

文章编号: 1001-8166(2003)01-0058-10

中国西部流域水循环研究进展与展望

夏 军¹, 孙雪涛², 谈 戈¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 2. 水利部办公厅, 北京 100053)

摘 要: 由于中国西部水文循环的地区特性、生态系统的脆弱性和社会经济发展对水资源需求的增加, 使得中国西部开发面临十分现实和严峻的水资源问题。从中国西部流域水循环的特点及存在的问题出发, 探讨了中国西部流域水循环研究基础科学问题。同时, 对 21 世纪中国西部流域水循环科学问题的研究进行了展望。核心的方面是: 自然变化和人类活动影响的西北干旱地区水资源演变规律是什么? 在西部生态环境建设中如何估算生态需水量? 西北干旱地区的水资源究竟能够承载多大规模的社会经济发展需求? 如何合理分配与调控水资源, 最大限度地发挥其潜力, 促进该地区社会经济的可持续发展?

关键词: 西部开发; 水循环; 水资源; 可持续发展; 中国

中图分类号: P339 **文献标识码:** A

0 引言

人口与环境是世界性的问题。在中国西北地区, 由于水资源短缺问题, 由此导致流域生态环境质量趋于退化和社会经济发展面临的一系列问题, 业已引起科学家和国家政府的极大关注^[1]。在国际地圈生物圈计划(IGBP)的国家响应和中国政府实施的西部开发科技研究计划项目多重机遇下, 在过去的 5 年时间里, 与生态保护、食物纤维和社会经济发展密切相关的中国水循环科学问题研究取得了明显的进步。

1995 年, 在国际地圈生物圈计划中国国家委员会(IGBP-CNC)框架下, 成立了 IGBP 核心计划“水循环的生物圈方面(BAHC)”中国委员会。国家自然科学基金委员会、科技部、水利部、环境部、林业部等多个部门, 业已支持了多项水科学基础研究和与国家需求紧密联系的水资源研究项目。如国家科技部“九五”攻关项目、国家基础研究发展规划

项目、西部行动计划项目等。这些项目的开展, 为研究中国西部水循环与水资源时间空间演变规律研究提供了有力的支持。

由于中国西部的气候、生态景观、人文社会经济发展的需求和受水资源限制的特点, 在实施中国国家西部开发战略过程中, 遇到大量新的水科学问题与挑战。如在水资源矛盾十分突出的西北干旱地区提出的问题:

- 自然变化和人类活动影响的西北干旱地区水资源演变规律是什么?
- 为保持西北干旱地区生态系统平衡不因为人与自然争水导致生态系统退化、恶化, 在国家和地区宏观战略规划决策方面, 究竟需要考虑多大额度的生态需水的水资源量?
- 西北干旱地区的水资源究竟能够承载多大规模的社会经济发展需求?
- 如何合理分配与调控水资源, 最大限度地发挥其潜力, 促进该地区社会经济的可持续发展等。

收稿日期: 2002-01-12; 修回日期: 2002-07-16

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“黑河流域水—生态—经济系统综合管理试验示范”(编号: KZCX1-09-02); 国家自然科学基金项目“变化环境下流域水循环机理与模拟研究”(编号: 50279049); 中国科学院 2000 年度“百人计划”项目(编号: 2000)资助。

作者简介: 夏军(1954-), 男, 湖北孝感人, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xaj@igsnr.ac.cn

面对这些国家需求的严峻问题,迫切需要从深层次科学规律认识层面和知识创新的原则,认真研究西部干旱地区水文循环及水资源的演变问题。

本文试图从中国西部流域水循环的特点及存在的问题出发,概述了与西部流域水循环相关的研究计划及其取得的进展。同时对²¹世纪中国西部流域水循环科学问题的研究进行了展望。

1 中国西部概况与水循环特点

1.1 中国西部地区概况

中国西部地区疆域辽阔,由西北和西南两大块组成。在行政区划上包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、四川、重庆、云南、贵州、西藏、广西、内蒙西部等12个省、市和自治区。其中西北地区的行政区划范围包括陕、甘、宁、青、新、内蒙⁶省区,总面积为^{41.6}万 km^2 ,占全国国土面积的^{4.3}%^[2]。目前西部地区人口稀少,是我国经济欠发达的地区。全国尚未实现温饱的贫困人口大部分分布于该地区,它也是中国少数民族分布最集中的地区。西部地区与¹⁰多个国家接壤,陆地边境线长。西部地区拥有十分丰富的自然资源,其中煤炭、石油、天然气、多种有色金属及贵金属、盐湖资源,以及土地、太阳能和风能等资源的储量或可利用量均居全国前列,有些甚至在上世界上亦占有重要地位。²¹世纪西部地区将成为支撑中国社会经济可持续发展的重要基地。

在实施西部大开发战略的新形势下,西部的发展正面临着前所未有的机遇,同时也面临着巨大的挑战。水的问题和生态环境脆弱是制约西部发展的关键性因素。其中,西北地区由于干旱缺水,使得人类基本生存环境变得异常恶劣。矿产资源、化石能源和水土资源的不合理利用,加剧了水资源的短缺和生态的破坏,环境质量的退化和自然灾害的加重构成了对重大基础设施的威胁。因此,国家把解决西部水问题和生态环境建设作为实施“西部大开发”战略基础。探讨西部流域水循环的特性,及其在自然变化和人类活动下的响应模式,成为中国流域水循环研究中的重点。

1.2 中国西部流域水循环的特点及现状

1.2.1 西部流域水循环的特点

(1) 西北地区的水汽输送。西北地区位于中纬度欧亚大陆的腹地中心,属典型的大陆性气候,在西北内河区除新疆北部为半干旱地区,全境属于干旱区和极干旱区。西北地区主要受蒙古高压大陆气团控制,地中海往东的水汽受阻于帕米尔高原,沿横断

山脉峡谷北上的印度洋暖湿气流被东西走向的一系列平行高山所阻挡,从太平洋输送来的东南季风到达河西走廊的东部已成为强弩之末。因此,整个区域干燥少雨,绝大多数地区年降水量在⁴⁰⁰ mm以下,而且多风沙,平原沙漠区夏季酷暑,高山区冬季严寒,日温差变化极大,蒸发作用强烈。

从图1可见,西北区全年降雨量中,有^{14.4}%形成降水 P_p ,^{85.6}%成为过境水汽直接穿过该地区上空出境,年总蒸发量中有^{7.2}%重新形成降水 P_p ,^{92.8}%随气流输出境外,年总降水量中^{92.8}%是由境外输入的水汽形成的,^{7.2}%是由当地蒸发的水汽形成的。总降水量中除^{0.1}% (约合^{0.6} mm) 经额尔齐斯河流出境外,其余^{99.9}%均消耗于蒸发。西北区的水文外循环系数($K_e = 0.2$)和水文内循环系数($K_i = 0.07$)都是全国各区中最小的,水汽年总输入量与年总输出量接近相等,而水汽年净输入量极小,出境河川径流趋于零。所有这些特征表明,西北区的水文外循环和水文内循环都不活跃。这显然是由于西北区的地理位置和大气环流限制,使该地区得不到较充沛的水汽补给所致^[1]。

西北地区的径流特点是:在天然条件下,河流出山口后进入平原或盆地,流经透水性极强的山前冲洪积扇群带,大量渗漏补给地下水。河水入渗量的大小取决于河床的地质地貌条件、流量和流程。一般而言,出山口径流量的⁶⁰%以上入渗补给了沿河两岸的地下水,出山径流不足⁴⁰%的部分以水面蒸发和湿地沼泽蒸发的形式蒸发。

天然状态下平原绿洲区地下水的补给来源有³种:一是河流入渗补给;二是降水入渗补给;三是山前侧渗补给。从数量上看,河流入渗补给的比例在⁸⁵%左右,降水入渗在³%左右,山前侧渗在¹²%左右。天然状态下地下水的排泄通道主要有²条:一是潜水蒸发;二是泉水溢出。一般情况下,冲洪积扇的地下水沿地形坡降向冲积平原运动,至冲积扇缘以泉水形式溢出,各路汇集后流入河道,再度转化为地表水。

在冲洪积扇线以下的冲积平原上,地表水补给河道两侧的地下水。平原地下水埋藏浅,其水平径流缓慢,地下水以垂向水量交替为主,以潜水蒸发维持着地表植被生态系统。由于河网不发育,地下水径流排泄困难,使地下水位上升,甚至接近地表。内陆河冲积平原下游直到尾间湖,除洪水季节外,河道基本断流。在洪水季节,泻洪通过河道补给地下水,余水流入尾间湖。在上游大规模引用水资源的条件

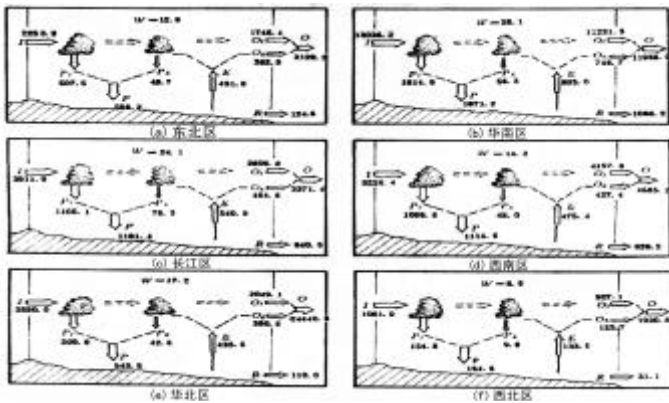


图 1 中国各区域水文循环特点分析图(刘国伟, 1999)

Fig.1 Regional hydrologic cycle characteristic analysis map in China

下, 冲积平原下游即使在洪水期也很少有上游来水, 造成尾间湖趋于干涸, 地下水位持续下降。

外流河的径流形成区与耗散区的分界一般不明显。黄河流域河川径流除个别河段外, 其径流量基本是沿程增加。径流的补给主要为降水, 上游段贵德以上的源头区为降水和融雪混合补给。长江流域河川径流的补给源也是以降水为主, 其源头沱沱河为降水和冰川融水混合补给, 径流的变化基本取决于降水的变化。

(2) 西北内陆河流域水循环。受区域环境和气候条件的影响, 西北内陆河流域水循环还具有以下的独特性: 在垂直方向上, 降水基本集中在山区, 蒸发主要发生在平原, 通过径流的水平运动, 将水分由山区输送到平原。山区与平原的水源关系可以概括为: 山区产水, 平原消耗。西北内陆河平原区 122.3 万 km^2 的面积上, 多年平均降水为 524 亿 m^3 , 仅占降水总量的 16% , 总径流量按平原面积折合深度不足 81 mm, 加上平原平均降水 43 mm, 平原地区总水量深度不足 124 mm。对干旱地区而言, 维持植被成长的水量必须在 $250 \sim 300$ mm 以上, 显然相差甚远。因此, 径流只能在沿河附近区域集中式消耗, 50% 以上的出山口径流支撑了人工绿洲生态系统。

径流出山口后以地表水与地下水两种形式相互转换, 其间不断蒸发和渗漏, 最终消失。平原盆地上中游的沿河两岸, 属于径流消耗和地表—地下水

强烈转化区。在平原盆地的下游和人工生态系统周边地带, 属于径流的排泄、积累和蒸散区, 水资源支撑了天然绿洲、内陆河尾间水域及低湿地生态系统; 尾间天然绿洲周边和下游广大荒漠区属于水分严重稀缺的无流区, 依靠极为有限的降水和大气凝结水, 支撑着脆弱的荒漠生态系统。

表 1 表明西北内陆区降水量与耗水量(包括降水和径流的全部有效与无效消耗)的空间分布。尽管绿洲仅占降水量的 3% , 但耗水量占 28% , 而山区的降水与耗水分别占 84% 和 57% 。出山口径流是绿洲的生命之源。

(3) 西南岩溶(喀斯特)地区流域水循环。西南地区位于青藏高原东南缘, 区域西部横断山脉呈南北走向, 西南水汽沿山谷上溯, 可达雅鲁藏布江河谷。区域东南部与越南、老挝、缅甸接壤, 海拔在表 1 西北内陆区降水与耗水的空间分布

Table 1 Special distribution of precipitation and water consumption in the inland region of Northwest of China

	山区	绿洲	过渡带	荒漠区	平原合计
降水量(亿 m^3)	2736	134	282	524	
(%)	84	3	4	9	16
耗水量(亿 m^3)	1775	860	192	282	1334
(%)	57	28	6	9	43

注: 耗水中包括入境量 88 亿 m^3 , 不包括出境量 239 亿 m^3 , 二者之差 151 亿 m^3 。

200 m 左右,来自孟加拉湾的水汽流从本区南边界和西边界进入上空后,经昆明、贵阳、立江向东北方向偏转,从北边界出境进入长江流域上空。水文气候垂直分带性是本区重要特点。如经纬度基本相同的新林、汤丹和落雪海拔高度分别为 1 254.1 m、2 252.4 m、3 227.7 m,三地年降水量分别为 683.3 mm、844.1 mm、1 187.4 mm,年降雪天数分别为 1.8 天、10.1 天和 25.3 天(盛承禹等,1986),可见降水量随高度明显增加。径流量也呈随高度增加而增加的趋势。由于气温随海拔增高而降低,所以蒸发量呈随海拔增高而减小的趋势。水量平衡要素的垂直分带性反映了区域内水文循环在垂直方向的特点,即海拔高处由降水形成的径流沿河汇入海洋,海拔低处蒸发的水汽沿河谷爬升至海拔高处再形成降水,这是明显区别于其它区域水文循环过程的。

由图 1 可见,西南地区水汽年总输入量中有 20.4% 形成降水 P_p , 79.6% 成为过境水汽直接穿过该区上空出境,年总蒸发量中,10.1% 重新形成降水 P_r , 89.9% 随气流携出境外;年降水量中有 95.7% 是由境外输入的水汽形成的,4.3% 是由区域内蒸发水汽形成的;年降水量中有 57.3% 成为河川径流,年径流量与出境水汽量之和与水汽年输入量相等,实现全年水文循环和水量平衡过程。西南区水文外循环系数($K_e = 0.6$)和水文内循环系数($K_i = 0.10$)均居全国 6 个区域之前列,区域上空水汽完全更新一次所需时间平均小于 7 天,表明西南区水文外循环和水文内循环均十分活跃^[1]。这显然是与该地区水汽充沛、地形复杂和水文气候的垂直分带特点密切相关。

西南地区降雨丰富,由于石灰岩的溶解作用,使大量的雨水和地表水渗漏到地下,成为岩溶地下水并形成地下河,而地下河的网络系统和地表水的水系往往不同。

1.2.2 西部流域水循环的现状

中国西部的西北与西南自然条件很不相同,西北部干旱少雨,西南部雨量充沛,但总体而言,西部地区的水旱灾害都十分严重,与流域水循环相关的生态环境问题十分突出^[5,7]。

1.2.2.1 西北地区流域水循环的现状

(1) 西北地区流域水循环产生的水旱灾害。西北地区降雨量较少,新疆、青海、内蒙西部少雨地区年降水量不足 100 mm,陕、甘、宁 3 省区的少雨地区年降雨量不足 300 mm。与此相反,于西北省区地处高原,风势强劲,气候干旱,蒸发量可达 1 000 ~

4 000 mm。因此,十年九旱是中国西北地区的主要特征。如陕西省 1994—1996 年连续大旱,70% 农田受灾,工农业生产损失近百亿元。新疆维吾尔自治区的北疆蒸发量为降水量的 10~15 倍,南疆则达 130~200 倍,有限的绿洲农业全靠冰川融水维持。

尽管西北地区以干旱为主要灾害特征,但受江河及局部暴雨诱发的山洪影响也常有较重的洪涝灾害发生。如陕西省从元年初年至 1949 年间,有 633 年发生洪水,其中 352 年发生灾害性洪水,平均 5.5 年发生一次,解放后平均 2 年发生一次灾害性洪水。宁夏回族自治区受黄河影响,平均 10 年发生一次灾害性洪水,地方局部洪水平均 4 年 3 次。内蒙古自治区东北部降雨量较大,常有洪水发生,1998 年洪水灾害损失达 164.5 亿元。青海省平均每 3~5 年发生一次大洪水,10~15 年发生一次特大洪水,1999 年由洪水及泥石流造成的经济损失达 5.8 亿元。新疆的山区暴雨也常对平原地区造成严重破坏,1999 年洪水冲毁了吐鲁番地区的大部分水利工程。2002 年西部多个省份在夏季又发生了短期的洪水灾害。

(2) 与流域水循环相关的生态环境问题。由于干旱缺水,西北地区生态环境极为脆弱。水资源开发利用后,引起生态环境的恶化。主要表现为:

· 河湖萎缩,水资源严重消退。塔里木河是我国最大的内陆河,流程 1 280 km,下游英苏至台特马湖,自 1972 年已经完全干涸,使塔里木河流程缩短约 180 km。孔雀河下游亦断流,流程缩短了 180 km。新疆湖泊水面 40 年来减少了 3 495 km²。罗布泊 1931 年有 1 900 km² 的水面,1962 年缩小到 660 km²,1972 年干涸。玛纳斯湖水面 1959 年近 550 km²,1972 年干涸。台特马湖也已干涸。艾比湖面积比 1984 年缩小了近一半。博斯腾湖水位也下降了 1.56 m,曾有湿地 1 400 km²,但退化严重,湖滨周围形成盐土荒漠,2000 年后则水位升高。

· 天然植被大量破坏,自然生态系统退化。西北地区是我国植被覆盖率最低的地区,由于气候变化和人类活动的影响,致使西北地区大片河谷林消亡、草场严重退化、土地沙漠化扩大,自然生态系统不断恶化。塔里木河流域 50 年代初原有胡杨林 93 万 hm²,40 年来减少了 80%。北疆的荒漠灌木林面积减少了 68.4%。新疆草场的破坏也非常严重,40 年来全区开垦草场达 330 万 hm²,严重退化草场面积 470 万 hm²,由于草场退化,每年造成的经济损失高达 8 亿元以上。如果生态需水不能得到满足,天

然植被大量破坏,势必会威胁到绿洲的存亡。

· 土地荒漠化加剧。中国的沙漠化土地约 149 万 km^2 , 占全国总面积的 15.5%, 其中有 90% 位于西北地区。在过去几十年内,西北地区由于不合理的开垦和缺水,导致已有植被覆盖的沙地和沙质干草原土地荒漠化面积达 15 万 km^2 , 并且每年还以 2 000 ~ 3 000 km^2 的速度增加。土地荒漠化正逐渐蚕食人们赖以生存的绿洲,这对西北干旱地区人类生存是一个很大威胁,因为新疆 90% 的人口生活在占土地总面积 4% 的绿洲上。

· 水土流失严重。黄河流域是世界上土壤侵蚀及水土流失最严重的地区之一。黄河年输沙量约 16 亿 t , 泥沙主要来源于中上游河段黄土丘陵沟壑区。水土流失不仅导致土壤养分流失、冲毁耕地和水利设施,增加黄河下游河床淤积,而且也是引起毁林、毁草的主要原因。据调查,1985 年陕北黄土高原水土流失所造成的经济损失就达 3.32 亿元,占该地区由于生态破坏所造成总损失的 56.2%。

· 土地次生盐渍化问题突出。西北干旱地区气候干燥、蒸发强烈,加上水资源利用不当(如重灌轻排等),土地盐渍化面积已达 200 万 hm^2 , 占全国盐渍化土地的 1/3 以上。据 1985 年统计,新疆不同程度盐渍化的土地面积超过 125 万 hm^2 , 占总耕地的 30.6%。而南疆地区次生盐渍化的土地达 32 hm^2 以上,占总耕地的 48.8%。土地次生盐渍化轻则影响农作物的产量,重则弃荒。

· 水环境污染加重。西北地区环境污染以大气和水污染影响最大。水污染较严重的地区和城市有黄河刘家峡水库以下河段,包括兰州、白银、银川和石嘴山等市,渭河西安—咸阳—宝鸡—天水河段及其支流,乌鲁木齐市等。化学耗氧量、氨氮、挥发酚、石油、六价铬等超标严重。流经各大城市河流水质大部分为 4 类或 5 类,少数甚至超过 5 类,已丧失功能。同时,地表水质恶化也普遍波及地下水。

1.2.2.2 西南地区流域水循环的现状

(1) 西南地区的旱灾灾害。西南地区多山多雨,因而伴随暴雨产生的山洪及泥石流等山地灾害成为主要灾害,对公路和铁路危害严重。

· 西藏地区水土流失严重。水量充沛而河道行洪能力差,山洪、泥石流、山体崩塌灾害多发,1998 年洪水造成较大灾害。云南省最大年降雨量 4 000 mm, 最小降雨量 300 mm, 因而旱灾灾害频繁发生。1950—1998 年的 49 年内,有 24 年发生大旱,有 22 年发生大洪涝。1997 年旱涝灾害同时发生,受旱面

积 98.13 万 hm^2 , 洪涝灾害面积 57.93 万 hm^2 , 旱灾灾害损失达 84.4 亿元。贵州省从 1368—1985 年发生水灾 254 年,其中大水灾 90 年。1991 年大洪水,全省 71 县市受灾,受灾人口 1 711 万人,经济损失达 19.07 亿元。1995 年又有 83 县市受灾,损失达 58.35 亿元。四川省 1981 年因暴雨洪水使 53 县市受淹,受灾人口 1 256.5 万人,死亡 1 384 人,经济损失达 28.66 亿元。广西壮族自治区大洪灾平均 11 年一次。

· 西南地区地势较高,常有大风,且河流下切形成深谷,而耕地稀少,又多位于高处,引水条件较差,多数农业靠自然降水维持。在水土流失严重的地区以及喀斯特发育的地区土层较薄,蓄水困难,都会导致旱灾发生,因此在西南地区也常受旱灾困扰。如贵州省从 1949—1985 年的 37 年间,有 31 年发生旱灾。1985 年受旱面积达 93.33 万 hm^2 , 粮食减产 21%, 全省 1 025 万人,675 万头牲畜饮水困难。四川省常发生春夏连旱,解放以来除 1967 年外,几乎年年都有旱灾发生,年均损失粮食 5 亿 kg 。广西壮族自治区 1963 年因旱受灾面积达 155.2 万 hm^2 , 1988—1990 年又发生连旱,经济损失达 9.3 亿元,粮食减产 17.6 亿 kg 。在西部开发中解决与水循环相关的山地灾害是一个至关重要的问题。

(2) 与流域水循环相关的生态环境问题。西南地区与流域水循环相关的生态环境问题突出表现为:

· 水土流失严重。西南地区降雨强度大是水土流失及造成大规模泥石流、滑坡、塌崖的动力条件,西南地区山多坡陡,坡面侵蚀力大也是造成水土流失的原因。如云南省山地面积约占总面积的 84%, 而水土流失面积占国土面积的 38.2%, 达 14.6 万 km^2 。其中,中度以上水土流失面积 6 万 km^2 。四川省水土流失面积达 19.98 万 km^2 , 占全省总面积的 41% 是全国水土流失最严重的地区之一。长江流域的水土流失总量已达 24 亿 t , 大部分集中在云南、贵州、四川等省区^[1]。

· 土地荒漠化。西南地区的山地和丘陵主要由石灰岩、花岗岩、玄武岩及各种变质岩构成。石质坚硬,土层浅薄,一旦流失则岩石裸露,土地石化。贵州省石漠化面积以每年 5% ~ 7% 的速度在增长。

2 中国西部流域水循环研究与进展

2.1 西部流域水循环研究计划

西部的水与生态问题日趋严重,已经成为当前西部大开发中的重要制约因素。为此,国家自然科

学基金委员会以及其它各部委都相继设立了一系列涉及西部水问题的大型研究项目,其中包括国家“九五”重点科技攻关项目“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”、国家基础研究发展规划(“973”)项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”、国家自然科学基金委员会“中国西部环境和生态科学研究计划”等。国家“九五”重点科技攻关项目“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”是近年来关于西部流域水循环研究中比较有代表性的国家大型科研项目之一,它主要以西部流域水循环、水与生态、水资源开发利用为核心研究以下7个方面的内容:

(1) 西北地区水资源评价(1956—1995)系统包括地下水、冰雪观测等。

(2) 重点地区水资源开发利用评价和生态环境质量评价,包括70—90年代变化。

(3) 生态需水计算方法——生态环境保护准则——生态环境需水量。

(4) 西北水资源合理配置模式——四大平衡、五个配置、流域和省区要点。

(5) 分析计算水资源承载力——统筹考虑经济、生态与水资源。

(6) “天然—人工”二元水循环——水资源、开发利用、生态环境统一评价。

(7) 面向西北生态经济的资源水利战略——经济与生态建设以水资源为核心。

2.2 研究进展

通过国家各部委的一系列研究计划的实施,对西部流域水循环中的水与生态问题做出了一些进展^[10-11]:

2.2.1 大气—土壤—植被的水文循环机理

水循环与生态系统的作用机制是水文科学研究的一个关键,水文界面过程及其动力学模式涉及很多与节水型生态系统有关的水文过程,如蒸发、入渗、根系吸水、蒸腾等均发生在土壤—地下水、土壤—大气、植物—土壤、植物—大气等界面上,加强界面研究,调控界面上的水分通量,可以达到节水和改善植物生态水循环的目的。如熟知的SPAC系统研究是水文多界面过程与系统耦合的研究重点之一,它是区域水文循环和生态系统优化设计的基础和核心。中国科学家在这方面的研究是鼓舞人心的,如植物根际微生态系统和叶—气界面水分迁移转化规律与模拟、根际微生态系统和叶—气系统中各环节水流阻力的变化,包括土壤阻力、土根界面阻力和根

系阻力及气孔阻力,探索各阻力的影响因素和变化关系,分析不同基因型品种间阻力变化的关系,胁迫条件下根系收缩和土—根界面间隙与传导的变化。

2.2.2 考虑自然变化和人类活动影响的水文循环模式

中国内陆河径流散失区内人工绿洲的出现和迅速发展,使得自然状态下的流域“四水”转化关系发生了明显变化,在天然水循环的大模式下又形成了侧支的人工水循环。以河道外大规模引水为基本特征的人工水循环通量日益增加,下游河道径流量不断减小。绿洲天然径流量与人工水循环通量此消彼涨,相应地天然绿洲与人工绿洲此退彼进,以水为纽带形成了水资源—社会经济—生态环境相相制约的定量关系。考虑自然变化尤其是人类活动影响的流域水循环模式,成为了量化的基本工具。它的作用是:为水资源评价、水资源开发利用评价、生态环境质量评价奠定了统一基础,能够从流域水循环高度统一界定水资源可利用量和生态环境用水量;能够从流域水循环和工程系统两个层次评价节水潜力,并为生态适宜需水量和最小需水量提供了统一标准。目前正在发展之中。

2.2.3 干旱区生态需水量的计算研究

在微观层次上,生态耗水机理和实验观测研究业已取得有用的数据,它们为确定各典型生态的最小耗水标准和适宜耗水标准提供基础。宏观层次上,根据绿洲区天然生态、人工生态与流域水循环的关系,对绿洲天然生态从大气降水、地下水潜水蒸发、人工绿洲退水等不同来源获取的水分进行了系统分析。通过微观机理与宏观分析的结合,业已提出了一些与区域发展模式及生态环境保护准则相适应的生态环境需水量估算结果。

2.2.4 针对西北生态脆弱地区的水资源合理配置方案

在区域发展层次,统筹进行经济发展用水与生态保护用水的配置,以水定发展规模,提高水资源与土地资源和矿产资源的匹配程度;在水资源开发利用层次,统筹进行节流与开源、近期与远期、丰水区与贫水区的水量调配,逐步实现向以提高水资源利用效率为中心的开发模式转变,在流域内部,统筹进行上游与下游、地表水与地下水的配置,保障水盐运

国家“九五”重点科技攻关项目(编号96-912-01-01),西北地区水资源与生态环境评价及其发展趋势研究,南京水文水资源研究所等,2000。

动的基本平衡并着重解决大面积春旱与次生盐渍化问题。通过水资源合理配置,促进区域的内涵发展方式并逐步向生态经济转型^[15,16]。

2.2.5 干旱区水资源承载力分析与计算

以流域水循环及生态环境容量作为承载主体,通过水资源合理配置和高效利用提高承载主体的承载能力。以区域社会经济系统作为被承载的客体,通过转变发展模式增加对有限承载力的适应能力。以流域水循环为纽带定量联系承载主体与被承载客体。同时考虑了区域内部的生态链联系和区域之间的市场链联系,在经济发展目标与生态保护准则间进行多目标定量权衡,解释并回答了内陆干旱区水资源开发利用中一系列“度”的问题^[17]。

2.2.6 遥感信息和 GIS 新技术在水文水资源的研究应用

利用 70 年代、90 年代和 2000 年遥感图像及有关资料,以 1:10 万和 1:50 万比例尺全覆盖西北地区,绘制了土地利用和生态系统分布图,与水循环和生态演变相结合,对西北干旱区水资源与生态系统相互关系进行了研究。取得了一系列有新意的研究成果,为该地区水资源开发、利用、保护、管理和生态环境保护规划提供了科学依据。

2.2.7 西北地区水资源可持续利用的整体战略规划研究

目前,针对西北地区发展战略、生态环境保护战略、水资源开发利用战略,业已提出了许多具体的建议。如生态环境保护的基本原则是“水利措施和种草措施并重”,10 年内扭转天然生态的整体恶化趋势,再用 10 年左右的时间使重点保护区的天然生态明显改观,同时解决人工生态区内的灌溉次生盐渍化问题。为此将在西北水资源的开发、利用、治理、配置、节约、保护等方面实现一系列的重点转移,坚持以节水和中低产田改造作为重点,大幅度地提高生态环境用水量及其保障程度,严格实行以流域为基础的水资源统一管理,加快若干丰水流域的开发步伐。

上述方面的研究成果,使西部地区水循环、水资源利用和生态环境研究的整体水平上了一个新的台阶,为国家加大西北开发力度和西部生态环境建设提供了科学依据。

3 21 世纪西部流域水循环研究新的机遇与挑战

3.1 西部流域水循环研究的科学问题

西部地区流域水循环的科学问题的本质是水文

—生态学基础,即水文循环及其生物圈影响方面。虽然通过一系列国家科研项目的实施,对西部流域水循环研究取得了一些突出的进展,但仍有许多科学问题尚未得到解决,其中需要深入思考的科学问题包括^[18-22]:

3.1.1 如何维持自然生态与人类环境用水的平衡?

维持中国西部特色自然生态与人类环境用水的平衡表现为水热(能)平衡、水盐平衡、水沙平衡、区域水量供需平衡。

水热(能)平衡。根据生态学中的物理原理,即能量与水分平衡,使地表能量与水分的收支保持平衡关系。

水盐平衡。内陆盐渍化是水盐不平衡所造成的。盐土则是因为排盐水量不足,盐分不断累积而形成的。

水沙平衡。河流上游的山丘区来水挟带着大量的泥沙,进入下游平坦地区以后,由于坡度骤然变缓,水量减少而使水流速度减慢,河流泥沙沉淀,淤塞河道,而河道的淤塞又引起泄洪的困难等灾害问题。

区域水量供需平衡。具体可分为两方面:一是区域水量平衡,二是水量供需平衡。前者属水资源条件,后者可以分为农业与城市工业的水资源供需平衡。从农业资源的角度来看,还包括水土平衡,这一平衡的确定涉及一定种植制度下农业需水量与水资源(降水、地表与地下水)可提供使用的水。

在四大平衡原则的基础上,深入研究水资源承载力 and 科学地计算必要的生态需水量,特别是西北地区,是亟待进行的研究任务。

3.1.2 如何确切地计算和评价西部地区的水资源?

由于西北内陆区的地表水和地下水存在着十分复杂的转化关系,西北地区水资源评价与东部地区有很大的差别,计算和评价方法不尽相同。其原因是:从水文循环来看,西北内陆区的流域水循环以垂向运动为主,年降水量等于年蒸发量,从各内陆河流域内部看,西北的河流可以划分成径流形成区、径流散失区,两区的水文情况有巨大的差异;从水源组成来看,冰雪补给占有相当的比例,与温度或气候变化有密切关系。由于以上三点,不能将东部地区水资源评价的经验用于西北地区。西北地区水资源的计算与评价必须切合西北地区的实际情况,研究西北内陆干旱区的水资源评价方法。

3.1.3 如何保护水源与环境,大力发展节约用水和雨水集流?

西部地区幅员辽阔,贫困地区多为缺水区,分布

范围广 防止工农业、城市生活用水增长过快和用水不合理是国家需求的重要问题。实行节水可望缓解供水不足。在与节水有关的水文科学研究方面,如何研究雨水集流,是解决分散性缺水的主要途径。西部水资源的来源大体可以分为两类:一是集中型的水资源,其特征是来水强度集中,再生或恢复周期短,诸如江河水与容易补给的富集浅层潜水,可称其为强水;二是分散性的水资源,其特征是来水强度弱,分布范围广,这就是常见的降水资源,可称为弱水。前者是水利工程开发的主要对象,已成为向城市、工业与农田灌溉供水的主要来源。后者则可为分散性用水提供水源。如果把集中型水源的来水速率按 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 计算,把分散型水源的来水速率按每分钟 1 mm^3 计算,则两者相差约 5^6 个数级。虽然弱水来水强度小,但可以通过人工集成来强化,以达到供水的目的。作为弱水的雨水利用已成为当今世界水资源开发的潮流之一。雨水集流应视为解决广大黄土高原与岩溶山区用水问题的主要途径。

为了回答上述国家需求,必须从水文基础方面研究下列科学问题^[13,29]:

(1) 西部水循环的时间空间变异规律。

- 不同时间尺度的水循环变化趋势与强度;
- 不同区域的水文变化相似性与变异性分析;
- 气候长期变化对水循环及水资源量时间空间变化的影响;水文尺度的新理论新方法。

(2) 流域水循环的生态水文学基础研究。

- 水循环与不同区域陆地植被生态系统的反馈机制与作用;
- SVAT 水文界面过程及其动力学模拟;
- 生态水文循环中的植物与光合作用耦合;
- 胁迫条件的最佳耗水关系;
- 植物各体—群体—景观的耗水与供水关系;
- 西部粮食生产与水资源的合理利用的水量关系。

(3) 人类活动对水循环的影响机理。

- 水资源工程开发对水循环影响的水资源量的变化规律;
- 社会经济发展对水循环速度的影响问题;
- 人类经济活动与水循环影响中的水质变化影响;
- 土地利用对区域水循环的影响规律;
- 城市化进程对水循环的影响规律。

(4) 量化自然变化和人类活动对水循环的影响。

- 全球气候变化影响的大气—陆面—生态模式

研究;

- 大尺度分布式水文模式研究;
- 不同时空尺度的水循环模式耦合与聚解;
- 人类活动对水循环不影响的水资源量化模式;
- 大气—陆面—社会经济活动的水资源估算模式;
- 自然变化和人类活动对水资源的影响的不确定性风险模拟分析。

3.2 西部流域水循环研究展望

21 世纪 IGBP 科学计划新的发展将对中国的西部水循环和生态保护产生新的影响。中国科学家将通过西部水循环科学问题新的探索研究,为中国和国际水文科学作出新的贡献。根据国家的当前需要,近期内有关西部流域水循环研究重点将放在“西部不同地域单元水循环过程及其演化趋势”、“大气降水过程、冰雪圈变化、地表径流、地下水循环以及生物的水循环全过程特征演化的趋势”、“人类活动干扰下流域水循环模式”等方面。

西部流域水循环科学问题研究与思路是:

(1) 西部地区土壤—植被—大气转化的水文生态模拟研究和检验。

- 受自然变化和人类活动影响土壤—植被—大气水文循环过程变化;
- 西部地区主要的生态需水(自然生态系统和人工绿洲生态系统)时间和空间变化;
- 西部地区土壤—植被—大气转化的水文生态模型研究和检验。

(2) 变化环境的西部陆面性质和能量交换的区域尺度研究。

- 西部水与生态信息档案(水循环—生态观测信息系统);
- 水文情势空间与时间变异,陆面性质与水资源量;
- 不同时间/空间尺度的水循环变化周期与强度;
- 不同区域的水文变化相似性与变异性分析;
- 地貌尺度律与水文循环动力学尺度律系统框架。

(3) 大气圈—生物圈—水圈交互作用的多样性与耦合。

- 大气对陆面水文生态系统的作用:聚解(Downscaling);
- 陆面水文、生态系统对大气的作用:聚合(Upscaling);
- 大气圈—生物圈—水圈交互作用多样性耦合

(系统聚合与聚解集成的参数化)。

西部流域水循环科学问题实现的技术支撑是：

(1) 水文循环生态观测信息系统。

目的是获取从流域和区域尺度水文循环研究必需的基础信息。方法手段：卫星遥感资源(如 MODIS 等)，已有国际/互连信息网(水文生态)，GIS 资源共享等。

(2) 西部典型地区水文循环生态实验区。

研究土壤—植被—大气水文循环过程变化、水文尺度问题和西部地区生态需水机理实验研究所需要。关键是实验区选择的代表性和有明确研究目标的实验区实验观测设计，其中包括尽可能利用已有的水文生态站。

(3) 有效的水文—生态—大气—地理协作研究梯队与国际合作。

需要打破传统学科独立门派界限，以水文循环研究问题为核心，组织水文、生态、大气、地理信息联合协作的科学梯队，开展以科学为目的的研究。

开展有目标的水文循环研究国际合作，尤其是国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心计划水文循环生物圈方面(BACH)等合作。充分利用国际同类研究新的发展信息与技术资源，作出有中国特色的水文循环研究成果。

参考文献(References)：

- [1] Liu Changming, He Xiwu. The Stratagem of the 21st Chinese Water Problem [M]. Beijing: Science Press, 1996. [刘昌明, 何希吾. 中国 21 世纪水问题方略 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [2] Shi Yulin. Chinese Natural Resources Series (Synthesis, Ocean Resources) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995. [石玉林. 中国自然资源丛书(综合卷·海洋资源) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.]
- [3] Liu Guowei. Atmospheric Process in Hydrological Cycle [M]. Beijing: Science Press, 1997. 4. [刘国纬. 水文循环的大气过程 [M]. 北京: 科学出版社, 1997. 4.]
- [4] Qu Huanlin. Estimate of Chinese Arid-Semi Arid Area's Ground Water [M]. Beijing: Science Press, 1992. [曲焕林. 中国干旱半干旱地区地下水资源评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [5] Tang Qideng, Qu Yaogang, Zhou Yuchao. Hydrology and Water Resources Utilization in Chinese Arid Area [M]. Beijing: Science Press, 1992. [汤奇成, 曲耀光, 周聿超. 中国干旱区水文及水资源利用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [6] Tang Qideng, Xiang Yi. Chinese River Hydrology [M]. Beijing: Science Press, 1998. [汤奇成, 熊怡. 中国河流水文 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [7] Zhao Songbiao. Physical Geography in Chinese Arid Area [M]. Beijing: Science Press, 1985. [赵松乔. 中国干旱区自然地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [8] Qian Zhengying, Zhang Guangdi. Strategic Studies of Water Resources for Sustainable Development in China [M]. Beijing: Chinese Water Resources and Hydropower Press, 2001. [钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究(综合报告及各专题报告) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.]
- [9] Lu Yunxian. Cause and countermeasure to the DaShan Karst area [J]. Pearl River, 1995, (2): 17-19. [卢云祥. 独山喀斯特地区干旱的成因及对策 [J]. 人民珠江, 1995 (2): 17-19.]
- [10] Nie Feng. Opinion and countermeasure on how to change the water environment crisis in China northwest area [J]. Exploiture Research, 1998, (3): 44-46. [聂锋. 改变我国西北地区环境危机的对策与意见 [J]. 开发研究, 1998 (3): 44-46.]
- [11] Ma Jingzhu, Gao Qianzhao. Water resources and ecosystem of interior river basin in northwest area [J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 1998, 11 (4): 15-21. [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 [J]. 干旱区资源与环境, 1998, 11 (4): 15-21.]
- [12] Wang Genxu, Cheng Guodong. Water resources and ecosystem problem in China northwest area [J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14 (2): 109-116. [王根绪, 程国栋. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题 [J]. 自然资源学报, 1999, 14 (2): 109-116.]
- [13] Xia Jun. Gray relevant degree estimate method on regional water environment quality [J]. Hydrology, 1995, (2): 4-10. [夏军. 区域水环境质量关联度评价方法的研究 [J]. 水文, 1995, (2): 4-10.]
- [14] Huang G H, Xia J. Barriers to sustainable water quality management [J]. Journal of Environmental Management, 2001, 61 (1): 1-23.
- [15] Xia Jun, Takeuchi K. Barriers to sustainable management of water quantity and quality, guest editors for special issue [J]. Hydrological Science Journal, 1999, 44 (4): 503-505.
- [16] Chen J Q, Xia Jun. Facing the challenge: barriers to sustainable water resources development in China [J]. Hydrological Science Journal, 1999, 44 (4): 507-516.
- [17] Xia Jun, Wang Zhenqun. Eco-environment quality assessment: a quantifying method and case study in Ningxia, arid and semiarid region in China No. 272 [R]. IAHSS Press, 2001.
- [18] Xia Jun. A stochastic weather generator applied to hydrological model in climate impact analysis [J]. Journal of Theoretical and Applied Climatology, 1996, (1-4): 177-184.
- [19] Xia Jun, Xu Xinyi, Hu Baoqing. Sustainable Water Resources Management and Application [M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1999. [夏军, 许新宜, 胡宝清. 可持续水资源管理研究与实践 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1999.]
- [20] Xia Jun. The progress and perspective of hydrological science [J]. Science Foundation in China, 2000, 14 (5): 293-297. [夏军. 水文科学发展与思考 [J]. 中国科学基金, 2000, 14 (5): 293-297.]
- [21] Xia Jun. International Water Resources Study and Sustainable

Water Resources Management in Taimu River Basin, Water Resources, Environment and Management in Taimu River Basin [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998. 296-303. [夏军·国际水资源研究与塔里木河流域可持续水资源管理问题,塔里木河流域水资源、环境与管理[M].北京·中

国环境科学出版社,1998.296-303.]

- [22] Xia Jun. Prospect of sustainable water resources system management [J]. Advances in Water Science, 1998, 4(3): 190-197.
[夏军·可持续水资源系统管理研究与展望[J].水科学进展, 1998, 4(3): 190-197.]

THE PROGRESS AND PROSPECT OF WATER CYCLE STUDY IN WESTERN CHINA

XIA Jun¹, SUN Xue-tao², TAN Ge¹

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. General Office of the Ministry of Water Resources of P. R. C, Beijing 100053, China)

Abstract: The Western China Development is confronted with a quite serious and realistic problem on water resources because of the water cycle's district characteristics, the ecosystem's vulnerability and the increasing demand of water resources. Based on the traits and existent problem of water cycle in western China, the key scientific issues of water cycle in western China has been addressed in this paper. Meanwhile, the prospect of water cycle study in the 21st century is also been discussed. The key issues are as follows: In the northwest arid area of China, what are the evolution rules of water resources which are affected by the nature change and human activity? How much eco-demanded water should be distributed on the stand of the national macro stratagem in order to keep the balance of northwest area's ecosystem which is vulnerable in the conflict between nature and human beings? How large is the social economy scale, which can be supported by regional water resources? How to reasonably distribute and manage the water resources to maximum exert its potential capability to boost the sustainable development of this area.

Key words: West area development; Water cycle; Water resources; Sustainable development; China