

中国工程院重大咨询项目

中国农业资源环境若干战略问题研究

农业高效用水卷

中国农业水资源高效 利用战略研究

王浩 汪林 主编

杨贵羽 张宝忠 吴文勇 副主编

RESEARCH ON THE STRATEGY FOR AGRICULTURAL
WATER RESOURCES EFFICIENT USE
IN CHINA

 中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国工程院重大咨询项目·中国农业资源环境若干战略问题研究. 农业高效用水卷: 中国农业水资源高效利用战略研究/王浩, 汪林主编. —北京: 中国农业出版社, 2019. 8

ISBN 978-7-109-25514-2

I. ①中… II. ①王… ②汪… III. ①农业资源-研究报告-中国 ②农业环境-研究报告-中国 ③农田水利-节约用水-研究-中国 IV. ①F323.2 ②X322.2 ③S279.2

中国版本图书馆CIP数据核字 (2019) 第095512号

农业高效用水卷: 中国农业水资源高效利用战略研究
**NONGYE GAOXIAO YONGSHUI JUAN: ZHONGGUO NONGYE
SHUIZIYUAN GAOXIAO LIYONG ZHANLÜE YANJIU**

审图号: GS (2018) 6807号

中国农业出版社

地址: 北京市朝阳区麦子店街18号楼

邮编: 100125

责任编辑: 孙鸣凤

版式设计: 北京八度出版服务机构

责任校对: 巴洪菊

印刷: 北京通州皇家印刷厂

版次: 2019年8月第1版

印次: 2019年8月北京第1次印刷

发行: 新华书店北京发行所

开本: 889mm×1194mm 1/16

印张: 20.5

字数: 360千字

定价: 180.00元

版权所有·侵权必究

凡购买本社图书, 如有印装质量问题, 我社负责调换。

服务电话: 010-59195115 010-59194918

本书编委会

顾 问：山 仑 康绍忠

主 编：王 浩 汪 林

副主编：杨贵羽 张宝忠 吴文勇

编 委（按姓氏笔画排序）：

王 浩	王 蕾	石萌莎	任 理
刘 钰	杜丽娟	李 佩	李孟南
杨贵羽	吴文勇	汪 林	张宝忠
张雪靓	张瑀桐	胡雅琪	姚懿真
贾 玲	唐克旺	彭致功	雷 波

课题组成员名单

- 组 长：**王 浩 中国工程院院士，中国水利水电科学研究院教授级高级工程师
汪 林 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师
- 副 组 长：**杨贵羽 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师
张宝忠 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师
吴文勇 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师
- 顾 问：**山 仑 中国工程院院士，西北农林科技大学水土保持研究所研究员
康绍忠 中国工程院院士，中国农业大学教授
- 主要成员：**刘 钰 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师
唐克旺 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师
彭致功 中国水利水电科学研究院高级工程师
杜丽娟 中国水利水电科学研究院高级工程师
雷 波 中国水利水电科学研究院高级工程师
王 蕾 中国水利水电科学研究院高级工程师
贾 玲 中国水利水电科学研究院高级工程师
任 理 中国农业大学教授
姚懿真 中国水利水电科学研究院硕士研究生
张瑀桐 中国水利水电科学研究院硕士研究生
胡雅琪 中国水利水电科学研究院博士研究生
李孟南 吉林省水利水电勘测设计研究院工程师
张雪靓 中国农业大学博士研究生
李 佩 中国农业大学博士研究生
石萌莎 中国农业大学硕士研究生



前言

P R E F A C E

随着我国粮食生产不断向北方转移，灌溉面积于1996年逆转为北方大于南方，农业水资源短缺、耕地亩均水资源量不足、水土资源匹配错位等问题更加突出。尽管2000年以来全国农业灌溉面积呈增长趋势，但农业用水量基本维持在3 860亿 m^3 左右，呈现“零”增长。全国七大农业主产区中的五大区（东北平原、黄淮海平原、汾渭平原、河套灌区和甘肃新疆主产区）、800多个粮食主产县的60%集中在常年灌溉区和补充灌溉区，水稻、小麦、玉米三大粮食作物播种面积逐渐向常年灌溉区和补充灌溉区集中，这些都增加了对灌溉用水的需求。多年平均情形下灌溉缺水量超过300亿 m^3 ，灌溉农业面临严峻挑战：一是农业干旱缺水态势进一步增加，北方农业水资源胁迫度增加；二是粮作种植布局与降水分布不匹配，对灌溉的依赖性增加；三是灌溉开采量不断增加，华北浅层地下水位持续下降；四是高效节水工程和信息化建设滞后，农业用水效率偏低。

在新形势下，我国粮食生产的主要矛盾已由总量不足转变为结构性矛盾，同时我国北方多数地区地表水资源开发程度已超过上限，地下水严重超采，黄河以北农业主产区地下水利用濒临危机，难以持续。推进农业供给侧结构性改革、适水种植、强化节水是当前和今后一个时期提高农业水资源质量和效率、建设10亿亩高标准农田、保障粮食安全的重要任务。

本书是在中国工程院重大咨询项目“中国农业资源环境若干战略问题研究”第一课



题“中国农业水资源高效利用战略研究”成果基础上，经过系统整理编撰而成，由课题报告和专题报告两部分组成。第一部分课题报告共分六章，系统梳理和介绍了我国农业用水态势及面临的问题、保障粮食安全的水资源需求阈值、现代灌溉农业和现代旱作农业、农业非常规水灌溉安全保障策略、农业水资源高效利用战略举措以及结论与建议。第二部分包括三个专题：专题一，保障我国粮食安全的水资源需求阈值及高效利用战略研究，从数量和质量上研究我国农业用水的变化态势及利用效率，分析未来保障国家粮食安全和农产品供给的水资源需求阈值，提出保障粮食和农产品安全的农业水资源合理利用战略举措；专题二，现代农业高效用水模式及有效管理措施，研究不同分区典型作物灌溉需水量时空分布规律，分析典型地区农业用水效率空间变异规律，提出现代灌溉农业和旱作农业分区优化技术模式及其管理措施；专题三，农业非常规水灌溉安全保障策略，从利用规模和空间分布上评价我国农业非常规水资源开发利用现状，分析非常规水资源利用效益与生境影响，提出我国农业非常规水利用前景及保障策略。

本书编撰过程中，得到了项目组组长石玉麟院士、中国工程院高中琪局长等的热情指导和帮助，得到了项目组其他课题组专家的大力协助，在此一并致以衷心感谢！

本书由多人合作完成，为了保持专题的相对独立性，在总体协调的前提下，编辑过程中尽可能保持各章节的特性。受时间和水平的限制，许多问题还有待于深入研究，错误和不足之处在所难免，欢迎批评指正！

本书编委会

2018年3月



C O N T E N T S

前言

课题报告

中国农业水资源高效利用战略研究

- 一、我国农业用水态势及面临的问题 // 2
 - (一) 我国水资源安全现状 // 2
 - (二) 农业用水特征及发展态势 // 5
 - (三) 农业用水面临的形势和问题 // 12
- 二、保障粮食安全的水资源需求阈值 // 13
 - (一) 粮食生产与消费状况 // 14
 - (二) 适水种植与粮食生产关系 // 20
 - (三) 保障未来我国粮食生产安全的需水阈值分析 // 27
- 三、现代灌溉农业和现代旱作农业 // 36
 - (一) 全国主要作物灌溉需水量分布特征 // 36



(二) 主要农作物用水效率分布特征	//	39
(三) 现代灌溉农业优化技术模式	//	44
(四) 现代旱作农业优化技术模式	//	58
(五) 现代灌溉农业体系建设	//	61
四、我国农业非常规水灌溉安全保障策略	//	63
(一) 农业非常规水资源利用现状与潜力	//	64
(二) 农业非常规水资源灌溉技术模式	//	66
(三) 农业非常规水资源利用技术保障	//	67
(四) 农业非常规水资源利用政策保障	//	70
五、农业水资源高效利用战略举措	//	71
(一) 建设节水高效的现代灌溉农业	//	72
(二) 发展集雨增效的现代旱地农业	//	85
(三) 农业非常规水资源利用	//	86
(四) 重点工程	//	87
六、结论与建议	//	89
(一) 主要结论	//	89
(二) 主要建议	//	90

专题报告

专题报告一 保障我国粮食安全的水资源需求阈值及 高效利用战略研究

一、我国农业用水现状及问题	//	95
(一) 我国水资源安全现状	//	95

(二) 农业用水演变态势	//	100
(三) 农业用水面临的形势和问题	//	115
二、我国粮食生产与消费状况	//	122
(一) 粮食生产状况	//	122
(二) 粮食消费状况	//	128
(三) 粮食生产与消费特点	//	131
三、适水种植与粮食生产的水资源需求关系	//	138
(一) 粮食生产总需水量和灌溉水量 (蓝水)	//	139
(二) 典型粮食作物生产需水量及其灌溉水量 (蓝水) 需求特征	//	141
(三) 粮食作物需水量空间分布特征	//	145
(四) 粮食生产与消费中灌溉水量的区域转移	//	159
四、保障未来我国粮食生产安全的需水阈值分析	//	160
(一) 粮食刚性需求目标	//	160
(二) 灌溉面积发展规模	//	162
(三) 农田灌溉需水量	//	165
(四) 农田灌溉可用水量及缺水状况	//	173
五、农业水资源高效利用战略举措	//	176
(一) 发展目标与总体布局	//	176
(二) 建设节水高效的现代灌溉农业体系	//	178
(三) 重点工程	//	191

专题报告二 现代农业高効用水模式及有效管理措施

一、全国主要作物灌溉需水量分布特征	//	196
(一) 研究分区和基础数据	//	196
(二) 分区主要作物需水量与净灌溉需水量	//	196



二、典型地区粮食作物用水效率和空间变异规律 // 205

- (一) 黄淮海平原冬小麦、夏玉米和苜蓿 // 205
- (二) 三江平原水稻与玉米 // 211
- (三) 松嫩平原水稻与玉米 // 212
- (四) 内蒙古东部牧区青贮玉米 // 213
- (五) 长江中下游地区中稻 // 214
- (六) 四川盆地水稻 // 215
- (七) 广西甘蔗 // 215
- (八) 新疆棉花 // 216

三、现代灌溉农业的优化技术模式 // 217

- (一) 三江平原区 // 217
- (二) 松嫩平原区 // 224
- (三) 内蒙古东部牧区 // 228
- (四) 黄淮海平原区 // 230
- (五) 长江中下游地区 // 241
- (六) 四川盆地 // 246
- (七) 广西甘蔗产区 // 249
- (八) 新疆棉花产区 // 252

四、现代旱作农业优化技术模式 // 256

- (一) 西北黄土高原区 // 256
- (二) 东北西部半干旱区 // 260
- (三) 华北西北部半干旱区 // 263

五、现代灌溉农业体系及其有效管理措施 // 266

- (一) 现代灌溉农业体系 // 266
- (二) 现代灌溉农业体系的总体发展措施 // 272
- (三) 现代灌溉农业体系分区发展措施 // 274

专题报告三 中国农业非常规水灌溉安全保障策略

- 一、农业非常规水资源开发利用现状评价 // 281**
 - (一) 国外农业非常规水资源开发利用状况 // 281
 - (二) 国内农业非常规水资源利用的空间分布特征与利用规模 // 285
 - (三) 国内外农业非常规水资源开发利用模式总结 // 287
- 二、农业非常规水资源利用效益分析与生境影响 // 289**
 - (一) 农业再生水利用效益分析与生境影响 // 289
 - (二) 农业微咸水利用效益分析与生境影响 // 299
- 三、农业非常规水资源利用的前景及保障策略 // 302**
 - (一) 农业非常规水资源利用潜力分析 // 302
 - (二) 农业非常规水资源利用技术保障 // 305
 - (三) 农业非常规水资源利用政策保障 // 308
- 参考文献 // 310**



课题报告

中国农业水资源高效利用
战略研究

一、我国农业用水态势及面临的问题

(一) 我国水资源安全现状

我国淡水资源总量为2.8万亿 m^3 ，但人均占有量少，时空分布不均，水土资源不相匹配，加之快速发展的经济社会和城市化进程对水资源需求日益增加，水资源供需矛盾突出，引发了一系列与水相关的生态环境问题。据统计，2015年我国水资源开发利用率为21.8%，北方地区（松花江区除外）水资源开发利用均超过40%的国际警戒线，海河区水资源开发利用最高，达到119.7%；南方地区水资源开发利用均不足21%（表0-1）。

表0-1 2015年水资源一级区开发利用率

单位：亿 m^3 ，%

区域	2015年水资源量			当地供水量			水资源开发利用率		
	总量	地表水	地下水	总量	地表水	地下水	总量	地表水	地下水
全国	27 963	26 901	7 797	6 103.1	4 969.4	1 069.2	21.8	18.5	13.7
松花江区	1 480	1 276	474	501.5	293.0	206.9	33.9	23.0	43.7
辽河区	304	227	163	203.3	96.3	102.6	67.0	42.5	63.1
海河区	260	108	214	311.6	84.4	208.1	119.7	77.8	97.4
黄河区	541	435	337	474.7	342.1	123.9	87.7	78.6	36.7
淮河区	854	607	374	515.4	346.3	159.0	60.3	57.0	42.5
长江区	10 330	10 190	2 546	2 126.0	2 041.6	71.6	20.6	20.0	2.8
东南诸河区	2 548	2 537	554	326.5	318.2	7.0	12.8	12.5	1.3
珠江区	5 337	5 324	1 163	857.0	820.0	32.7	16.1	15.4	2.8
西南诸河区	5 014	5 014	1 176	103.3	99.3	3.7	2.1	2.0	0.3
西北诸河区	1 294	1 183	796	683.8	528.2	153.7	52.8	44.6	19.3

目前，我国呈现出大量与水相关的生态环境问题。根据相关统计，20世纪末，全国600多座城市中有400多座城市存在供水不足问题，其中缺水较为严重的城市达110个，城市缺水总量约60亿 m^3 。海河、淮河、辽河和黄河中下游地区等北方河流的生态环境用水长期处于匮乏状态，在多年平均条件下缺水88亿 m^3 （酃建强等，2011），主要河流断流，白洋淀、七里海等12个主要湿地总面积较20世纪50年代减少了5/6（王浩等，

2016);地下水超采严重,超采区涉及21个省(自治区、直辖市),集中分布在华北平原、长江三角洲和甘肃—新疆绿洲等地区(陈飞等,2016)。

根据《2015中国水资源公报》,在全国23.5万km的评价河长中,水质超过Ⅳ类的占25.8%;在面积大于100km²的41个评价湖泊中,水质超过Ⅳ类的占65.9%;在全国评价的3048个重要江河湖泊水功能区中,水质不符合水功能区限制纳污红线主要控制指标要求的占29.2%。根据《2015中国水环境质量公报》,在全国423条主要河流、62座重点湖泊(水库)的967个国控地表水监测断面(点位)中,Ⅰ~Ⅲ类、Ⅳ~Ⅴ类、劣Ⅴ类水质断面(点位)分别占64.5%、26.7%、8.8%。以水量、水质和水生态三大基本要素为约束条件,当前我国水资源承载能力状况可以归为五大区(表0-2、图0-1):

一是超过水资源承载能力的区域,即不安全区域,包括海河区、黄河中下游、淮河中游及沂沭泗、山东半岛、辽河流域,存在水资源与经济社会发展匹配关系差的问题,区域水资源开发利用率均在70%以上,生态环境恶化,严重制约了经济社会的可持续发展,其中以海河流域南系最为严重。黄河流域中下游是传统干旱区,自国务院实行黄河水量分配方案以来,特别是近5年黄河泥沙量减少,潼关站实测泥沙量由2001年的1.33亿t下降到2015年的0.55亿t,相应减少了对冲沙水量的需求,增加了机动水量。

二是接近水资源承载能力的区域,即较不安全区域,主要位于西北诸河片区的河西内陆河、吐哈盆地、天山北麓、塔里木河等西北干旱地区。该区域水资源禀赋差,生态环境脆弱,目前水资源开发利用率已超过50%,基本没有挖掘潜力,成为典型的资源型缺水地区。

三是水资源承载能力富裕度不高,环境和生态较安全,可认为是水资源安全状况一般的区域,主要包括松花江流域、淮河上游及下游地区、内蒙古高原及青藏高原内陆河、东北和西北的跨界河流。该区域水资源开发利用程度已接近50%,但仍有一定的开发潜力。特别是松花江流域,在北方地区水资源相对丰富,开发利用程度较低,随着三江连通工程^①的建设,区域水资源安全状况将进一步提高。

四是水资源开发尚有一定潜力的区域,即较安全地区,包括长江下游及岷沱江、嘉陵江、汉江等支流,珠江南北盘江、东江、珠江三角洲及粤西桂南诸河、海南岛、浙东沿海诸河。该区域水资源承载能力有一定的富裕度,但太湖流域、珠江三角洲等地区水环境状况较差,存在水质性缺水问题,粤西浙东等沿海地区水源和供水调蓄能力不足。

^① 三江连通工程:以黑龙江支流鸭蛋河入江口作为渠首,然后向南穿过嘟噜河、梧桐河、鹤立河和阿凌达河,至松花江左岸注入松花江,增加工程范围内灌区面积和灌溉水量。

五是水资源安全区域（仍具有一定开发潜力的区域），包括长江上中游（除岷沱江、嘉陵江、汉江）、珠江、西江、北江、东南诸河（除浙东沿海诸河），西南诸河。该区域水资源开发利用维持在10%~30%，水资源富裕度较高，水资源开发尚有一定潜力，水生态环境状况良好。

表0-2 我国区域水资源安全状况

区域	水资源承载状况	水环境承载状况	水生态安全状况	综合评价
海河区、黄河中下游、淮河中游及沂沭泗和山东半岛、辽河流域	不安全	较安全	不安全	不安全
河西内陆河、吐哈盆地、天山北麓、塔里木河	较不安全	较安全	一般	较不安全
松花江流域、淮河上游及下游地区、内蒙古高原及青藏高原内陆河、东北和西北跨界河流	一般	较安全	较安全	安全状况一般
长江下游及岷沱江、嘉陵江、汉江等支流，珠江南北盘江、东江、珠江三角洲及粤西桂南诸河、海南岛、浙东沿海诸河	较安全	较安全	较安全	较安全
长江上中游（除岷沱江、嘉陵江、汉江）、珠江、西江、北江、东南诸河（除浙东沿海诸河）、西南诸河	安全	安全	安全	安全

资料来源：郇建强，王建生，颜勇，2011. 我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J]. 中国水利 (23): 42-51.

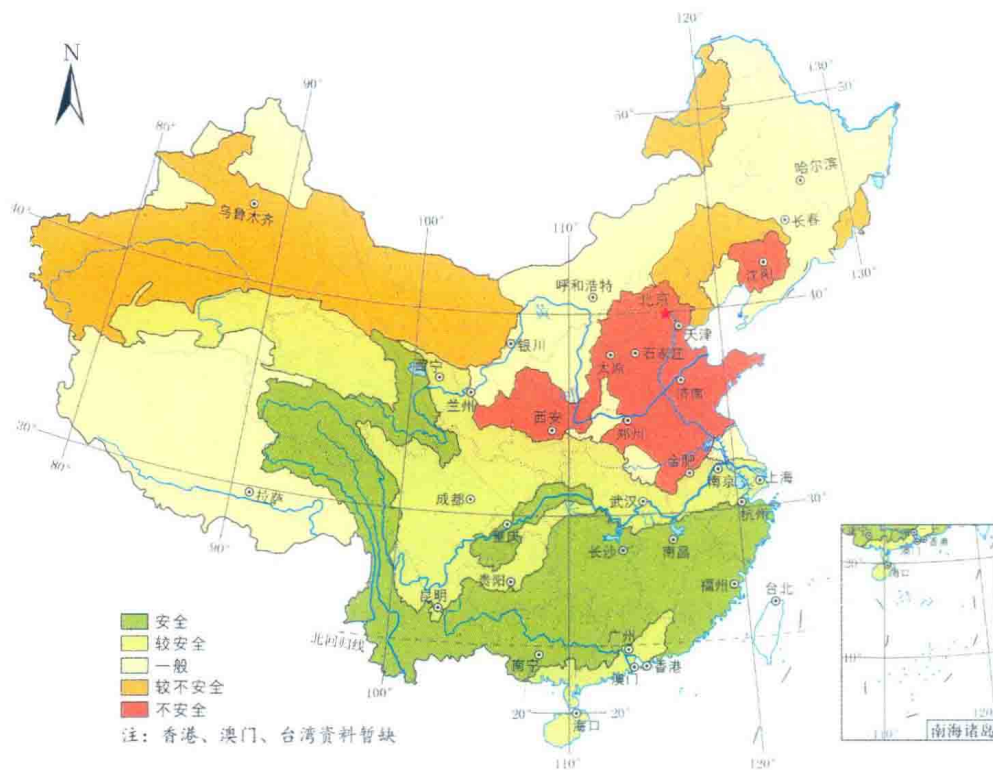


图0-1 当前中国水资源安全状况

（二）农业用水特征及发展态势

1. 农业对灌溉依赖度高，新增灌溉面积难度大

我国水资源丰枯变化大、区域分布不均，灌溉面积发展在很大程度上决定农业发展的前景。根据《全国水利统计年鉴2016》，2015年我国灌溉面积达到10.81亿亩，位列全球第二，其中耕地灌溉面积9.88亿亩，占总灌溉面积的90%以上，耕地灌溉率为48.8%，远高于美国（16%）、澳大利亚（5%），我国农业发展对水资源的依赖程度高。

随着土地资源的紧缺，我国耕地被占用严重，2000—2010年全国耕地被占用3 471万亩，其中有效灌溉面积占用达2 383万亩，占68.5%。2010—2015年耕地面积因建设占用、灾毁、生态退耕、农业结构调整等原因逐年下降，虽然耕地实施18亿亩红线制度，基本保持占补平衡，但补充耕地的质量较差，很多不具备灌溉条件，耕地“占优补劣”现象突出且难以逆转。另外，我国后备耕地资源匮乏，据最新数据显示，全国后备耕地资源总面积8 029万亩，其中4 721.97万亩受水资源利用条件的限制，短期内不适宜开发利用。保护现有灌溉面积和灌溉质量，建设旱涝保收、高产稳产的高标准农田，是保障我国农业生产稳定的关键。

2. 灌溉面积持续增长，农业用水总量趋于零增长

根据《中国水利统计年鉴》，1949—2015年我国农田有效灌溉面积从2.39亿亩发展到9.88亿亩，增加了7.49亿亩，期间经历了四个发展阶段：中华人民共和国成立初期的初级快速发展阶段、1958—1980年飞速发展阶段、1980—1995年节水灌溉发展起步阶段和1995—2015年节水灌溉快速发展阶段（图0-2）。1980年、1998年和2010年农田

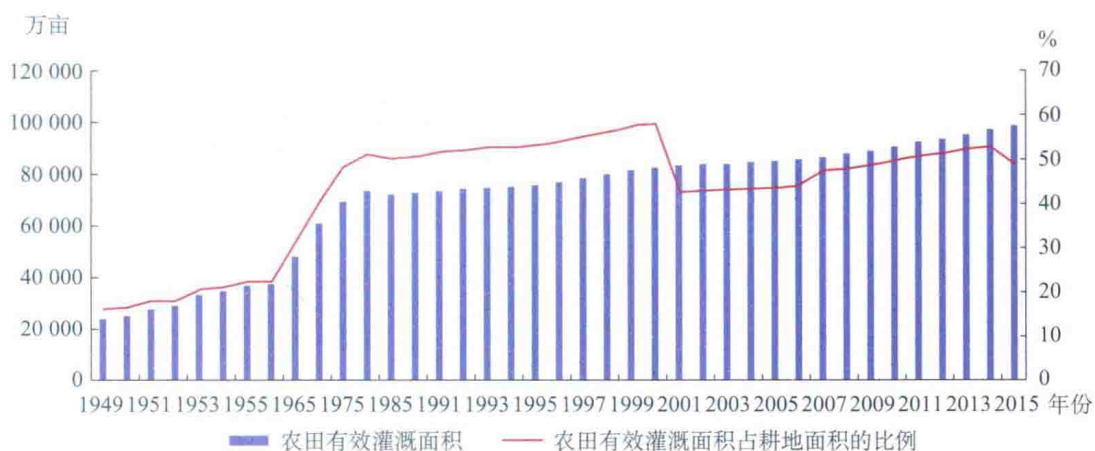


图0-2 1949—2015年农田有效灌溉面积发展状况

有效灌溉面积先后突破7亿亩、8亿亩和9亿亩；2015年全国农田有效灌溉面积占耕地面积（按20.25亿亩计）比例达到48.8%。

在空间上，灌溉面积发展北方快于南方，以1996年为界，由南方大于北方逆转为北方大于南方（图0-3）。全国近70%的农田有效灌溉面积集中分布在河南、山东、黑龙江、辽宁、吉林、内蒙古、河北、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、四川13个粮食主产省（自治区）（表0-3）。

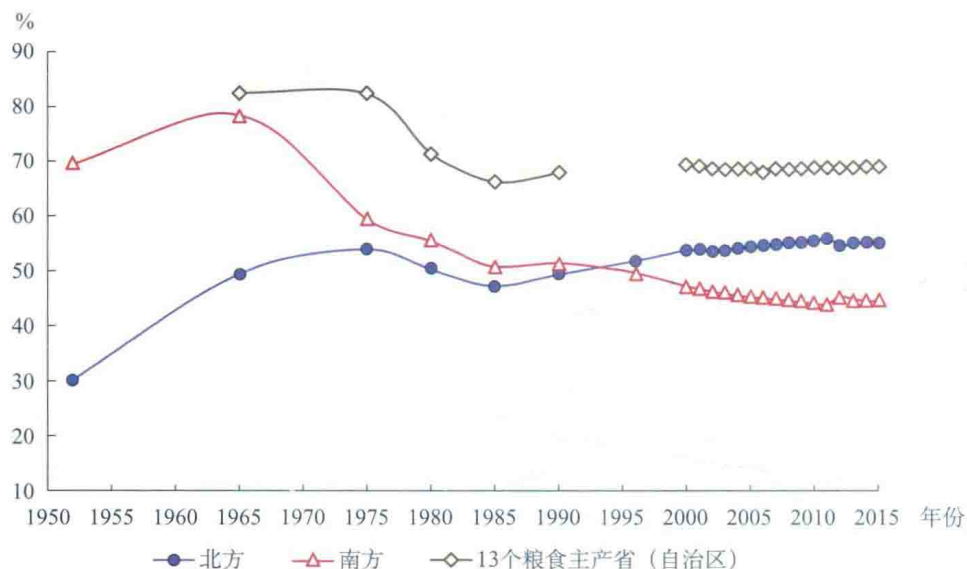


图0-3 1950—2015年南北方农田有效灌溉面积占全国的比重

表0-3 13个粮食主产省（自治区）农田有效灌溉面积

单位：万亩，%

地区	农田有效灌溉面积				农田有效灌溉面积占全国的比重			
	2001年	2005年	2010年	2015年	2001年	2005年	2010年	2015年
全国	83 613	84 844	92 522	98 809	100.00	100.00	100.00	100.00
13个粮食主产省 (自治区)	57 417	58 400	63 882	68 521	68.67	68.83	69.05	69.35
河北	6 665	6 766	6 895	6 672	7.97	7.97	7.45	6.75
内蒙古	3 657	4 053	4 609	4 630	4.37	4.78	4.98	4.69
辽宁	2 249	2 290	2 383	2 280	2.69	2.70	2.58	2.31
吉林	2 321	2 421	2 711	2 686	2.78	2.85	2.93	2.72
黑龙江	3 278	3 591	6 499	8 296	3.92	4.23	7.02	8.40
山东	7 196	7 185	7 480	7 447	8.61	8.47	8.08	7.54
河南	7 204	7 296	7 726	7 816	8.62	8.60	8.35	7.91
小计	32 570	33 602	38 303	39 827	38.95	39.6	41.40	40.31