kg}/\text{m}^3$ 。以上说明，发达国家高产值作物占主要比例，而且灌溉水利用率高；我国粮食作物占主要比例，灌溉水浪费严重、灌溉水利用效率低，这是人均农业产值低的主要原因。

表 1-4 各国的灌溉发展状况表

国 家	耕地 面积 (亿亩)	灌溉 面积 (亿亩)	灌溉面积占 耕地面积的 比重 (%)	灌溉定额 ($\text{m}^3/\text{亩}$)	灌溉粮食 产量占粮食 总产量比重 (%)	灌溉水的农业 产出效率
中 国	19.50	7.8	40	477	73.5	$0.9\text{美元}/\text{m}^3$
印 度	24.23	8.6	35.5	583	91	$0.4\text{kg}/\text{m}^3$
以色列	0.053	0.03	56.6	395	54 *	$1.54\text{美元}/\text{m}^3$, $2.30\text{kg}/\text{m}^3$
美 国	26.54	3.2	12.1	366	—	—
澳大利亚	8.23	0.41	5	—	—	—

注 1. 中国的资料来源于《中国可持续发展水资源战略研究》，其他国家的数据来源于 FAO 数据库 (1997)，ICID: Watsave Scenario 和 Annual Statistical Abstract of Israel (1996)。

2. 带 “*” 者表示灌溉作物产值占农业总产值的比例。

发达国家农业节水工程标准高。如美国，虽然水资源丰富，但农业实行农场主管理，人少地多，采用喷灌技术、激光平整土地等先进的节水技术，降低了劳动强度，同时提高了农业用水的生产效率。美国的喷灌面积占有效灌溉面积的 45% 以上，先进的沟畦灌技术占地面灌溉面积的 80% 以上，采用激光平整的土地面积占地面灌溉面积的 30%，平整精度比人工平地提高 10~50 倍。喷灌面积大，设备先进。农业基本上实施规模经营，农业现代化水平高，节水灌溉技术含量高。以色列属于水资源短缺和经济发达的国家，有条件采用高效的输水方式和现代化节水灌



溉技术，园艺作物和经济作物种植面积大。在 20 世纪 70 年代中期，喷灌面积已占全部灌溉面积的 90%。近 20 年来又把发展重点转向微灌，目前，微灌占有效灌溉面积的 75%，喷灌占 25%，主要是采用现代化控制技术和工厂化生产模式。因此，水的利用率和水分生产率是世界最高水平。以色列的北水南调工程利用地下管道把各区域性供水系统通过泵站与国家输水工程连成整体，形成了统一调度、联合运用的巨大管网，为以色列发展现代化大农业奠定了基础。德国、英国、奥地利、日本等国旱地灌溉面积的 80% 以上采用喷灌，日本的灌区干管输水工程全部衬砌，配套完善，大部分采用了自动化控制技术。前苏联的喷灌面积也发展到占总灌溉面积的 40% 以上。相比之下，中国的喷灌、微灌面积仅占总灌溉面积的 3% 左右，印度喷灌、微灌面积占总灌溉面积的 1.6%。

三、发达国家农业节水的几个特点

(一) 节水设备产业化水平高

世界上灌溉技术先进的国家同时也是先进节水灌溉设备的生产国家，如美国、以色列、澳大利亚、法国等国生产的喷灌、微灌设备以及土壤水分监测、计算机控制、气象观测及田间供水自动化等设备，集成工艺先进，使用性能好，质量高，成为世界名牌，形成了技术密集型的出口产业，占据了世界各地市场，也占领了我国很大市场。

(二) 注重提高水的利用效率

发达国家在可持续发展的思想指导下，将土壤、植物、大气作为一个整体，运用“SPAC”系统的思路，开展提高水的利用效率的研究。

1. 选育耐旱作物和节水品种

选育耐旱作物品种，是充分利用生物适应环境、以生物机能提高作物水分利用效率的重要途径。如墨西哥选育的矮秆小麦品种，在不增加耗水量的情况下，产量比过去的小麦品种增加 2~3 倍。高粱品种在水分供应不足时，会停止生长，从而减少蒸