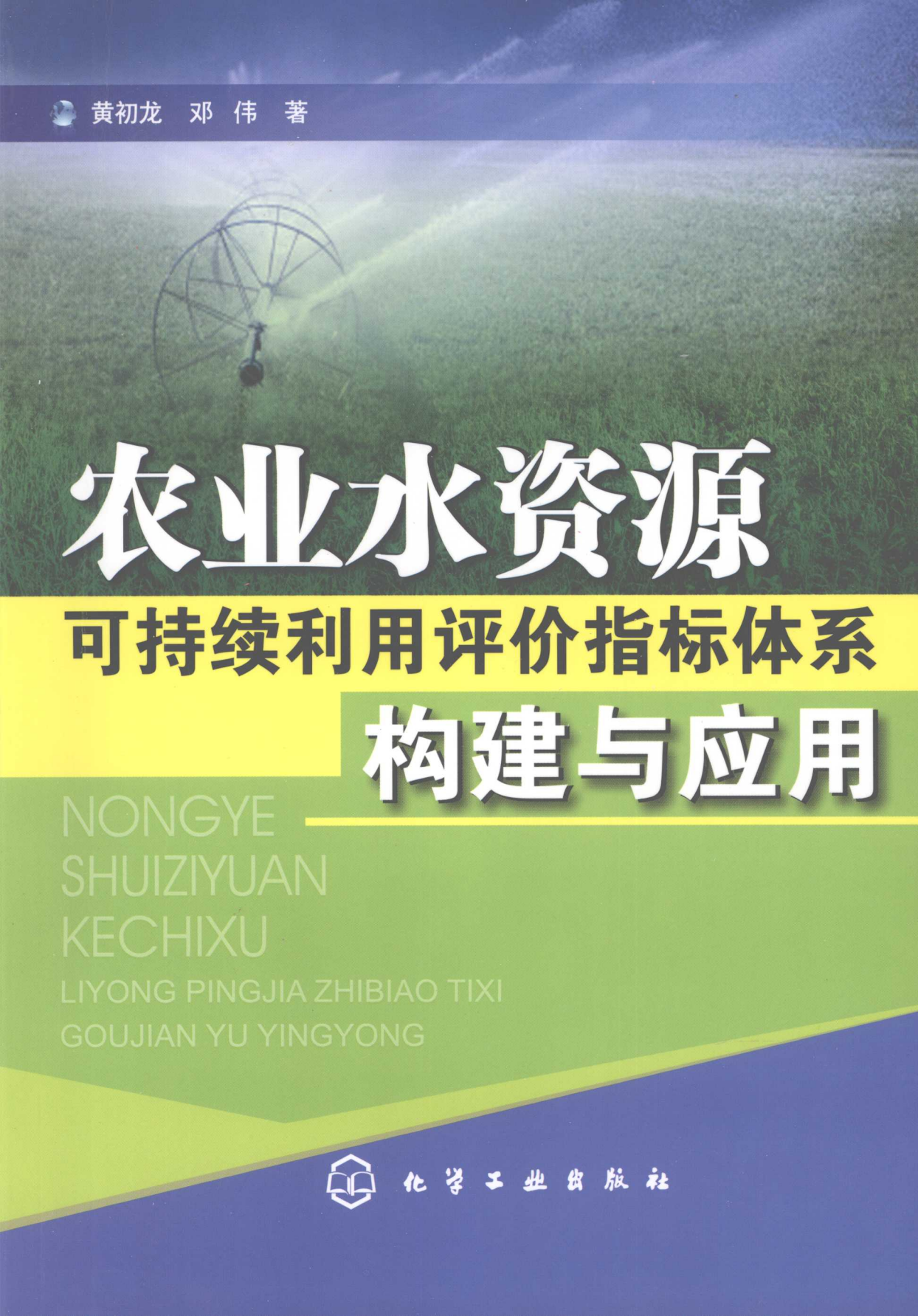


 黄初龙 邓 伟 著



农业水资源

可持续利用评价指标体系 构建与应用

NONGYE
SHUIZIYUAN
KECHIXU

LIYONG PINGJIA ZHIBIAO TIXI
GOUJIAN YU YINGYONG



化学工业出版社

中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-19-1-02)

福建省青年科技人才创新项目(2006F3115)

桐江学术丛书

农业水资源

可持续利用评价指标体系

构建与应用

NONGYE
SHUIZIYUAN
KECHIXU

LIYONG PINGJIA ZHIBIAO TIXI
GOUJIAN YU YINGYONG

黄初龙 邓伟 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从理论上探讨了农业水资源可持续利用评价指标体系构建原理,阐述了反映农业可持续发展与水资源可持续利用相协调的兼顾科学性与可操作性、区域通用性与适用性的指标体系的构建方法,进而提出了制定促进复杂系统可持续发展对策的主导指标的产生方法,探讨了如何在指标体系中体现可持续发展内涵的时、空两个维度,使指标体系具有较强的科学性、可操作性和区域适用性。

本书可供从事资源、环境、水资源规划与管理、农田水利、地学等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考,也可供高等院校相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

农业水资源可持续利用评价指标体系构建与应用/黄初龙,邓伟著. —北京:化学工业出版社,2008.6
ISBN 978-7-122-02954-6

I. 农… II. ①黄…②邓… III. 农业资源:水资源-资源利用-可持续发展-研究 IV. S27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 073660 号

责任编辑:刘兴春

文字编辑:荣世芳

责任校对:陶燕华

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

720mm×1000mm 1/16 印张13½ 彩插1 字数268千字

2008年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:45.00元

版权所有 违者必究

前 言

我国于1999年发布的《水资源评价导则》指出水资源综合评价应建立评价指标体系(IS)。农业水资源可持续利用(SUAWR)评价属于综合评价,我国目前尚无统一通用的导则及IS。本书以可持续发展理论和系统科学思想为指导,从资源、环境、地理、农业等学科角度,在总结前人关于IS研究成果及农田用水调查基础上,制定SUAWR评价IS构建的理论体系和方法论,探讨并制定科学适用的IS构建模式,尝试构建能兼顾SUAWR内涵的、全面反映农业供水各环节的、具有科学性与可操作性的、具有区域通用性与适用性的SUAWR评价IS。构建一般性SUAWR评价IS后,在不改变IS结构与功能的基础上,结合研究区农业水资源(AWR)系统实际,调整部分指标,应用于研究区SUAWR评价。

全书大致分为四个部分。第一,在农业用水可持续理论、水资源评价、水资源评价指标等与SUAWR评价IS构建相关的研究进展回顾基础上,明确了SUAWR评价IS研究中存在的问题。第二,通过AWR、SUAWR等相关概念的辨析,提出“三效”、“三生”、“三量”、“二维”、“二性”五类同评的SUAWR评价原则及IS构建模式与方法,构建了由目标层、运行层、框架层、指标层4个层次组成的能同时反映AWR复合系统的时间维与空间维可持续性的一般性区域SUAWR评价IS。第三,在东北区AWR系统现状分析基础上,选取具有区域适用性和可操作性的指标,把一般性区域SUAWR评价IS调整为东北区SUAWR评价IS,并应用于东北区SUAWR现状评价,分析SUAWR分异规律及其主导指标,分析IS的可操作性、通用性等。在此基础上,提出东北典型粮食主产区SUAWR预测评价IS对典型区的SUAWR发展趋势进行预测。进而,根据SUAWR现状评价所得主导指标与预测结果提出SUAWR对策。第四,在福建省AWR系统现状分析基础上,把东北区SUAWR评价IS调整为福建省SUAWR评价IS,验证一般性区域SUAWR评价IS的跨区域通用性。

研究表明,SUAWR评价结果符合实际,SUAWR对策可为AWR相关管理部门提供宏观决策参考,四层结构模式IS能发挥反映SUAWR内涵、揭示SUAWR区域分异规律及其主导因素、预测SUAWR趋势、为SUAWR分区及其对策制定提供依据等功能作用,符合农业可持续发展的水资源需求评价的要求,具有科学性、可操作性、区域适用性与通用性。IS构建模式丰富了IS构建理论,评价模式丰富了水资源评价理论,可为国家制定相应的AWR评价导则和IS提供参考。

本书是在邓伟研究员主持的中国科学院知识创新工程重大项目《东北区农业水土资源优化调控机制与技术体系研究》专题“区域AWR时空分异规律与高效

利用途径”(KZCX1-SW-19-1-02)及黄初龙主持的福建省青年科技人才创新项目“福建省中长期水资源供需发展趋势与平衡途径研究”(2006F3115)的支持下,在邓伟老师的指导下,由黄初龙撰写而成的,本书的完成也离不开泉州师范学院“桐江学术丛书出版基金”的资助。借此出版之际,向所有支持、关心和给予我们帮助的老师、同学和朋友们及单位有关领导致以最诚挚的谢意!

特别感谢中国科学院东北地理与农业生态研究所杨建峰、朱颜明、刘兴土、马学慧、张柏、刘景双、吕宪国、章光新、胡金明、闫敏华、阎百兴、齐晓宁、裘善文、佟连军等专家学者,卢晓宁、杨波、王志强、刘强、栾兆擎、曹慧聪、李彬、梁爱珍、陈定贵等各位博士,吉林大学赵勇胜、杨毅恒等教授,东北师大尚金城、许林书等教授,吉林农业大学赵兰坡教授,中国水利水电科学研究院严登华博士后等在本著作完成过程中给予的宝贵建议和帮助!感谢中国科学院水利部水土保持研究所徐学选博士、西北农林科技大学宋松柏博士、西安理工大学宋孝玉博士、辽宁师范大学孙才志教授及相关专家、学者在IS咨询中提出的宝贵意见。感谢黑龙江省、吉林省、辽宁省、福建省的水利厅、国土资源厅、气象局、气象台、统计局、农业委员会、林业厅、环保局等单位的各位领导和同志们在调研和资料收集中的真诚帮助!除此之外,本书还吸收了部分文献的学术思想,在此一并致谢!

限于编写时间和水平,书中不足之处在所难免,敬请读者指正。

著者

2008年5月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 研究背景和意义	1
一、研究背景	1
二、研究意义	2
第二节 研究内容、方法、技术路线及创新点	3
一、研究内容	3
二、研究方法	3
三、研究思路	3
四、技术路线	4
五、创新与特色	4
第二章 国内外研究进展	5
第一节 农业发展与农业水资源利用的可持续思想	5
第二节 水资源评价与农业水资源评价	7
第三节 水资源评价指标	8
一、国外水资源评价指标	8
二、国内水资源评价指标	10
三、国内外水资源可持续利用评价指标体系研究存在的问题	13
第四节 指标体系赋权方法	17
第五节 水资源评价方法	17
一、国外水资源评价方法	17
二、国内水资源评价方法	19
三、灰色聚类法	19
四、模糊综合法	20
五、因子分析法	22
第三章 一般性农业水资源可持续利用评价指标体系构建	24
第一节 农业水资源可持续利用评价指标体系构建意义	24
一、农业水资源可持续利用评价采用指标体系的可能性	24
二、农业水资源可持续利用评价指标体系的构建意义	24
第二节 农业水资源可持续利用评价指标体系构建理论基础	27
一、农业水资源界定	27
二、农业水资源可持续利用内涵构成及其特征	30
三、农业水资源可持续利用评价目的	32
四、农业水资源可持续利用评价原则	32
第三节 农业水资源可持续利用评价指标体系构建方法论	33

一、构建思路	33
二、构建原则	34
三、构建模式	37
四、构建步骤	37
第四节 一般性农业水资源可持续利用评价指标体系构建	39
一、农业水资源可持续利用评价指标库	39
二、新拟指标	40
三、初选指标	40
四、一般性区域农业水资源可持续利用评价指标体系的构建	41
第四章 东北区农业水资源可持续利用评价指标体系构建	43
第一节 东北区农业水资源可持续利用评价意义	43
第二节 东北区农业水资源可持续利用现状评价年确定	44
第三节 东北区农业水资源系统概况	45
一、自然环境概况	45
二、农业发展概况	48
三、水资源开发利用现状	49
四、农业水资源开发利用状况	54
五、讨论	60
第四节 东北区农业水资源可持续利用评价指标体系构建	63
一、基于东北区农业水资源系统现状分析的区域适用性指标选取	63
二、东北区农业水资源可持续利用评价指标体系	67
第五节 东北区农业水资源可持续利用评价指标适用性分析	70
一、评价指标与农业用水环节的耦合性	70
二、评价指标与评价区现状的耦合性	70
第六节 东北区农业水资源可持续利用评价指标体系构成分析	73
一、指标体系结构分析	73
二、指标变量含义或来源	80
三、讨论	82
第五章 东北区农业水资源可持续利用评价指标体系的应用	83
第一节 东北区农业水资源可持续利用现状评价	83
一、基础数据来源及处理	83
二、指标实际值计算	83
三、指标实际值标准化处理	86
四、指标体系权重分配	89
五、农业水资源可持续利用现状评价	93
六、评价结果分析	113
七、讨论	125
第二节 东北区典型粮食主产区农业水资源可持续利用预测评价	126

一、预测评价区的典型性与概况	126
二、典型区农业水资源影响因素分析	131
三、预测评价指标体系	132
四、预测评价	134
五、指标实际值及其标准化处理	147
六、结果分析与讨论	147
第六章 东北区农业水资源可持续利用对策	152
第一节 基于现状评价的农业水资源可持续利用对策	152
一、东北区农业水资源可持续利用分区对策	152
二、东北区农业水资源可持续利用总体对策	159
第二节 基于预测评价的农业水资源可持续利用对策	166
一、德惠市农业水资源可持续利用对策	166
二、东北区农业水资源可持续利用对策	167
第三节 讨论	168
第七章 指标体系在福建省农业水资源可持续利用评价的应用	169
第一节 福建省农业水资源系统概况	169
一、自然环境概况	169
二、农业发展概况	171
三、水资源开发利用现状	172
四、农业水资源开发利用状况	175
第二节 福建省农业水资源可持续利用评价指标体系及其应用	175
一、指标体系	175
二、指标体系的应用	178
第八章 结论与展望	189
第一节 结论	189
第二节 展望	191
参考文献	196

第一章 绪 论

第一节 研究背景和意义

一、研究背景

水是农业的命脉,农业水资源 (agricultural water resources, AWR) 的供给能力制约着区域农业的发展,维系着农业生态系统及粮食安全生产。庞大的人口规模和水土资源存量的有限性决定了中国粮食安全主要依赖本国农业水资源可持续利用 (sustainable use of agricultural water resources, SUAWR), 然而,其农业对水土资源高强度开发导致 AWR 系统发生显著变化,出现了众多影响 SUAWR 的因素或问题。通过构建指标体系 (indicators system, IS), 进行 SUAWR 评价与预测,发现主导指标,才能制定科学可行的 SUAWR 对策。AWR 是一种具有复杂时空分异的动态资源,其可持续利用影响因素复杂多变,决定了 SUAWR 评价属于综合评价。我国于 1999 年发布的《水资源评价导则》指出水资源综合评价应建立评价 IS。然而,目前 AWR 评价尚无统一通用的导则及 IS。

随着人口增长和工业发展,农业供水不稳定、水污染、农业用水效益低下等问题加剧了部分地区农业可利用淡水资源的供需矛盾,影响农业发展和粮食稳产。据世界粮农组织 (FAO) 统计,全球陆地面积只有 11% 是可耕地,可耕地中只有 17% 可灌溉。目前,灌溉耕地估计生产了世界 40% 的粮食,吸纳了 30% 的农村人口,未来估计 60% 的粮食供给将依赖灌溉耕地 (Kijne, 2006)。然而,储存于河湖等可利用淡水水体中的水量仅占全球总水量的 0.75%, 其中 70% 已用于农业生产 (Prathapar, 2000)。生活和工业用水竞争加剧,意味着农业可利用水量的减少和食物生产用水短缺的加剧,缺水将成为 21 世纪世界农业生产和食物安全的主要限制因素之一已被逐渐认可 (Turner, 2006)。

中国作为世界农业大国和人口大国,其粮食安全和农业用水安全问题已引起国内外广泛关注 (沈振荣等, 1998; Taylor, 2001)。据 FAO 数据计算,2002 年我国平均耕地载荷为 9.13 人/hm², 是世界平均 4.43 人/hm² 的 2 倍多。近年来,中国耕地逐年减少和退化,增大了人口增加和生活水平提高导致的粮食压力,而粮食作物作为耗虚拟水量 (virtual water) 较大的作物 (Allan, 1996, 1999a), 由于耕地减少,其产量增加对灌溉用水增加的依赖性增强。1999~2001 年,我国各年粮食年总产量比上一年度分别减产 0.8%、9%、2.1% (国家统计局, 2000、2001、2002), 旱灾缺水是主要原因之一。然而,全国人均水资源占有量继续锐减,灌溉水源枯竭,特别是北方缺水流域的产水量明显衰减,井灌区地下水普遍超采,工业和城镇化发展继续挤占农业用水 (沈振荣等, 1998)。干

旱缺水已成为影响我国农业生产与粮食安全和社会经济可持续发展的一大制约因素。预计 21 世纪 20~50 年代, 中国农业供水与需水矛盾将进入非常尖锐阶段(沈振荣等, 1998)。水土资源的稀缺性、有限性、地域性决定了我国农业发展和粮食安全只能依靠现有水土资源的合理利用。

然而, 我国某些地区水资源无序开发导致农业用水短缺, 部分灌区灌溉方式落后导致水资源浪费严重, 工农业废水和生活污水污染灌溉水源, 导致灌溉功能下降, 作物种植结构与水资源时空分布配置不合理、管理机制不健全、水价低难以制约用水浪费现象、水土资源空间配置不协调等众多因素导致 AWR 利用效率低、供需矛盾加剧。必须构建 IS 进行综合评价, 才能揭示这些农业用水问题产生的主要原因。构建能反映 AWR 系统各种影响因素的 IS 评价其 SUAAR 能力, 既便于理清农业用水系统的复杂机制, 揭示区域农业用水的主要障碍因素, 也可为国家制定相应的 AWR 评价导则提供参考。建立科学和统一规范的 IS, 也是水资源管理工作进入计算机运行环境的技术接口和通向数字化、信息化的桥梁。

二、研究意义

SUAAR 评价不仅是农业可持续发展研究的重要组成部分, 也是水土资源合理利用研究的重要组成部分, 是实现工程水利向现代水利转变的不可或缺的重要环节。目前, 国内少量的 AWR 评价大多仅指出 AWR 短缺、浪费、污染等一些宏观定性问题。建立 IS, 量化评价 AWR 可持续支撑能力较少见。为了发现和准确定位 AWR 可持续管理和可持续利用的主要影响因素, 确保 AWR 的优化配置, 提高 AWR 利用效率, 也为了尽快实现工程水利向现代水利转变, 实现传统农业向现代农业、节水农业转变, 加快农业产业化、机械化、现代化进程, 解决我国加入 WTO 后区域农业所面临的挑战, 我国 AWR 的科学评价迫在眉睫。SUAAR 评价是农业可持续发展的理论基础。通过建立节水高效的现代农业, 实现 SUAAR 是可能的。但首先必须评价其 AWR 的可持续利用现状, 才能确定区域需水结构或用水结构是否符合其水资源时空分布状况, 认识区域 AWR 的空间分布及区域水资源数量供需变化, 从而简化制定水资源配置最优化方案所需考虑的因素或指标, 降低农业用水决策的不确定性, 提高决策效果, 支持农业可持续发展。

IS 评价法是在单项指标评价法和多项指标评价法基础上发展起来的, 能更全面、更准确地反映复杂系统的客观规律性的评价方法, 是区域可持续发展理论研究的重要组成部分, 已广泛应用于复杂系统可持续性评价。但在应用中, 存在以下问题: 不同评价目的的 IS 之间通用性较差; 评价过程复杂, 涉及环节众多, 常有指标与评价目标不吻合; 因评价对象的系统复杂性, 指标数目多少难以确定; 为了兼顾多目标评价, 常出现 IS 结构不尽合理、IS 不完整或指标重叠; 指标的长期监测评价作用与指标对系统变化敏感性的长期维持难以兼顾; IS 的可操作性与全面性、科学性难以兼顾; IS 应用于不同时空评价对象的通用性与特

定时空评价对象的适用性难以兼顾,等等。这些问题有待进一步探讨。SUAWR 评价 IS 的构建,不仅为 SUAWR 提供决策导向和预警预测作用提供有效工具,也有助于 IS 构建理论、水资源评价理论与可持续发展理论的深入探讨和发展完善。IS、评价模型、SUAWR 对策制定首选指标有机组合而成的 SUAWR 评价模式可为社会、经济、资源等其他领域复杂系统的可持续性综合评价提供借鉴,该评价模式所得的评价结论也可为精准农业和农业信息化发展、水资源合理配置方案和作物种植结构调整方案的制订提供宏观背景依据。

第二节 研究内容、方法、技术路线及创新点

一、研究内容

- ① 东北区 AWR 开发利用状况分析。
- ② SUAWR 评价 IS 的构建。
- ③ 在应用 IS 进行东北各评价单元 SUAWR 能力现状评价的基础上,选择东北典型粮食主产区进行 SUAWR 能力预测评价。
- ④ SUAWR 对策的制定。
- ⑤ 福建省 SUAWR 现状评价与对策制定。

二、研究方法

- (1) 指标体系构建方法 包括频度统计法、理论分析法、谱系聚类算法之分裂法、指标属性分组法、二维交叉法、客观实际分析法、专家咨询法和系统分析法、德尔菲法。
- (2) 指标体系赋权方法 层次分析法(AHP)。
- (3) 现状评价方法 包括二层赋权加和法、加权平均法、模糊综合法、因子分析法、灰色聚类法。
- (4) 预测评价方法 有趋势外推法或均值法。

三、研究思路

根据农业可持续发展战略目标,深入剖析 SUAWR 内涵,以水资源与农业发展的协调性为基准,以 AWR 系统结构和功能的优化与良性循环为目的,在总结国内外 AWR 评价理论和 IS 构建理论的基础上,拟定 SUAWR 评价 IS 构建理论与方法,提出一般性 SUAWR 评价 IS。再从区域整体出发,结合 AWR 系统概况分析研究成果,在明确水资源量分布和用水结构的基础上,构建区域适用、可操作的 SUAWR 评价 IS,进而采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)为 IS 赋权,采用灰色聚类法、模糊综合法、因子分析法等评价方法将该 IS 应用于东北区 SUAWR 现状排序评价和分级评价,验证 IS 的科学性、可操作性、区域适用性与通用性,并分析东北区 SUAWR 的区域分异格局及其主要影响因素,即主导指标,并据以制定相应的 SUAWR 对策。进而,选择典型农业用水区,以现状评价 IS 为基础,确定预测评价 IS,分高、低方案模拟预测典型区 2010 年、2030 年的 SUAWR 水平,进而揭示影响 SUAWR 发展趋势的主要

指标，制定相应对策。最后，选择福建省作为亚热带雨养灌溉农业的代表，采用因子分析法将基于一般性 SUAWR 评价 IS 的东北区 SUAWR 评价 IS 结合福建省 AWR 系统实际适当调整后的 IS 应用于福建省 SUAWR 现状评价，验证 IS 在亚热带灌溉农业区的通用性。从而实现从评价区水资源系统影响 SUAWR 的各种因素的动态变化过程中，认识和讨论 AWR 如何在多条件约束下提高可持续利用能力，评价区域农业安全生产的水资源可持续支持能力，为保障区域稳定的粮食生产能力的农业水分需求提供重要科学依据。

四、技术路线

在广泛阅读 IS 构建相关文献基础上，探讨 IS 构建模式，到研究区与 AWR 的供给、利用、管理相关的气象、水利、环保、统计、农业、国土等部门调研，进行农业用水野外调查，分析其 AWR 系统概况，尝试构建兼顾通用性与区域适用性、科学性与可操作性的 SUAWR 评价 IS，再通过多种评价方法验证并分析 SUAWR 区域分异规律及其主导因素，制定 SUAWR 对策。

具体技术路线见图 1-1。

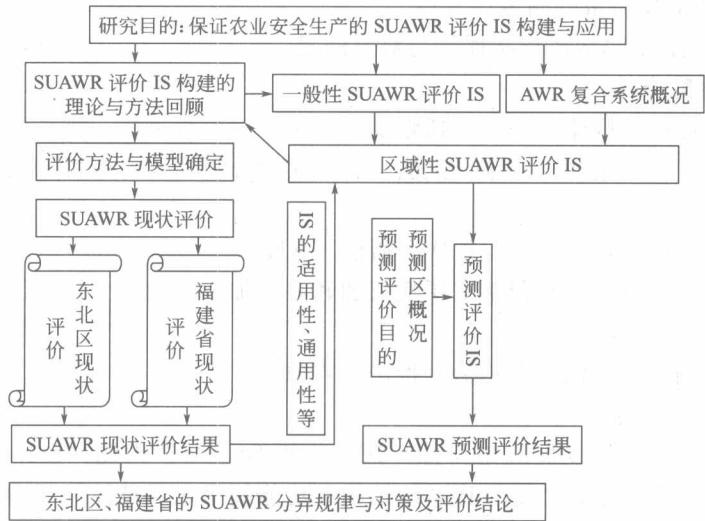


图 1-1 技术路线

五、创新与特色

- (1) 提出揭示 SUAWR 制约因素的途径和方法，即架构 SUAWR 评价 IS 的科学构建模式，构建 IS，并应用所构建的 IS 合理评价 SUAWR 空间分异及其主导因素的评价模式。
- (2) 全面、系统、科学地建立兼顾科学性与可操作性、通用性与区域适用性的 SUAWR 评价 IS。

第二章 国内外研究进展

第一节 农业发展与农业水资源利用的可持续思想

可持续发展的实质是协调人地关系,人地关系的协调离不开人地需水关系的协调,作为人地需水关系的重要组成部分,农业与非农业之间的需水关系的协调程度主要表现为水资源利用与农业发展的协调性。这种协调性不仅指水资源供需平衡与农产品供求平衡必须相互协调发展,也指 AWR 系统各要素与农业生产系统各要素的协调。高效节水是农业可持续发展和 SUAWR 的共同特征和途径。这种思想在水资源与农业发展研究领域已有所渗透和体现,但未明确系统表述。

农业可持续发展实质是农业系统中各要素的协调发展和良性循环(刘兴土等,2002),即协调农业发展、生态环境保护与经济社会发展需求之间的关系,其中,水资源利用合理与否直接关系着农业的可持续发展(李新文等,2001),强调农业发展与水资源利用必须相互协调才能实现农业发展与 AWR 利用同时可持续的双赢。因此,SUAWR 量化研究的重要环节就是如何表征水资源利用与农业发展的协调程度,IS 就是衡量这种协调度的良好表征工具。但国内目前这方面的工作尚很少见,极少提出具体指标或参数,表征或量化协调度,而 AWR 系统可持续性的量化研究未见报道。

目前,国内学者已从以下几个方面开展 AWR 研究:①通过建立模型实现 AWR 的优化利用;②通过节水与高效用水,寻求 SUAWR 途径;③从粮食增产、农业发展、区域可持续发展出发,探讨 AWR 的持续利用问题。

这些研究涉及了 AWR 的可持续研究,其中如何实现节水与高效用水,以缓解水资源供需矛盾,促进水资源的可持续利用已成为我国 SUAWR 研究的热点。但还存在以下问题有待探讨:①干旱区、半干旱区的水资源可持续利用问题探讨较多,但对半湿润区、湿润区在未来国家粮食安全格局中将担负的重要作用关注不够。②对灌溉 AWR 的可持续利用研究较多,但雨养旱作 SUAWR 研究极少。③农业可持续的基础是农业生态环境的可持续,农业生态环境需水的满足是农业可持续生产的必要条件,但目前农业生态需水研究较少。④缺水地区水资源可持续利用的重要途径是节水。我国节水研究中,微观量化研究较多,宏观量化研究较少。⑤有些文章把外调水作为 AWR 的可持续满足方式之一尚有争议。⑥目前水资源可持续研究中,AWR 评价研究尚较少见,可持续程度的量化和表征研究不足,很少涉及水资源多维度可持续支撑能力表征方法的研究,以 IS 评价 SUAWR 的探讨更少见。

国外对 SUAWR 研究较少见,但相关的农业用水研究较多,特别是灌区农业用水问题及其缺水表征研究。2004 年澳大利亚布里斯班举行的第四届作物科

学大会对“水稀缺表征方法与改善灌溉、旱地系统管理以增加水产出和增强系统的良性环境效果 (Rijsberman, 2006)”和“用水量不变甚至减少条件下水产出的潜力, 即缺水状态下通过作物培育和田间管理增加水产出 (Passioura, 2006)”两个主题进行了讨论, 展示了关于提高作物系统水产出的最近研究进展与展望和缺水的当今世界的食物需求满足的新方法 (Turner, 2006)。按国家尺度评价, 按 Falkenmark (1989) 标准, 即以年人均可更新淡水资源量 1700m^3 作为水资源紧张与否的阈值, 低于 1000m^3 说明某国进入水稀缺 (water scarcity) 状态, 低于 500m^3 则为绝对稀缺, 则 21 世纪前 25 年将有近 14 亿人必须生活在即将缺水的地区 (Seckler et al, 1998)。然而, 使用简单的 Falkenmark 标准评价各国年均水稀缺状况, 忽略了以下几点: ①更小时空尺度缺水的危害性 (Rijsberman, 2006); ②各地水利设施开发利用水资源能力的差异 (Rijsberman, 2006); ③不同时空尺度、经济规模、结构和发展模式、生活方式及气候条件下的需水差异 (Rijsberman, 2006); ④水源地的水空间及其水调蓄能力对不同时空尺度取水的响应的差异; ⑤不同社会、经济、技术条件下水资源规划和管理能力的差异。因此, 需要研究新的评价标准和评价指标来衡量或表征水紧缺程度和类型。同时, 在有限的甚至逐渐减少的灌溉可用水量的现实面前, 需要统一协调地努力提高农业用水产出量, 即“珍惜每滴水, 提高单位用水粮食产出 (more crop per drop)” (Kijne et al, 2003), 包括提高灌溉效率、作物水分利用效率、可利用水受限的环境中旱地作物系统的生产力 (Turner, 2006)。用更少的水生产更多的粮食需要有效的和适当的灌溉技术。目前灌溉农业面临的一些挑战主要有: ①如何更有效利用水、肥、农药、劳动力等农业投入, 降低成本和减少不良环境影响; ②如何使灌溉系统与景观容量 (landscape capability) 匹配来减少盐渍化 (Khan et al, 2003); ③如何使作物生产系统的环境影响最小化; ④如何通过优化水配置、提高农田水分利用效率、改变种植结构等方式来节水以平衡农业生产耗水和环境需水; ⑤如何维持和提高农田排水水质, 使其对河流和生态系统的影响最小; ⑥如何界定水权, 避免因体制或生态问题而重蹈古代美索不达米亚之覆辙 (Khan et al, 2006)。增加利用单位稀缺水的作物产量需要改良栽培技术和农艺技术, 主要挑战是如何管理作物和改良作物基因构成, 以便截取更多的水用于蒸腾, 使水汽和 CO_2 的交换更有效, 以增加作物生物量, 把更多的生物量转换成谷物或其他可收获的产品 (Passioura, 2006)。野外条件下, 管理良好、无疾病、适度给水的谷物用水产出最高可达 $20\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, 实际产量低于此值的原因有杂草、疾病、营养不良、土壤不佳、水分不足等, 当水成为主要限制因素时, 提高用水总体产出将取决于作物发育是否与水供应模式良好匹配, 应减少蒸发或其他水损失, 维持作物成熟前后的用水平衡, 也应培育能在花期短暂缺水时维持足够养分供给花的基因类型, 通过标记筛选, 控制阻碍水分摄取的根系疾病的发生 (Passioura, 2006)。

第二节 水资源评价与农业水资源评价

近半个世纪来,随着世界性水问题的日益突出,许多国际机构和组织及许多国家都开展了水资源评价工作。但国际上关于水资源评价的概念、范围和内容的认识很不一致。

我国于 20 世纪 80 年代完成了水资源基础评价和利用评价,但未涉及可持续评价和 AWR 评价。水利部水资源水文司(1999)根据水利部水利水电技术标准制订计划,在总结全国第一次水资源调查评价以来的实践基础上,编制并发布了《水资源评价导则》。它主要由总则、一般规定、水资源数量评价、水资源质量评价、水资源开发利用及其影响评价等几部分构成,其中,水资源开发利用及其影响评价包括现状水资源供用水情况调查分析、存在问题、水资源开发利用对环境的影响,以及水资源综合评价、水资源价值量评价等内容。水资源综合评价是在水资源数量、质量和开发利用现状评价以及对环境影响评价的基础上,遵循生态良性循环、资源永续利用、经济可持续发展的原则,对水资源时空分布特征、利用状况及与社会经济发展的协调程度所作的综合评价。其中,分区水资源与社会经济协调程度分析包括建立评价 IS、进行分区分类排序等两部分内容。农业用水是水资源开发利用的一种主要类型, SUAWR 评价属于水资源综合评价。然而,目前,国内外尚无统一的通用的 AWR 评价导则及相应的评价 IS。

近年来,水资源评价研究主要进展可简要归纳如下。

① 随着计算机软硬件技术的发展,计算机技术在水资源评价中的应用日益深入,使水资源评价日益自动化和精确化。

② 因为水资源系统的复杂性、动态性,跨学科研究日益明显,使评价方法日益多样化,且综合运用多种方法进行评价,使评价结果更符合实际。目前,基于数学、生物进化论、计算机技术的遗传算法、进化策略等方法在水资源评价中的应用日益广泛而深入。

③ 模型技术的开发、改进与应用研究在水资源评价中备受青睐。

综上所述,我国水资源评价的理论探讨与实践研究已取得不少成果,但也存在一些问题。

首先,近年来,我国经济社会发展很快,对水资源的开发利用活动加剧,气候异常频繁发生,大部分地区区域水循环规律和产、汇流条件变化深刻,水资源供需平衡在地区分布上已发生很大变化,各地区、各产业部门用水特点也已变化,单靠水文资料及常规方法已难以正确评价人类活动影响下的水资源量及其时空分布规律,更难以评价水资源利用的可持续能力;再者,第一次评价的广度、深度不够,资料系列短,且评价中未能贯彻可持续发展思想。

其次,目前,大多仅评价水资源量,较少进行水资源质的评价。水资源量的评价大多按一定区域或流域内的地表水、地下水、大气降水进行评价,或对城市的水资源供需状况进行评价,针对农业用水状况进行评价尚较少见。

再次,因为水资源系统是动态的,其条件和制约因素是不断发展变化的,水资源评价成果要不断进行重新估价和更新,特别是全国性、大自然地理区的水资源评价工作。

最后,通过构建 IS 评价水资源可持续利用能力尚不多见,而以协调度作为可持续能力的衡量标准,用模糊综合法、因子分析法等多种方法评价区域性 AWR 可持续支撑能力未见报道。

第三节 水资源评价指标

一、国外水资源评价指标

指标是系统关键信息的沟通工具,是政策制定者和公众易于理解的信息简化形式。指标起着简化、量化、沟通的作用,即指标可减少关于社会、环境和经济方面的海量数据所可能造成的混乱,并评估问题所在、确定问题发展趋势、比较问题的区域差异,从而帮助政策制定者制定相应对策(UK Department of the Environment, 1996; Paremaki, 2001; Feitelson and Chenoweth, 2002)。

国外评价指标研究进展迅速,已取得了很多科研成果,但与水资源可持续利用相关的指标研究较少,能贴切表征水资源可持续利用能力的指标更少。Liisa Paremaki (2001) 指出在资源开发压力下,生态系统健康发生了显著变化,生态不确定性高,而关于环境状态的科学知识却不完整,环境指标通过报告环境信息,能填补环境数据的缺失和满足人们了解环境信息的需要,还有助于制定、实施、评价土地利用规划和资源管理方面的对策。Gallopin (1997) 指出实用的指标应可测量,指标所需的数据可连续获取。Feitelson and Chenoweth (2002) 强调指标必须与所要解决的问题密切相关,根据水贫困(water poverty)“是指某国或地区不能给所有人持续提供清洁水的费用”的定义,指出水贫困指标有助于评估各国结构性水问题。Falkenmark 等(1989)基于生活、农业、工业和能源部门及环境的水需求评价,提出“水紧张指数”(water stress index)。该指标提出后由于容易应用和理解而被广泛引用。但它仅能反映天然水供给能力,不能反映水需求满足度。Ohlsson (1998, 1999) 通过说明一个社会通过经济、技术或其他方式对世界性水紧张的适应能力,修正了 Falkenmark 指标,称之为“社会水紧张指数”。Rijsberman (2006) 指出 Falkenmark 指标并不能解释水稀缺的真正本质,忽略了地方尺度的水丰缺时空差异及水开发利用基础设施的差异,没考虑不同生活方式和气候条件下水需求的差异。还指出,目前世界许多地区的生活用水与食物和工业生产用水已对生态系统造成较大影响,而且,水已成为亚洲、非洲等地区未来几十年农业发展的主要制约因子。为此,应重视 Gleick (2002, 2003) 所提出的“水软着陆”(soft path of water) 法来适应水稀缺程度,即由建造大量的水坝、沟渠、管道、复杂的集成水处理厂等传统“硬着陆”法解决水供给需要,转变为通过详细规划和管理以小规模分散设施为辅助的集成基础设施、开放式决策、水市场、公平计收水费、高效技术应用、环境保护等“软着

陆”途径来适应水稀缺。然而,“软着陆”主要目标是提高单方水经济产出,而单方水经济产出还难以表征水资源可持续利用能力,因为水资源除了支持经济发展外,还应满足生活和生态用水需求,即水资源对社会、经济、生态的综合支撑能力更符合水资源可持续利用能力表征的需要。Raskin 等(1997)在评价全球水时,采用可利用水资源量的年总取水率作为水资源脆弱指数,一个国家水资源脆弱指数达 20%~40%界定为水稀缺,超过 40%为严重稀缺。然而,该指数未考虑可利用水资源量有多少水能转变为人类可利用水量,总取水量未考虑多少水被消耗、多少水能回用,该指标未考虑社会对水紧张的适应能力(Rijsberman, 2006)。国际水管理协会(IWMI)尝试解决这三个问题,基于水消耗量和取水剩余量分析了可用于人类需要的可更新水资源份额,认为,某国通过改善水资源管理政策提高取水能力和灌溉效率后仍不能满足水需求的可称为“天然水稀缺”(physically water scarce),有充足的可更新水资源但需巨额水利投资才能满足人们用水需求的,定义为“经济水稀缺”(economically water scarce)(Seckler et al, 1998)。然而, IWMI 并未分析个人用水安全问题。为此, Sullivan 等(2003)开发一个集成方法评价家庭和社会水平的用水安全,提出了“水贫困指数”(water poverty index)以同时反映天然可利用水量、人类受水服务程度、生态整体性的维持。该指数由水可开发接近程度、水量水质和水变动等资源禀赋特征、生活与粮食和生产用水情况、水管理能力及环境方面 5 个子成分构成,较综合全面地反映了缺水的多种因素,满足了政治家和决策者对公开透明的评价工具的需要,也使穷人有权参与改善水利部门的公共预算目标,但因复杂而不易理解,难以在短期内替代 Falkenmark 指标(Rijsberman, 2006)。Bossel(1999, 2000)提出了一组用于确定可持续利用方向的基本定向指标,即生存、能效、自由、安全、适应和共存 6 个指标,这些指标能反映可持续性最基本特征,但不能直接获得。

目前,国外水资源评价相关指标类型如下。

(1) 单项指标 Cresser(2000)研究了 20 世纪最后 10 年与 21 世纪头 10 年临界负荷概念在减少各种尺度环境污染的规划与管理及其相关领域中的作用,并指出这一指标在水土资源的长期可持续管理中将继续发挥作用。Ortega 等(2004)通过对半干旱区大麦、大蒜、玉米、洋葱四种作物的毛边际效益与毛灌溉深度的关系分析,评价了水价对水资源可持续管理的作用。

(2) 综合性指标 He 等(2000)指出变化流域环境评价采用综合生态指标对水资源管理决策至关重要,提出了一个构建和整合水文指标与生物指标的概念框架,结合 GIS、RS 及各种自然生物数据库和模拟模型,这些指标能揭示所研究流域 LUCC 导致的水文生物条件时空分布的变化,通过一定时段这些指标的动态比较可评估管理实践与程序的影响,为了把这些指标整合到流域规划与管理过程中,概括了使主要自然和结构方面的流域指标研究与生物过程和生态系统指标研究相联系所需的步骤。Kondratyev S. 等(2002)计算了可持续发展委员会