

干旱区面向生态的水资源合理配置研究进展与关键问题

粟晓玲¹, 康绍忠^{2, 1}

(1. 西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 杨凌 712100;

2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 水资源合理配置一直是干旱区水资源开发利用的一个关键问题。该文从研究内容、研究方法以及配置机制等方面分析了水资源合理配置的国内外研究现状与发展态势, 指出中国干旱区在生态水文过程的机理、生态需水基础数据积累、水资源的生态价值以及水资源配置的水文学科学基础研究等方面是面向生态的水资源合理配置的制约因素, 并提出了该领域应进一步研究生态水文过程与作用机制、流域尺度生态需水计算的理论基础、水资源的生态价值的评价、分布式流域模型、自然与人工复合系统下水资源转化、演变的规律、面向生态的水资源合理配置机制与流域水资源多维调控理论模式及决策方法等若干关键问题。

关键词: 水资源合理配置; 干旱地区; 可持续利用; 生态系统

中图分类号: TV 213.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)01-0167-06

0 引言

水资源短缺和水土环境恶化已成为制约中国农业乃至整个国民经济可持续发展的核心。由于缺水而造成的水土环境退化、土壤荒漠化、河流断流及沙尘暴等, 已经给我们的生存环境和经济发展带来了严重的影响。干旱内陆河流域有限的水资源承载了过多的人口及经济活动, 使水循环过程发生了深刻变化, 带来生态环境的巨大改变。在干旱区, 由于经济与生态对水资源的双重依赖, 水与生态问题密切相关^[1]。如何确定生态需水, 如何协调和解决经济与生态环境之间的关系以及区域之间或流域上下游之间用水竞争的矛盾, 是水科学需要重点研究和解决的关键问题。

水资源利用的配置过程是人类对水资源及其环境进行重新分配和布局的过程。它既可对生态环境产生良好的影响, 促进经济、社会的持续发展, 也可导致生态环境恶化, 影响经济、社会正常发展。水资源合理配置的概念是在一定的社会经济条件及水资源问题出现的背景下提出的。其概念逐步明确, 内涵日益丰富。建立保障生态需水条件下的水资源合理配置理论、方法、原则和模式是现代水科学、自然地理学、生态水文学、生态经济学等学科的前沿研究课题, 是一个正在开发的、具有综合性和学科交叉性的新领域, 具有重大而深远的科学意义。

1 国内外水资源合理配置的研究现状与发展态势

国际上应用系统分析方法进行水资源配置的研究始于 20 世纪 50 年代中期, 主要研究单一枢纽工程(水库)的优化调度, 以后逐渐发展到流域水资源的优化分配, 水资源合理配置的研究内容、配置目标、研究方法以及配置机制都得到了发展。目前国际上水资源配置研究的发展态势可归纳为以下几个方面:

1.1 国际上从单纯的水量配置研究发展到水量水质统一配置研究, 从追求流域经济效益最优的目标发展到追求流域整体效益最优为目标的合理配置研究, 更加重视生态环境与社会经济的协调发展

1971 年美国的 Bishop 提出了流域水资源管理的概念, 引起社会广泛重视, 其优点是可以从水量、水质及其对环境和社会的影响, 评价各地区水资源供需状况, 协调流域内各地区、各部门之间的水资源分配; Y. Y. Haimes^[2](1974)进一步提出了水资源系统协调管理模型; 澳大利亚 Murray 流域水管理局^[3]实施了 Murray River 规定河道的配水规划, 在对生态系统的需水时间和需水量、现有用户的需水要求以及未来的需水要求计算评价的基础上, 评价水资源满足需求的能力, 以最小的环境负效益、最大的社会效益为优化配水的目标; 国际水资源协会(WRA)主席 B. Braga^[4]认为流域水资源优化配置是将有限的水资源在多种相互竞争的用户中进行复杂分配, 各项目标的基本冲突表现在经济效益与生态环境效益上的冲突; Ringler^[5]对湄公河流域进行了以经济净效益最大为目标的水资源优化配置; Tew ei^[6]建立了流域整体的水量水质网络模型; Daene^[7]等开发了一个基于多目标优化和水量平衡原理的 A ral Sea 流域水优化分配模型, 包括 3 个子目标: 流入到 A ral Sea 的水量最大(考虑生态目标), 需水满足程度最大(考虑社会经济目标), 缺水时均衡分配(考虑公平分配)。Q uba^[8]开发了确定多用户优化配水模型的线性规划模型, 以净收益最大为目标, 以水土资源条件和季节

收稿日期: 2004-07-05 修订日期: 2004-12-15

基金项目: 国家自然科学基金委员会西部环境与生态科学重大研究计划项目(90202001); 国家自然科学基金委员会水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50279042)

作者简介: 粟晓玲(1968-), 女, 四川开江人, 副教授, 在职博士, 主要从事水文循环及水资源规划方面的研究与教学工作。陕西杨凌西北农林科技大学水建学院, 712100。Email: suxiaoling68@tom.com

通讯作者: 康绍忠(1962-), 男, 湖南桃源人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水与水资源领域的研究。北京 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 100083

的单位需水为约束。Fathali^[9]提出了水资源再分配和水库建设的适时优化模型。

1.2 我国从以需定供的水资源配置发展到面向宏观经济和面向生态的水资源合理配置研究,把生态需水作为水资源配置需水结构中重要的组成部分,如何协调经济需水与生态需水成为当前水资源配置研究的热点

我国在 90 年代以前是以需定供的水资源配置,以经济效益最优作为水资源配置的唯一目标,用过去或目前的国民经济结构和发展速度预测未来经济规模,以及该经济规模下的需水量,提出满足需水要求的供水工程规划,仅考虑水资源的供需平衡关系。有代表性的出版物有《水资源大系统优化规划与优化调度经验汇编》^[10],以流域或区域供水优化规划和综合利用水库优化调度研究较多,以经济效益为目标,如张元禧等建立了石羊河流域水资源优化调配系统模型及联解方法;刘建民建立了京津唐地区水资源大系统供水规划和调度优化的递阶模型;唐德善研究了黄河流域多目标优化配水模型。这种配置把不同水平年的需水作为定值,而忽略了影响需水的诸多因素间的动态制约关系,强调了需水要求,其结果必然带来掠夺式的开采水资源,引起河道断流、土地荒漠化甚至沙漠化,地下水位下降等环境恶化的现象。

20 世纪 90 年代以后,随着可持续发展理论的认可,水资源优化配置将社会、经济、资源、环境的协调发展作为目标。国家“八五”科技攻关项目专题^[11]提出了基于宏观经济的水资源优化配置理论,并对黄河流域水资源合理分配与优化调度进行了研究。宏观经济水资源优化配置以宏观经济为基础,以区域可持续发展为目标,在水资源、生态环境和投资三方面实现动态平衡。水资源优化配置的基本功能包含两个方面:在需求方面通过调整产业结构,建设节水型系统并调整生产力布局以抑制需求,适应水资源条件;在供给方面协调各项竞争性用水,并通过工程措施改变水资源的天然时空分布来适应生产力布局。基于宏观经济投入产出分析的水资源优化配置,由于传统的投入产出分析中未能反映生态环境的保护,不符合可持续发展的观念^[12]。

90 年代后期,针对干旱地区由于缺水而导致的一系列生态环境问题,一些学者从整个区域或流域生态系统的角度,提出了面向生态的水资源合理配置,并对水资源的合理配置和调控模式进行了探索性研究。面向生态的水资源合理配置是以生态水文过程的认识为基础,在区域或流域生态环境良性循环的条件下,通过工程措施和非工程措施,遵循有效性、公平性和生态平衡的原则,调节水资源的天然时空分布;开源与节流并重,开发利用与保护治理相结合,统一调配各种可利用水源;协调区域间、社会经济与生态环境间以及各部门间的利益冲突,满足单位产值的水资源消耗最小,生态服务最大,尽可能的提高区域整体的用水效率,促进水资源的可持续利用和区域的可持续发展。面向生态的水资源合理配置除了考虑水资源的供需平衡、水环境的污染与治理平

衡、以及水投资来源与分配的平衡关系外,还要考虑与水有关的生态平衡关系。面向生态的水资源合理配置符合可持续发展的观念。

国家“九五”攻关项目^[13]首次提出了面向生态经济建设的西北水资源合理配置模式;方创琳^[14]运用灰色计算模型对 2000 年河西走廊绿洲生态系统作了现状动态模拟和前景预测分析,提出了以适度投入与产出为主要内容的可持续发展方案是保证河西走廊经济持续发展和生态环境良性循环的最佳对策方案;方创琳^[15]在对经济目标、生态目标、资源约束等多目标辨识的基础上,采用多目标方案优选的密切值模型求出了柴达木盆地水资源优化配置的最佳方案。赵丹等^[16],以系统分析的思想为基础,建立了南阳渠灌区面向生态和节水的灌区水资源优化配置序列模型系统,提出了综合考虑节水、水权、生态环境等因素的多目标多情景模拟计算方法,孙自永等^[17]提出西北地区内陆河流域面向生态环境的水资源开发模式要以水资源与生态环境的耦合研究为基础,将水资源开发作为水资源系统的输入,其输出作为生态环境系统的输入,分析其响应,即生态环境的变化对水资源开发方案的生态环境效应进行预测评价。左其亭等^[18]提出了面向可持续发展的水资源管理量化模型,包括水量—水质—生态耦合系统模型、社会经济系统模型以及社会经济系统与水量—水质—生态系统的耦合系统模型,并对博斯腾湖进行了可持续水资源管理应用研究。姚华荣等^[19]以区域生态环境建设和资源利用效益最佳为目标,选择作物、林地、草地等 9 种土地利用类型作为决策变量,利用灰色线性规划模型,分别针对沙源地受到控制的 3 种不同状态,在 3 种节水假设条件下,结合 GIS 空间分析与管理软件,对河北省怀来县水土资源进行优化配置。

1.3 水资源配置的研究方法从常规优化技术(线性规划、非线性规划、整数规划、动态规划等)发展到优化技术和模拟技术相结合,以及随机规划、模糊优化、神经网络、遗传算法等现代非线性技术的应用

水资源合理配置问题是一个复杂的大系统多目标决策问题,各目标的量化和评价以及它们之间的协调是多目标分析的主要任务,因而优化理论与方法是研究区域或流域水资源规划和水资源优化配置的重要手段,几十年来系统分析理论在水资源研究中的应用,已有很大进展,取得了不少有价值的成果。如计算模型由单一的优化模型发展为几种方法的组合模型;计算问题由单目标发展为多目标。国内外大系统多目标优化模型的方法除了运筹学中的优化技术如线性规划、整数规划、非线性规划、动态规划外,还有集结法、大系统递阶分析法,包括多目标分解协调方法、多目标分解聚合法等,但上述模型各有其使用范围和适用条件。随着系统科学的发展,非线性理论、遗传算法、复杂适应系统等在水资源合理配置研究中得到了广泛应用^[20-26]。陈守煜将模糊数学的原理与方法应用于水资源,提出了水资源系统模糊优化原理。神经网络理论具有快速收敛于状态空间中一稳定平衡点的优点,因此作为优化算法模型而被应用到许多优化问题的求解中,为优化理论和算法提供了一条

新的途径。近年模拟生物进化过程中优胜劣汰规则与群体内部染色体信息交换机制的遗传算法在处理水资源优化分配问题也有应用。Simonovic 提出一种改进的多目标法, 将多目标解的敏感性分析与多目标值和优先权(权重)结合, 可以产生“最强解”替代“最协调解”的结果, 这种在应用多目标分析中所产生的概念上的差别, 对协调代际人在可持续水资源发展与管理中的公平性问题提供了直接的方法。赵建世等^[27]应用复杂适应系统(CAS)的原理与方法, 构架了水资源配置系统分析模型, 对系统的动力机制、主体行为特性和系统状态的评价方法进行了描述。

1.4 国际上水资源分配机制由某单一机制逐渐向边际费用价格机制(MCP)、公共(或政府)分配机制(PAM)、水市场机制(WM)、用水户参与机制(UBA)等多种分配机制的结合, 以满足水资源分配的效率性、公平性与可持续性的要求, 从而使水资源分配趋于合理, 最终实现水资源可持续利用的目的。

Jerson^[28]等针对经济用水超过了水资源的承载能力的干旱地区, 讨论了水分配机制, 提出了基于不同用水户的机会成本的分配模型; Tisdell^[29]研究了澳大利亚Border河Queensland地区水市场的环境影响, 研究结论是水权交易有可能使生产需水和天然流量情势之间矛盾增加, 因为生产用水集中于有高利润的作物种植; 水市场有可能限制恢复自然流量情势的水政策的有效性, 因此要在生产需水和环境需水间平衡。Ariel^[30]认为不同水资源分配机制各有其优势和局限, 如边际费用价格机制体现了效率性原则而忽略了公平性原则; 公共(政府)分配机制容易体现公平性原则, 但往往导致低效、不合理的水资源配置; 水市场分配机制对个体和社会都具有经济上的有效性, 但有时需要政府参与创造必要的市场运作条件, 如确定原始的水权分配方案、制订管理上和法律上的交易规则、建设必要的基础设施进行水的运输等; 用水户参与分配机制具有对满足当地用水需求所采取的分水模式的潜在适应性, 但需要较高的用水户组织管理费用。因此在水资源配置实践中, 不同国家、不同部门采取不同的分配机制, 许多国家已经开始了几种分配机制的结合。

2 我国干旱区面向生态的水资源合理配置研究的制约因素

我国干旱区面向生态的水资源合理配置尽管已做了一些探索性研究, 但由于对生态水文过程的作用机制、生态需水的理论机制、水资源的生态价值的评价理论方法以及水资源合理配置的机制、原理等领域研究的不成熟, 影响了面向生态的水资源合理配置研究结果的合理性, 进而制约了其实施与应用, 具体表现在以下几方面。

2.1 干旱区生态水文过程的研究积累十分薄弱, 对于干旱区天然植被的水分利用机理的研究基本处于空白状态。目前的知识积累尚不足以回答维持干旱区生态系统良性循环的水分来源^[31]

生态水文过程的机理是干旱区环境保护和恢复重建中必须面对的基础科学问题。许多年来, 人们对

单一的土壤水文过程或农作物的植物水文过程以及微域生态水文过程进行了广泛的研究, 在土壤水与植物关系研究中, 以农业节水为目标, 研究农田土壤水分转化、农田水均衡以及土壤-植物-大气系统(SPAC)水分传输理论和应用^[32]。但对天然植被和农林复合系统的生态水文过程研究较少。

2.2 缺乏生态需水的野外定位试验和基础数据积累, 严重制约了生态需水的科学合理计算

有关生态需水的论文还基本停留在介绍一些基本的概念或定义, 其计算方法主要从物理的水量平衡、水热平衡、水沙平衡、水盐平衡等方面考虑, 而且主要是针对对现有生态系统或生态水文条件, 没有考虑生态系统和水文过程的相互反馈作用以及不同遗传特性物种的水分生产力关系, 缺乏生态需水的野外定位试验和基础数据积累, 缺乏系统的建立在严谨的生理学、生态学和物理学理论及定量的数学方法基础之上的生态需水量计算方法。

2.3 对水资源系统与社会—经济—生态复合系统的相互演变关系考虑不够, 对水资源的生态价值研究滞后, 影响了水资源在生态需水与经济需水之间的合理配置

我国干旱区的水资源优化配置模型研究中, 大多不考虑生态需水, 仅在经济需水部门间进行配置, 即使考虑生态需水, 也仅考虑人工林草灌溉需水, 没有考虑天然植被生态需水, 而且把生态需水作为外部约束条件, 对水资源系统与社会—经济—生态复合系统的相互演变关系考虑不够^[33]。同时由于生态需水的价值研究滞后, 难以进行生态需水与经济需水的合理配置。在水资源短缺的北方干旱地区, 生态需水与经济需水相互竞争, 仅考虑水资源的经济价值, 不考虑水资源的生态价值, 必然导致经济需水挤占生态需水。只有对水资源的生态价值和经济价值统一权衡, 使整个系统综合效益最大, 才能使生态系统良性循环, 支持社会经济可持续发展。

2.4 水资源合理配置的水文学科学基础研究薄弱, 尤其是人类活动影响下的“天然—人工”二元动态水循环模式研究欠缺

由于流域水循环过程是水资源合理配置对象依存和演化的过程, 因此流域水循环过程研究是水资源配置的科学基础, 包括水循环的全过程及各要素转化的研究。目前国内外水资源配置依然限于天然水循环模式, 把实测水文要素还原到天然状态, 然后对这一天然水资源量进行分配, 这种模式不能充分反映人类活动对产汇流过程的影响效应^[34]。人类活动从循环路径、循环特性和循环动力机制等方面明显地改变了流域水循环过程^[35], 形成了由开发、利用、消耗、排泄等环节构成的人工侧支水循环。目前对于“天然—人工”二元水循环模式仅提出了概念框架, 需要定量研究人类活动影响下流域水文特性的改变与同期下垫面改变的关系, 以及与相应水生态过程的变化之间的关系。

2.5 流域水资源配置缺乏有效的初始水权分配机制

有机的补偿和激励机制、广泛的用户参与机制,致使水资源配置难以实现真正意义上的合理^[34]

我国法律对水资源的使用权和所有权有较为清晰的界定,但对水资源的配置和经营权没有明确规定,存在着产权不完整问题,缺乏有效的初始水权分配机制;由于流域是一个具有水力联系的系统单元,上游易于获取而低效利用水资源,下游社会经济活动集中,供需水矛盾突出,目前由于缺乏有效的补偿与激励机制,造成水资源配置的低效;另外我国的水资源分配机制目前仍是以行政管理为主的形式存在,还不能在多种分配机制下,达到多样性的分配管理体制^[36],也缺乏广泛的用户参与机制。

3 干旱区面向生态的水资源合理配置研究的关键问题

面向生态的水资源合理配置研究是解决水资源持续利用问题的新途径,是人们在寻找水资源与社会经济、生态环境协调发展的水资源配置方案中所利用的一种方法和手段,其理论基础涉及自然地理学、生态水文学、环境经济学、水资源学等多学科,是一个具有综合性和学科交叉性的新领域。由于水资源系统、生态环境系统以及社会经济系统的复杂性,在资源观、价值观、系统观和方法论方面均要突破传统的水资源合理配置中所涉及的问题,以下内容将是今后面向生态的水资源合理配置研究的关键问题。

3.1 干旱区生态水文过程与作用机制研究

受水控制的干旱内陆流域,有水成绿洲,无水为荒漠,其生态系统的结构和动态依赖于气候、土壤水分和植被之间的相关关系。一方面,气候和土壤水分控制植被动态,另一方面,植被对整个水平衡起着重要的控制作用,又同时反馈给大气,因此一个地区的植被覆被状况和生态环境状况是与其水分状况(大气水、地表水、地下水)相适应的^[37]。干旱区生态水文过程的研究中,应加强干旱区天然植被格局及其生态水文学机制,即水文过程对生态系统配置、结构和动态的影响,以及生物过程对水文过程(水循环要素)的相互影响,具有水力提升功能植物识别,确定植物吸收的水分来源等方面的研究。

3.2 流域尺度生态需水计算的理论基础研究

什么是最优的植被群体结构组合和良性循环的生态系统?什么是最适于西北旱区的节水型生态系统及如何构建西北旱区生态极度脆弱条件下的节水型生态系统?生态系统最少需要多少水来维持其正常的功能(生态需水的阈值)?如何处理器官、个体、群体及景观生态的关系,由典型植株或局部区域的实验观测资料考虑尺度效应确定某一区域(或流域)的生态需水量?生态需水和生态耗水有什么区别?这些问题是当前生态需水研究急需回答的问题^[38]。

3.3 水资源的生态价值的评价

把水作为联系生态系统和社会经济系统的纽带,研

究各类生态需水的生态服务功能,结合生态经济学、环境经济学和资源经济学理论研究水资源的生态价值的估算方法。同时随着社会经济发展水平、人们生活水平的提高,人们对生态服务的需求和支付意愿也会提高,因此还需研究生态价值的动态性及其估算方法。评价生态耗水的价值并最优协调生态需水与经济需水的矛盾。

3.4 分布式流域模型研究

由于集总式模型难以反映流域尺度水循环的空间不均匀性变化和不同地貌单元的水文特性和相互作用以及水资源时空变化对生态演变的驱动作用,需要研究如何确定分布式流域模型的有效结构,如何对水资源利用在分布式模型中进行有效表达,如何在野外对模型参数进行原位测定和对分布式流域模型的栅格参数率定。

3.5 自然与人类活动双重影响下水资源转化、演变的规律研究

自然与人类活动对水循环及水资源有哪些影响?如何量化人类活动对水循环水资源的影响?这是水资源合理配置研究所面临的主要科学问题。在 IGBP 科学大会上,特别强调土地利用/覆被变化与水循环的关系。需要研究从“点”、“典型流域”的水循环机理、水文循环与生态系统的相互作用、地表水与地下水交换的相互作用;开拓流域水文循环过程中的非线性机制研究;量化区域水文循环演化与土地利用/土地覆被影响关系,为认识陆地表层生命物质过程提供重要的基础科学支撑^[39]。迫切需要建立认识陆地水循环演化格局的空间信息支撑系统、陆地水循环过程变化的实验研究支撑系统和可定量描述自然变化/人类活动影响的分布式水循环模型等。

3.6 面向生态的水资源合理配置机制的研究

研究流域有效的初始水权分配机制、有机的补偿与激励机制以及广泛的社会参与机制等水资源配置机制,以及在深入研究水资源计划调控(政府机制)和市场配置(市场机制)理论与方法的基础上,如何运用系统工程理论,探索实现面向生态的水资源合理配置多种机制结合的最佳形式。

3.7 面向生态的流域水资源多维调控理论模式与决策方法

研究如何把生态水文循环过程与调控和流域水资源优化配置结合起来,以提高各转化环节的水分利用效率,在水资源有限条件下实现单位水分消耗所产生的生产力及提供的生态服务达到最大。面向生态的水资源配置研究在以下方面提出了挑战。在资源观方面是对传统水资源概念的拓宽,不但包括传统水资源的大气水、地表水、地下水,还包括土壤水;在价值观上需权衡生态价值与经济价值;从系统观上是研究水资源—生态—经济—社会复合系统;在方法论上要从集总式描述向分布式描述转变;在微观上要求研究水与生态相互作用的机理;宏观上要求经济用水与生态用水的统一配置,需要发展流域水资源多维调控模式。

由于水资源同时具有自然、社会、经济和生态属性,

其合理配置问题涉及到国家与地方等多个决策层次, 部门与地区等多个决策主体, 近期与远期等多个决策时段, 社会、经济、环境等多个决策目标, 以及水文、生态、工程、环境、市场、资金等多类风险, 是一个高度复杂的多阶段、多层次、多目标、多决策主体的风险决策问题^[40]。因此, 还需要对水资源合理配置的决策方法进行创新。

[参 考 文 献]

- [1] 陈敏建 我国水资源研究的发展趋势[J]. 水利水电技术, 2001, 32(1): 16- 19
- [2] Hames Y Y, Hall W A. Multiobjectives in water resources systems analysis: The surrogate trade-off method[J]. Water Resources Research, 1974, 10(4): 615 - 624
- [3] RiverMurray Catchment Water Management Board, Water allocation plan for the River Murray prescribed watercourse[R]. 1997.
- [4] Braga B. 发展中国家的可持续水资源开发[A]. 夏军, 许新宜, 胡宝清编 水资源可持续管理问题研究与实践[C]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1999, 6- 13
- [5] Ringler C. Optimal allocation and use of water resources in the Mekong River Basin: multi-country and intersectoral analyses [R]. Development Economics and Policy Series, Vol 20 Frankfurt: Peter Lang 2001.
- [6] Teweidat, John W. Labadie River basin network model for integrated water quantity/quality management[J]. J of Wat Res Planning & Management, 2001, 127(5): 295- 305
- [7] Daene C M ckinney, Cai X ining Multiobjective optimization model for water allocation in the Aral sea basin [EB/OL]. [http://www. ce utexas edu/prof/ mckinney/papers/ara/aihcis pdf](http://www.ce.utexas.edu/prof/mckinney/papers/ara/aihcis.pdf), 2003-6-20
- [8] R Quba'A, M. El-Fadel & M. R. Darwish. Water pricing for multi-sectoral allocation: a case study [J]. Water Resources Development, 2002, 18(4): 523- 544
- [9] Fathali firoozi, John Merrifield An optimal timing model of water re-allocation and reservoir construction [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 145: 165 - 174
- [10] 中国水利水电科学研究水资源所编 水资源大系统优化规划与优化调度经验汇编[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995
- [11] 许新宜, 王浩, 甘泓 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [12] 王顺久, 侯玉, 张欣莉, 等 中国水资源优化配置研究的进展与展望[J]. 水利发展研究, 2002, 2(9): 9- 11.
- [13] 中国水利水电科学研究院 面向生态经济建设的西北水资源合理配置模式[EB/OL]. [http://www. chinawater net cn/Journal/cwr/200004/](http://www.chinawater.net.cn/Journal/cwr/200004/), 2003-6-22
- [14] 方创琳 河西走廊绿洲生态系统的动态模拟研究[J]. 生态学报, 1996, 16(4): 389- 396
- [15] 方创琳 区域可持续发展与水资源优化配置研究——以西北干旱区柴达木盆地为例[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 341- 347.
- [16] 赵丹, 邵东国, 刘丙军, 灌区水资源优化配置方法及应用[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 69- 73
- [17] 孙自永, 马瑞, 周爱国, 等 中国西北地区内陆河流域面向生态环境的水资源开发模式研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(1): 28- 31.
- [18] 左其亭, 陈嘻 面向可持续发展的水资源规划与管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003
- [19] 姚华荣, 吴绍洪, 曹明明 GIS 支持下的区域水土资源优化配置研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 31- 35.
- [20] 金菊良, 张欣莉, 丁晶, 等 解水资源最优问题的遗传算法[J]. 水利水运科学研究, 2000, (4): 65- 68
- [21] 方红远, 邓玉梅, 董增川 多目标水资源系统运行决策优化的遗传算法[J]. 水利学报, 2001, (9): 22- 27.
- [22] 贺北方, 周丽, 马细霞, 等 基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J]. 水电能源科学, 2002, 20(3): 10- 12
- [23] 沈军, 勇健 资源优化配置模型参数识别的遗传算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 5(3): 13- 16
- [24] 陈晓宏, 陈永勤, 赖国友 东江流域水资源优化配置研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 366- 371.
- [25] 魏一鸣, 曾荣, 范英, 等 北京市人口、资源、环境与经济协调发展的多目标规划模型[J]. 系统工程理论与实践, 2002, (2): 74- 83
- [26] 冯耀龙, 韩文秀, 王宏江, 等 面向可持续发展的区域水资源优化配置研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, (2): 133- 138
- [27] 赵建世, 王忠静, 翁文斌 水资源复杂适应配置系统的理论与模型[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 639- 647.
- [28] Jerson Keeman, Rafael Kelman Water allocation for production in a semi- arid region[J]. Water Resources Development, 2002, 18(3): 391- 407.
- [29] Tisdell J G The environmental impact of water markets: An Australian case-study [J]. Journal of Environmental Management, 2001, 62: 113- 120
- [30] Dinar Ariel, Mark W, Rosegrant Water allocation mechanism s-principle and examples [R]. The World Bank, 1995, Policy Research Working Paper 1779: 6- 17.
- [31] 赵文智, 程国栋 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1851- 1857.
- [32] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章, 等 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994
- [33] 康绍忠, 蔡焕杰, 冯绍元 现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 1- 6
- [34] 王浩, 王建华, 秦大庸 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 123- 128
- [35] 王浩, 秦大庸, 王建华 多尺度区域水循环过程模拟进展与二元水循环模式的研究[A]. 刘昌明, 陈效国主编 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001, 34- 41.
- [36] 甘泓, 李令跃, 伊明万 水资源合理配置浅析[J]. 中国水利 2000, (4): 20- 23
- [37] Su Xiaoling, Kang Shaozhong, Tong Ling Sustainable development and management of water resources in the Shiyang River of Northwest China [A]. Kang

- Shaozhong, Bill Davies Water-saving Agriculture and Sustainable Use of Water and Land Resources [C] Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003, 610 - 617.
- [38] 栗晓玲, 康绍忠 生态需水的概念及其计算的理论框架 [J] 水科学进展, 2003, 14(6): 740- 744
- [39] 刘昌明, 张士锋, 傅国斌 水文循环过程理论与方法的研究进展 [A] 刘昌明, 陈效国主编 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展 [C] 郑州: 黄河水利出版社, 2001: 22- 33
- [40] 王浩, 秦大庸, 王建华 流域水资源规划的系统观和方法论 [J] 水利学报, 2002, (8): 1- 6

Research advances and key topics on optimal allocation of water resources based on ecosystem in the arid areas

Su Xiaoling¹, Kang Shaozhong^{2,1}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Yangling 712100, China; 2 Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Water resources allocation is a key topics for water resources development and utilization. The concept of optimal allocation of water resources based on ecosystem was presented. The developments and research methods were analyzed in the research of this area. Some technological difficulties were analyzed, i.e., eco-hydrological process mechanism, experimental data accumulation for ecological water demand, value of the ecosystem services, and hydrological theoretic basis of water resources allocation. The key topics which should be studied in the future, were also presented, i.e., eco-hydrological process mechanism, theoretic basis of ecological water demand calculation on basin scale, ecological value evaluation of water resources, distribution model of basin hydrology, and water resources evolution law under the influences of natural and human factors, reasonable water resources allocation mechanisms based on ecosystem, and multi-sectoral regulation principle for water resources on basin scale and its decisionmaking methods.

Key words: water resources allocation; sustainable utilization; ecosystem

栗晓玲, 康绍忠 干旱区面向生态的水资源合理配置研究进展与关键问题 [J] 农业工程学报, 2005, 21(1): 167- 172

Su Xiaoling, Kang Shaozhong Research advances and key topics on optimal allocation of water resources based on ecosystem in the arid areas [J] Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 167- 172 (in Chinese with English abstract)