

西北干旱区水循环与水资源问题

张强¹, 赵映东⁴, 张存杰², 李耀辉¹, 孙国武¹, 高前兆³

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州区域气候中心, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 4. 甘肃省水文水资源勘测局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 从现实条件和可持续发展的角度初步归纳了全国水资源短缺的空间格局, 评述了西北干旱区水资源的现状和趋势, 简要分析了西北干旱区水循环和水资源利用的特点和规律, 概括了西北干旱区水循环和水资源高效利用研究的进展和动态, 初步探讨了西北干旱区水资源高效率利用的科学对策。最后, 提出了西北干旱区水循环和水资源高效利用研究方面的某些重要科学问题。

关键词: 西北干旱区; 水循环; 水资源利用; 研究进展; 科学问题

中图分类号: P461⁺. 8

文献标识码: A

引言

水分是宇宙生命基础, 也是气候系统中最活跃的因子, 它以不同相态和形式存在于自然界之中, 并参与气候系统中各个圈层的物理、生物、甚至化学过程, 它是气候系统各圈层物质和能量传递的重要载体之一。水分对全球变化的响应也十分敏感, 它在任何一个环节的异常表现都有可能牵动气候系统的其它环节甚至与全局密切联动^[1]。

气候系统的水分运动或输送总是表现为不同尺度的循环过程, 以此支配地球表面丰富多彩的自然活动和千姿百态的生命过程, 进而影响着整个地球环境演化和生命进化的过程。水分循环过程的特征和变化规律与自然因素和人类活动均密切相关。随着自然要素的变化和人类行为的改变, 地球上不同尺度水分循环的特征和规律均发生着比较明显的变异, 这又会反过来在不同尺度上对地球环境和人类生活产生比较深刻的影响。

水分既是生命体的重要组成部分, 也是人类生命体赖以维持的重要条件之一, 因此水资源对人类来说是首要的自然资源。不仅如此, 人类对水资源条件的适应性也相当脆弱, 人类事实上只能生存在相当局限的水分条件范围。只是在地球演化的历史长河中出现了比较短暂的水分和温度适宜时段, 才

诞生出了地球生命, 进化出人类, 并逐步形成人类文明。实际上, 水分多寡的环境条件都会给人类带来灾难性的影响。在人类社会发史中, 自然界水分条件与人类需求总是在不同空间和时间尺度上表现出明显的矛盾和冲突。它的兴衰大多与气候影响下的水资源条件变化密切相关。所以, 人类社会的发展史实际上也是一部改造水分环境和水资源条件的历史, 无论是古代的大禹治水, 还是今天的南水北调, 人类社会一直在为改善水资源条件而不懈奋斗。

全球水资源分布基本上决定了地球文明和社会发展的时空格局。在全球来看, 干旱的非洲大陆、中东和中亚地区始终处于贫穷而萧条的状态; 而雨水丰沛的欧美大陆则经济发达, 发展迅速。就我国而言, 干旱缺水的西北地区经济落后, 文化不发达; 而水量丰富的东南沿海地区则经济繁荣, 文化昌盛。如今, 随着全球人口的迅速增加, 水资源短缺已经不再只是区域性问題, 而已经上升为全球性问題, 它与能源问题一起已成为当今人类社会可持续发展的重大挑战, 也日益成为牵涉国家外交和国际战略的重大问题^[2-3]。

我国西北与中亚相连的内陆干旱区位于欧亚大陆腹地, 是全球最大的一块内陆干旱区, 处于这块内陆干旱区的中国西北干旱区是我国最主要的水资源

收稿日期: 2008 - 04 - 24; 改回日期: 2008 - 04 - 28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40575006) 资助

作者简介: 张强 (1965 -), 男, 甘肃靖远人, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气边界层、陆面过程、干旱气候与环境等领域的研究。

短缺地区。而且,该地区高原和大型山脉分布广泛,是我国主要外流河和内陆河发源地,水分循环过程十分特殊,也十分重要^[4]。在人口增长和经济发展及气候变化的多重压力下,该地区已经出现严重的水资源和生态环境安全隐患,甚至已经对全国沿长江和黄河流域的水资源形势提出严峻挑战。同时,全球气候变化和人类活动也对该地区水循环规律产生着明显的影响。纵观全球,世界上还没有那个地区的水循环特征与我国西北干旱区比较类似,也没有那个地区的水资源开发能为西北干旱区提供比较成熟的经验。为此需要全面综合分析西北干旱区的水循环规律和水资源特征,探讨针对该地区水循环特点来应对水资源短缺的方法和措施,为我国西北地区社会 and 经济发展提供切实可行的科学对策。

1 中国水资源短缺特点

我国总体上是一个水资源短缺的国家,并且水资源分布和变化复杂多样^[5]。全国大致可分为3种典型水资源短缺类型:第1种类型是由于常年降水稀少引起的水资源短缺,称其为干旱气候型水资源短缺。这种类型的水资源短缺从根本上决定了整个区域的社会基础和生存环境,该种类型地区一般生态环境较差,生活条件落后,发展基础薄弱。我国西北干旱区和内蒙古一带就是干旱气候型水资源短缺的代表性地区。第2种类型是由于区域人口承载量过大引起的水资源供需失衡,称其为社会发展型水资源短缺。这种类型的水资源短缺地区一般生态环境不错,发展程度比较高,社会基础也比较好,但进一步发展受到了水资源短缺的明显制约。我国华北的京、津、唐地区就是社会发展型水资源短缺的代表性地区。第3种类型是由于气候变化引起自然降水波动,使得长期形成的依赖充沛水资源条件的生产和生活方式在降水减少时段受到了一定程度的限制,称其为社会依赖型水资源短缺。这种类型的水资源短缺地区大多社会基础良好,经济发达,发展程度高,由于阶段性缺水而影响了社会经济的稳定发展,并造成一定程度经济损失。我国东南沿海和中原大部分地区正是社会依赖型水资源短缺的代表性地区。

2 西北地区水循环特点和水资源现状

在我国西北地区,虽然总体上以干旱气候背景

为主,但由于其范围广阔,高原和高山众多,所以该地区不仅是长江和黄河等主要外流河的源区和主要产流区,而且还广泛分布着内陆河水系。所以,它既有独特的内陆水循环过程,又是全球水循环的重要组成部分^[6-8]。长期以来,该地区水资源依靠自然界独特的水分循环过程基本保持着脆弱的平衡关系。

与其它区域相比,西北地区水循环和水资源特征比较突出^[9-10],主要表现为:水资源形成区与消耗利用区相互分离(水资源形成在高原或高山地区,而消耗在平原、绿洲和荒漠地区),水资源的时空分布显著不均匀,地表水与地下水相互转换十分频繁,水资源受全球变暖影响比较敏感,水资源以冰川、积雪、地下水、湖泊及地表径流等多种形式共存。

西北地区高原和山区降水及冰川和积雪消融汇流而形成的河川径流大部分由长江和黄河等主要外流河向东输送,经过沿途引灌和提灌及蒸发消耗一部分外,剩余部分最后汇入大海^[11]。另一部分通过内陆河流输送在广阔的山前平原下渗转化为土壤水和地下水及通过蒸发蒸腾进入大气。在内陆河流域的山前平原,水资源进行频繁多次的地表水、土壤水、地下水之间相互转化,各种水资源分量之间的关系错综复杂。

目前,人类活动正在一定程度上逐渐无意识地破坏着西北地区水循环的系统性和有机性,并在某种程度上已经打破了自然界水资源原有的脆弱平衡:如江河中上游大量拦水或引水,使下游出现断流;过量开采地下水,造成许多区域地下水漏斗。甘肃省武威市漏斗区面积扩大到 10 km^2 以上,漏斗中心水位深达 75 m ;甘肃省永昌县漏斗区面积扩大到 150 km^2 以上,中心水位埋深达 57 m 。这些漏斗区水位埋深已经远远超出了农作物和自然植被根系所能分布的深度。这种上游大量拦水或引水及地下水的过量开采都是对水循环过程的人为改变。大量拦水或引水加大了蒸发消耗分量,减弱了下游的径流分量,改变了水资源分布的格局及参与全球水循环的程度。地下水的开采是机械强迫的水分输送方式,减弱甚至中断了通过植物根系和土壤抽吸的自然输送过程,改变了地下水的输送方式和循环速度,影响了地下水对生态过程的参与程度和地下水的动态平衡特征^[12]。

就水资源现状而言,西北地区是我国水资源短缺最严重的地区之一,水资源在西北地区生态安全

和社会经济发展中具有至关重要的作用^[13]。最近的统计表明^[14],西北地区可利用的总水资源量约为 1 364 亿 m^3 ,人均水资源占有量约为 1 573 m^3 ;每年总用水量 811 亿 m^3 ,人均用水量 940 m^3 。西北地区平均引水率高达 60% 以上,远远超过国际上引水率低于 50% 的参考警戒值。尤其是一些内陆河流域引水率极端偏高,如新疆乌鲁木齐河流域和甘肃河西石羊河流域引水率高达 160% 以上,引水量大大超过了水资源总量,严重破坏了水资源的自然平衡,导致湖泊萎缩和地下水位快速下降^[15]。由于水资源紧缺,不仅限制了西北地区的社会经济发展,而且面临土地退化和自然灾害增加的严峻趋势。近 50 a 来,西北地区沙漠化土地面积达 674.93 $\times 10^4$ hm^2 ;天然森林面积减少 49% ~ 58%,草地面积减少 16% ~ 92%;干旱、沙尘暴等灾害发生频数增加,灾害程度加剧^[16]。如果这种情况得不到有效遏制,将会导致内陆河下游绿洲全面消失、高原和荒漠湖泊干涸、高山冰川和积雪消亡等生态环境灾难。

随着人口增长和经济发展对水资源需求的进一步增加,以及全球变暖对水循环过程和生态需水规律的改变,西北地区水资源危机将会更加突出,影响也更加深刻。据初步估计,西北地区 2030 年以前经济社会发展对水资源的需求量每年还将比现用水量新增 80 亿 m^3 。西北地区许多流域水资源供需矛盾将会更加突出,水资源的合理调配和开发及高效利用无疑会成为该地区社会、经济发展中亟需解决的重大科学问题之一。

3 水循环与水资源利用研究进展

3.1 国际水循环和水资源研究动态

早在 20 世纪 50 年代国际上就已经提出了全球宏观水文循环的初步物理图像,但由于缺少必要的观测资料,尚不能给出全球水文循环比较定量的结果。直到 20 世纪 70 年代,随着世界天气监测网的建立和新的观测手段的使用,资料情况才有了明显改进,水文和气象学家开始尝试对全球水文循环进行定量估算。但 80 年代前,国际上对气候系统的物理过程研究仍然主要以能量循环为核心,对水文的研究则主要集中在对水资源现状调查方面,而并没有十分关注水分循环和水分平衡的物理特征及水资源的演化规律。所以这期间并没有得出对全球水文循环比较清晰的认识,对区域或流域水分循环的了解就更加十分有限。

从 20 世纪 80 年代开始,由于人口快速增长,全球范围的水资源紧缺问题及其引起的生态环境退化问题日益突显,许多国际研究机构开始从以研究大气环流为主的能量循环问题转向了以解决社会可持续发展和生态环境问题为主的水资源和水分循环问题^[17]。在这种形势下,水分循环在气候模拟中也越来越被重视。近 20 多 a 来,水文循环的研究主要经历了 2 个阶段^[18-24]:第 1 阶段的研究与水资源的评价值工作紧密相关。对全球及某些区域水资源储量、水资源的再生能力有了比较客观的认识。这一阶段可以称为水循环要素的定量分析阶段,主要是利用观测资料进行统计分析,通过定量计算水文循环过程的各要素值,分析全球及某些区域水文循环的时间、空间分布特征,探讨全球或典型区域水文循环各要素变化规律。第 2 阶段的研究与气候变化紧密相关,可称为气候变化对水资源的影响研究阶段。其研究主要集中于 2 个方面,一是气候变化对水文循环和水资源的影响;二是水文循环对气候变化的敏感性。通过这一阶段的研究,对内陆区域和全球水循环对全球气候变化的响应有了初步认识。

特别是进入 20 世纪 90 年代以来,国际上组织实施了一系列较大规模的水科学研究计划,如国际水文计划 (IHP)、世界气候研究计划 (WCRP)、国际地圈生物圈计划 (IGBP)^[25]及水文循环中的生物圈研究计划 (BAHC)^[26]等等。这些研究计划的目标之一是要从全球、区域、流域和局地等不同尺度及大气、水文和生态等多学科交叉的角度,探讨全球变化下的水循环特征以及与之相联系的水资源变化规律。

到 20 世纪末,气候变化和人类活动对水资源的影响已成为全球变化研究中的重大问题之一^[27-30]。气候未来变化对淡水供应及其可靠性的影响、现有或拟修建的大型水利工程对水循环过程的调整和水资源格局的改变等问题都受到国际社会的极大关注。这使得全球变化与人类活动双重影响下的水文循环与水资源的脆弱性研究也成为热点问题。比较突出的科学问题包括:水文循环对生物圈的影响,气候变化和人类活动影响下的水资源演变规律,水与土地利用、覆被变化和社会经济发展之间的相互作用等。

2001 年 7 月在荷兰举办了 2 个与水科学有关的大型国际会议^[31],一个是由 IGBP、WCRP 和 IHP 等国际大计划联合举办的“全球变化科学大

会”,另一个是第六届国际水文科学大会。这 2 次重要会议提出了“一个干旱地球新的水文学问题”,并且把环境变化与水文循环之间的关系及人类活动对水循环和水资源演变的影响问题摆到了十分突出的位置。2001年初,我国国家水利部、海洋局、气象局和环保总局等 4 个部委也在国家科技部的支持下联合开展了“中国水资源安全保障系统的关键技术研究”。在 2002 年 7 月召开的以“全球变化与中国水循环前沿科学问题”为主题的香山科学会议第 187 次学术讨论会上也把水循环列为目前几个关键科学问题之一^[32]。总之,从发展趋势看,全球变化背景下的水循环规律和水资源演化趋势研究是当今国际水科学研究的前沿问题,也是人类活动和社会经济发展为国际科学界提出的一个现实科学问题。

3.2 西北地区水循环和水资源研究现状

国内从 20 世纪 60 年代就已经开始了对全国水资源的初步调研工作。西北地区是我国主要干旱地区之一,水资源问题是社会发展的最大限制因素,所以对西北地区水循环和水资源研究在国内起步相对比较早。但最初的研究主要集中在对冰川、积雪和江河流域等水资源的普查和分析方面,比较系统的科学分析和研究工作则起步相对比较迟^[33]。最近 20 a 来对水文循环和水资源的关注程度逐步增加,并且该领域的研究也取得了较大进展^[34-36],已经初步形成了对西北地区水循环和水资源及其与全球变化关系的部分认识,使我们可以大致了解在全球变化背景下西北地区水资源演化和水循环过程的初步特征。

尤其,在 20 世纪末和“十五”期间我国科学家围绕西北“水”问题开展了不少相关重要工作^[37-44]。譬如,已经完成的“河西内陆河地区水资源的合理利用研究”、“乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用”、“黑河流域水资源合理利用问题研究”和“塔里木河流域水资源与生态问题研究”等一些解决现实问题的应用性研究项目以及国家自然科学基金项目“西北干旱区内陆河流域水资源形成与变化”和 973 项目“黄河流域水资源转化规律与可再生性维持机理”等一些基础性研究项目。这些项目都从不同角度对西北地区水循环和水资源利用问题做过一些探索,也在一定程度上涉及到一些主要流域各水资源分量的转化规律,并初步建立了关于西北地区水循环的大致物理框架。

另外,在西北地区水资源开发利用方面也做了

大量卓有成效的研究工作。在对区域水资源变化规律和变化特点、水资源与生态系统演化关系的认识不断深入的基础上,已经相继开展了以水资源开发利用模式、水资源优化配置、水资源合理利用与生态环境保护为主题的研究工作,在流域或区域水资源优化配置、水资源决策管理、水资源承载能力评估等方面取得了一些很有价值的成果。

20 世纪 90 年代以来,生态需水研究也越来越受到重视,已经成为水资源和生态水文学研究的热点科学问题,特别是生态系统需水量成为全球关注的焦点之一。目前,生态需水研究主要涉及到了生态需水计算方法、生态需水量的时空异质性分布格局、农田系统生态需水量可塑性对区域内生态需水量的反作用、区域内水资源合理配制的机制等方面的问题。

最近,刘昌明和刘春葵等^[45-47]还对水资源系统的脆弱性进行了研究。他们认为:西北地区的水资源对气候变化和人类活动更为敏感,其水资源系统对由于气候变化所产生的不利影响的调节适应能力更差、更脆弱。由于人类的工程措施和非工程措施的不利影响,从而形成了人类活动驱动下水—生态—经济的时空紧密耦合的水资源脆弱性机制,导致西北地区水资源及生态环境问题更加突出。

同时,气象学者们还开展一些针对西北地区区域特点的空中云水资源开发利用方面的研究工作^[48]。特别在分析影响空中云水资源的天气形势和环流背景的基础上,探索了开发利用空中云水资源的技术途径,提出了一些适合西北干旱半干旱区特点的开发利用空中云水资源的一些初步思路。同时,围绕祁连山和天山等内陆大型山脉空中云水和降水时空分布规律及其转化关系也开展初步研究,并对内陆河源头山区水资源的演化规律及空中水资源的开发潜力提出了一些新认识^[49]。

21 世纪以来,中国科学家对西北干旱区“水科学”问题的关注程度进一步增强,中国工程院 2001~2002 年期间的重大科学咨询项目“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”对西北地区“水”问题开展了跨学科、跨部门的综合性战略研究。该项目研究表明^[50]:为了保证西北地区社会经济可持续发展,必须确立人与自然和谐共存的发展方针,必须以水资源可持续利用来支持经济与社会的可持续发展。另外,刚刚完成的中国科学院院士重大咨询项目“西北干旱区生态环境建设与

可持续发展咨询报告》中提出了西北干旱区—青藏高原—黄土高原耦合系统的概念,加深了对西北干旱半干旱区水资源整体性认识。

3.3 问题和局限

目前,关于西北地区水循环和水资源研究虽然已经取得了不少进展,但很明显还有许多问题和局限^[50]。首先,西北地区水资源和水循环研究与气候变化大背景结合得还不够紧密。其次,并没有充分把西北干旱区水资源研究放到西风带和季风的环流耦合系统中来考虑,限制了对水资源动态变化机理的深入分析。第三,对西北地区水分宏观循环过程关注较多,而对水资源分量之间的转化关系及陆面和生态水分的微循环过程的研究则相对缺乏。第四,对西北地区水资源和水循环研究落后于气候系统其它圈层的研究,更落后于该区经济社会发展的需要,制约了对水资源问题的深刻认识。第五,有关水资源和水循环的研究成果总体上还比较分散,难以对一些具体问题形成比较完整认识。

4 主要科学问题

4.1 水循环过程及其变化机理

目前,对西北地区水循环的研究大多集中在对水循环特征和状态的研究方面,而对其过程和循环机制的研究则显得不足。其次,对水分某一状态或某一阶段的变化研究的比较多,但把区域水分作为一个完整循环系统来研究的则比较少。并且,对水循环的静态特征的研究相对比较充分一些,而对全球气候变化背景下水循环特征的动态变化规律则较少涉及^[46]。对西北干旱区水分循环的总体规律和动态特征认识十分有限,我们仍不清楚驾驭水分循环规律的完整物理机制,也不了解全球气候变化对西北地区水循环到底意味着什么?所以,水循环物理机制及其对全球气候变化的响应研究无疑是今后西北地区水循环研究的重点目标。

4.2 水资源各分量之间的转化关系

在西北地区,对于开展以流域为单元的各种水资源量的转化研究比较少,水资源评价主要以河川径流为主,降水资源仅作参考或背景量,对典型内陆河流域内从降水到冰川水、地表水、土壤水、地下水的转化机理和定量规律研究仍是西北地区水循环研究的一个薄弱环节。所以,对水资源各分量之间的转化关系的研究已经成为深入认识水资源演化趋势和水循环特征的突破点,重点是要开展典型区域或

流域的大气降水、地表水、土壤水、地下水和植物水等转化关系研究,并依据水量平衡建立科学可靠的水资源转化模型和水循环模式,揭示流域或区域内各种水资源分量转化的规律和内在机理,定量评估水资源未来演化规律,从而对典型流域或区域水资源做出系统而定量的评价。

4.3 水资源利用和脆弱性

西北地区水资源利用的核心是水资源优化配置与高效利用,有关西北干旱区农业水资源高效利用问题,需要从工程、生物、农艺、管理等各个方面进行大量的实验和研究,建立基于宏观经济的水资源优化配置、水资源承载能力分析方法,探索适合干旱区水资源高效利用的技术和方法,提出西北地区水资源优化配置的科学方案与高效利用综合技术。而且,生态需水问题已成为水资源合理利用的一个重要环节,只有深入了解和认识不同生态类型生态需水规律和特征,确定出维持西北地区生态稳定和生态建设的生态需水量时空分布图,才能够提供科学合理的水资源分配方案。

同时,西北地区的水资源对气候的变化和人类活动的响应更为敏感,其水资源系统对由于气候变化所产生的不利影响的调节和适应能力更差,水资源脆弱性更突出。西北地区能否解决区域水文循环特征变异、水资源脆弱性及社会经济发展对水资源需求的增加等问题,关键要弄清其水资源脆弱度的发展方向和变化特点。

4.4 陆面水分过程

干旱半干旱区陆面水分过程是水分的微循环过程。至今,我们对陆面水分过程及其气候效应的认识十分有限,对其许多相关问题仍然缺乏科学认识。因此,需要加强对地表水分输送机理方面的理论探讨,而且也特别应该加强专门针对水分过程的陆面过程野外试验^[1]。通过对陆面水分运动过程的观测试验和数值模拟,分析地表土壤水分的时空变化特征,揭示西北干旱半干旱区陆面水分输送和循环机理,探讨气候环境因素对陆面水分过程的影响。

4.5 生态恢复过程与水循环的互动机制

水资源缺乏是干旱半干旱区生态环境建设的主要限制因子,因此研究生态恢复过程与水文过程的互动机制是重要科学问题之一。对于这一问题的突破,需要通过对不同类型区土壤—植被—大气之间水分输送特征的分析,研究气候变化和水文过程对生态恢复过程影响,揭示生态恢复过程、水文过程自

作用及互动机理,并提出生态恢复过程与水循环的互动机制及其物理模型。

4.6 地形云降水特征

在西北地区,虽然高原和高山是水资源的主要形成区,但对高原和高山等大地形降水云系的云物理过程和水分转换机理的研究却相当薄弱,对许多重要问题的认识还很模糊。因此,特别需要通过分析祁连山内陆河流域降水云系宏、微观物理结构和时空分布特征,揭示地形云降水触发机制及云系的水分转换机理,建立地形云降水理论和概念模型,为开展西北地区山区人工增雨提供理论依据。

4.7 空中云水资源

空中水汽输送是内陆地区水资源的最根本来源。西北地区空中水汽主要来源于区域外输送和区域内循环。区域内循环主要指地表水分经过蒸腾、蒸散过程进入大气,它对该区域内降水的贡献相对较小;而对该区域降水贡献最大的水汽源应该是通过季风系统和西风带气流输送来的印度洋、太平洋等大洋上空的水汽。空中水汽和降水是区域水循环的关键环节,其变化将会引起区域内冰川、积雪、径流、土壤水等要素的直接联动,进而改变原有的水分平衡,最终牵动水资源的全局响应。所以,需要摸清西北地区空中水汽的来源、传输机理及其变化规律,深入理解全球变化对西北地区空中云水时空分布的影响^[51]。

4.8 水资源开发及其对循环的影响

水资源开发的主要发展方向是“开源”。对一个区域的水资源总量而言,开源的途径主要有区域外调水和区域内增水。在西北地区,区域外调水的关键科学问题是需要认真研究和探讨南水北调西线工程的社会和经济效益及其对相关地区生态环境的长远影响,弄清其利弊和可行性。区域内增水最有效的途径是人工增雨,这需要加强具有西北区域特点的在开发利用空中云水资源的相关研究,发展利用西北地区空中云水资源的新思路和新技术。无论是区域外调水,还是区域内增水,都是人类活动对区域宏观水循环特征的有序改变,我们应该深入认识这种人类有序活动对水资源变化规律的改变方向和程度^[52]。

5 结束语

总体而言,目前对区域水分循环这一气候系统中特别重要而活跃的因子的研究还不够充分,尤其

是针对西北干旱区这一全球变化敏感区的研究则更少见。由于西北地区气候的敏感性、环境系统的复杂性以及水分过程的活跃性和多样性,把该地区水分作为一个整体的循环系统来研究,合乎当今科学发展的总趋势。

我们认为,从目前西北地区人类活动现状还是社会经济发展的需要来看,非常有必要从国家层次对西北地区水循环和水资源利用问题专门进行立项研究。应该在国内外有关水循环和水资源利用研究工作的基础上,针对西北干旱区水资源缺乏、生态环境退化以及水资源利用效率低等问题,分别从水资源各分量和水循环各环节入手,研究西北内陆流域和黄土高原雨养农业区空中云水、降水、地表水、土壤水、地下水以及生态用水的特征及相互转化机理;研究西北地区特殊地形条件下云水转化机理和开发利用空中水资源的技术方法;研究生态恢复过程与水文过程互动性问题;研究西北干旱区水资源优化配置方案和高效利用的途径,综合评估全球变化和人类活动双重驱动下西北地区水资源的脆弱性及其适应性对策,并提出切实可行的西北地区水资源开发利用方案,为政府建设和开发西北提供科学决策依据。

当然,西北地区“水”问题涉及面广,问题也很复杂,需要从基本综合观测入手,依靠多学科交叉,通过全方位合作,长期持续地围绕水循环和水资源开展研究,不断推进对这一问题的认识水平。应该说,对这一问题的研究仍然任重道远。

参考文献:

- [1] 张强,王胜.关于干旱和半干旱区陆面水分过程的研究[J].干旱气象,2007,25(2):1-4.
- [2] Lins H f, Slack J R. Streamflow trends in the United States[J]. Geophys Res Lett, 1999(26): 227-230.
- [3] Cluis Daniel, Laberge Claude. Climate change and trend detection in selected rivers within the Asia-Pacific region[J]. Water International, 2001, 26(3): 411-424.
- [4] 夏军,孙雪涛,谈戈.中国西部流域水循环研究进展与展望[J].地球科学进展,2003,18(1):58-67.
- [5] 张宗祜,张光辉.大陆水循环系统演化及其环境意义[J].地球学报,2001,22(4):289-292.
- [6] 刘昌明.黄河流域水循环演变若干问题的研究[J].水科学进展,2004,15(5):608-614.
- [7] 张士锋,贾绍凤,刘昌明.黄河流域水循环变化规律及其影响[J].中国科学(E),2004,34(增刊):117-125.
- [8] 刘昌明,郑红星.黄河流域水循环要素变化趋势分析[J].自然资源学报,2003,18(2):129-135.

- [9] Lan Yongchao, Kang Ersi, Zhang Jishi, et al Study on the mutual transformation between groundwater and surface water resources in the Hexi inland arid regions[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(4): 535 - 545.
- [10] Liu Chunzhen, Liu Zhiyu Study of trends in runoff for the Haihe River basin in recent 50 years[J]. *Journal of applied meteorological science*, 2004, 15(4): 385 - 393.
- [11] 夏军, 王中根, 刘昌明. 黄河水资源量可再生性问题及量化研究[J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 534 - 541.
- [12] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 321 - 326.
- [13] 友贞, 施国庆. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. *自然资源学报*, 2005(4): 597 - 604.
- [14] 曲玮, 梅肖冰. 西北水资源研究综述[J]. *甘肃社会科学*, 2002(6): 23 - 31.
- [15] 孙国武. 我国西北地区水的问题综述[J]. *干旱气象*, 2004, 22(4): 76 - 81.
- [16] 宋连春, 张强, 孙国武. 全球变暖对甘肃省经济、社会和生态环境的影响及其对策[J]. *干旱气象*, 2004, 22(2): 69 - 75.
- [17] 张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆 - 气相互作用试验(NWC - AL IEX)及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 427 - 441.
- [18] Michael L Roderick, Graham D Farquhar The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410 - 1411.
- [19] Walter M Todd, Daniel S Wilks Increasing Evapotranspiration from the Contemporary United States[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004(5): 405 - 408.
- [20] Valentin S Golubev, Jay H Lawrimore, Pavel Ya Groisman, et al Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(13): 2665 - 2668.
- [21] Pavel Ya Groisman, Richard W Knight, Thomas R Karl, et al Contemporary Changes of the Hydrological Cycle over the Contiguous United States: Trends[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004(5): 64 - 85.
- [22] Michael L Roderick, Graham D Farquhar Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. *International Journal of Climatology*, 2004(24): 1077 - 1090.
- [23] Taichi Tebakari Time - Space Trend Analysis in Pan Evaporation over Kingdom of Thailand[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2005, 10(3): 205 - 215.
- [24] Pekarova P, Miklonek P, Pekar J. Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th - 20th centuries[J]. *Journal of Hydrology*, 2003(274): 62 - 79.
- [25] “黑河试验 核心小组. 黑河地区地气相互作用观测试验研究 HEIFE[J]. *地球科学进展*, 1991, 6(4): 34 - 38.
- [26] 高彦春, 王长耀. 水文循环的生物圈方面(BAHC计划)研究进展[J]. *地理科学进展*, 2000, 19(2): 97 - 103.
- [27] Gedney N, Cox Pm, Betts R A, et al Detection of a direct carbon dioxide effect in Continental river runoff records[J]. *Nature*, 2006, 439: 835 - 838.
- [28] Jiongxin X. The Water Fluxes of the Yellow River to the Sea in the Past 50 Years in Response to Climate Change and Human Activities[J]. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 620 - 631.
- [29] Dai A, Trenberth K E, Qian T. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870 - 2002: Relationship with soil moisture and effect of surface warming[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004(5): 1117 - 1120.
- [30] Douglas E M, Vogel R M. Trends in floods and low flow in the United States: Impacts of spatial correlation[J]. *J Hydrol*, 2005(240): 90 - 105.
- [31] 叶守泽, 夏军. 水文科学研究的世纪回眸与展望[J]. *水科学进展*, 2002, 13(1): 93 - 104.
- [32] 赵生才. 全球变化与中国水循环前言科学问题[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(4): 628 - 730.
- [33] 陈家琦. 全球变化和水资源的可持续发展[J]. *水科学进展*, 1996, 7(3): 187 - 192.
- [34] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. *水科学进展*, 2004, 15(5): 608 - 614.
- [35] 杨胜天, 刘昌明. 黄河流域土壤水分遥感计算及水循环过程分析[J]. *中国科学(E)*, 2004, 34(增刊): 1 - 12.
- [36] 杨胜天, 刘昌明, 孙睿. 黄河流域干旱状况变化的气候与植被特征分析[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 136 - 141.
- [37] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(D: 主要研究成果[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(11): 1157 - 1167.
- [38] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(ID: 研究成果的创新性及项目实施效果[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(11): 1168 - 1175.
- [39] 高歌, 黄朝迎. 中国水资源年景评估方法及其应用研究[J]. *应用气象学报*, 2005(增刊): 105 - 110.
- [40] 陈亚宁, 崔旺诚, 李卫红, 等. 塔里木河的水资源利用与生态保护[J]. *地理学报*, 2003, 58(2): 215 - 222.
- [41] 雷志栋, 甄宝龙, 尚松浩, 等. 塔里木河干流水资源的形成及其利用问题[J]. *中国科学(E辑)*, 2003, 33(5): 473 - 480.
- [42] 钟定胜, 孙亚梅. 水资源可持续发展的综合评价指标体系研究与应用[J]. *天津工业大学学报*, 2005(2): 65 - 68.
- [43] 杨志峰, 尹民. 城市生态环境需水量研究——理论与方法[J]. *生态学报*, 2005(3): 389 - 396.
- [44] 陈洪松, 邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. *水科学进展*, 2003, 14(4): 513 - 520.
- [45] 刘昌明. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究进展[J]. *中国基础科学*, 2002(3): 22 - 26.
- [46] 刘春霖. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 115 - 119.
- [47] 王国庆, 张建云, 章四龙. 全球气候变化对中国淡水资源及其脆弱性影响研究综述[J]. *水资源与水工程学报*, 2005(2): 10 - 15.
- [48] 陈添宇, 李照荣, 陈乾. 用 GMS5 卫星反演水汽场分析中国西北地区大气水汽分布的气候特征[J]. *大气科学*, 2005, 29(6): 864 - 871.
- [49] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(4): 633 - 642.

- [50] 钱正英. 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 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [51] 俞亚勋, 王劲松, 李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋

- 势分析 [J]. 冰川冻土, 2003, 25 (2): 14 - 20.
- [52] 王浩, 贾仰文, 王建华, 等. 人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探 [J]. 自然资源学报, 2005, 20 (2): 157 - 162.

ISSUES About Hydrological Cycle and Water Resource in Arid Region of Northwest China

ZHANG Qiang¹, ZHAO Yingdong⁴, ZHANG Cunjie², LI Yaohui¹, SUN Guowu¹, GAO Qianzhao³

- (1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China; 2. Lanzhou Regional Climate Center, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 3. Cold and Arid Region's Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 4. Hydrologic and Water Resources Survey Department of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The spatial distribution of water resource shortage in China is summed up from the practical condition and sustaining development angles. The actuality and trend of water resource are reviewed, the characteristic of water cycle and water resource utilization in arid region of Northwest China are analyzed. And research advances on water cycle and effective utilization of water resource in arid region are summarized, the scientific countermeasures about effective utilization of water resource in arid region are preliminarily discussed. Finally, some important scientific issues about water cycle and effective utilization of water resource in arid region of Northwest China are put forward.

Key words: arid region of Northwest China; water cycle; water resource utilization; research advance; scientific issue