

流域尺度生态水文研究评述

王根绪^{1,2}, 刘桂民¹, 常 娟²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 根据国际上生态水文学发展的主要方向, 归纳了现阶段流域生态水文学的生态水文过程与生态水资源两大主要学科领域及其进展。全球变化下流域生态过程对水文循环加剧的应对策略, 基于土地利用与覆盖变化的流域水土界面可持续管理将是未来流域生态水文过程研究的前沿核心问题。以生态需水量为主, 分析了生态水资源领域存在的问题, 评述了河道内与河道外生态需水量评价的方法与问题, 建立更加适用的生态需水量评价体系是目前生态需水量研究的关键问题, 一个全新的面向生态系统的水资源评价和规划的理论体系是未来人类社会可持续发展的基础。

关键词: 生态水文过程; 生态水资源; 生态需水量; 评价体系; 流域

Review on some issues of ecohydrology research at the watershed scale

WANG Gen-Xu^{1,2}, LIU Gui-Min¹, CHANG Juan² (1. Statekey Lab. of Frize Soil Engineering Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou, 730000, China; 2. Education Ministry Key Laboratory of Western Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 892~903.

Abstract: Based on the leading aspect of the international ecohydrology development, the two primary subjects—the ecohydrological process and ecological water resource research field with their research progress of watershed ecohydrology currently are reviewed in this paper. Under the situation of global changing, the corresponding strategy of watershed ecological process towards hydrology circulation and the sustainable management about water-soil interface of watershed that based on land use and land coverage change are the frontier and core issues of the watershed ecohydrological process in future. According to ecological water requirement, the problems that exist in ecological water demand field was analyzed, and also the methods and problems about the evaluation for ecological water demand quantity in inner river channel and outer river channel were discussed. To set up a more appropriate evaluation system for ecological water demand is the key issue of ecological water requirement research at present, and a new theory system about water estimate and water programming that consider the ecological system as a primary water user is the basis of human society sustainable development in future.

Key words: ecohydrological process; ecological water resource; ecological water demand quantity; estimate system; watershed
文章编号: 1000-0933(2005)04-0892-12 中图分类号: X143 文献标识码: A

在广泛关注的全球变化研究中, 全球水文循环中的生态作用成为核心问题之一, 使得水文过程与生态过程耦合研究成为水文科学最为活跃的领域^[1,2]。正是由于水文循环联系地球系统地圈-生物圈-大气圈的纽带作用, 水文循环过程的变化与其相关的生态环境的变化交叉研究与社会需求, 产生了新的学科生长点, 即生态水文学。Hatton 等广义的生态水文学定义^[3], 是指在一系列环境条件下来探讨诸如干旱地区、湿地、森林、河流和湖泊等对象中的生态与水文相互作用过程的科学, 也就是研究有关生态圈与水文圈之间的相互关系以及由此产生的相关问题的一门新兴学科。生态水文学重点研究陆地表层系统生态格局与生态过程变化的水文学机理, 揭示陆生环境和水生环境植物与水的相互作用关系, 回答与水循环过程相关的生态环境变化的成因

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40171002); 中国科学院百人计划资助项目(2004 年)

收稿日期: 2004-05-10; **修订日期:** 2005-03-02

作者简介: 王根绪(1965~)男, 博士, 研究员, 主要从事寒旱区现代环境过程、生态水文学与景观生态学研究。E-mail: gxwang@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40171002) and the “Hundred People” project of Chinese Academy of Sciences (2004).

Received date: 2004-05-10; **Accepted date:** 2004-03-02

Biography: WANG Gen-Xu, Ph. D., Researcher, mainly engaged in modern environmental processes of cold and arid region, eco-hydrology and landscape ecology research. E-mail: gxwang@ns.lzb.ac.cn

与调控。生态水文学是现代水文科学与生态科学交叉中发展的一个最为活跃的前沿学科领域,它以植物与水分关系为基础理论,以生态过程和生态格局的水文学机制为研究核心,是干旱区水资源合理配置、生态环境保护与建设的重要理论依据。经过近 10 a 的迅速发展,生态水文学的理论与方法在干旱区流域水资源和生态环境问题领域研究中已经显示出其广阔的应用前景,成为最具活力的干旱区水文学与生态学前沿领域,但是正如夏军教授所指出的^[4],生态水文学作为新生学科,其发展和应用过程不可避免的存在许多问题,这也是当今干旱区水文与水资源学以及生态环境领域所面临的一系列重要的挑战性任务与课题。

国际上流域生态水文学研究可归纳为 3 个主要方向:一是流域或区域水文循环过程中生态与水文相互作用与影响问题,研究生态过程如何影响流域或区域的水文循环过程,包括河道内水生生态系统对河流水文过程的作用;二是流域水利工程措施如何作用和影响流域内的生态系统,也就是流域水文过程或水文情势变化对生态系统有何影响的问题,包括河道内和河道外相关区域;三是生态水资源问题,研究流域内各种生态系统的水资源需求和水消耗规律,包括不同水供给情况下的生态水分胁迫的响应机理。前两个方面可以称为生态水文学的水文过程领域,后者则是生态水文学的水资源问题领域。可以认为生态水文学是基于水文学和生态学理论基础的包含生态水文过程与生态水资源两个理论与实践相结合的学科体系。

1 生态水文过程

1.1 流域水文过程变化下的生态系统过程响应

这是早期生态水文学的核心领域,以流域水利工程措施如何作用和影响流域内的生态系统为主要研究内容。早在 20 世纪 40 年代,随着水库的建设和水资源开发利用程度的提高,美国的资源管理部门开始注意和关心流域淡水渔场减少的问题。美国鱼类和野生动物保护协会对河道内水文情势变化与鱼类生长繁殖、产量等之间的关系进行了许多研究,强调了河川径流作为生态因子的重要性^[5]。长期以来水利工程如大坝对流域生态系统的影响就一直是生态学家研究的热点问题,提出了许多有关生态系统对水利工程响应的特征与机理方面的观点,并逐渐成为决定工程建设规划的重要科学依据,如我国三峡大坝建设规划中对长江流域水生生态系统影响的评估就考虑得非常周密。在 20 世纪 70 年代后,澳大利亚、南非、法国和加拿大等国家针对河流生态系统,比较系统地开展了关于鱼类生长繁殖、产量与河流流量关系的研究,同时,有关生态对象的研究也开始从单纯的鱼类扩展到其他水生生物类型^[6,7]。1971 年,联合国教科文组织(UNESCO)正式启动人类生物圈(MAB)计划,水生生态系统研究成为该计划的一个核心内容,其主要内容是陆地生态系统和水生生态系统之间的过渡带,如何影响水生生态系统生物化学循环^[8]。这些方面的研究和学术观点是生态水文学产生的雏形,也是生态水文学研究的一个基本领域。

该领域早期的另一个典型生态水文学研究问题就是针对湿地生态系统——湿地、沼泽、泥炭地和水生生态系统等,研究水生生态系统对水文情势变化的响应,是生态学家很早关注生态过程与水文过程相互关系的领域,建立了多种尺度上的多种侧面地湿地生态系统对水文变化的响应机制^[9]。由 Andrew J. Baird 等人编撰的《生态水文学》一书中,大量的生态水文学术语被用来描述湿地中水位和植物分布的关系,很多有关生态水文过程的研究成果建立在湿地生态系统基础上^[10]。由于湿地作为地球之肺的巨大生态功能和对全球变化的敏感反应,现阶段湿地生态水文学的研究仍然是生态学家关注的焦点领域,研究尺度从微观的个体、群落、生态系统到相对宏观的景观尺度,研究问题由最初的生态结构与种类变化发展到生物多样性、生态功能以及包含生物地球化学和水分在内的多种物质与能量传输变化。近期代表性的研究如美国在佛罗里达开展的综合沼泽恢复计划(CERP),在 2004 年提交的汇总研究报告中,从野生动物生态、植物生态、生态系统生态以及景观生态等 4 个方面系统总结了美国南佛罗里达沼泽区与由于沼泽疏干旱化引发的整个生态体系的变化及其多方面的环境与经济影响^[11,12]。

为了全面系统揭示人类活动影响下的水文、气候与生态过程之间的相互关系,以清晰地理解生态水文学的内涵,在美国科学基金支持下,借助全球生态长期观测研究网络(LTER),一个专门的基于流域尺度的生态水文过程观测研究在全球不同生态系统类型的 6 个具有 60 a 生态过程与水文过程研究的典型流域和另外 6 个非代表性地点展开,包括了针叶林、落叶林、混交林、热带雨林、北极冻原、南极干河谷、非洲大草原等主要生态体系,核心目标之一就是要揭示水文过程,包括类型、速率、时间以及不同时间的的水文过程发生的空间特征如何影响生态过程^[13,14]。这一研究计划的实施,使得生态水文过程研究进入了一个全球性的立足于多种生态类型系统观测的新局面。与此相类似的研究还有荷兰 KIWA 水研究计划支持下对不同地下水动态变化下陆面生态系统结构、功能等的响应特征的研究^[15],加拿大水资源需求与供给研究计划中对于大湖地区生态系统随水资源利用程度的变化的研究^[16]。

这些研究对于弥补生态系统对于水文过程响应机制方面的多种不足是必要的,但人类社会面临的客观事实是:不仅仅是河流生态系统对于人类社会的影响产生了巨大变化,地球上的整个陆地淡水生态系统都不同程度面临着因人类社会对水资源的过度占用而造成的生存威胁^[16,17],因此,全球变化和人类活动共同作用下水文过程变化及其水资源的时空再分配对全球淡水生态系统的影响,以及人类由此从淡水生态系统中丧失的生态服务功能及其未来变化趋势,将是生态学家和水文学家在该领域所关注的核心科学问题。有关全球气候变化的研究结果表明^[17],未来 100 a 里由于气候变化将导致地球水文循环普遍加强,伴

随降水、蒸散发和暴雨事件的增加,以及生物地球化学过程的显著改变,陆地淡水生态系统将如何应对这种剧烈的水文过程变化,是生态水文过程研究可能面临的最严峻的挑战和任务,也是全球变化研究的关键科学问题之一。

水循环过程中的水分运移,包含了生物圈中最大的物质循环。科学管理水土界面的相互作用,使得淡水生态系统可持续化,就是现阶段生态水文学中流域尺度上提出的新课题,其核心目标就是要探求在全球变化和人口数量剧增的情况下,针对河流与洪泛平原生态系统、沼泽湿地生态系统等水土界面矛盾突出的陆地生态体系,如何保护淡水生态系统及其服务功能,如何有效地控制和减少由于水文情势变化(包括水富营养化和有机污染等)所导致的大范围生态系统的退化^[12,18]。水土界面间物质与能量传输与变化及其对陆地生态系统的影响研究,将深化水文生态学的内涵。

1.2 水文过程中的生态系统因素问题

也就是生态过程如何影响水文过程。在水文学领域,水文学家早就关注生态系统对水分的消耗以及植被系统蒸散发作用对水文循环过程的影响,如森林和草地植被如何影响流域产汇流以及区域生态系统碳排放如何与水分结合影响区域降水过程等问题^[19,20]。森林水文生态作用研究内容主要是以不同的时空尺度来了解和认识森林植被变化与水分运动的作用关系以及与之相伴随的生物地球化学循环、能量转换^[20,21]。由于森林生态系统对于流域、区域乃至全球尺度水文循环过程的显著影响,森林水文学一直是水文科学领域的重要分支领域。森林水文生态作用研究强调了树木如何影响地表水运输以及如何通过蒸散发作用影响土壤水分状况,自 20 世纪 70 年代以来,研究内容从森林覆盖对河川流量的影响研究,发展到森林生态系统与水文过程的相互作用机理及其对大尺度干扰的响应过程^[20]。干旱区山地森林生态水文过程研究集中在森林生态系统在地表径流形成过程中的作用,以揭示山区森林生态的水源涵养功能为核心。森林对降水-汇流过程和土壤侵蚀过程的影响为主,从林冠截留、林地枯落物吸持水、林地土壤水分入渗与贮水以及林地蒸散发等水文平衡要素出发,系统研究森林水文生态作用过程,包括对不同气候带典型森林植被类型水文过程及对比研究,已能明确揭示不同树种对降水截留与吸持的比率;同时,对森林水文生态作用过程的不同阶段或全过程,已开发出许多数值模拟模型,如模拟林冠截留的 Rutter 模型、Massman 模型,模拟土壤水分过程的 Philip 模型、Hottan 模型以及许多径流模型等^[19]。但林地蒸散发的定量化与模型化研究尚无显著的突破性研究成果。

然而,长期以来,森林生态水文的研究并没有能够在生态系统与水文过程之间形成准确的详细链接,提出普遍性的有关生态与水文关系的原则以指导流域尺度的水文循环过程研究和湿度生态系统的保护^[14]。这种局面直接影响到对全球变化如何影响区域水文过程的认识,因此,国际地圈生物圈计划的“水文循环的生物圈方面(BAHC)”以及联合国教科文组织(UNESCO)国际水文计划(IHP)等,都以认识陆地生态系统与区域水文过程的耦合机制为核心内容^[21,22],IAHS 积极建立各种尺度的“大气-土壤-植物”相互作用模型。这些工作开创了水文学研究的新局面,同时,形成了现代生态水文学的主要内涵。一方面,适合不同生态类型的大尺度生态水文过程模拟模型不断提出和应用,SVAT(土壤-植被-气候传输)模型在各种尺度上得以迅速发展,通过对陆地生态系统的不同参数化处理,形成了种类繁多的生态水文过程模拟模型,如 SWIMV. 2.1,可解决 4 种植被类型、土壤中不同根系分布、多层结构土壤的水分与溶质的传输问题^[23];SHE 模型可以处理流域水流过程所有方面的问题^[24];还有其他一些用于简单 SVAT 和植物生长问题的生态-水文模型,如 TOPMODEL、PATTERN 模型等^[25];最近几年围绕地下水与植被群落结构、种类和其他生态特征之间的密切关系,发展了针对地下水生态过程的多种模拟模型如 MXW 以及 IRM 等^[26]。在另一方面,植被对控制土壤侵蚀、河流沉积等的作用问题,也是水文学家和环境学家长期关注的焦点领域,这方面的研究进展扩展了早期生态水文学关注的生态系统对湿地或河流系统营养物质、沉积物和污染物质的迁移影响的认识,使得生态水文学在包括水文循环过程和物质循环过程两方面都得到了迅速发展^[27]。

土地利用与覆被变化是陆地生态系统变化的主要表现,近年来生态水文过程研究的一个突出热点就是围绕土地利用与覆被变化,分析流域水文过程的响应过程,其中最具代表性的研究是哥伦比亚盆地开展的由美国国家环保局设立的 ICBEMP 研究计划^[28],系统研究和定量描述 1900 年以来该区域土地利用与覆被变化对水文过程,包括积雪与消融、蒸散发、土壤水分以及径流的产汇流过程的影响,并由此提出该区域合理的水土资源利用。全球变化和人类活动在多时情况下是通过改变陆地表面的覆被类型与利用结构对水文循环产生影响,因此,BAHC-LUCC 联合发起了土地利用与覆被与水文循环关系的核心研究计划,在全球选择了数个典型地区开展区域尺度的土地利用与覆被变化如何影响水文循环的观测研究^[29]。

20 世纪 90 年代以来,国际上生态水文学迅速发展并逐渐成为相对独立的学科,如 1996 年 9 月在法国召开的“小流域生态水文学过程”研讨会,独立的以生态水文过程为这次全球性学术会议的主题^[30],1997 年国际水文计划出版了专集:生态水文学-水生资源可持续利用的新范例,文集指出生态水文学主要是为了研究水循环过程、机制与生物、非生物之间的相互关系^[31]。国际水文计划(IHP)的第 5 个研究计划(IHP-V,1996~2001 年)以“脆弱环境中的水文水资源开发”为研究方向,把生态水文学列为该计划的核心内容,其目标旨在从流域观点、从河流系统与自然社会经济的联系中,理解水文过程中生物和物理过程的整体性^[32]。1998 年 5 月在波兰召开的 UNESCO IHP-V2.3-2.4 工作组会议和会后出版的论文集,给生态水文过程的研究现状进行了全面总结^[33],并指出了未来生态水文过程研究的重点领域,认为河流生态系统是受水文过程控制的“超有机体”,确定生态水

文学研究的目标为:① 比较和评价现有的水文和生态过程相互关系的信息;② 评论预测的潜力、确定未来研究最重要的方向;③ 识别与水文过程相关联的环境问题层次;④ 定量生物因素、非生物因素之间的联系以及它们在水中的沉积物质、营养物质和污染物质运输、转化中的作用,以确定从区域到流域尺度上的转移路径。

我国在 20 世纪 90 年代以来,也先后在多方面开展了生态水文学的研究,如干旱半干旱地区建立的小尺度描述土壤-植被-大气间水分传输过程的 SPAC 模型、在流域或区域尺度上研究“大气-土壤-植物”系统水分能量交换的 SVAT 模型等,在模拟植被生态系统水分传输方面无论是试验观测手段和参数确定方法还是数学模型的开发和模拟研究,基本以国际发展水平相接近。森林生态水文研究在我国多种气候单元都有较长时间,尤其在黄土高原和干旱内陆山区森林生态水文研究具有鲜明特色,以研究森林对降水-汇流过程和土壤侵蚀过程的影响为主,从林冠截留、林地枯落物吸持水、林地土壤水分入参与贮水以及林地蒸散发等水文平衡要素出发,系统研究森林水文生态作用过程,包括对不同气候带典型森林植被类型水文过程及对比研究,对森林水文生态作用过程的不同阶段或全过程,提出了许多数值模拟模型^[19],同时在森林生态系统的水文生态功能和森林水文生态效益等方面也开展了卓有成效的研究。在干旱内陆流域,生态水文过程研究集中在 3 个方面,一是在河源山区森林带开展的以森林水源涵养功能观测研究为核心的森林生态水文过程研究,在黑河流域祁连山区这方面的研究已有近 30a 历史,在国内具有一定影响;二是干旱区典型植物的水分利用机理和水分胁迫的响应特征等方面相对微观尺度的生态水文研究,包括干旱区土壤结皮的生态水文规律研究;三是不同景观带植被生态系统的蒸散发及其年内变化规律的研究。1990~1992 年的 HEIFI 试验选择黑河流域中游 70km×90km 的绿洲与沙漠地区作为研究区域,进行了大量以水分与热量交换为核心的地气相互作用综合观测,对黑河中游荒漠陆面过程特征与机制的有了新的认识,获得了大量观测数据与参数化方案中的重要参数,关于绿洲与沙漠之间的水热相互作用研究有了突破性的认识与进展^[34,35],在国际上有一定影响;2001 年以来在黑河流域山区森林和草原带、中游绿洲-荒漠交界带和下游荒漠植被带分别建立了陆面过程观测的环境观测系统(ENVIS),研究流域不同植被景观带内各有特色的土壤-植物-大气体系(SVAT)内的水分、热量、光合作用过程及其时空分布规律,已取得了初步研究成果^[36]。在塔里木河流域中下游地带,有关荒漠植被和地下水、地表水的关系研究有了近 40a 的历史,近年来对流域植被系统的水文过程响应规律的研究取得了一些列有影响的成果,揭示了荒漠植被的水分耗散规律和来源以及对生态输水的响应特征等^[37]。

总之,水文过程及其变化如何在不同时空尺度上影响生态过程,生态系统和陆地表面生态过程如何反作用于水文过程,如植被系统如何以媒介的方式参与水的输入、储存和消耗而作用于整个水文循环等,是生态水文学生态水文过程研究的两大相互密切关联的核心主体和主要内涵。LTER 就把这两个方面设定为长期定位研究的生态水文科学问题^[14]。但生态水文过程研究存在多方面的来自学科交叉与观念上的和技术手段上的等诸多困难,面临的最大挑战就在于缺乏陆面生态过程要素中有关水文的一些关键性的数据和信息积累,如植被结构如何影响降雨和雪的截留作用、土壤水分的有效性和水气压差如何控制着植物功能性组分的蒸腾作用等,而且存在比水文过程更加复杂和困难的尺度问题。有挑战就有机遇,正是这些巨大挑战吸引了越来越多的生态学、水文学和环境科学以及人文科学等诸多学科的科学家人汇聚到生态水文科学这一新的交叉学科领域中来,在全球范围内业已形成了庞大的专门研究队伍。我国在有些领域的研究独具特色,如黄土高原以土壤侵蚀为核心的植被-土壤-大气水分交换以及流域尺度的水沙效应研究、干旱内陆流域不同景观带的植被-土壤-大气间水分传输规律研究和植被的水文响应特征研究,以及青藏高原基于高寒生态系统的高原能水平衡实验研究等。

2 生态水资源——面向生态系统的水资源评价与管理

在全球范围内,过去 40a 里,人类社会无限度地获取陆地淡水资源,现代水利工程也成功地控制了大部分河流,使人类可以很方便的无论何时何地可以获得想获得的水量,但从未考虑过生态系统的基本生存需水问题^[38],人类活动极大地改变了生物圈水资源的分配,地球淡水生物圈处于极度危险状态,这种对淡水生态系统水资源利用的疏忽将直接威胁人类社会未来的可持续发展^[38,39]。Lundqvist 和 Gleick 在可持续的 21 世纪世界水资源的报告中指出^[40],需要一个全新的面向可持续发展的水资源评价和规划的认识和理论体系,提出必须要将环境和生态系统维护的淡水资源需求纳入到区域水资源评价和开发利用规划中来。利用狭义水资源的概念,定义生态水资源为一定时期内可被生态系统以各种方式利用的水体,包括大气降水、地表水与地下水,并可得以恢复与更新。这里生态系统指自然、半自然及人工生态体系,但不包括人类自身,水资源供给方式有自然和人工两种。生态水资源与人类社会水资源的最大区别在于水资源概念的主体不同,只有在人类在自然生态系统上构建的人工生态系统(如农田生态系统、人工防护林生态系统等)方面存在主体的交叉,同时人类社会水资源与水质密切相关,只有水质符合人类社会要求的水体才能作为水资源看待,但对于不同水环境下形成的不同生态系统来讲,除非是受人类活动影响而次生的严重污染水体,对于天然状态水质以及轻度污染的水体几乎没有限制。面向生态系统乃至整个环境体系的水资源科学体系尚没有足够认识,由于生态系统对水资源的利用方式、对水质的要求等与人类社会不同,因此有理由认为面向生态环境的生态水资源构成与评价体系也应不同于现在立足于人类社会利用的水资源理论框架。

现阶段,国际上生态水资源领域主要集中在生态需水及其相关问题的研究,生态需水量的研究是生态水文过程理论的实践

应用,早在 20 世纪 40 年代到 60 年代,美国、加拿大、澳大利亚、南非以及法国等国家,通过对流域水生生物(主要是鱼类)对河流水文情势变化的响应特征的研究,提出了河流最小环境(或生物)流量的概念,编制了典型鱼类繁衍所必需的河流生境质量的高低与基本生态需水(流速和水深)之间的曲线关系,通常是基于河流物理形态、鱼类和无脊椎动物确定最小或最佳的生态需水流量^[6,41]。此后直到 20 世纪 90 年代,随着生态水文过程研究的不断深入和扩展,人们才开始考虑维持整个淡水生态系统完整性的生态水量需求,Covich 和 Gleick 认为生态需水就是恢复和维持生态系统健康发展所需的水量,提出了基于生态建设(恢复)用水的基本生态需水量的概念(basic ecological water requirement)^[42],指出能够最大限度改善生态系统并保护生物多样性和生态整合性所需要提供给天然生境的水量,认为生态需水在一定范围内可以变动,而不是一个固定的值,所针对的是自然生态系统的平衡问题。基于河流生态需水量,尤其是河道生态系统稳定与健康对于河流水文过程与基流量的要求等,并把河流生态系统的服务价值体系与河流管理结合起来,形成了河流生态学这一交叉学科领域^[41,43]。2003 年由英国政府国际发展部发起完成的南非洲发展中国家流域水资源需求与利用报告中,认识到环境是一个合理的必须考虑的水资源用户,并将环境需水量同作物和工业需水量等同看待,给与定量评价,但该报告里对环境需水就完全定义为河道内生态系统尤其是流域内水生生物生存繁衍对河流流量的要求,认为流域环境需水量也就是河流生态系统维持一定状态所要求的河道内径流量^[43]。Baron 等人系统总结了过去 10 a 来有关人类社会与生态系统间水资源的合理利用问题的论述后认为,科学上明确了维护淡水生态系统对水资源需求及其人类必须予以保障的必要的理论阐述,但远不足以建立人类社会与生态系统之间水资源合理分配的理论体系^[44]。

与生态水文过程不同,近年来生态需水量的研究在我国发展迅速,以西部生态环境保护和建设为目标的区域生态需水量评价和相关理论的探讨,在国内已经形成了很有影响的水文学科前沿领域。早在 20 世纪 70 年代,原国家地质矿产部兰州水文地质与工程地质中心在开展地矿部‘六五’攻关计划“河西走廊地下水评价与合理开采利用规划”问题时,在针对地下水盆地水量平衡中,提出了生态用水的水量消耗项。20 世纪 80 年代后期,施雅风和曲耀光等人在开展乌鲁木齐河与塔里木河流域水资源合理利用的问题研究过程中,提出生态用水问题,认为“为了保护各绿洲的生态环境,而生态环境的保护也离不开水,这部分水可统称为生态用水”,并把这个理念用到后来开展的河西走廊水资源合理利用研究中^[45]。进入 20 世纪 90 年代,先是国家‘八五’攻关计划中有关华北水资源合理利用问题研究中,明确将生态环境用水作为重要的水资源需求而给予优先满足,考虑到华北地区的实际情况,当时仅把水污染状况作为环境的约束条件^[46]。此后,随着水环境问题越来越受到广泛关注,关于河流环境用水问题的研究逐渐成为全国范围内的热点领域,先后有众多科学家提出了多种关于环境用水的概念内涵以及评价方法^[44,47,48]。刘昌明先生提出^[2,44],维持自然生态与人类环境用水应该考虑水热(能)平衡、水盐平衡、水沙平衡以及区域水量平衡与供需平衡等 4 个原则,从广义角度,维持全球生物地球化学平衡诸如水热(能)平衡、水盐平衡、水沙平衡等所消耗的水分都是生态环境用水,从狭义角度讲,保障生态环境不再恶化并逐渐改善而需要消耗的水资源总量。在流域尺度的生态需水量的概念、内涵及其组成等方面,强调要在研究水循环和水量转化规律的基础上确定生态需水的理论内涵,提出陆地系统中的水可分解为资源水、灾害水、生态水 and 环境水,并认为维持全球生物地球化学平衡诸如水热(能)平衡、水盐平衡、水沙平衡等所消耗的水分都是生态环境用水。从维持地表水体特定的生态环境功能,天然水体必须储存和消耗的最小水量角度评价了国内一些河流的河流生态环境需水^[48,50]。西北干旱区生态环境与经济社会发展的用水矛盾十分突出,由于水资源开发利用而引发的生态环境问题最为严重且复杂多样,不仅严重制约了本区域的可持续发展,而且其影响波及全国以及整个国民经济在 21 世纪的稳定发展,因此,西北干旱区是有关生态需水问题研究的核心地区。系统开展干旱区生态需水问题从 20 世纪 90 年代开始的,确切地讲开始于国家九五攻关计划关于西北水资源合理利用研究时期,从那时起,有关干旱区生态需水量的概念、内涵以及分析方法等,不同学者提出了不同观点,在不同地区和空间尺度上提出了有关的生态需水量的计算结果^[49,51,52]。2002~2003 年间,由钱正英主持开展了中国工程院重大咨询项目“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”,对整个西北地区的生态需水量进行了系统评价,给出了宏观尺度上不同地区的现状生态需水量。基于河流生态学的河流水体富营养化、河流水体功能变化以及河流环境的生态学管理等问题研究在国内也有显著发展,成为流域资源环境与管理研究最具活力的领域^[41,50]。

然而,生态需水量的研究毕竟是近几年才出现的新生事物,无论是对其概念的理解、生态对象的选择还是需水量的计算方法,都处于开发和形成阶段,理论上的争议是必然和必需的,而且伴随对生态环境的新认识和水资源问题的新困难,生态需水研究面临许多新的挑战。但从认识和理论的准备上业已形成了共识:人类对淡水资源的评价和开发利用规划,必须将陆地淡水生态系统和环境质量维持的需水量纳入到人类社会水资源利用的整体中,需要建立基于这种考虑的全新的水资源理论体系。现在面临的问题是如何准确评价生态系统需水量,如何把生态需水量纳入到人类社会的蓄水量整体中统一管理^[53]。为了实现生态水资源的合理规划与管理,需要在流域尺度上开展^[53,54]:(1)定量评价维持生物物种和生态系统功能所需要的淡水资源及其关键性的制约要素;(2)准确分析现状及未来充分满足人类社会对水资源的需求对流域水资源状况的影响,客观评估人类与生态系统之间对水资源需求的不相容性及其时空分布特征;(3)多学科通力协作共同寻求解决这种不相容性的途径与办法,并引入水资源管理试验以解决人类社会与生态系统统一协调利用水资源中存在的一些不确定因素;(4)制定并实施面向生态环境的流

域可持续水资源管理规划,该规划应具有很强的实用性和长期有效性。

3 基于生态需水量的理论与问题

3.1 关于生态需水量的概念与组成

综述目前国内外有关生态需水量的研究成果,可以分为河道内生态需水量和河道外生态需水量两大体系。河道内生态需水量国际上研究较早,其内涵包括生态系统及其生境维持的非生命系统需水量在内,基本上是河道环境保护的水量需求这样一个范畴,早期国外有关生态需水的概念大都明确局限在维持天然河道内生态系统稳定的水量需求这样的内涵范畴,国内由于存在紧迫的区域生态需水量评价社会需求,以西北干旱区生态需水量研究为重点,发展较快。归纳现阶段的生态需水概念,可以分为如下有争议的两大体系:(1)生态需水即生态环境需水,认为生态需水量是指水域生态系统维持正常的生态和环境功能所必须消耗的水量,计算生态需水量实质上就是要计算维持生态保护区生物群落稳定和可再生维持的栖息地的环境需水量^[2,47,49]。在这一认识中还包括与 Covich 观点相似的生态安全需水论,认为生态需水是在一定时期内为保障生态系统安全所消耗的水资源,区域生态需水包括生态系统对风险的抵御需水和生态系统健康维护需水两方面^[1]。(2)生态需水就是生态系统维持生命系统的需水量,认为生态需水是生态环境需水的一部分,包括为维护生态系统稳定,天然生态保护与人工生态建设所消耗的水量^[44,50,51]。加拿大在大湖盆地开展的 2001~2005 年水资源利用与供应研究计划中定义生态需水量为维持现有生态系统或生态功能区域的满足一定水质要求的适宜水量,就属于这类概念的范畴^[16]。

实际上,这里的生态需水与生态环境需水既有区别,又相互联系(如图 1),生态需水的主体包括生物体及环境中的生命及其相关支撑部分;环境需水所指的主体即通常所说的环境,它包括生命和无生命两部分,其中生命部分的需水也就是生命支持系统需水,该部分是生态需水的组成部分;生态环境需水则囊括了生态需水与环境需水的主体。不考虑环境中对生命系统起重要支持作用的非生命系统的水量需求,以单纯生命系统的需水量作为生态需水量是不可取的,但是把具有广泛内涵的生态环境需水作为生态系统需水的理解也存在很大问题,关键在于二者水量需求的主体不同,这要视具体研究对象是什么,对于干旱区以植被生态系统为对象的生态需水问题,就应该局限在上述生态需水的概念范畴。

与人类社会的水资源利用相类似,一定时期内生态水资源实际消耗量与生态水资源实际需要量具有不同的含义,其量也在大多数情况下不同。生态耗水量(用水量)指一定时期内在特定水资源供给水平下生态系统的实际水资源消耗量,与一定时期生态系统对水资源的利用能力、水资源保障程度有关;生态需水量指维护生态系统正常结构、功能与完整性所需要的水分,强调的是满足不同生态环境体系维持其正常生态体系健康的基本水量需求,生态需水量不仅与生态类型密切相关,而且还与生态系统的结构和生态特征(如覆盖度、郁闭度等)关系密切,不同类型的生态体系,其需水量不同,对植被生态而言,其需水量主要表现在生长期间的有机体水分平衡以及蒸腾耗散,因此还与所处地域的气候,水文条件有关。

3.2 关于干旱区生态需水的分类与界定问题

干旱区植物具有适应这种环境与水分条件的特殊生态功能与生理机制,Evenari 系统归纳了干旱区植物对荒漠环境的适应性,并把植物划分为“变水”植物和“恒水”植物两类,变水植物具有许多对极端干旱环境的生理适应性能,苔藓或地衣类植物是干旱区植物最典型的组成类型,但大部分荒漠植物属于恒水植物大类,可进一步划分为干旱胁迫一年生植物、干旱胁迫雨季生植物、多年生及双季性年内生植物等,这些类型都具有多种干旱适应性^[55]。分析干旱植物在水分胁迫下的群落组成结构、分布格局与演变过程,始终是干旱区生态水文科学研究的重点领域,但迄今为止关于这方面的研究未能取得突破性进展,尤其是群落演变的生态机理仍然处于未知阶段^[55]。干旱区植被生态系统的这种水分适应性,使得对以植被生态为主要对象的生态需水量计算带来了更大困难,尤其是干旱胁迫一年生植物、干旱胁迫雨季生植物的大量存在,使得生态需水量在需水的对象角度就存在很大的随机性。

根据上述干旱区植物的生态水分适应机理,以植被生态体系为对象的生态需水量,就存在最小生态需水量、适宜生态需水量和最大生态需水量几个类型。接近生态系统维持其生存的最低水量,从维护生态环境系统功能的角度,遏制其不再继续恶化的最基本的需水阈值,一旦生态环境用水量低于最小生态环境需水量,将导致该生态系统破坏甚至崩溃,类似于农田生态系统

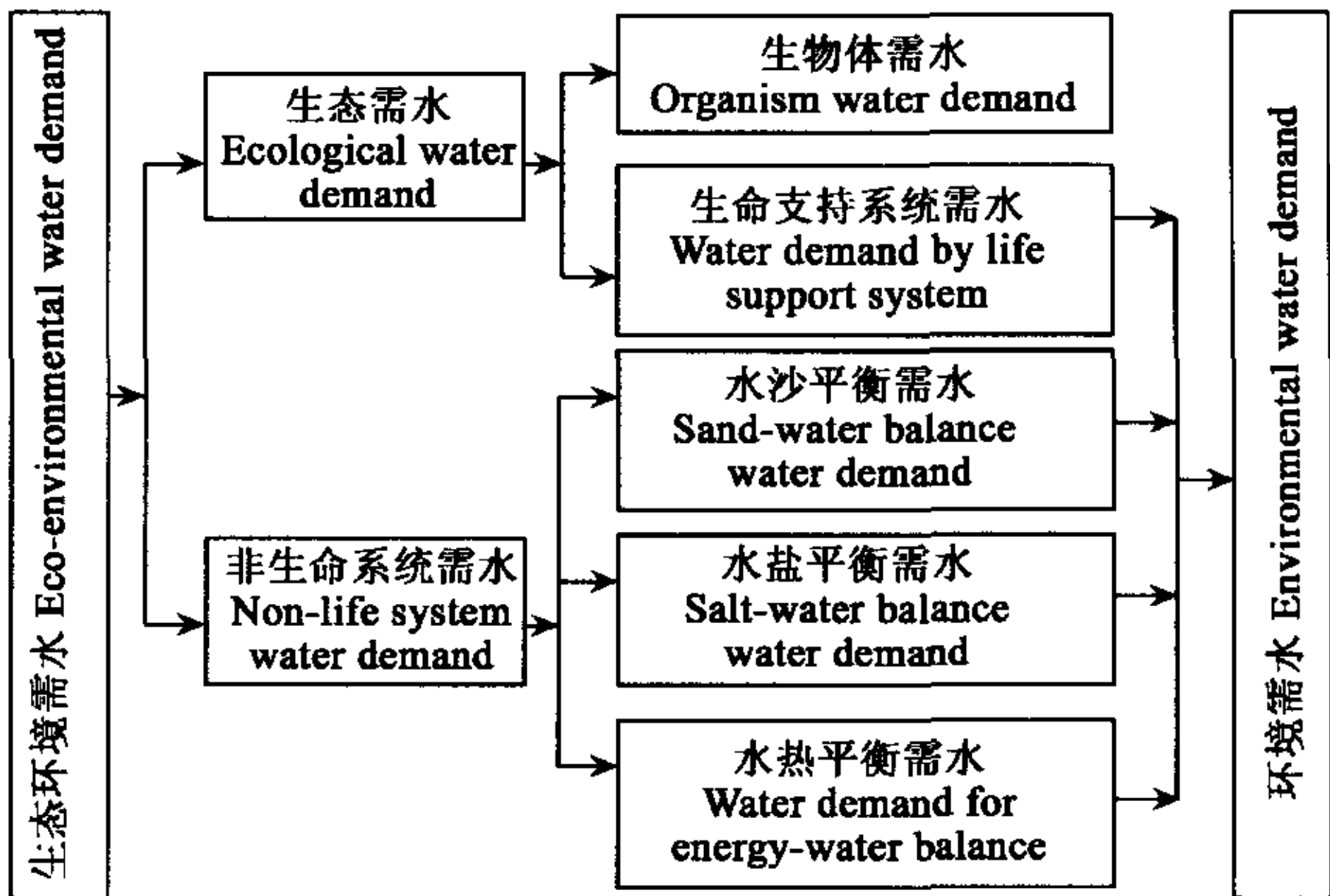


图 1 生态需水及其与生态环境需水、环境需水的区别
Fig.1 Comparison of ecological water demand with ecoenvironmental water demand and environmental water demand

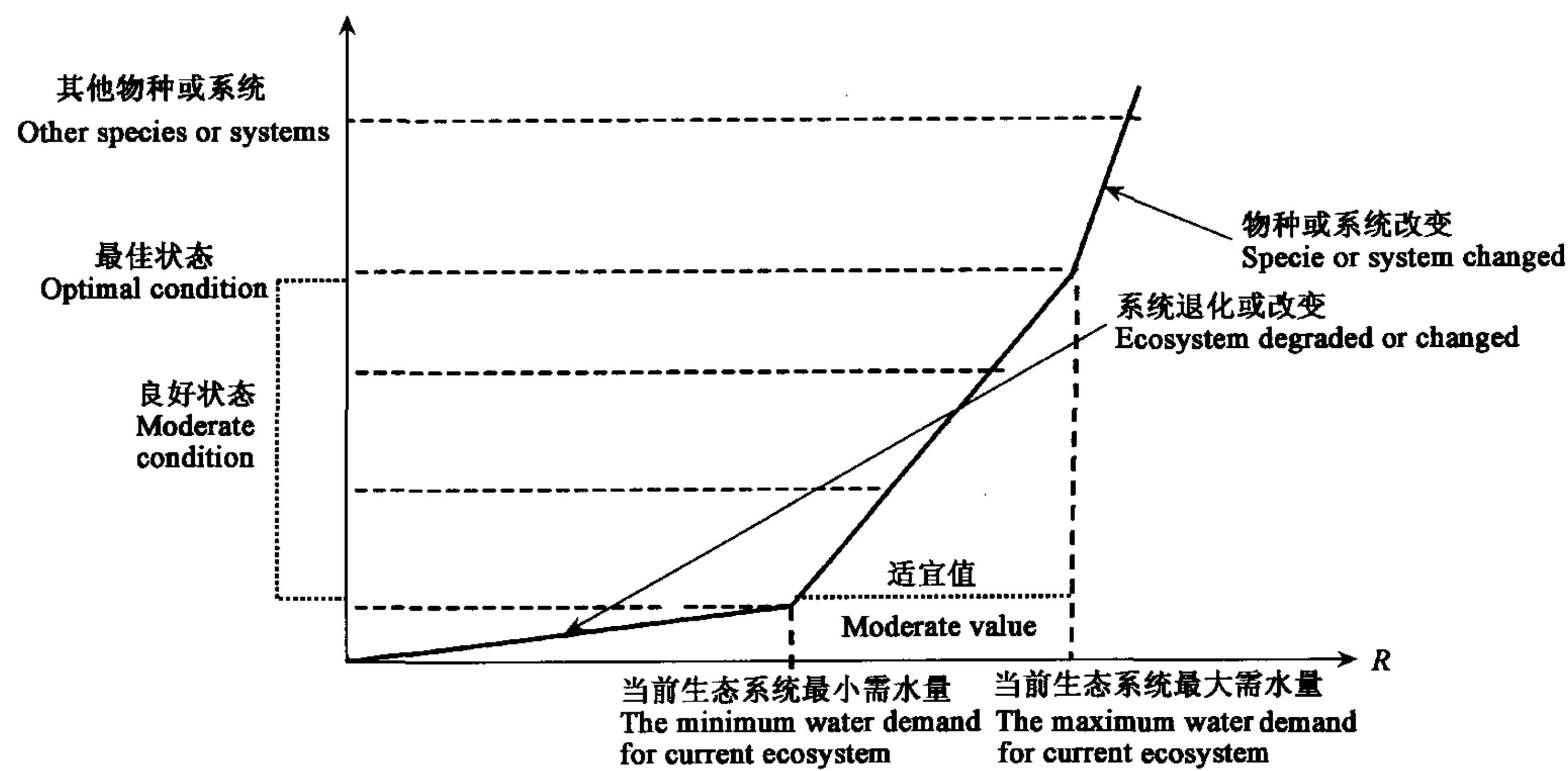


图 2 生态需水量类型的分布及其相互关系(据夏军等^[45]改绘)

Fig. 2 The classification and distribution of and ecological water demands and their mutual relationship (according to Xia J, *et al.*)

的凋萎水量。最大生态系统需水量是以生态系统的水、热条件最佳匹配为标准,在所处环境下的潜在耗水量能够充分得到满足,区域处于最佳质量下的需水量,是一种生态系统在其最佳生态结构和功能下,在所处气候条件下的最大生态用水量,如果供水量超过该水量,在失衡的水热条件下生态系统将发生演替,类似于农田生态系统中的饱和田间持水量。正是由于干旱区植物具有广泛的水分适应性,所以只要水分条件大于最小生态需水量,又不超过最大生态需水量,其间的水量对于某一特定生态系统而言均是适宜的,就是适宜生态需水量。生态系统需水量的 3 种形式及其相互关系可以由图 2 来表示,区域植物的水分耗散能量(净辐射 R_n)换算的水分当量(通过除以蒸发潜热 L)与水分收入(Q)的比值 R 代表了生态系统水分的供给和需求状况,当 R 为 1 或者趋近于 1 时,表示生态系统水分需求能够完全满足,水热条件完全匹配,生态系统处于最佳状态。当 $R \geq 1$ 时,生态系统水分需求大于供给量,处于水分亏损状态,当 R 值持续增大,直至到生态系统需水的最低临界值,系统就处于生存临界阈值;当 $R \leq 1$ 时,水分供给超过需求,水分有盈余,当 R 持续减少,水分盈余过多时,形成新的水热条件不匹配,在新的水热条件下,生态系统将发生演替,如原来的草原生态系统可能形成湿地生态系统。介于某一生态系统需水量的最低临界值和最大值之间的水量供给都是适宜水量。

在干旱内陆流域尺度上,生态需水量的界定还需要考虑生态系统对象自身所处的阶段和研究目的,存在几种情况:一是以现状生态类型、结构与分布为对象的生态需水量评价,生态需水量的评价以现阶段实际存在的生态系统分布与组成状况为对象;二是考虑业已退化生态系统的恢复以及区域生态环境建设的生态需水量评价,这是干旱区进行水资源合理配置和利用规划中需要确定的量,但作为用水主体的生态系统的组成与分布状况是不确定的,随人们所确定的区域退化生态系统恢复程度和生态建设的布局而变化;三是依据流域内生态系统保护区域和生态建设规划方案的生态需水量,随保护对象和规划方案设定的生态系统的不同而变化,服务于流域的水资源中长期开发利用规划。因此生态需水量并不是一个简单的固定水资源需求量,存在不同考虑角度的生态需水量分类,既存在生态系统现状、恢复和保护与建设等不同条件下的生态需水量,而且,就同一条件下的生态适宜需水量也应该是一个区间,而不是固定常量。

3.3 生态需水量的评价方法

3.3.1 河道内生态环境需水量确定方法 目前有关河道内环境维护水量需求(环境流量)的计算方法很多,一般常用的方法有:标准流量设定法、水力学法、栖息地法和整体分析法(BBM 法),各方法的主要原理、分类及其优缺点汇总于表 1。

3.3.2 河道外生态环境需水量确定方法 这是现阶段生态水资源研究的前沿领域,主要集中在河流冲洪积平原或流域盆地生态需水量(用水量)的计算上,这主要源于生态环境保护与建设规划以及区域水资源利用规划与合理配置决策的制定需要。目前关于生态用水量(需水量)的计算方法大致可归纳为以下几类^[16,45,49~52,57]:

(1)水量平衡法 在河流或河道内生态需水量计算中,是利用河道多年平均枯水期径流量与流域生态系统最低用水近似相等或一定区域(洪泛区及湖泊洼地)多年平均蒸散发量与降水量的差值近似看作区域生态系统耗水量,包括水沙平衡、水盐平衡以及河流污染自净所需要的最低水量等;在河道外流域范围、或局部地区,利用区域水资源均衡原理和供需平衡分析方法计算生态系统用水量,该方法是早期生态需水量计算最常用手段,也是区域较大尺度上,当缺乏生态系统本身的有关数据时常采用的方法之一。水量均衡法应该是计算区域生态需水量较为准确可靠的手段,而且原理成熟方法简单,问题是区域内其他水均衡

要素难以准确量化。

(2)基于植被蒸散发特性的经验计算方法 以植被蒸散发特性参数为基础,利用一些经验和半经验方法类计算较小空间尺度植被生态系统需水量,主要有:①定额估算法,类比作物灌溉定额,确定不同区域天然或人工植被单位面积用水量,依据研究区域相应植被的分布面积,估算生态系统需水量;②植被耗水模式法,采用经试验获得的典型植被的水分消耗规律,确定不同植被类型在不同地下水分布区的植被耗水模式,将其推广到整个研究区域,估算生态需水量,广泛用于干旱内陆地区;③潜水蒸发量法,认为天然状态下植被生长消耗的水分是通过浅层地下水和降水来满足的(非河流区),利用潜水蒸发量的经验与半经验估算方法(如阿维里扬诺夫公式)推算植被生态耗水量,是干旱区生态需水量计算较常用的方法之一。

表 1 河道内生态环境需水量计算的主要方法及其优缺点评述^[44,56]

Table 1 The main calculating methods about river channel water demand and their advantages and disadvantages ^[44,56]				
主要方法类 Main methods	方法亚类 Subcategory methods	主要原理 Main principles	方法优点 Advantages	方法缺陷 Disadvantages
水文指标法 HIM method	①Tennant 法 Tennant method	根据月或日的流量历史记录数据获取河流流量推荐值以确定河流环境流量 Conclude the river environmental basic flow according to the recommend values that based on historical report of the monthly or daily flow	最简单,易用;一旦建立了流量和水环境的关系,需要数据较少;一般不需要现场工作 Simple, easy; little data needed once the relationship of the runoff and the water environment founded; seldom field works needed	流量与水生态系统的关系很难准确建立;适用于较高目的研究 It is difficult to set up the accurate relationship of runoff and aquifer ecosystem
	②Texas 法 Texas method			
	③A-M 法 A-M method			
	④水流持续曲线法 Flow continuum curve method			
	⑤可变逼近区间法 Range of variability approach			
水力学法 HRM method	湿周法 Wetted-perimeter method	利用湿周作为栖息地的质量指标来估算期望的河道内流量值 Take the wetted perimeter as the quality index of the habitat to estimate the expected channel runoff	相对简单,数据要求较少 Simple, little data needed	只能产生最小环境基流,属于特定地点依赖方法 Only produce the minimum basic environmental flow belongs to especial location depended methods
整体分析法 Holistic method	分块法 BBM method	将河流生态需水量分为基础流量、底质维持流量和维持生态所需的洪水流量 Divided the channel ecological water demand to basic flow, deposit maintained flow and ecological flood	考虑了月枯水期和丰水期的流量变化;枯水期流量可作为主要环境流量 Monthly flow variation of flood season and dry season was considered; the flow of dry season could be regarded as the main environmental flow	需要评价基础流量、自然年均流量和还原流量;属于特定地点依赖方法 It needs to obtain the basic-flow, annual flow and the recovery flow, location depended methods
栖息地法 Habitat method	①IFIM 法 IFIM method ②CASIMIR 法 CASIMIR method	依据河流实际参数,基于水力学模型,建立河流参数与生物生态参数间的数值模拟模型,确定环境流量 Based on the actual parameters and the principles of the hydraulics model, the channel para-meters and ecological parameters model used to dedicate the environmental flow	可提供各考虑物种和环境要素的水量;可获得指示物种整个生命周期的流量要求;自然流量的建立不依赖还原数据 The water quantity of each considering species and environment factor could be accommodated. The water demand of whole life also could be acquired	相对昂贵且费时,只能用于中小尺度的一个或数个河段,很少用于整个流域甚至次一级流域 Expensive and time costly, it is only adaptable for one or several reaches of middle or mini scale channels

(3)基于遥感与 GIS 技术的区域生态需水量估算法 这是现行的区域生态需水估算的主要方法,主要思路是:依据不同气候带与降水等条件,开展自然生态系统分区,通过不同植被类型的蒸散发计算、估算生态需水或生态耗水总量。该方法的主要问题是:如何对不同植被类型选择适当方法估算其蒸散发量,尤其在区域或较大流域尺度上,植被类型复杂多样,缺乏相应的气象参数的观测数据情况下,准确计算不同类型植被的蒸散发量就遇到很大困难。

(4)基于遥感与 GIS 技术的生物生产力水分利用效率法 不同生态类型分区的生物生产力不同,并具有不同的单位生产力水分利用率,如果通过其他生物的或生态水文学的一些方法获得区域不同生态类型分区的单位生物生产力水分利用效率,就

可以通过 RS 技术获得的生物生产力空间分布参数,计算生态需水量。该方法把不同植被的水分生物生产力作为主要依据,应该说是能够较为准确估算植被蒸散发的有效方法之一,其优点还在于该方法能够依据植被生长不同阶段的水分效率计算不同时期的植被蒸散发量。主要问题就是如何准确确定不同类型植被在不同气候与地理条件下的水分效率函数。

(5)生态阈值诊断法 构建流域生态系统对于水分胁迫的临界指标体系,这些指标能够从不同角度揭示生态系统的水分临界状况,综合起来可定量指示生态系统对水资源需求的最低临界阈值;根据这些可定量的指标体系建立数值模拟模型,预测分析不同气候和水资源供给情境下的生态需水量。

这些方法在计算以现状生态系统分布为基础的生态需水量或现实用水量中,都有一定的应用价值,尤其是当前没有完善的有关生态需水量分析理论的情况下,都反映了不同侧面人们对于评价区域生态需水量的探索结果。现阶段从植被的蒸散发角度估算流域河道外生态系统需水量仍然是主要途径,最有效也被多数人所接受和从事的方法可以分成两类:一是基于不同下垫面的实际陆面蒸散发观测结果,选择现行较好的蒸散发计算方法如 Penman-Monteith、Shuttleworth-Wallace、以及 Priestly-Taylor 方程等计算区域尺度的植被蒸散发量。其中 Penman-Monteith 公式被认为是计算植被蒸散发最稳定和相对最准确的方法,被 FAO 推荐为全球范围内进行有关作物蒸散发计算的方法。二是借助遥感与 GIS 技术的流域和较大区域尺度的植被蒸散发估算,随着遥感与 GIS 技术的发展和普及,把原来在较小范围内取得的观测结果向较大区域尺度推演成为可能,而且可以通过土壤水分遥感数据和植被的区域 NDVI 值进行植被覆盖程度与生物水分效率推算,结合蒸散发计算公式可估算较大区域尺度上的陆面蒸散发量。

4 流域生态水文研究展望

生态水文学的理论与方法对于流域的水文学与水资源、生态学以及可持续发展等学科领域的一系列科学问题提供了最富有前景的研究途径和思路,展望未来,针对全球流域尺度紧迫的水资源与环境问题,流域生态水文学的发展将从生态水文过程和生态水资源相关的几个领域取得突破和需要深入研究。

4.1 生态水文过程领域

(1)基于长期观测网络的生态系统对于水文过程作用的关键参数的获取 在各种空间尺度上,水文循环的准确描述都存在缺乏对生态过程影响的关键环节的定量参数,如降水与地表径流之间、与地下水之间,地下水或土壤水的蒸散发过程等环节,存在许多未知的生态作用因素,这是流域尺度水文过程模拟得以发展的瓶颈,也是全球变化研究中 BACH 计划的核心。利用全球范围内已成功建立的生态观测网络——LTER,系统开展各种生态系统以及生态功能分区中生态要素与水文要素之间的相互作用机理研究,掌握其物理过程和生物过程,获取基于这些过程的水文循环关键环节的生态参数。

(2)全球变化下流域生态过程对水文循环加剧的应对策略 随着全球气候持续变暖,未来 100 a 高温天气、强降水、热带气旋等极端天气气候事件发生的频率会增加,流域尺度降水变异性增强、蒸散发加剧、突发性洪涝和极端干旱事件的频率增加,无疑将导致流域水文循环剧烈变化。在这种水文情势下,流域生态系统的响应机制就是流域保护的关键科学问题,需要掌握全球气候变化下生态系统对水文循环巨变的应对策略,以制定可控制的生态系统可持续对策。

(3)土地利用与覆被变化的水文效应 在全球变化和人类活动共同作用下,土地利用与覆被变化成为最重要的陆地生态系统变化方式,土地利用与覆被变化在较大的时空尺度上深刻改变着地表生态结构。这种变化对流域水文过程的影响是显著的,有许多分布式水文模型已经模拟出不同土地利用与覆被结构对流域水文过程的影响程度,但仍然存在许多问题需要进一步深入探索。在我国,这一问题在黄土高原就具有其重要的现实意义,黄土高原实施退耕还林还草的政策,对于黄河流域的水文情势(包括水沙过程)以及下游水生生态系统具有何种影响,已引起国际社会的普遍关注。

(4)流域生物地球化学过程中的生态水文耦合与水土界面的可持续管理 流域生态过程与水文过程变化在不同程度上对区域生物地球化学过程产生影响,而生物地球化学过程变化反过来对流域淡水生态系统和水文(水化学)过程产生影响,三者在流域尺度上具有密切的相互作用关系。这种关系实质上是流域内最为普遍和重要的水土间物质的传输过程,是伴随水分运移而必然存在的过程。在流域水文过程不可避免的发生剧烈变化的情况下,如何使得流域生态系统结构与功能可持续化,科学合理的管理水土界面的物质循环可能是一条有效途径。

(5)干旱区特殊的生态水文过程研究 干旱区有着长期和丰富的有关干旱植物水分适应机理和水分胁迫响应对策的研究积累,近年来,初步开展了有关地带性植被群落的水分行为和更广泛的中旱生及其他绿洲建群种物种的水分耗散过程研究,并依据干旱内陆流域自然景观分异的区域性特点,对不同植被景观带的陆面水热通量开展了系统观测研究,这些研究积累和研究工作,为进一步开展较大空间尺度的生态系统、生态景观以及区域的生态水分行为奠定了基础。只有在较大空间尺度上获得干旱植物群落以及系统的水分行为和生态水文过程,才能够制定合理的流域生态水资源时空配置制度与决策,科学地引导人为因素,促进干旱区生态系统的良性发展及荒漠绿洲生态的安全维护。这方面涉及生态水文过程的尺度问题和生态水文过程与地质地貌、土壤与气候条件等因素间的相互关系问题。

(6)流域尺度的生态水文过程集成与模拟 现有的 SVAT 模型和其他描述植被水分影响的生态水文模型更注重垂直方向的水热运动规律的模拟,能够模拟空间水文过程的许多分布式水文模型,大都基于对生态系统的简化;同时,基于相对湿润和森林植被开发的模型不能适应于干旱区气候与植被条件。研究开发基于干旱内陆流域封闭水文单元的,能模拟迥然不同景观代生态系统水文作用的生态水文模拟模型,是现阶段干旱区生态水文研究的重要任务。

4.2 生态水资源领域

(1)更加适用的生态需水量评价体系的建立 以干旱区典型植物(以旱生灌木为主)为对象进行的个体或群丛水分耗散机理观测实验结果,分析干旱区生态需水量,不仅存在尺度以及空间异质性的问题,而且也不能代表实际存在的各种生态系统对水资源的不同需求特性;区域水均衡法将区域水资源消耗项中扣除水域蒸散、境外排泄和人类利用等量的剩余部分全部归结为生态消耗量,由于存在区域水资源消耗项准确定量的困难以及很多情况下无法明确区别其他水消耗项与生态系统水资源消耗,该方法存在明显缺陷。基于遥感数据分析较大区域生态系统的水分需求是目前最为活跃的生态需水量研究途径,然而准确判定生态系统需水量评价对象上和生态水文要素诸多参数获取的困难限制了其有效应用。由蒸发散计算生态需水量是普遍的方法之一,但下垫面因素、水文参数等空间的变异性和不均匀性,使得由蒸散发计算的生态需水在向大尺度的转换过程中产生了很大的误差,始终影响着计算结果的准确性。现阶段迫切需要研究适合于干旱区生态系统和水文过程的生态需水量评价方法。只有以水文过程为基础,结合生态系统的水资源需求规律,才能较为合理地计算生态需水量,也就说建立在具体特定区域的生态水文过程特征基础上研究生态需水量是干旱区生态需水量评价的必由之路。

(2)面向生态环境的流域水资源评价与开发利用模式的研究 现行的水资源评价体系是基于传统水文过程科学,没有考虑生态过程对水文过程的影响以及水资源消耗机理。正是由于长期依赖基于这种方法获得水资源量进行开发利用,使得区域生态用水长期被挤占和掠夺,出现了流域生态环境问题伴随流域开发的开始而发生,随着开发程度深入而加剧的局面。干旱区流域水资源合理利用规划与配置、生态环境保护方案的制定与实施以及流域经济与社会发展规划等,都需要一个面向生态环境和基于可持续发展理论的能够准确评价水资源状况与利用潜力、给出水资源合理开发利用模式的水资源理论体系,这种体系将水文过程与生态过程密切结合,基于系统的区域生态水文特征,能客观体现水资源系统的人类与自然的和谐发展。

References:

- [1] Covich A. Water and ecosystems. In: P. H. Gleick, ed. *Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources*. Oxford University Press, New York, New York, USA., 1993. 40~55.
- [2] Liu C M. Analysis of balance about water supply and demand in the 21st century of China: Ecological water resource studying. *China Water Resources*, 1999, (10): 18~20.
- [3] Zalewski M, et al. Ecohydrology-A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources, International Hydrological Programme. IHP-V, No. 7. 1997.
- [4] Xia J, Sun X T. The progress and prospect of water cycle study in western China. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(18): 58~67.
- [5] Ward J V and J A Stanford. *The ecology of regulated streams*. New York, USA: Plenum Press, 1979.
- [6] Bovee K D. Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology, Instream Flow Information Paper No. 21, US Fish and Wild life Service. Biological Report 86(7), Washington, D. C. , 1986.
- [7] Petts G E. water allocation to protect river ecosystems. *Regulated Rivers: Res. Management*, 1996, 12: 353~365.
- [8] UNESCO. *Ecohydrology-advanced study course*, IHP-V, theme 2, Paris, 2000.
- [9] Wassen W J, Grootjans A P. Ecohydrology: an interdisciplinary approach for wetland management and restoration. *Vegetation*, 1996, 126: 1~4.
- [10] Baird A J. & Wilby, R L, eds. *Eco-hydrology. Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments*. Routledge, London, UK. , 1999.
- [11] Fred S, Carlos C M, Amy G, et al. *Everglades Consolidated Report: Ecological effects of hydrology*. 2004.
- [12] Garth W. Redfield. Ecological research for aquatic science and environmental restoration in south Florida. *Ecological Applications*; 2000, 10(4): 990~1005.
- [13] LTER Network. Ecological Hydrology—Intersite comparison of long-term streamflow records from forested basins in Oregon, New Hampshire, North Carolina, and Puerto Rico. In: <http://lternet.edu/documents/Newsletters>.
- [14] Post DA, GE Grant and JA Jones. New developments in ecological hydrology expand research opportunities. *EOS*, 1998, 79(43): 517, 526.
- [15] Jos Von Asmuth and Kees Mass. The method of IRM: a new method of groundwater and eco-hydrological modeling. *IAHS publ*, 2001, 269: 51~58.

- [16] Environment Canada. Water use and supply project: The sources, use and future demand of Great Lakes water at a sub-basin level and the potential implications of climate change. In: <http://www.on.ec.gc.ca>.
- [17] Robert B Jackson, Stephen R Carpenter, Clifford N Dahm, *et al.* *Ecological Applications*, 2001, **11**(4): 1027~1045.
- [18] Catherine M Pringle, Guest Editor, and Mary Barber. The Land-Water Interface: Science for a Sustainable Biosphere. *Ecological Applications*, 2000, **10** (4): 939~940.
- [19] Liu S R. *Hydrology Ecological function law of forest ecosystem in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996. 107~203.
- [20] Hornbeck J W, Adams M B, Corbett E S, *et al.* Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern United States. *J. Hydrology.*, 1993, **150** :323~344.
- [21] Likens G E, Bormann F H, *et al.* *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. New York, Springer-verlag, 1996. 1~54.
- [22] UNESCO. *Ecohydrology processes in small basins*. IHP-V, theme 2, Paris. 1997.
- [23] Verburg K, Ross P J and Bristow K L. SWIMv2.1 user manual, Divisional Report of the CSIRO Division of Soils No. 130, 1996.
- [24] Feyen L, Vázquez R, Christiaens K, *et al.* Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2000, **4** (1): 47~63.
- [25] Beven K J. *Distributed hydrological modeling*. John Wiley & Sons, New York, 1997. 348.
- [26] Von Asmuth J R, Grootjans A P, Lammerts E J, *et al.* 'Eco-hydrological modeling using response characteristics of hydrological systems'. Proceedings ICWRER Conference, Dresden, 2002.
- [27] Palmer M A, Covich A P, Lake S, *et al.* Linkages between aquatic sediment biota and life above sediments as potential drivers of biodiversity and ecological processes. *Bio. Science*, 2000, **50** : 1062~1075.
- [28] Bernt Matheussen, Robin L Kirschbaum, Iris A Goodman, *et al.* Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada). *Hydrological Processes*, 2000, **14** (5): 867~885.
- [29] IGBP. IGBP report 43, 1996. 7~30.
- [30] UNESCO. *Ecohydrology processes in small basins*. IHP-V, theme 2, Paris, 1997.
- [31] UNESCO. Ecohydrology—a new paradigm for the sustainable use of aquatic resources, IHP-V, theme 2, Paris, 1997.
- [32] UNESCO. Ecohydrology-hydrological and geochemical processes in large river basins, IHP-V, theme 2, Paris, 2001.
- [33] Xia J, Sun X T, Feng H L, *et al.* The challenge of the research about ecological water demand in West China faces. *China Water Resources*, 2003, (5): 57~60.
- [34] Hu Y J, Gao Y X, Wang J M, *et al.* Some research results of the test (HEIFEI) in Heihe River. *Plateau Meteorology*, 1994, **13** (3): 225~236.
- [35] Tao Z H, Zuo H C, Hu Y J. The database of Heihe River Test. *Plateau Meteorology*, 1994, **13** (3): 369~376.
- [36] Song K C, Kang E S, Lan Y C, *et al.* Synchronous measurement of land surface processes in typical vegetation landscape zones in the Heihe River basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, (5): 552~557.
- [37] Chen Y N, Li H W, Xu H L, *et al.* The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58** (4): 542~549.
- [38] Raskin P, Hansen E and Margolis R. Water and sustainability: A global outlook. Polestar Series Report Number 4, Stockholm Environment Institute. Boston, Massachusetts, USA. , 1995.
- [39] Gleick P, Loh P, Gomez S, *et al.* California water 2020: a sustainable vision. Pacific Institute Report, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. Oakland, California, USA, 1995.
- [40] Lundqvist J, and Gleick P H. Sustaining our waters into the 21st century. Report to the Comprehensive Global Freshwater Assessment of the United Nations. Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden, 1996.
- [41] Cai Q H, Tang T and Liu J K. Several research hotspots in river ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14** (9): 1573~1577.
- [42] Gleick P H. Minimum water requirements for human activities; meeting basic needs. *Water International*, 1996, **21** : 83~92.
- [43] Jill S Baron, LeRoy Poff N, Paul L. Angermeier, Clifford N. Dahm, Peter H. Gleick, Nelson G. Hairston, Robert B. Jackson, Carol A. Johnston, Brian D. Richter, and Alan D. Steinmanj. Meeting ecological and societal needs for freshwater. *Ecological Applications*, 2002, **12** (5): 1247~1260.
- [44] DFID. Handbook for the assessment of catchment water demand and use. HR Wallingford, Wallingford, UK, 2003, 248.
- [45] Xia J, Zheng D Y, Liu Q E. Study on evaluation of eco-water demand in northwest China. *Hydrology*, 2002, **5** (22): 12~17.
- [46] Shi Y F, Qu Y G, *et al.* *Reasonable utilization and the carrying capacity of water resources in Urumqi River basin*. Beijing: Science Press, 1992.

- [47] Xu X Y, Wang H, Gan H, *et al.* Theories and methods for the macroeconomic water resource management of North China. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1997.
- [48] Li L J, Zheng H. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe basins. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55** (4): 495~500.
- [49] Wang F, Wang H, Chen M J, *et al.* A study of ecological water requirements in Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17** (2): 129~137.
- [50] Wang X Q, Liu C M, Yang Z F, *et al.* Method of resolving lowest environmental water demands in river course. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21** (5): 544~547.
- [51] Wang GX, Cheng G D. Water demand of eco-system and estimate method in arid inland river basins-Take Heihe River basin as an example. *Journal of Desert Research*, 2002, **22** (2): 129~134.
- [52] Jia B Q, Zhang Z Q, Zhang H Q, *et al.* On the current research status, problems and future framework of ecological and environmental water use. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22** (10): 1734~1740.
- [53] Brian D Richter, Ruth Mathews, David L. Harrison, and Robert Wigington. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity. *Ecological Applications*, 2003, **13** (1): 206~224.
- [54] Xia J, Tan G. Hydrological science towards global change: progress and challenge. *Resources Science*, 2002, **24** (3): 1~7.
- [55] John Wainwright, Mark Mulligan and John Thornes. Plants and water in drylands, in: A. J. Baird and R. L. Wilby, *Eco-hydrology*. London, Routledge, 1999. 78~123.
- [56] Tennant D L. 'Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources', in Orsborn, J F, and Allman, C H (eds), *Proceedings of Symposium and Specility Conference on Flow Needs II*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 1976. 359~373.
- [57] Vorosmarty C J, Federer C A and Schloss A L. Potential evaporation functions compared on US watersheds: possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *Journal of Hydrology*, 1998, **207** : 147~169.

参考文献:

- [2] 刘昌明. 中国 21 世纪水供需平衡分析:生态水利研究. 中国水利, 1999, (10): 18~20.
- [4] 夏军, 孙雪涛. 中国西部流域水循环研究进展与展望. 地球科学进展, 2003, **18** (18): 58~67.
- [19] 刘世荣. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996. 107~203.
- [33] 夏军, 孙雪涛, 丰华丽, 等. 西部地区生态需水问题研究面临的挑战. 中国水利, 2003, (5): 57~60.
- [34] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河试验(HEIFEI)的一些研究成果. 高原气象, 1994, **13** (3): 225~236.
- [35] 陶泽宏, 左宏超, 胡隐樵. 黑河试验数据库. 高原气象, 1994, **13** (3): 369~376.
- [36] 宋克超, 康尔泗, 蓝永超, 等. 黑河流域典型景观植被带陆面过程同步观测研究. 冰川冻土, 2003, (5): 552~557.
- [37] 陈亚宁, 李红卫, 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.
- [41] 蔡庆华, 唐涛, 刘健康. 河流生态学研究中的几个热点问题. 应用生态学报, 2003, **14** (9): 1573~1577.
- [45] 夏军, 郑冬燕, 刘青娥. 西北地区生态环境需水估算的几个问题研讨. 水文, 2002, **5** (22): 12~17.
- [46] 施雅风, 曲耀光, 等著. 乌鲁木齐河流域地区水资源合理利用与承载力. 北京: 科学出版社, 1992.
- [47] 许新宜, 王浩, 甘泓, 等编著. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [48] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. 地理学报, 2000, **55** (4): 495~500.
- [49] 王芳, 王浩, 陈敏建, 等. 中国西北地区生态需水研究. 自然资源学报, 2002, **17** (2): 129~137.
- [50] 王西琴, 杨志峰, 刘昌明. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究. 环境科学学报, 2001, **21** (5): 544~547.
- [51] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算-以黑河流域为例. 中国沙漠, 2002, **22** (2): 129~134.
- [52] 贾保全, 张志强, 张红旗, 等. 生态环境用水研究现状、问题分析与基本框架探索. 生态学报, 2002, **22** (10): 1734~1740.
- [54] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战. 资源科学, 2002, **24** (3): 1~7.