

# 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望

鲍 超, 方创琳

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要** 水资源是干旱区生态环境最主要的限制性因子和重要组成部分。干旱区人口和经济规模的膨胀, 导致生产、生活用水不断挤占生态环境用水, 部分地区水资源开发利用甚至严重超过了最大极限, 导致生态系统不断恶化甚至难以恢复。干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究越来越受到重视。当前, 国内外按照“发生的问题—产生的机理—调控的标准—过程模拟—情景预测—响应对策”这一逻辑思路, 围绕干旱区水资源开发利用对生态环境的影响进行了大量研究, 并取得了明显进展。但干旱区水资源开发利用对生态环境的影响机理研究相对薄弱, 仍难以精确刻画水资源开发利用与生态环境之间的定量关系, 难以动态模拟和有效预测水资源开发利用对生态环境的影响, 面向干旱区生态环境的水资源开发利用对策研究在实践中仍面临着较多障碍。因此, 未来应以机理研究为基础, 以过程模拟和情景预测为突破口, 以综合集成的对策体系建设为落脚点, 不断加强干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究。

**关 键 词** 干旱区; 水资源开发利用; 生态环境; 人类活动; 研究进展

干旱区在世界上广泛分布, 而且集中了大部分贫困人口, 是全球环境变化与可持续发展研究中的重点区域之一<sup>[1]</sup>。由于水资源缺乏, 生态环境脆弱, 干旱区水资源开发利用所引起的生态环境问题十分普遍, 一直为世人所关注<sup>[2]</sup>。如联合国教科文组织长期致力于世界干旱区的发展与研究, 已出版专著多部, 几乎全部涉及到生态和环境恶化及其防治问题, 尤其在成立 60 周年 (1945~2005 年) 和国际沙漠及荒漠化年 (2006 年) 之际, 出版了《The Future of Arid Lands- Revisited》, 对近 50 年来国际干旱区研究进行了系统回顾, 并对未来国际干旱区研究进行了展望<sup>[3]</sup>。我国的干旱区主要包括新疆全境、甘肃河西走廊及内蒙古贺兰山以西地区, 地表水和地下水分别占全国的 3.3% 和 5.5%, 而土地面积约占全国的 24.5%<sup>[4]</sup>, 水资源和生态环境问题十分严峻, 长期以来为我国干旱区研究的焦点。因此, 本文系统梳理和总结了国内外干旱区水资源开发利用对生态环境影响的相关研究进展, 并探讨了当前该领域研究的不足以及未来的研究方向, 旨在为干旱区水资

源可持续开发利用提供有益借鉴。

## 1 干旱区水资源开发利用引起的生态环境效应研究

干旱区水资源开发利用引起的生态环境问题或生态环境效应在我国和世界范围内均进行了大量研究, 该类研究总体可归纳为三种:

(1) 将水资源开发利用笼统地作为影响因素, 对干旱区生态环境系统的某一种或几种关键要素及其变化进行观测、描述和分析, 主要包括水资源开发利用引起的土地利用与土地覆被变化、水系和水域面积变化、动植物生境与多样性变化、地表水和地下水水质变化、土壤质量变化、局部气候和空气质量变化等等。这类研究起源较早, 研究人数较多, 研究的时空尺度和研究手段随着观测数据的积累、观测仪器的改进以及 RS、GIS 等新技术的进步而不断拓展。例如, Dixon 早在 1892 年就分析了澳大利亚干旱区殖民地牧场和水资源开发对本土植

收稿日期: 2008-01; 修订日期: 2008-05.

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-307-02); 中国博士后科学基金资助项目(20070420063); 中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金.

作者简介: 鲍超(1978-), 男, 湖北麻城人, 博士后, 近期主要从事城市化与水资源可持续利用研究。 Email: baoc@gsnrr.ac.cn

物种类造成的影响<sup>[5]</sup>, Snyder 和 Tartowski 阐明不同时间尺度下干旱半干旱区可利用水资源量变化对植被动态变化的影响<sup>[6]</sup>, Rodriguez-Iturbe 和 Porporato 对水资源控制下的干旱区生态系统尤其是土壤湿度和植物动态变化进行了探讨<sup>[7]</sup>。这一类型的研究,大多由特定专业领域的生态学和环 境学者完成,内容较微观,研究侧重于自然科学领域。

② 将生态环境问题泛化,而具体研究各种不同类型的水资源开发利用活动对干旱区生态环境的影响,主要包括修建水库、开采地下水、调水、灌溉、排水、增加城市和工业用水等对生态环境造成的影响。例如, Mainguet 描述了埃及尼罗河流域阿斯旺水坝带来社会效益和生态环境负效应<sup>[8]</sup>, Poff 和 Hart 对水库的生态环境正负效应进行了区分<sup>[9]</sup>, Service 分析了反坝主义和兴坝主义间冲突<sup>[10]</sup>, 丁宏伟等分析了地下水资源开发引起的生态环境问题<sup>[11]</sup>, 王金贵等阐述了调水工程生态环境效应<sup>[12]</sup>, 方妍总结了国外跨流域调水工程生态环境影响<sup>[13]</sup>, 王立洪等分析了农业灌溉对生态环境的影响<sup>[14]</sup>, 魏晓妹等分析了农业发展对水资源转化的影响及生态环境效应<sup>[15]</sup>, Fitzhugh 和 Richter 分析了城市生长对水资源和生态系统的影响<sup>[16]</sup>。由于干旱区对水资源的开发利用一般经历了“先开发地表水、后大规模开发地下水,先大规模开发农业用水、后逐渐重视城市和工业用水”的过程,因此地下水开采、城市和工业用水增长等对生态环境造成的影响越来越受到关注。

③ 针对重点问题区域或流域,对水资源开发利用引起的生态环境效应进行系统跟踪和研究,主要包括我国西北干旱区、中亚地区、中东地区、北非地区、澳大利亚、印度干旱区等。例如,中亚地区水资源开发利用引起的生态环境问题得到了全世界的高度关注<sup>[17,18]</sup>,尤其是咸海生态危机给世人敲响了警钟<sup>[19,20]</sup>,中东地区的水资源与生态环境问题甚至常和冲突与战争联系在一起<sup>[21]</sup>。我国西北干旱区水资源开发利用及其生态环境问题也受到了高度关注<sup>[22,23]</sup>,新疆、甘肃河西走廊等典型干旱区水资源开发利用及其导致的生态环境变化均得到了历史分析和动态监测<sup>[24,25]</sup>,并从流域尺度上进行了大量研究,包括甘肃的石羊河流域<sup>[26,27]</sup>、黑河流域<sup>[28,29]</sup>、疏勒河流域<sup>[30,31]</sup>、新疆的塔里木河流域<sup>[32,33]</sup>、玛纳斯河流域<sup>[34]</sup>、乌鲁木齐河流域<sup>[35]</sup>、奎屯河流域<sup>[36]</sup>、伊犁河流域<sup>[37]</sup>、额尔齐斯河流域<sup>[38]</sup>等。由于石羊河流域、黑河

流域、塔里木河流域水资源和生态环境问题更为突出,而且战略地位十分重要,因此研究的深入性和连续性较好,并保持良好态势;而其他流域虽然基本掌握了水资源开发利用造成的生态环境问题,但随着水资源开发利用程度的加大或水资源开发利用方式的转变,亟需加强研究。

## 2 干旱区水资源开发利用对生态环境的胁迫与驱动机理研究

在干旱区出现地表水域萎缩、地下水位下降、泉水资源量衰减、水质污染与盐化、植被退化、土地荒漠化和盐渍化等一系列生态环境问题后,学者们在对干旱区生态环境变化进行监测和动态评估的基础上,主要从全球或区域气候变化以及人类进行的水资源开发利用活动等两大方面对干旱区生态环境变化的原因或机理进行了更加深入的探讨。目前,部分学者认为自然气候条件和水资源的天然不足是导致干旱区水资源及生态危机的最根本原因,而人类对水资源无序无度的开发利用,进一步加速了干旱区生态环境的恶化<sup>[39]</sup>,而大部分学者认为在水资源贫乏且时空分布不均的自然禀赋基础上,人类活动是导致干旱区水资源及生态环境恶化的主要原因<sup>[40-42]</sup>,因此加强了水资源开发利用对生态环境影响机理的研究。该类研究总体也可以归纳为以下三种:

(1) 研究水资源过度开发利用对生态环境的胁迫机理。主要是基于水量平衡、水盐平衡、水热平衡、水沙平衡、生态平衡等原理,从水资源与生态环境的关系,大气水-地表水-生物水-土壤水-地下水的迁移与转化规律以及生态-生产-生活用水转换特点出发,探讨水资源过度开发利用对生态环境的不利影响。例如, Huber-Sannwald 等阐述了水资源过度开发与生态环境和土地退化之间的相互反馈作用<sup>[43]</sup>;马金珠等探讨了过度放牧、过度开荒、排放污水、大量拦蓄地表水、超采地下水、大定额灌溉等不合理的水资源开发利用对内陆河流域生态环境的影响机理<sup>[44]</sup>,并分析了天然河道人工渠系化、平原水库建设等人类对水资源的开发利用活动对干旱区地下水补给空间格局的影响<sup>[45]</sup>;高前兆分析了塔里木盆地南缘水资源与生态环境的关系,并阐述了高强度的人类活动对干旱区水资源及生态环境的不利影响<sup>[46]</sup>;周可法等阐述了干旱区人类-气候-河

流之间的相互影响,并重点探讨了人类过度利用上游河水对下游生态环境的胁迫机理<sup>[47]</sup>。随着研究的深入,许多学者从更为微观的层面,重点阐述了干旱区水分、盐分对植被的胁迫机理。例如,Ridolfi等分析了缺水的持续时间和发生频率对植被的胁迫作用,并建立了相应的分析模型<sup>[48]</sup>;陈亚宁等分析了塔里木河下游地下水水位下降对植被退化的影响<sup>[49]</sup>;张丽等分析了干旱区地下水位、土壤盐分对植被覆盖度、频度的影响<sup>[50]</sup>;张勃等阐述了干旱区土壤水分和盐份对植被生存的限制作用<sup>[51]</sup>;郑丹等对干旱区地下水与天然植被的关系进行了系统梳理<sup>[52]</sup>。而国家“九五”科技攻关计划《西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究》较为系统地阐述了干旱区水资源开发利用与生态环境保护的关系,初步揭示了干旱区水分—生态相互作用机理,还建立了地下水埋深和土壤含水量关系模型、地下水与草本植物生物量、胡杨胸径生长量和红柳统计关系模型、地下水埋深植被覆盖度与土地沙漠化关系模型,将地下水与生态环境的关系由定性描述提高到定量化水平,推动了水资源过度开发利用对生态环境胁迫机理研究的较快发展<sup>[53]</sup>。

② 研究水资源开发利用不足和社会经济发展水平低而对生态环境产生的胁迫机理。例如,刘志辉等认为我国新疆阿勒泰地区水资源丰富,但水资源开发利用程度低,水资源有效利用率不高,灌区工程标准低、配套差,管理系统不健全,从而导致局部地区生态环境问题严重<sup>[54]</sup>;张军民认为伊犁河流域地表水资源丰富,但受经济发展水平及产业结构层次的限制,水资源总体上仍处于利用效率低下、生产经营方式落后、综合利用潜力巨大的初级开发阶段,流域水资源统筹开发利用不合理导致生态环境问题出现<sup>[55]</sup>。但以前人们主要将精力集中在水资源过度开发利用地区,对水资源开发利用不足地区的生态环境问题研究较少,因此亟需加强研究。

③ 研究水资源合理开发利用对生态环境改善的驱动机制。由于以前人们更多地关注典型干旱区的水资源和生态环境危机,因此探讨水资源合理开发利用对生态环境改善的研究相对较少。但随着水资源和生态环境系统有效调控措施的实施,部分干旱区生态系统得到了一定程度的恢复,于是人们开始重视水资源合理开发利用对生态环境改善的驱动作用。例如,郭铤等分析了黑河调水对下游生态环境恢复效果<sup>[56]</sup>;陈亚宁等分析了新疆塔里木河下

游断流河道输水与生态恢复机理<sup>[57]</sup>。

### 3 干旱区水资源开发利用合理阈值与生态环境需水研究

在逐渐认识干旱区水资源开发利用对生态环境的胁迫与驱动作用的基础上,人们开始尝试探讨干旱区水资源开发利用的合理标准,即水资源开发利用到何等程度会对生态环境造成胁迫作用、胁迫强度如何,何种程度会对生态环境产生驱动作用、改善程度如何等问题。水资源开发利用合理阈值、生态环境需水或与之类似的概念不断出现并成为相关研究领域的热点。

目前国际上一般以40%作为流域水资源开发利用的警戒线,近年来中国工程院有关专家通过总结各方面的研究成果后认为,西北内陆干旱区生态环境和社会经济耗水以各占50%为宜<sup>[58]</sup>,即流域至少需要50%的水资源留给生态环境系统,否则会造成流域生态系统退化。至于水资源开发利用到何种程度会造成流域生态系统不可恢复或最终崩溃,目前鲜有研究。而对于地表河流,人们也提出了生态流量占径流量比例的概念,并提出了不同的计算方法<sup>[59]</sup>。其中,美国规定河道内大多数水生生物在主要生长期优良的栖息条件和多数娱乐用途所推荐的径流量为 $P=50\%$ 频率下的河道径流量的60%,保持大多数水生动物有良好的栖息条件和一般的娱乐活动所推荐的基本径流量为 $P=50\%$ 频率下河道径流量的30%~60%;而河道内径流为 $P=50\%$ 频率下河道流量的10%(即90%为河道外耗水),是保持大多数水生生物在全年生存所推荐的最低径流量。国内部分学者也提出了河流生态系统合理生态用水比例的概念,并根据最小生态需水、最佳生态需水、最大生态需水确定河流合理生态用水的阈值区间,在此区间之外,水资源开发利用都会对河流生态系统造成不利影响<sup>[60]</sup>。而对于干旱区的湖泊和地下水,人们提出了合理生态水位的概念,并提出了不同的计算方法,还分析了低于最低生态水位和超过最大生态水位对干旱区植被、土壤等的不良影响<sup>[61,62]</sup>。

水资源开发利用的合理阈值、水资源开发利用的最大极限、河流合理生态用水比例等的确定,最终都要涉及到生态环境需水的研究。只要计算出流域或区域的生态环境需水,就可以根据流域或区域的水资源总量和已经开发利用的水资源量,来准确

判断水资源开发利用对生态环境的影响程度。因此,生态环境需水是研究水资源与生态环境之间相互作用与关系的核心。目前,国内外已经从理论、方法与实践等多个层面对生态环境需水进行了大量研究<sup>[63]</sup>,在我国西北地区<sup>[64]</sup>、西北干旱区<sup>[65]</sup>、内陆河干旱区<sup>[66]</sup>均对生态环境需水进行了具体测算,我国干旱区各大流域的生态环境需水量基本上都进行过研究。但由于不同学者对生态环境需水的概念理解不同,而且提出的河道外和河道内生态需水都有几种甚至数十种计算方法<sup>[67,68]</sup>,因此,生态环境需水研究还存在着诸多问题,亟待从机理剖析的角度,结合区域水资源的科学配置与管理实践,构建适合的理论框架与技术体系<sup>[69]</sup>。

## 4 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的过程模拟与情景预测研究

在对干旱区水资源与生态环境之间相互关系与相互作用机理研究不断加强的基础上,人们不再满足于仅对水资源开发利用引起的生态环境效应进行描述和统计分析,而是开始尝试运用各种方法来模拟水资源开发利用对生态环境的影响过程,并对不同水资源开发利用模式或社会经济增长方式下的生态环境系统变化趋势进行情景预测,以期为干旱区水资源可持续开发利用与生态环境保护提供优化方案和科学决策依据。

目前,该领域已经取得了一些重要进展。例如,陈曦等利用地理信息系统、洪水演进、遥感方法,通过对塔里木河干流坎木里克漫溢型生态用水调控的分析,建立了生态放水漫溢模型,动态模拟了生态放水的漫溢过程,分析了生态用水量与生态保护范围、放水淹没时间之间的定量关系<sup>[70]</sup>;丛振涛等根据塔里木河下游3次应急输水的有关资料,从流量沿程损失率及水头前进速度出发,模拟了历次输水的流量沿程分布、输水距离、输水历时及输水水量,建立了塔里木河下游输水半经验半机理模型,提出了输水距离长、生态保护效益好的输水方案<sup>[71]</sup>;Murray-Hudson等对气候变化下博茨瓦纳 Okavango 三角洲及其上游的水资源利用方案设定了不同的发展情景,并对不同情景下下游三角洲的水文与生态系统变化进行了仿真模拟<sup>[72]</sup>;张华等应用 CLUE-S 模型,以黑河中上游张掖市为例,分别模拟

了水资源利用率为 68%、100%和 132%三种情景下的土地利用与土地覆盖变化<sup>[73]</sup>;方创琳等以系统动力学模型为依据,根据黑河流域生态系统、生产系统和生活系统相互作用形成的水-生态-经济协调发展耦合关系式,建立了黑河流域水-生态-经济协调发展耦合模型,通过动态模拟和综合调试,从众多实验方案中选择生成了水-生态保护型发展方案、水-经济高效型发展方案、水-生态-经济协调型发展方案等三种有效方案,并根据不同用水方案下经济效益和生态环境效益的比较分析选择了最优方案<sup>[74]</sup>,该模型虽然没有直接预测水资源开发利用对生态环境的影响,但同样可以预测不同水资源开发利用率和社会经济增长速度下耕地、林地、草地等主要生态环境系统要素的变化趋势。

然而,干旱区水资源与生态环境之间相互关系与相互作用机理非常复杂,甚至在不同地区有不同的表现形式,目前要从宏观、中观与微观层面精确刻画水资源系统与生态环境系统及其各要素之间的定量关系,并动态模拟预测水资源开发利用对生态环境的影响,仍较困难,需要从理论、方法和实践层面继续探索。

## 5 干旱区水资源开发利用对生态环境的响应对策研究

在对干旱区水资源开发利用引起的生态环境效应、水资源开发利用对生态环境的影响机理、水资源合理开发利用阈值、水资源开发利用对生态环境的影响过程与变化趋势等进行研究之后,人们最终关注的是如何调整干旱区的水资源开发利用模式来减轻对生态环境的不利影响,如何从数量和质量上保证合理的生态环境需水。而在水资源总量有限的干旱区,如何探寻有效的对策,尽量减少社会经济用水,同时减少水污染,是当前干旱区水资源开发利用对生态环境响应对策的研究重点。目前,众多学者都以节水、高效、防污、人水和谐、可持续发展为目标,从技术、社会、制度、政策、法律、市场、金融、财政等各个层面提出了干旱区水资源开发利用对生态环境的响应对策,研究的热点和主要进展包括以下四个方面:

(1) 强调流域水资源综合管理及其制度的建设。尽管人类可以通过大规模建设水库、跨流域调

水和引水渠道等水利工程来实现水资源的人工调节,解决水资源在时空分布上的不均,而且过去几十年干旱区在水利建设和供水技术上的研究也不遗余力,甚至认为人类可以通过技术进步完全控制水文过程(如人工降雨),但实践证明,以有限的水资源供给来满足无限的用水增长需求,结果就是“水涨船高”,工程水利和技术狂热不断刺激社会经济系统在扩张型的发展道路上愈走愈远,而社会经济系统扩张又带来生态破坏和水环境污染,大大加剧了水资源的时空分布不均。因此,在研究供水和减水技术的同时,人们逐渐认识到水资源管理的重要;在研究水资源供给管理的同时,人们逐渐认识到水资源需求管理的重要。目前,流域水资源综合管理被认为是解决干旱区水资源开发利用对生态环境影响的重要手段<sup>[75]</sup>。它要求将流域上中下游和河流的左右岸作为一个有机联系的整体,将水资源作为生态环境系统的一个有机组成部分,在保持流域生态系统完整性和不危及流域生态系统安全的前提下,以流域社会经济福利最大化和共同繁荣为目标,对水资源的供给和需求统筹考虑,对水、土和其它相关资源进行统一协调、规划和管理<sup>[76,77]</sup>。但从目前的研究和实践来看,虽然流域水资源综合管理为干旱区提供了一种解决水资源和生态环境问题的新方法和新视角,同它面临的机遇一样,也面临着诸多挑战<sup>[78]</sup>。其中,水资源管理制度的建设和完善仍然存在着不少问题<sup>[79]</sup>,尤其是直接关系干旱区生态环境系统健康的生态用水量控制及补偿制度、水功能区划及排污总量控制制度、污水处理回用及中水利用制度等,亟待具体和深化。

② 强调社会经济增长方式转变与节水型社会的建设。由于大部分干旱区经济社会发展水平低,农业产值和用水比重大,用水效益低,因此通过城市化<sup>[80]</sup>、用水结构与产业结构双向优化<sup>[81]</sup>、发展循环经济、生态经济和推行清洁生产<sup>[82]</sup>等,转变社会经济增长方式,也是解决干旱区水资源开发利用对生态环境影响的重要手段。其中,节水型社会建设是当前研究和实践的重中之重。节水型社会的本质特征是建立以水权、水市场理论为基础的水资源管理体制,形成以经济手段为主的节水机制,建立起自律式发展的节水模式,不断提高水资源的利用效率和效益<sup>[83]</sup>。它不仅要大力发展和普及节水技术,建立与水资源优化配置相适应的节水工程和技术体系,而且要构建节水型产业结构体系,实现从“以需水定

供水”到“以供水定经济结构”的转变,同时还要综合采用法律、工程、经济、行政、科技等措施,建立与用水权管理为核心的水资源管理制度体系。目前,我国甘肃省张掖市于2002年初已经成为全国第一个建设节水型社会的试点,初步形成了“总量控制、定额管理、以水定地(产)、配水到户、公众参与、水量交易、水票流转、城乡一体”的节水型社会建设运行机制和体制,取得了明显成效,并开始在西北干旱区逐步扩大试点。但目前节水型社会试点建设中水权系统的完善仍然存在诸多困难,水权贸易也因为面临着管理、法律、行政、财政等诸多障碍,也难以在流域范围内进行普及和推广<sup>[84]</sup>,亟待进一步实践和研究。

③ 实施虚拟水战略。虚拟水概念由 Tony Allan 于1993年提出,由程国栋院士于2003年引入国内,是指以“虚拟”的形式内含有工农业产品中的水,其数量上相当于生产产品时所消耗的水量<sup>[85]</sup>。自虚拟水的概念诞生之后,许多学者对其理论和方法进行了大量研究,并取得了明显进展<sup>[86,87]</sup>。其中,虚拟水贸易的提出为干旱缺水地区解决水资源和生态危机提供了一种新途径,干旱缺水地区可以通过从富水地区进口水密集型工农业产品以降低自身社会经济对水资源的需求,从而提供更多的生态环境用水减少对生态环境系统的不利影响。实际上,虚拟水贸易是干旱区除跨区域调水等之外有限开源的重要形式,也是促进干旱区社会经济结构转型的重要举措,但是也会带来对区外高耗水产品的严重依赖,仍需要根据不同干旱区的具体情况慎重对待和进一步深入研究。

④ 实施流域水资源开发、社会经济发展与生态环境保护合作。当干旱区流域尤其是跨国界或跨区界流域的水资源综合管理机制还很难有效建立的时候,人们试图通过流域上中下游水资源开发、社会经济发展与生态环境保护合作<sup>[88]</sup>,甚至通过流域上-中-下游的三段耦合、山地-绿洲-荒漠系统的三片耦合以及生态-生产-生活系统的三生耦合等模式来推行流域生态经济带建设<sup>[89]</sup>,从而化解干旱区水资源开发利用带来的生态危机。虽然目前国内外从理论和实践层面都对流域水资源开发和生态环境保护的合作机制与合作框架进行了卓有成效的探讨,但由于流域不同利益主体发展目标和立场不同,如何合理分配流域有限的水资源,如何建立长效的合作机制,仍有待进一步研究。

## 6 不足与展望

尽管国内外按照“发生的问题—产生的机理—调控的标准—过程模拟—情景预测—响应对策”这一逻辑思路,围绕干旱区水资源开发利用对生态环境的影响进行了大量研究,但从已有研究进展来看,仍显以下不足:

(1) 利用描述、统计、RS 和 GIS 等手段对干旱区水资源开发利用所引起的生态环境问题或生态环境效应研究较多,而影响机理研究相对较少。虽然对干旱区水资源及其关联的生态环境问题认识较深刻,对干旱区水资源与生态环境的相互关系与相互作用机理研究也取得一定突破,但仍难以精确刻画水资源开发利用与生态环境之间的定量关系。

(2) 干旱区水资源过度开发利用对生态环境的胁迫机制研究较多,水资源开发利用不足和社会经济发展水平低而对生态环境产生的胁迫机制研究较少,水资源合理开发利用对生态环境改善的驱动机制研究也较少。

(3) 基于生态环境需水的干旱区水资源合理开发利用阈值研究较多,但研究方法和标准不统一,再加上水资源与生态环境之间的关系难以量化,导致不同水资源开发利用程度对生态环境的胁迫强度和改善程度如何等问题难以进行动态过程模拟和情景预测。

(4) 面向干旱区生态环境的水资源开发利用对策研究较多,但研究比较分散,而且提出的部分对策过于理想,在实践中面临着障碍。

针对以上主要不足,今后干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究应着重加强以下几方面:

(1) 注重干旱区水资源开发利用对生态环境的影响机理研究。应从干旱区水资源开发利用对生态环境的正负效应入手,在阐明生态环境需水机理的基础上,从宏观、中观和微观层面量化水-生态-经济系统及其各要素之间的相互关系与相互作用。

(2) 注重干旱区水资源开发利用对生态环境影响的过程模拟与情景预测研究。应广泛应用 GIS、RS 等先进技术手段,对干旱区水资源与生态环境系统及其要素的变化进行动态监测和过程反演,并设定不同的气候变化与水资源开发利用情景,对生态环境系统及其要素的变化趋势进行预测,同时区分并比较自然因素变化和人类对水资源的开发利

用活动对干旱区生态环境的影响强度。

(3) 注重面向干旱区生态环境的水资源开发利用对策体系建设。尤其要构建流域水资源综合管理、节水型社会建设、虚拟水贸易、水资源与生态环境合作的统一框架,综合运用经济、技术、法律等多种手段,建立集成的干旱区水资源开发利用与生态环境保护的政策体系与管理体制。

### 参考文献

- [1] Office to Combat Desertification and Drought. Aridity zones and dryland populations: an assessment of population levels in the world's drylands. New York: UNSO/UNDP, 1997.
- [2] 毛德华, 韩德麟, 张发旺, 张小雷. 塔里木河流域水资源、环境与管理. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [3] Hutchinson C F and Herrmann S M. The future of arid lands - revisited: a review of 50 years of drylands research. Paris: UNESCO; Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2008.
- [4] 施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响. 济南: 山东科学技术出版社, 1995.
- [5] Dixon S. The effects of settlement and pastoral occupation in Australia upon the indigenous vegetation. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1892, (15): 195~206.
- [6] Snyder K A and Tartowski S L. Multi-scale temporal variation in water availability: Implications for vegetation dynamics in arid and semi-arid ecosystems. Journal of Arid Environments, 2006, 65(2): 219~234.
- [7] Rodriguez-Iturbe I and Porporato A. Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [8] Mainguet M. Aridity: droughts and human development. Berlin: Springer, 1999.
- [9] Poff N L and Hart D D. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. BioScience, 2002, 52, (8): 659~668.
- [10] Service R F. As the west goes dry. Science, 2004, 303 (5661): 1124~1127.
- [11] 丁宏伟, 张荷生. 近 50 年来河西走廊地下水资源变化及对生态环境的影响. 自然资源学报, 2002, 17(6): 691~697.
- [12] 王金贵, 肖秀芹, 武立辉等. 调水工程的生态环境效应. 水利科技与经济, 2008, 14(1): 59~61.
- [13] 方妍. 国外跨流域调水工程及其生态环境影响. 人民长江, 2005, 36(10): 9~10.
- [14] 王立洪, 张斌, 万英. 新疆南疆农业灌溉对生态与环境的影响. 水土保持研究, 2002, 9(1): 30~33.

- [15] 魏晓妹, 康绍忠, 马 岚 等. 石羊河流域绿洲农业发展对水资源转化的影响及其生态环境效应. 灌溉排水学报, 2006, 25(4):28~32.
- [16] Fitzhugh T W and Richter B D. Quenching urban thirst: growing cities and their impacts on freshwater ecosystems. *Bioscience*, 2004, 54 (8):741~754.
- [17] Igor V S. Water-related problems of central Asia: some results of the (GIWA) International Water Assessment Program. *Ambio*, 2004, 33(1~2):45~51.
- [18] Micklin P P. *Managing water in central Asia*. London: Royal Institute of International Affairs, 2000.
- [19] Pala C. To save a vanishing sea. *Science*, 2005, 307(5712): 1032~1034.
- [20] Pala C. Once a terminal case, the North Aral Sea shows new signs of life. *Science*, 2006, 312(5771):183.
- [21] Christine Drake. Conflict of water resource in Middle East. *Journal of Geography*, 1997, 96(1):4~11.
- [22] 李元寿, 贾晓红, 鲁文元 等. 西北干旱区水资源利用中的生态环境问题及对策. 水土保持研究, 2006, 13(1): 217~219.
- [23] 王根绪, 程国栋, 徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题. 自然资源学报, 1999, 14 (2):110~116.
- [24] 李世明, 程国栋, 李元红 等. 河西走廊水资源合理利用与生态环境保护. 郑州:黄河水利出版社, 2002.
- [25] 钱亦兵, 樊自立, 雷家强 等. 近 50 年新疆水土开发及引发的生态环境问题. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 58~63.
- [26] 袁生禄. 石羊河流域水资源大规模开发对生态环境的影响. 干旱区资源与环境, 1991, 5(3):44~52.
- [27] 韩凤君. 石羊河流域水资源开发对环境的影响及防治对策. 甘肃水利水电技术, 2006, 42(4):320~322.
- [28] 王根绪, 曲耀光, 程国栋. 黑河流域水资源开发的环境效应分析. 干旱区资源与环境, 1997, 11(4):8~14.
- [29] 任建华. 黑河流域水资源开发对生态环境的影响. 水土保持通报, 2005, 25(4):94~97.
- [30] 王 昭, 陈德华. 疏勒河流域水资源开发及其对生态环境的影响, 2002, 23(增刊):14~17.
- [31] 孙 涛, 潘世兵, 李纪人 等. 疏勒河流域水土资源开发及其环境效应分析. 干旱区研究, 2004, 21(4):313~317.
- [32] 冯 起, 刘 蔚, 司建华 等. 塔里木河流域水资源开发利用及其环境效应. 冰川冻土, 2004, 26(6): 682~690.
- [33] 海米提·依米提, 潘晓玲, 塔西南拉提·特依拜 等. 塔里木盆地水土资源开发及其生态环境效应. 资源科学, 2002, 24(6):48~54.
- [34] 程维明, 周成虎, 刘海江 等. 玛纳斯河流域 50 年绿洲扩张及生态环境演变研究. 中国科学 (D 辑), 2005, 35(11): 1074~1086.
- [35] 李晓娜, 焦 黎, 孙桂丽. 浅谈乌鲁木齐河流域水环境问题及保护对策. 新疆师范大学学报 (自然科学版), 2007, 26(3):228~231.
- [36] 母敏霞, 王文科, 杜 东 等. 新疆奎屯河流域地下水资源开发引起的生态环境问题及对策. 干旱区资源与环境, 2007, 21(12):15~20.
- [37] 加尔肯. 伊犁地区水土资源开发引起的生态环境问题及对策. 新疆环境保护, 1998, 20(1):5~8.
- [38] 罗江呼. 额尔齐斯河流域开发对河谷生态的影响及保护. 新疆环境保护, 1992, 14(2):1~8.
- [39] 关惠平, 王生花. 甘肃河西走廊水资源与生态环境状况分析. 兰州铁道学院学报(自然科学版), 2002, 21(4):17~21.
- [40] 马金珠, 李吉均, 高前兆. 气候变化与人类活动干扰下塔里木盆地南缘地下水的变化及其生态环境效应. 干旱区地理, 2002, 25(1):16~32.
- [41] 樊自立, 徐 曼, 马英杰 等. 历史时期西北干旱区生态环境演变规律和驱动力. 干旱区地理, 2005, 28 (6): 723~729.
- [42] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红 等. 塔里木河流域近 50 年来生态环境变化的驱动力分析. 地理学报, 2006, 61(3): 262~272.
- [43] Huber-Sannwald E, et al. Ecohydrological feedbacks and linkages associated with land degradation: a case study from Mexico. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15):3395~3411.
- [44] 马金珠, 高前兆. 西北干旱区内陆河流域水资源系统与生态环境问题. 干旱区资源与环境, 1997, 11(4):15~21.
- [45] 马金珠, 李吉均. 塔里木盆地南缘人类活动干扰下地下水的变化及其生态环境效应. 自然资源学报, 2001, 16 (2):134~139.
- [46] 高前兆. 塔克拉玛干沙漠南缘水资源开发与绿洲生态环境负效应. 干旱区地理, 2003, 26(3):193~201.
- [47] 周可法, 张 清 等. 中亚干旱区生态环境变化的特点和趋势. 中国科学(D 辑), 2006, 36(增刊 ):133~139.
- [48] Riddif L, et al. Duration and frequency of water stress in vegetation: an analytical model. *Water Resources Research*, 2000, 36(8):2297~2307.
- [49] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量 等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. 地理学报, 2003, 58(4):542~549.
- [50] 张 丽, 董增川, 黄晓玲. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究. 中国沙漠, 2004, 24(1):110~113.
- [51] 张 勃, 孟 宝, 郝建秀 等. 干旱区绿洲荒漠带土壤水盐异质性及生态环境效应研究. 中国沙漠, 2006, 26(1): 81~84.
- [52] 郑 丹, 李卫红, 陈亚鹏 等. 干旱区地下水与天然植被关

系研究综述. 资源科学, 2005, 27(4):160~167.

- [53] 宋郁东, 樊自立, 雷志栋等. 中国塔里木河水资源与生态环境问题研究. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 2000.
- [54] 刘志辉, 王建军, 杨天明. 阿勒泰地区水资源开发利用中的环境问题研究. 新疆大学学报(自然科学版), 1996, 13(4):62~66.
- [55] 张军民. 伊犁河流域地表水资源优势及开发利用潜力研究. 干旱区资源与环境, 2005, 19(7):142~146.
- [56] 郭锐, 梁芸, 王小平. 黑河调水对下游生态环境恢复效果的卫星遥感监测分析. 中国沙漠, 2004, 24(6):740~744.
- [57] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复. 生态学报, 2007, 27(2):538~545.
- [58] 钱正英, 沈国舫, 潘家铮. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究(综合卷). 北京:科学出版社, 2004.
- [59] 汪秀丽. 河流生态流量浅论. 水利电力科技, 2007, 33(1):20~29.
- [60] 占车生, 夏军, 丰华丽等. 河流生态系统合理生态用水比例的确定. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(2):121~124.
- [61] 李新虎, 宋郁东, 李岳坦等. 湖泊最低生态水位计算方法研究. 干旱区地理, 2007, 30(4):526~530.
- [62] 陈永金, 陈亚宁, 李卫红等. 塔里木河下游输水条件下浅层地下水化学特征变化与合理生态水位探讨. 自然科学进展, 2006, 16(9):1130~1137.
- [63] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲等. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京:科学出版社, 2003.
- [64] 王芳, 王浩, 陈敏建等. 中国西北地区生态需水研究(2)——基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析. 自然资源学报, 2002, 17(2):129~137.
- [65] 程国栋, 赵传燕. 西北干旱区生态需水研究. 地球科学进展, 2006, 21(11):1101~1108.
- [66] 陈敏建, 王浩, 王芳等. 内陆河干旱区生态需水分析. 生态学报, 2004, 24(10):2136~2142.
- [67] 粟晓玲, 康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法. 水科学进展, 2003, 14(6):740~744.
- [68] 钟华平, 刘恒, 耿雷华等. 河道内生态需水估算方法及其评述. 水科学进展, 2006, 17(3):430~434.
- [69] 严登华, 王浩, 王芳等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探. 水利学报, 2007, 38(3):267~273.
- [70] 陈曦, 黄粤, 钱静等. 干旱区内陆河漫溢型生态用水调控的模拟分析——以塔里木河干流灿木里克生态区为例. 中国科学(D辑), 2006, 36(增刊):1~8.
- [71] 丛振涛, 周海鹰, 雷志栋等. 塔里木河下游输水过程的分析与模拟. 水科学进展, 2003, 14(3):276~279.
- [72] Murray-Hudson M, Wolski P, Ringrose S. Scenarios of the impact of local and upstream changes in climate and water use on hydro-ecology in the Okavango Delta, Botswana. Journal of Hydrology, 2006, 331(1~2):73~84.
- [73] 张华, 张勃, Peter Verburg. 不同水资源情景下干旱区未来土地利用/覆盖变化模拟——以黑河中上游张掖市为例. 冰川冻土, 2007, 29(3):397~405.
- [74] 方创琳, 鲍超. 黑河流域水-生态-经济发展耦合模型及应用. 地理学报, 2004, 59(5):781~790.
- [75] Lal R. Integrated watershed management in the global ecosystem. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
- [76] Adil A R. Integrated water resources management (IWRM): an approach to face the challenges of the next century and to avert future crises. Desalination, 1999, 124 (1~3):145~153.
- [77] Matondo J I. A comparison between conventional and integrated water resources planning and management. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27 (11~12):831~838.
- [78] Van der Zaag. Integrated water resources management: Relevant concept or irrelevant buzzword? Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(11~16):867~871.
- [79] 万育生, 张继群, 姜广斌. 我国水资源管理制度的研究. 中国水利, 2005, (7):16~20.
- [80] Portnov B A and Safriel U N. Combating desertification in the Negev: dryland agriculture vs. dryland urbanization. Journal of Arid Environments, 2004, 56(6):659~680.
- [81] 鲍超, 方创琳. 内陆河流域用水结构与产业结构双向优化仿真模型及应用. 中国沙漠, 2006, 26(6):1033~1040.
- [82] 金蓉, 石培基, 王雪平等. 张掖绿洲水循环经济发展探讨. 中国沙漠, 2005, 25(6):922~927.
- [83] 汪恕诚. 资源水利——人与自然和谐相处(修订版). 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [84] Zhang Junlian. Barriers to water markets in the Heihe River basin in northwest China. Agricultural Water Management, 2007, 87(1):32~40.
- [85] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路. 中国科学院院刊, 2003, (4):260~265.
- [86] 徐中民, 龙爱华, 张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用. 地理学报, 2003, 58(6):861~869.
- [87] 刘宝勤, 封志明, 姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展. 资源科学, 2006, 28(1):120~127.
- [88] 张宁. 中亚国家的水资源合作. 俄罗斯中亚东欧市场, 2005, (10):29~35.
- [89] 方创琳. 黑河流域生态经济带分异协调规律与耦合发展模式. 生态学报, 2002, 22(5):699~708.

## Impact of Water Resources Exploitation and Utilization on Eco-environment in Arid Area: Progress and Prospect

BAO Chao, FANG Chuanglin

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Water resources are the key restricting factor and one of the important sectors for eco-environment in arid area. During the rapid growth of population and economy in arid area, much water once for eco-environment was used for production and living, so that in some arid areas, the exploitation and utilization of water resources have approached or exceeded the threshold of natural water resources, and the eco-systems are getting deteriorated or crashed. More and more attention was paid to the impact of water resources exploitation and utilization on eco-environment in arid area. At present, many scholars in China and abroad have studied this topic according to logical thought and obtained obvious progress, including the problems, the mechanisms, the adjustment criterion, the process simulation, the scenario forecast and the response countermeasures. However, study on the impact mechanism of water resources exploitation and utilization on eco-environment in arid area is still weak. The quantitative relationship between water resources and eco-environment can still not be expressed. The impact intensity of water resources exploitation and utilization on eco-environment can not be explicitly simulated and forecasted. Some suggested countermeasures on water resources exploitation and utilization for eco-environmental protection still face many obstacles in practice. Consequently, in the future, we should take the impact mechanism as the base, the process simulation and the scenario forecast as the breakthrough, and the integrated countermeasures system as the final task, and improve the research on the impact of water resources exploitation and utilization on eco-environment in arid area.

**Key words:** arid area; water resources exploitation and utilization; eco-environment; human activities; research progress