

中国水利教育协会

高等学校水利类专业教学指导委员会

共同组织



全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）

农业水资源 规划与管理

邵东国 顾文权 林忠兵 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水利教育协会
高等学校水利类专业教学指导委员会

共同组织



全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）

农业水资源 规划与管理

邵东国 顾文权 林忠兵 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书系统地阐述了农业水资源规划与管理的基本理论与方法。全书共分为8章，包括绪论、水资源评价、土壤水利用、地下水利用、地表水利用、水资源供需分析、多水源联合运用和水资源管理等内容。

本书可作为农业水利工程、水文学及水资源、水利水电工程等水利、农业院校的专业教学用书，也可供从事水利、农业、资源、环境等领域的水资源规划、利用、配置、调度、管理等实际工作的技术人员作为参考用书。

图书在版编目（C I P）数据

农业水资源规划与管理 / 邵东国, 顾文权, 林忠兵
编著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2020.5
全国水利行业“十三五”规划教材. 普通高等教育
ISBN 978-7-5170-8575-1

I. ①农… II. ①邵… ②顾… ③林… III. ①农业资源—水资源管理—高等学校—教材 IV. ①S279.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第107893号

书 名	全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育） 农业水资源规划与管理 NONGYE SHUIZIYUAN GUIHUA YU GUANLI
作 者	邵东国 顾文权 林忠兵 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.5印张 207千字
版 次	2020年5月第1版 2020年5月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	28.00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

前言

水资源是人类赖以生存与发展的重要自然资源，维系着生态系统的稳定与环境安全，它与粮食、能源之间存在复杂的相互转化与相互作用的关系，“节水优先”已成为国家新的治水理念，水—粮食—能源—环境的互馈关系正成为国际前沿研究热点。

长期以来，受学科和专业设置、教学学时计划等多种因素的限制，水资源规划与管理相关教材及教学中，较多关注地表水与地下水资源的开发利用及配置、保护等问题，较少考虑土壤水在农业生产中的利用与节约保护；较多考虑大中型水库联合运用，较少考虑塘坝、泵站等小型水利工程的作用等。过去按细小专业编写教材的模式，与现行“宽口径、厚基础”的人才培养需求不相适应，难以满足国际水资源精细化管理的发展需要。

本书列入中国水利教育协会《关于公布全国水利行业‘十三五’规划教材名单通知》（水教协〔2016〕16号）名录，是在原有《水资源规划与管理》的基础上修编而成的。10多年来，为满足节水型社会建设与最严格水资源管理制度建设等客观需求，不断适应本科教学改革的发展，根据授课经验，突出农业用水管理特色，本书比较系统地阐述了地表水、地下水、土壤水等水资源评价、利用及其多水源配置、调度、管理基本理论与方法，修改完善了农业水资源规划与管理内容，对适应高等学校教学和水资源规划管理等生产实践的要求具有重要意义，可适用于农业水利工程和水文学及水资源、水利水电工程等专业教学与生产实践。

参加本书编写的有武汉大学邵东国教授（第1章、第8章），顾文权副教授（第2章、第5~7章），林忠兵副教授（第3章、第4章）。全书由邵东国教授和顾文权副教授统稿。

在本书编写过程中，武汉大学水利水电学院对本书的出版给予了大力支持，中国水利水电出版社的编辑同志为本书出版付出了大量的辛勤劳动，在此表示衷心感谢！

对于书中错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

2019年12月于珞珈山

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水资源	1
1.1.1 水资源特性	1
1.1.2 水资源现状	2
1.1.3 水资源开发利用	4
1.2 农业水资源	5
1.2.1 农业水资源概念	5
1.2.2 农业水资源开发利用	6
1.3 农业水资源学理论体系	8
1.3.1 水资源学科发展	8
1.3.2 水资源学科内容	8
1.3.3 农业水资源学	9
思考题	12
参考文献	12
第 2 章 水资源评价	13
2.1 水资源评价原则与内容	13
2.1.1 水资源评价基本概念	13
2.1.2 水资源评价原则	13
2.1.3 水资源评价内容	14
2.2 水资源量评价	14
2.2.1 地表水资源量评价	14
2.2.2 地下水资源量评价	17
2.2.3 水资源总量评价	25
2.3 水资源质量评价	26
2.3.1 水资源质量评价参数	27
2.3.2 水资源质量评价标准	28
2.3.3 水资源质量评价方法	29
思考题	30

参考文献	31
第 3 章 土壤水利用	32
3.1 土壤水概述	32
3.1.1 土壤含水率	32
3.1.2 土壤水分类	33
3.2 土壤水运动方程	34
3.2.1 土壤水的能态	34
3.2.2 土壤水分特征曲线	34
3.2.3 达西定律	36
3.2.4 土壤水分运动连续性方程	38
3.2.5 Richard 方程	39
3.2.6 Richard 方程的柱坐标形式	39
3.2.7 Richard 方程的球坐标形式	42
3.2.8 土壤水运动基本微分方程定解条件	44
3.3 土壤水分的管理与利用	46
3.3.1 灌溉对土壤水分的影响	46
3.3.2 覆膜对土壤水分的影响	47
3.3.3 垄作和耕作对土壤水分的影响	47
3.3.4 土壤水与作物生长	47
思考题	48
参考文献	48
第 4 章 地下水利用	50
4.1 地下水概述	50
4.2 地下水运动方程	53
4.2.1 承压水运动方程	53
4.2.2 潜水运动方程	55
4.2.3 地下水流定解条件	56
4.2.4 地下水单井抽水稳定流计算	57
4.3 地下水利用	62
4.3.1 地下水资源评价	62
4.3.2 地下水开采方式	64
4.3.3 地下水监测与管理	65
思考题	66
参考文献	66
第 5 章 地表水利用	68
5.1 地表水资源利用形式	68
5.1.1 无坝取水枢纽位置的选择	68

5.1.2	有坝取水枢纽位置的选择	69
5.1.3	泵站取水枢纽位置的选择	69
5.2	蓄水工程可供水量计算	69
5.2.1	大中型蓄水工程可供水量	70
5.2.2	小型蓄水工程可供水量	72
5.3	引水工程可供水量计算	73
5.4	提水工程可供水量计算	74
5.5	区域可供水量计算	75
	思考题	77
	参考文献	78
第 6 章	水资源供需分析	79
6.1	概述	79
6.2	生活用水预测	80
6.2.1	生活用水计算方法	80
6.2.2	人口预测方法	80
6.3	生产需水预测	81
6.3.1	第一产业需水预测	81
6.3.2	第二产业需水预测	82
6.3.3	第三产业需水预测	85
6.4	生态环境需水预测	85
6.4.1	水文学方法	86
6.4.2	水力学方法	87
6.4.3	生境模拟方法	88
6.4.4	综合法	89
6.5	供需平衡分析	89
	思考题	90
	参考文献	90
第 7 章	多水源联合运用	91
7.1	地表水与地下水联合运用	91
7.1.1	地表水与地下水联合运用的必要性	91
7.1.2	地表水与地下水联合运用的基本原理与水量调配原则	92
7.1.3	地表水与地下水联合运用系统的类型	92
7.2	劣质水利用	96
7.2.1	污水灌溉的发展与现状	96
7.2.2	污水处理工艺及灌溉原理	98
7.2.3	污水灌溉技术措施	99
7.2.4	咸水灌溉及其对环境的影响	100

7.3 灌区多水源联合运用	101
思考题	102
参考文献	103
第8章 水资源管理	104
8.1 水资源综合管理	104
8.1.1 概念内涵	104
8.1.2 基本原则	105
8.1.3 主要方法	106
8.1.4 内容分类	107
8.2 水权与水价	110
8.2.1 水权	111
8.2.2 水权交易	113
8.2.3 水价	116
8.3 水资源配置	120
8.3.1 水资源配置任务	120
8.3.2 水资源配置原则	121
8.3.3 水资源配置机制	122
8.3.4 水资源配置方法	124
思考题	126
参考文献	126

第 1 章 绪 论

1.1 水 资 源

1.1.1 水资源特性

淡水资源是陆地生态系统不可缺少的可以更新的自然资源，是人类社会发展的重要物质基础。由于水的表现形式多种多样，如降水、地表水、土壤水、地下水等，它们不仅相互之间可以转化，还具有广泛的流动性、侵蚀性和化学生物特性，直接影响经济、社会、生态、环境等各个部门，不同部门对水资源含义的理解往往各不相同。

1988 年，联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）共同制定的《水资源评价活动——国家评价手册》中，定义水资源为“可资利用或有可能被利用的水源，但应具有足够的数量和可用的质量，并在某一地点为满足某种用途而被利用”。

广义而言，一切具有利用价值的淡水来源或形式，均属水资源范畴。它不仅指可被人们开发利用的那部分水，还有供生态环境使用的，甚至包括那些暂时无法利用但具有潜在使用价值的那部分水。狭义而言，水资源主要是指水循环周期内可以恢复再生的、能为人类直接利用的淡水资源。它具有如下特性。

1. 可再生性

水资源与其他固体资源的本质区别在于其所具有的流动性，它是在循环中形成的一种动态资源。水循环系统是一个庞大的天然水资源系统，水资源在开采利用后，能够得到大气降水的补给，处在不断地开采、补给和消耗、恢复的循环之中，如果合理利用，可以不断地供给人类利用和满足生态平衡的需要。

2. 储量有限性

水资源处在不断的消耗和补充过程中，在某种意义上水资源具有“取之不尽”的特点，恢复性强。但实际上全球淡水资源的储量是十分有限的，且淡水资源的大部分储存在极地冰帽和冰川中，真正能够被人类直接利用的淡水资源仅占全球总水量的 0.00768%。从水量动态平衡的观点来看，某一时期的水量消耗量接近于该时期的水量补给量，否则将会破坏水平衡，造成一系列不良的环境问题。

3. 时空分布不均匀性

受大气环流和重力作用，降水和融雪水在地球表面产流、汇集总是在一定地域从高处向低处流动，这就决定了水资源演变变化总是在流域分水岭之间进行，显现出明显的气候地域特征。受气候和地理位置等因素影响，水资源在自然界中具有一定的时间和空间分布，不同流域、地区之间和流域上、中、下游之间存在明显的差异，并随着社会经济发展状态的不同而出现水资源量与质上的变化。

我国水资源在区域上分布极不均匀,总的来说,东南多,西北少,沿海多,内陆少,山区多,平原少;在同一地区中,不同时间分布差异性很大,一般是夏多、冬少。

4. 随机性

自然界中可更新的水资源主要来源于大气降水和融雪水,其循环转换具有因果关系。由于大气降水和融雪水在时空上存在随机性,导致水资源转化过程中有随机性。如某一区域既有丰水年、平水年、枯水年三种年型,又有连枯、连丰情况,一年当中还有枯水期和丰水期,这种变化都是随机的,具有一定的统计规律。

5. 用途广泛性

水资源是被人类生产和生活中广泛利用、“不可替代”的自然资源,广泛应用于生产、生活和生态中,向人类社会提供供水、灌溉、发电、航运、养殖、旅游、景观等多种服务功能。在各种不同的用途中,有的是消耗性用水,有的则是非消耗性或是消耗很少的用水,且不同目的的用水对水质的要求各不相同,这是水资源“一水多用”、充分发挥其综合效益的有利条件。

6. 利害两重性

水量过多容易造成洪涝灾害,水量过少则易形成干旱。水资源的这种双重性质,要求在水资源开发利用过程中强调统筹规划和合理调控,以达到兴利除害的目的。

7. 动态转化性

水资源动态转化既包括液态、固态水的汽化,水汽凝结降水等过程,又包括降水在地球表面形成的地表水、土壤水、地下水的聚集及其相互转化。各种不同水体的边界并非完全封闭,而是与外界环境存在各种物质能量交换,是一种既相互联系又相互转化的开放系统。例如,地表蓄水体,可以接受外界水溶解的化学盐类与泥沙及有机质的悬浮物,在重力与分子力作用下,发生的渗流、越流,可使地表水与地下水相互转换;在热力作用下,这些水体又可通过蒸发与凝结,与大气水分相互转化。因此,气候与下垫面变化都可能导致水资源量的变化。

1.1.2 水资源现状

地球上水量丰富,表面约有 70% 以上的面积为水所覆盖,其余约占地球表面 30% 的陆地也有水存在,但只有 2.53% 的水是可供人类利用的淡水,主要分布在冰川与永久积雪和地下水中。如果考虑现有的经济、技术能力,扣除目前无法取用的冰川积雪及深层地下水,理论上可以开发利用的淡水不到地球总储存水量的 1%。随着经济的发展和人口的增加,世界用水量逐年增加,但人均供水量逐年减少。到 2025 年,世界将近一半的人口会生活在缺水的地区,水危机已经严重制约了人类的可持续发展。

我国多年平均降水量为 648mm,其中,约 56% 消耗于陆面蒸发,44% 转化为地表和地下水资源。多年平均年径流总量 27115 亿 m^3 , 年均地下水资源量为 8288 亿 m^3 , 扣除重复计算量 7279 亿 m^3 , 我国多年平均水资源总量为 28124 亿 m^3 , 居世界第 6 位, 占全球的 6%。但 2017 年我国人均水资源拥有量仅为 2074.53 m^3 , 为世界平均值的 1/4 左右, 到 2030 年我国人口 16 亿、人均水资源 1760 m^3 、接近国际公认的“少于 1700 m^3 时为用水紧张国家”标准, 是全球水资源贫乏的主要国家之一。

我国水资源时空分布很不均匀。最大与最小年径流的比值, 长江以南的河流小于 5;

北方河流多在 10 以上。径流量年际变化大与连续丰、枯水段的出现，使我国经常发生旱、涝或连旱、连涝、旱涝急转等现象，加大了水资源开发利用的难度。

我国水资源配置极不合理，水资源供需矛盾日益突出。北方地区人口占全国总人口的 2/5 以上，耕地占全国耕地总面积的 3/5，而水资源总量仅占全国的 1/5，人均水资源拥有量为 1127m^3 ，每公顷耕地拥有水资源量为 9465m^3 （亩均 431m^3 ）。南方地区人口占全国总人口的 3/5，耕地占全国耕地总面积的 2/5，却拥有全国水资源总量的 4/5。在全国人均水量不足 1000m^3 的 10 个省份中，北方占了 8 个，主要集中在华北地区。在全国耕地每公顷水量不足 1500m^3 的 15 个省份中，北方片占了 13 个。此外，我国有 1333 万 hm^2 可耕后备荒地，主要集中在北方片的西北区和东北区。如果考虑开发这些后备荒地的用水量，那么北方片每公顷耕地拥有的可用水量仅为 7687m^3 （ $512\text{m}^3/\text{亩}$ ），为南方片的 1/7.5。我国水资源空间分布的不均衡性与全国人口、耕地分布上的差异性，加剧了我国水资源供需的矛盾。

(1) 水旱灾害更加频繁，洪旱涝渍灾害损失日益严重。1998 年长江、珠江、松花江发生超历史记录的洪水，直接经济损失 2466 亿元。2006 年夏季，重庆市发生百年一遇特大旱灾，直接经济总损失 81.5 亿元，农作物受旱面积近 133 万 hm^2 ，农作物经济损失 60.31 亿元。

(2) 水资源需求不断增长，用水效率低，供需矛盾不断恶化。在过去 100 年中，世界人口增长了 3 倍，经济增长了 20 倍，水资源消耗总量增长了 10 倍，水资源供需矛盾更加尖锐。据统计，目前全球有 80 多个国家正面临着水资源不足，16% 的城市人口缺水，约 12 亿人严重缺少饮用水。据估计，到 2050 年世界人口可能增长 1 倍，达 106.4 亿人，其中发展中国家占 87%，即 92.9 亿人，人类对水资源的需求必将大幅度增加。目前，我国人多水少，水资源供需矛盾突出，全国正常年份缺水量达 500 亿 m^3 ，但全社会节水意识不强、用水粗放、浪费严重，水资源利用效率与国际先进水平存在较大差距。2017 年，我国农田灌溉水有效利用系数仅为 0.54，与发达国家 0.7~0.8 的系数差距很大；万元工业增加值用水量为 45.6m^3 ，是世界先进水平的 2 倍；万美元 GDP 用水量约为 500m^3 ，而发达国家基本在 300m^3 以下。水资源短缺已经成为生态文明建设和经济社会可持续发展的瓶颈制约，迫切需从国家层面统筹推动节水工作。

(3) 水环境恶化趋势明显，水资源保护任务加重。据统计，全世界每年排向自然水体的工业和生活废水达 4200 亿 m^3 ，使 35% 以上的淡水资源受到不同程度的污染，约 1/5 人口得不到符合卫生标准的淡水。据估计，2025 年将有 50% 的人口居住在城市，人类活动的发展将使更多的废弃物不断污染可利用的水源。在污染物中，未处理的或部分处理的污水中，农业和工业排放的污水占主要部分。这些污染物将严重影响水质，特别是生活用水的水质。许多过去认为可以开发的水源，将来很可能成为不适宜的、特别是不适于饮用的水源。

(4) 河湖湿地生态系统萎缩，水电开发下游生态环境用水难以保证。与 20 世纪 50 年代初期相比，目前全国湖泊面积减少了 15%，长江中下游的湖泊数量减少了一半以上，天然湿地面积减少了 26%，由此导致水资源调蓄能力和水体自净能力下降及河道泄洪能力降低，加剧了洪涝灾害和水质污染的危害，对生物多样性也造成了严重破坏。不合理的水电

站、水库建设及其运行调度方式，导致下泄流量减少甚至断流，水温、水位甚至水质变化，鱼类栖息地与洄游通道消失等。

1.1.3 水资源开发利用

水资源开发利用是指人类通过劳动、科学技术和手段，使天然水资源能为人类发展服务的有关活动的总称，包括认识水、控制水、保护水、管理水和利用水。水资源在未开发前，虽然和其他资源一样具有使用价值，但其使用价值是潜在的。只有通过开发利用，才能转变为现实的使用价值，才具有真正的价值。

认识水的基本规律是取得水资源开发利用良好效果的基础；控制水的时空分布是兴水利除水害的基本手段；保护水免受污染是充分利用水资源、维护良好生态环境的必要条件；管理水是实现综合用水和不断提高经济效益的保证；利用水是满足工农业生产和人民需求的基本目的；水资源开发利用的最终目的是要达到人与水之间的协调。因此，水资源开发利用的过程和目的可以表述为：人们对自然状态的水，运用科学方法和技术措施，进行有目的、有步骤的控制与管理，使其在水量、水质、水能和水体形态（水位、水温、流速等）上满足社会经济发展和人民生活需求的全部过程。

水资源开发利用的历史伴随着人类文明的发展。公元前 3500 年，古埃及人用水位计量测河流变化规律；公元前 3000 年，尼罗河上修建了水坝；前 486 年，沟通长江与淮河的邗沟工程建成；公元前 256 年，我国都江堰建成。

在近代，随着社会经济的发展和科学技术的不断进步，水资源开发利用开始由过去单一的水运、灌溉、供水、排水、防洪等开发，向以流域或河流为单元的水力发电、灌溉、防洪、供水、跨流域调水等综合开发利用转变。1802 年，美国陆军工程师团成立，标志着人类进入水资源规划的新阶段；1807 年，美国出现了第一个水资源综合规划报告，从此改变了单纯为了航运进行开发的历史；1882 年，美国建成第一座水电站 Wisconsin，开始进行水能开发利用；1913 年，美国进行了大迈阿密河流域的土地利用与防洪规划建设。

我国大江大河治理始于 1955 年，1986 年进行了全国水资源评价和水资源开发利用规划，并于 1990 年提出了全国流域综合治理与开发利用规划。1998 年长江、松花江发生特大洪水后，又进行了全国防洪规划。1999 年全国开展了大型灌区续建配套与节水改造规划，2000 年进行了全国乡镇供水发展规划和城市水资源规划，2001 年进行了全国水资源保护规划，2002 年进行了全国水资源综合规划，2006 年进行了流域综合规划修订等。现在，正围绕国家水生态文明建设与乡村振兴等战略，实施农业节水、最严格水资源管理、河湖长制、水污染防治与水生态修复等众多重大工程建设，水资源的节约保护与绿色高效利用将是未来关注的重点之一。

迄今，我国已建成各类水库 98002 座，总库容 9323 亿 m^3 。其中，大型水库 756 座，总库容 7499.85 亿 m^3 ；中型水库 3938 座，总库容 1119.76 亿 m^3 。已建（含在建）水电站 46758 座，装机容量 3.33 亿 kW。过闸流量超 $1\text{m}^3/\text{s}$ 的水闸 268476 座，其中，大型水闸 860 座，分洪闸（进水闸）7919 座，排涝闸（退水闸）17198 座，挡潮闸 5795 座，引水闸 10970 座，节制闸 55137 座。泵站 424451 座，农村供水工程 5887.46 万处，塘坝窖池 456.51 万处，江河堤防 413679km，灌溉面积 10.02 亿亩。此外，还修建了南水北调东

线与中线、江水北调、东深供水、引滦入津、引青济秦、引黄入卫、引黄济青、引碧入大、塔里木河调水等引调水工程。

全国 2017 年总供水量 6043.4 亿 m^3 ，其中，地表水源供水量 4945.5 亿 m^3 ，占总供水量的 81.8%；地下水源供水量 1016.7 亿 m^3 ，占 16.8%；其他水源供水量 81.2 亿 m^3 ，只占总供水量的 1.4%。全国总用水量 6043.4 亿 m^3 ，其中生活用水 838.1 亿 m^3 ，占总用水的 13.9%；工业用水 1277 亿 m^3 ，占 21.1%；农业用水 3766.4 亿 m^3 ，占 62.3%。

所有这些，极大地缓解了我国水资源紧张状况与生态退化情势，提高了防御洪涝干旱等灾害的能力以及灌溉、供水、发电、航运等综合效益。预计到 2050 年，我国城镇化率将达到 60%，人均水资源量将进一步减少到 1760 m^3 ，需水总量将达到 7300 亿 m^3 左右，人均需水约为 457 m^3 ，农田灌溉面积要达到 9 亿 m^3 ，水资源开发利用情势将更加严峻。

如何应对气候变化与强人类活动对水资源的影响，适应国家高质量绿色发展需求，进行“节水优先”“生态保护”下的水资源开发利用保护规划设计与建设管理，则是今后需要研究解决的首要问题。

1.2 农业水资源

1.2.1 农业水资源概念

农业水资源是自然界中的水资源可用于农业生产中的农、林、牧、副、渔各业及农村生活的部分。它主要包括被植物截留的降水有效利用量，但因其总量仅占全年降雨量的 2.5% 左右，通常被忽略；可被旱地作物直接吸收利用的土壤水；通过水利工程设施而得以为农业所利用的地表水量和地下水量，但地表水、地下水只有被转化为土壤水后才能被作物利用；生活污水和工业废水，经过必要的净化处理，也是一种重要的农业用水水源。

农业水资源只限于液态水。气态水和固态水只有转化成液态水时，才能形成农业水资源。叶面截留的雨露水和土壤内夜间凝结的水分都可为作物利用，但其量甚微，在农业水资源分析中有时也可不予考虑。

降水对农田是一种间断性的直接补给，也是农业水资源最基本的部分。在我国，年降水量大于 800mm 的湿润带，主要是水稻产区，除降水直接提供作物生长需水外，仍需发展灌溉，在时间上补充雨水的不足。在年降水量为 400~700mm 的半干旱、半湿润带，主要是小麦、棉花等旱作物产区，降水量多集中在 7—8 月，需调蓄汛期雨水所形成的地表径流，以供早期灌溉之用。西北干旱地带的年降水量为 200mm，在这类地区没有灌溉就没有农业，须依赖于蓄水、引水或提水工程，以供给农业用水需要。在年降雨量 200~400mm 的半干旱地带，而又缺乏人工灌溉条件的地区，只有依靠雨水，发展旱作农业，有效地利用雨水对这类地区的农业生产具有决定的意义。

地表水主要是河川湖泊径流，江河在其水文动态许可范围内可为沿程提供农业用水。江河中下游平原是农业用水集中的地区，常需在河道上游修建蓄水工程，以调节水资源在时空上的不均衡，或在河道上筑坝引水，建闸建泵提水，以弥补雨水不足或不及时。必要

时还可实施跨流域调水，以调剂流域间水资源的不平衡。但是，江河湖泊的地表径流，可为国民经济各种用水部门提供水源，并不是全部水量都可构成可利用的水资源，如为了维护河道生态平衡，必须有一部分河道径流输入海洋的生态环境用水；水源开发工程虽可进行年内及年际调蓄，但在汛期内也常产生无法调蓄的弃洪水。因此，江河湖泊中可利用的水资源只是径流总量的一部分，而农业可用水资源又只是可利用水资源量中的一部分。

地下水包括丘陵山区的泉水、基岩裂隙水、冲积平原地区的浅层地下水、南方喀斯特地区的岩溶水，是农业水资源的另一来源。开采地下水，综合调度水资源，应在一个丰、枯水文周期内保持地下水采补平衡。农业用水应以开采浅层地下水为主，深层地下水只能作为应急备用水源。

农业水资源的规划调度应在各用水部门综合规划平衡、合理安排农业结构的基础上，充分利用有效降雨量，发挥土壤的调蓄作用，积极开发利用地表水和合理开采地下水，统筹安排，发挥水资源的最大效益。

1.2.2 农业水资源开发利用

我国水资源总量虽占世界第 6 位，亩均耕地占有水量仅 1750m^3 ，约为世界平均值的一半左右，这些水还不能完全用于灌溉，因此，我国灌溉水源并不丰沛，在地区上的分布也极不均衡。南方长江以南各河流域，年径流量占全国总量的 82%，但耕地只占全国总耕地面积的 38%；而华北、东北、西北广大地区耕地占全国总耕地面积的 62%，但年径流量仅占全国总量的 18%，其中黄河、淮河、海河三大河流域，年径流量只占全国总量的 6.6%，但耕地却占全国总耕地面积的 40%。这种不均衡情况，给农业生产的发展带来很大影响。把自然资源时空变化与农业耗用水的动态变化相协调，在充分利用降水与土壤水的前提下，通过农田水利工程设施调节利用地表水、地下水，使其成为可利用的农业水资源，是农业水资源开发利用的基本任务。

1949 年后，我国进行了大规模农田水利建设。2014 年总灌溉面积 7065.17万 hm^2 ，其中，耕地灌溉面积 6453.95万 hm^2 ，林地灌溉面积 222.87万 hm^2 ，果园灌溉面积 237.62万 hm^2 ，牧草灌溉面积 109.24万 hm^2 ，其他灌溉面积 41.48万 hm^2 。到 2015 年年底，全国农田有效灌溉面积达到 9.88 亿亩，建成各类水库 9.8 万座、大中型灌区 7700 多处、小型农田水利工程 2000 多万处，灌排泵站 42.4 万座，排涝面积 3.25 亿亩，全国粮食产量达到 62143 万 t，解决了 2.73 亿人的饮水困难问题，农村集中供水人口比例达 82%，农村自来水普及率达 76%，供水保证程度和水质合格率均大幅提高，极大地保障了国家粮食安全与农村饮用水安全。

雨水利用是一种综合考虑雨水径流污染控制、防洪排涝以及生态环境的改善等要求，建立包括雨水集蓄系统、雨水截污与渗透系统、生态小区雨水利用系统等，将雨水用作绿地、经济林、旱作灌溉，喷洒路面，蓄水冲厕等城市杂用水的雨水收集利用技术，是水资源可持续利用的重要措施之一。但是，降雨随季节而变化，年际变化大，时间上分配极不均衡，与作物生长需水并不完全一致，这使降雨的时间分配与灌溉的需求不尽适应，特别是干旱与连续干旱年份，水量不足对农业生产的影响极大。

为了避免对单纯依靠天然降雨为水源的农业产生不利影响，近来拓展了现代“雨养农

业”的内涵，包括人工汇集雨水，实行补偿灌溉的农业生产类型，主要是靠当地降雨形成的径流蓄积小型工程，利用一定雨水量湿润农田，补偿农田水分不足，灌溉水量较小，适用于半干旱或半湿润易旱区，也可用于雨量充沛的湿润地区。但它与灌溉农业不同，灌溉农业（特别是干旱区）是作物全生育期都靠灌溉，且灌溉水源主要靠地表水或地下水等外来水源，一般都建有大、中型工程水源和灌溉区域。随着干旱加剧和农业灌溉用水在整个水资源分配中的比例减少，雨养农业在未来农业中的地位将越来越重要。

为有效利用雨水资源，协同解决防洪排涝与水资源高效环保利用、场地尺度的干预累积会给更大尺度景观产生影响等问题，人们提出了“水敏感规划和设计”的概念，旨在通过规划和设计达到生态完整性，充分考虑水这一因素，使每个场地的水循环尽量不受到影响。水敏感实践领域包括低冲击雨水利用开发、湿地休闲公园、滨水缓冲区规划等。近些年来，在澳大利亚兴起了水敏感城市设计（WSUD）研究，综合了最佳管理实践（BMP）和最佳规划实践（BPP）的优点，使城乡雨水利用与景观设计结合并使之优化。

现在，“节水优先”已成为新时期的重要治水理念。为大力推动全社会节水，全面提升水资源利用效率，形成节水型生产生活方式，保障国家水安全，促进高质量发展，2018年制定的《国家节水行动方案》。方案中提出：到2022年，创建150个节水型灌区和100个节水农业示范区；到2035年形成健全的节水政策法规体系和标准体系，全国用水总量严格控制在7000亿 m^3 以内。

然而，我国农业水资源开发利用容易受到政策、体制、机制等因素的影响。新中国成立以来，农业用水总体呈现出“持续增长—缓慢下降—缓慢上升—基本稳定”的趋势。1949年我国农业用水总量为1001亿 m^3 。受“水利是农业的命脉”“土地承包制”等影响，1949—1996年农业用水量持续增长，1997年农业用水达3920亿 m^3 ，农业用水占总用水量的97.1%。1998年进行灌区续建配套与节水改造后，2003年农业用水减少到3433亿 m^3 。2004年实行以“取消农业税、工业反哺农业”为主要内容的农业新政后，农业用水缓慢上升，2012年达到3902.5亿 m^3 。2015年，提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针后，2017年农业用水下降至3766.40亿 m^3 ，约占总用水量的62.32%；全国农田灌溉水有效利用系数达到0.545。

总体来说，我国农业用水总量较大，效率不高，资源性缺水、工程性缺水与水质性缺水并存，水资源供需矛盾尖锐。我国各地农业水分生产率不足 $1.5kg/m^3$ ，远低于 $2kg/m^3$ 的世界先进水平。农业水污染严重，大量化肥和化学农药残余部分储留在土壤、水体及大气环境中，造成了对农业资源和生态环境的污染。被污染的河流水用于灌溉，对土壤环境产生严重的不良影响，影响了农产品质量。农业用水基础设施中“重建设、轻管护”的现象较为普遍，农业水利工程设施产权不明，监测和管理手段薄弱，建后管护责任和措施不到位，管护资金不落实等问题依然突出。

到2030年要基本实现灌溉现代化，全国灌溉用水量控制在3730亿 m^3 ，农田有效灌溉面积达到10.35亿亩，节水灌溉率达到74%，农田灌溉水有效利用系数提高到0.6以上，单位灌溉水粮食产量超过 $1.60kg$ 。强化节水、建设现代灌溉农业和现代旱作农业体

系,是当前和今后一个时期提高农业水资源效率、保障 10 亿亩高标准农田建设的重要任务。所以需要不断转变灌溉发展方式,以自然资源与生态区划为基础,视“山、水、田、林、湖、草”为同一个生命共同体,建立农业水资源的利用与保护体系,制定区域性政策法规,推动农业水权制度改革,构建动态细分的水权交易机制,开展水资源监测,支持节水灌溉技术研发,实施水资源绿色保护工程,对农业水资源进行分区规划管理,实现农业水资源的绿色开发与高效利用,提高灌溉发展水平。

1.3 农业水资源学理论体系

1.3.1 水资源学科发展

水资源学科是一门融合自然资源、工程技术和社会经济的综合性应用学科。

20 世纪 50 年代以来,全球经济发展和人口大幅度增长,导致水资源问题日益突出,人们对水的高效、合理、永续利用有了新的认识,逐渐把水资源作为主体进行专门研究,并提到全球性的议事日程上来。1965 年,美国通过“水资源规划法规”,同时成立了水资源理事会,负责协调联邦政府各部门有关水资源的规划、管理和开发工作,并定期进行全美范围的水资源评价活动。1972 年,美国周文德教授倡议成立国际水资源协会,活动范围涉及水资源的规划、开发、保护和管理等各方面的科学技术问题,包括水资源的基础理论、评价、规划、设计、施工、运行管理、水旱灾害防治、河流整治等专题研究,逐渐形成了以水资源评价、规划、开发、利用和保护为核心的水资源学科体系。水资源系统的模型化与最优化、计算机模拟与仿真、多目标规划与决策等系统分析技术,得到了快速发展和广泛应用。

20 世纪 90 年代,由于社会经济飞速发展,水资源短缺和水污染形势越来越严峻,水资源开发利用与水资源保护之间的协调研究开始引起人们的重视。1992 年都柏林宣言、里约热内卢联合国环境与发展大会等,都将水资源开发利用的合理性和可持续性作为水资源活动的衡量标准。人们开始综合运用工程学、环境学、生态学、经济学、管理学、社会学、系统学等相关原理和方法,从资源利用、环境保护、经济增长、社会发展之间的相互依存与相互制约的定量关系入手,建立水资源学科独立的研究方法与体系。

进入 21 世纪,气候变化与强人类活动下的水安全、粮食安全与生态环境安全备受关注,水—粮食—能源—环境互馈关系及其大数据分析、智慧灌溉等成为全球新的研究热点,水资源优化配置与高效利用、节水减排与生态环境需水、水资源综合管理与水权交易、水资源调度与预报预警等,为水资源学科发展不断注入新的内涵,成为未来水资源学科发展的重要方向。

1.3.2 水资源学科内容

水资源学科是研究降水、地表水、地下水(简称“三水”)等水资源形成、转化、循环、演变及其评价、配置、开发、利用、节约、保护的科学,直接对象是水资源及其相关水库、水电站、泵站、水闸、渠系、管道、水厂等工程设施与工农业等生产、城乡等生活、河湖湿地等生态用户。它涉及三方面研究内容。

(1) 不同时空尺度水资源规律的基础与应用基础研究,包括农田、灌区、流域、地

区乃至全球等不同空间尺度和多年、年、季、月、日等不同时间尺度的降水、地表水、土壤水、地下水（简称“四水”）等的形成、转化、循环和演变规律研究。科学认识气候变化与人类活动下的水资源动态过程，从中发现从一个水资源系统向另一个水资源系统转化的界面过程及其物质能量交换关系，成为现代水资源转化过程研究的热点问题。

(2) 水资源开发利用过程中的应用基础与应用研究，包括水库、水电站、泵站、闸坝等水资源工程绿色开发模式及其多目标调度、综合利用方式、管理体制与运行机制等的研究。它是为了满足人类生存和发展需求，以不同时空尺度的水资源规律认识为基础，而采取的一切涉水活动，如地表水、地下水等多水源开发利用，雨洪水与劣质水利用，农业需水与节水灌溉，水资源优化配置与水权交易，高效用水与结构优化，供水安全与跨区域、跨流域引水，多水库联合调度，海水淡化，新型节水器具与技术的发明推广等。人类社会对区域水资源开发利用的方式，一直是人们研究的重点。

(3) 水资源系统与社会经济系统、生态环境系统三者互馈关系研究，包括水资源的适应性、脆弱性与敏感性，生态需水，环境容量，水资源承载能力，水—粮食—能源互馈关系等。它既强调水资源系统与社会经济系统、生态环境系统三者之间的关联性与动态平衡，又关注气候变化与人类活动对水资源—社会经济—生态环境复合系统影响的复杂性。可持续的水资源系统，必然要符合“适者生存”的进化论观点，又要适用于“增长极限”的经济学原理。

1.3.3 农业水资源学

农业水资源学是水资源学的重要分支，主要研究农业生产活动中降雨、地表水、土壤水、作物水、地下水（简称“五水”）相互转化、消耗、运移、演变的过程，及其评价、利用、调配、预测和调控规律。与传统水资源学相比，农业水资源学更加关注农业生产过程中的灌溉供水、田间用水、作物耗水、农田排水过程及其灌溉用水效率，强调以田间土壤水资源为核心的“四水”甚至“五水”转化、运移、演变规律，突出田间水管理与渠系输配水管理，节水灌溉与非常规水利用，水库、湖泊、塘坝等地表水源与地下水源的联合利用调控。

农业水资源学既是水资源学科的重要组成部分，也是农业水土工程学科的重要组成部分。涉及农业、水利、资源、环境、生物、生态、管理等多学科交叉，具有基础与应用基础学科、应用学科和综合学科的特征。其中，基础与应用基础学科研究主要表现在不同自然环境与农业生产条件下，农田、灌区和流域等不同区域尺度和年、季、月、日等不同时间尺度的“三水”“四水”“五水”转化、消耗、运移、演变机制及规律，影响不同时空尺度农业耗需水的主控因子及其与降雨、地表水、土壤水、地下水的相互关系，不同土地利用下灌区产汇流及其高效利用机制等方面；应用学科研究涉及降雨、地表水、土壤水、地下水、农田排水等劣质水的灌溉利用模式，多水源联合调控机制，库（湖）、塘（坝）、闸（站）、渠系（管道）联合优化配水技术等；综合学科研究包括水肥一体化与农田水管理、灌溉效率与水足迹、生态灌区与农业面源污染、灌溉排水与旱涝灾害防治、灌区信息化与自动化、农业水价与水权交易等。

农业水资源学具有相对独立的学科基础。与水资源学一样，水文学是农业水资源学