

华北地区水资源及水安全问题的思考与研究

夏 军^{1,3}, 刘孟雨², 贾绍凤¹, 宋献方¹, 罗 毅¹, 张士峰¹

(1.中国科学院 地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101; 2. 中国科学院 石家庄农业现代化研究所,河北 石家庄 050021; 3.武汉大学 水资源与水电工程国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要: 结合中国科学院知识创新工程项目“华北地区水循环与水资源安全”的研究工作,论述华北地区紧迫的水安全问题与反思,展望国际水科学研究前沿与热点问题,介绍中国科学院在变化环境下的水循环、农业节水和水资源安全研究的阶段成果和近期研究行动计划,提出中国北方特别是华北地区的水文水资源科学研究与发展的几点建议。目的是研讨未来中国北方特别是华北地区水资源安全国家需求中的长远发展的前沿性问题。

关键词: 水循环; 水资源; 水安全; 华北地区; 变化环境

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1000-3037(2004)05-0550-11

1 华北地区紧迫的水安全问题与反思

华北在全国政治、经济和文化领域占有非常重要的地位,但又是水资源矛盾和环境问题十分突出的地区。据水利部门的估算^[1],海河流域多年平均水资源量约为 $419 \times 10^8 \text{m}^3$,人均水资源占有量 350m^3 ,不足全国的 $1/6$,世界的 $1/24$ 。目前,由于山区与平原径流明显减少和过量开发水资源,已造成了地下水漏斗、平原区河道干涸、湖泊湿地萎缩、地表和地下水污染等生态环境恶化问题,严重影响到该区水安全,并引起国家的高度重视。

由于华北地区的重要性,长期以来国家十分重视华北水资源研究,取得了一系列成果^[2-4],但由于华北水问题的复杂性,特别是环境变化以及社会经济的快速发展,目前华北缺水问题还没有真正解决,与水相关的水污染和生态环境问题越来越严重。究其原因,除了华北地区的社会经济的增长、人口压力大和环境变化之外,许多与生态环境问题相关的水科学应用基础与交叉学科的问题研究不够。国家在解决华北缺水和遏制严重的生态环境退化措施和对策方面,迫切需要深层次的应用基础研究的科学依据。这些问题不得不引起人们的反思。目前,华北水资源与水安全研究亟待解决的关键问题^[1-10]有以下几方面。

(1)山区来水减少的成因问题 山区集雨区是华北地区尤其是北京等大城市供水的重要水源地。但是,近 30 年来华北山区来水即水资源量严重衰减,造成华北地区日趋严重的水危机。以北京市供水水源地——密云、官厅水库为例,官厅水库 1955~1984 年间平均来水量

收稿日期:2004-01-09;修订日期:2004-05-12。

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-SW-317/CX10G-E01-08); 国家自然科学基金项目 (50279049, 50239050)。

第一作者简介:夏军(1954~),1985 年获水文学及水资源博士学位。1991 年任武汉大学(原武汉水利电力大学)教授,2000 年入选中国科学院“百人计划”、地理科学与资源研究所创新基地研究员,现任国际水文科学协会 (IAHS) 副主席,国际水资源协会 (IWRA) 副主席。E-mail: xiaj@igsrr.ac.cn

致谢: 该文是以作者们为骨干承担的中国科学院知识创新方向性项目阶段成果以及中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室针对中国北方水问题的方向性讨论的总结。除了论文作者,还有参加课题的其他成员和重点实验室的人员,在此一并表示感谢。

$11.3 \times 10^8 \text{m}^3$, 但 1985~1995 年平均来水量已衰减到 $2.7 \times 10^8 \text{m}^3$, 仅为前者的 1/4, 而两个时期的流域平均降水量却相当 (407.5mm)。密云水库来水减少的趋势也十分严重, 相比 1960~1979 年段, 1980~1997 年的平均来水量已减少了 $4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。近 5 年持续干旱, 山区水源地来水量的大量减少, 给城市和中下游地区的生态环境与社会经济发展带来极大的影响。目前, 亟需研究的问题是: 山区入库径流变化究竟是自然变化还是人类活动所为? 山区土地利用/覆被变化与流域水循环究竟有什么影响关系? 山区已修建的水利、水保工程, 究竟在山区来水大量减少的变化过程中起到什么样的角色? 如何认识它们的作用和水源地保护的关系? 这些问题过去研究较少, 其中内在的原因和机制不太清楚。

(2) 城市化地区水循环与地下水大漏斗问题 目前, 华北地区城市化发展比较快, 但是城市地区的地下水超采严重^[1,8], 已分别形成了以北京、石家庄、保定、邢台、邯郸、唐山为中心, 总面积达 $4.1 \times 10^4 \text{km}^2$ 的浅层地下水漏斗区, 其中 $1 \times 10^4 \text{km}^2$ 范围的含水层已疏干; 形成了以天津、衡水、沧州、廊坊等多个城市为中心、面积达 $5.6 \times 10^4 \text{km}^2$ 整体连片的深层地下水漏斗区。地下水枯竭直接威胁华北城市平原地区的安全用水储备, 引起了严重的地面沉降、海水入侵问题。但是, 以人类活动为主要特征的华北城市化水循环机理研究还比较薄弱, 严重滞后城市化经济发展。目前, 愈来愈迫切需要研究城市化进程中人口流动面临集中供水、水污染、地下水大漏斗等带来的城市生态环境问题。华北地区的地下水大漏斗主要集中在城市, 这与城市持续性超采的用水特性有关。但是, 浅层地下水与深层地下水的再生能力有很大的不同。如何认识城市地区浅层与深层地下水的变化机制? 如何认识城市集中供水、补水和浅层与深层地下水的水量水质变化以及它们之间的相互作用关系? 如何合理修复城市化地区深层地下水漏斗、防止地下水污染等是亟需研究的问题。

(3) 水污染和生态环境演变的历史与成因问题 华北地区特别是缺水严重的海河流域水污染引起的水安全问题十分突出。目前, 已由 20 年前的局部河段发展到全流域, 由下游蔓延到中上游, 由城市扩散到农村, 由地表侵入地下。据统计^[1], 近年来海河流域的废污水排放量每年高达 $60 \times 10^8 \text{t}$ 。官厅水库因水质恶化, 被迫于 1997 年开始退出生活供水。流域内每年还引用 $20 \times 10^8 \text{m}^3$ 污水进行灌溉, 对浅层地下水、土壤和农作物造成污染。由于缺水引起的生态环境问题突出, 多数中下游河道枯竭断流, 土地退化、湿地萎缩十分严重。据统计^[1], 总长 $1 \times 10^4 \text{km}$ 的河长中, 有 4 000km 河道干涸。海河流域内 194 个 667hm^2 以上天然湖泊、洼淀现多已干涸。入海水量由 20 世纪 50 年代的年均 $240 \times 10^8 \text{m}^3$ 锐减为 2001 年的 $10 \times 10^8 \text{m}^3$, 造成河口自然生态遭到破坏, 河口海洋生物大量灭绝。人们不得不反思华北地区水污染和生态环境过程演变的历史与自然变化和人类活动的关系。究竟怎样看待华北地区水安全中的水资源数量缺乏与水体污染之间的联系? 如何认识人类活动包括 20 世纪 60 年代在海河流域建设的大型水利工程对华北持续干旱面临的水生态环境变化的影响与作用? 如何协调防洪、缺水和生态环境保护的矛盾的宏观对策与措施问题? 目前仍然存在相当大的争议。

(4) 社会经济转型过程中的“生活—生产—生态”用水需求规律问题 华北地区在全国的重要地位及其气候与水文条件, 决定了该地区水资源的矛盾与冲突。从现在起到 2030 年人口高峰的未来 20 多年间, 该流域除京津和一些特大城市外, 绝大部分地区仍处于以工业化为特征的经济快速增长和城镇化加速发展阶段, 其生产、生活和生态需水量也将相应地增长, 如不及时采取相应措施, 必将使“三生”需水量与水资源承载力之间出现严重的不适应状况, 最终有可能导致流域内生态环境系统受到进一步破坏。海河流域作为资源型缺水流域, 为了满足全流域“三生”需水量不断增长的需求, 并逐步恢复受损的水生态环境, 除了采取必要的调水措施外, 必须建立水资源节约型的经济社会体系, 科学合理地测算“三生”用水需求量是问题的关键之一。目前, 值得思考的是: 华北地区现状条件相适宜的节水型“三生”用水应该是什么样的结构与布局? 在社会经济转型过程中华北地区的“三生”用(耗)水会将发生什么的变化? 如何估算华北地区的“三生”用(耗)水, 尤其是华北地区生态需水问题?

(5)流域生态环境承载力与可持续发展问题 华北地区缺水以及与水相关的生态环境恶化是国家关注的重要问题。21世纪的战略目标是既要维系良好的生态环境,经济社会还要有更大的发展。那么,以水、土自然资源支撑为基础,与流域生态环境和经济社会发展联系的基本限制因素与阈值是什么?因此,提出了“生态环境承载力”新的问题。生态环境承载力实际上是指变化环境下流域水、土等各种生态环境要素共同作用的支撑能力。它是以水循环为纽带的流域“生态—社会—经济”系统高层次承载能力的量度,其中最主要的生态环境要素是水资源、土地资源和水环境3个方面。所以,生态环境承载力亦称为流域综合承载力。度量流域的生态环境承载能力,需要分析流域水资源承载力、土地资源承载力和水体允许的纳污能力(水环境容量)多个层面的主导因子;需要集成3个方面的相互影响,识别起决定性作用的影响部分,最后在生态环境系统的更高层面上,综合确定生态环境承载能力的阈值。一个流域的生态环境承载能力的最终确定,符合“水桶原理”,即总的承载能力由承载能力最小的那个要素(正如水桶的容量由最低的那块木板)决定。这是它与水资源承载力、土地承载力与水环境容量之间的联系与区别。目前,需研究的问题是:如何量化流域生态环境承载能力?如何在生态环境承载能力的制约下,通过节水、调水和调整地区的产业结构,化解日趋严峻的缺水与生态环境恶化的矛盾?如何根据不同时期经济社会发展的要求与承载力的约束,合理配置水资源,制定适宜的经济社会发展模式?通过调整经济增长速度、城镇化进程、产业结构、经济的区域布局,以及倡导可持续的生活方式,谋求华北缺水地区的经济社会和环境保护的协调发展。

2 国际水科学研究与展望

20世纪90年代后,国际有关组织实施了一系列水科学计划,如国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际水文计划(IHP)等。目的是从全球、区域和流域不同尺度和交叉学科途径,探讨变化环境下的水循环及其联系的水资源安全问题^[11-16]。

国际地圈生物圈计划(IGBP)代表国际地球科学发展前沿,水文循环的生物圈方面(简称BAHC)是IGBP的核心之一。前沿问题有:水文循环与生态系统的相互作用、水与土地利用/覆被变化、水资源可持续利用与水安全等。

进入21世纪后,IGBP-BAHC针对全球变化和水资源问题,于2003年开始一项跨四大国际计划(IGBP-WCRP-IHD-DIVERSTAS)的联合研究项目:全球水系统计划(The Global Water System Project, GWSP)与联合水研究计划(Joint Water Project, JWP)。重点研究人类引起的在全球日益显著变化的水循环与环境 and 资源问题。

2001年7月在荷兰举办了由IGBP、WCRP和国际人文计划(IHDP)联合举办的“全球变化科学大会”。其两大主专题是:①一个不断变化的地球的挑战;对全球变化的科学理解;②展望未来:地球系统科学与全球可持续性。

2001年在荷兰还举办了第六届国际水文科学大会(IAHS)。其热点问题是:①环境变化与水文循环问题;②人类活动对水循环水资源演变的影响。

2002年7月11~18日,在瑞典的斯德哥尔摩召开了每年一度的世界水周(World Water Week)。主题是:平衡竞争的水资源使用。它是可持续发展基本的需求。

2003年3月在日本召开了“第三届世界水论坛及部长级会议”。论坛的议题:水与气候,供水、卫生与水污染,水与文化多样性,水与能源,水、粮食与环境,水与和平,水、自然与环境,水与城市,水与信息,地下水,防洪,水与行政管理,水与贫困,水资源统一管理 with 流域管理,水、教育与机构能力建设,大坝与可持续发展。发表了由世界水理事会组织的《世界水行动》计划;发表了由联合国教科文组织具体组织的《世界水资源评价》第一部分成果;召开“水、粮食和农业”部长级会议。

2003年10月6~9日在西班牙马德里举行了主题为“21世纪水资源管理”的第十四届国

际水大会(XIV WORLD WATER CONGRESS)。大会主题是:不确定性、气候变化、变异影响下的水规划;水的价值;新技术在水资源管理的影响;地下水开发的适宜性与可持续性;水的基础开发建设;社会经济、文化和宗教对水资源政策的影响;水管理的参与。

从国际水科学研究发展趋势看,变化环境的水循环和水安全研究是当今国际水科学前沿问题,是人类社会经济发展活动对水资源需求所面临的新的应用基础科学问题,而水资源供需平衡破坏带来的用水基本需求得不到满足、生态用水被挤占、工农业城市发展水的需求矛盾,使得水安全成为资源与环境科学领域国内外突出的研究课题^[16]。

3 中国科学院近期研究计划与行动

自 20 世纪 60 年代以来,中国科学院地理科学与资源研究所等单位不断加强以在禹城综合农业实验站、栾城农业生态实验站等为代表的华北水资源农业生态实验基地建设^[17,18]。在 20 世纪 80 年代主持国家重大项目“黄淮海平原中低产地区综合治理和综合开发研究”等。在“九五”期间开展了中国科学院重大项目“中国华北水资源变化与调配”以及相关的多个研究项目与课题。特别是 2001 年后,在中国科学院知识创新重要方向性项目中,支持了“华北地区水循环与水资源安全”研究。项目总目标是:抓住 21 世纪华北水资源研究 3 个关键性问题,即自然变化和人类活动影响下的水循环、农业节水和水资源安全,开展科学院知识创新工程中该重要方向的科学研究。项目主要研究内容:变化环境下的华北地区水循环研究;华北平原农田耗水机理及节水潜力与技术研究;华北地区可供水量与水资源安全研究。拟重点解决的科学问题:华北地区土地利用/土地覆被变化与流域水循环之间的影响关系,变化环境下的流域水循环分布式量化模拟;节水措施对农田 SPAC 系统的蒸散发过程、变化规律影响机理,农田节水潜力评价;符合可持续发展 and 市场经济原则的水资源安全评价体系的建立,市场经济下和社会经济转型过程中水资源供给和需求的变化规律。其研究的基本思路是:

(1)在水循环研究方面,重点探讨华北地区以“自然—都市化”和“自然—农业化”为基本特征的水循环问题。通过海河水系的子牙河典型流域(农业平原区)和潮白河典型流域(密云水库供水水源地)水循环实验平台建设和在认识其变化特征的基础上,建立自然变化和人类活动影响下的分布式水循环模型,定量分析流域上游“入库径流减少”与农业平原区“土壤水—地下水”时空变化的影响,为认识华北地区水资源的变化、水资源可利用量测算、生态需水与水安全等提供科学依据。

(2)在华北平原农田耗水机理及节水潜力与技术研究方面,以中国科学院栾城、禹城农业生态实验站为依托,系统研究华北平原农田耗水过程、节水措施对农田 SPAC 系统水热传输影响的生理生态基础、灌溉水高效利用的节水调控机制与模式、农田节水潜力,形成应用上可行的综合节水配套技术及不同区域的节水模式,大幅度提高农田水分利用效率,降低地下水开采,缓解地下水位下降趋势,为最终实现地下水位下降的“零增长”做出贡献。

(3)在华北地区可供水量与水资源安全研究方面,提出在可持续发展原则下的生态需水量和社会经济用水的配置原则,预测未来 30 年华北地区水资源可利用量、总供水量的变化趋势,研究产业结构调整、城市化、新的水权水价制度对水资源需求的作用,综合研究华北地区的节水潜力;建立水资源安全评价的理论、方法与指标体系,对华北地区水资源安全程度与脆弱性进行评估,提出水资源安全对策。

通过项目的研究,推动我国资源与环境学科水循环水资源安全知识创新,推动中国科学院战略方面军为国家需求目标服务的能力与水平,培养出一批优秀人才队伍,为华北地区社会经济可持续发展、水资源的可持续利用以及环境保护的国家战略目标服务。

目前,科学研究取得了阶段性成果,表现在下列几方面:

(1)以华北典型流域为对象,通过建设与集成已经初步形成了有自己特色的流域水循环实验基地与研究平台,取得初步实验成果(图 1)。它们是华北山区潮白河水系实验流域(东

台沟、小苍峪和怀沙河),丘陵地区的大清河崇陵实验流域和华北农业平原区子牙河流域(太行山石门流域—山前平原地区栾城实验站—海滨地区南皮实验站)。通过流域水循环实验以及同位素水文学方法等获得第一手资料。



图1 华北地区典型流域水循环实验基地与站网建设示意图

Fig.1 Scheme of hydrological experiment basins in North China

例如,在潮白河东台沟实验流域,通过两个小流域比较研究,可以分析土地利用/覆被变化,特别是水保工程对入库水量变化的影响。2003年7月19日,流域降水量22.4mm,历时0.45h,平均雨强50mm/h,最大雨强为1.84mm/min。无水保措施的天然流域产流18.5mm,径流模数为 $1.85 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}$,最大流量达 $0.038 \text{m}^3/\text{s}$,并冲下泥沙、枯枝落叶物约1.5t,侵蚀模数为 $8.8 \text{t}/\text{km}^2$ (图2);而对应的有水保工程的比较流域在整个降雨期间地表无产流。这说明水土保持工程对流域产流影响显著,既减少了水土流失,同时也减少了地表径流,这也是入库径流减少的重要原因之一。

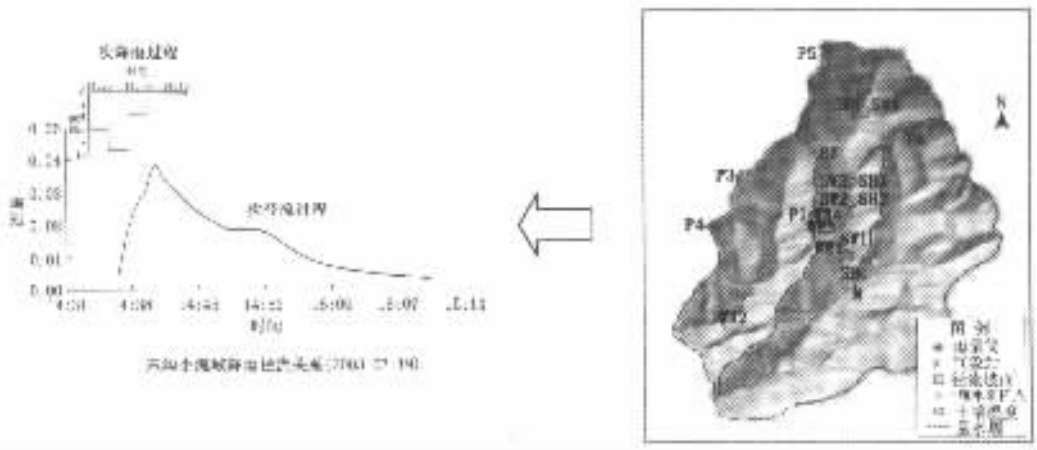


图2 华北地区东台沟比较流域与水文观测过程示意

Fig.2 Scheme of observed hydrological process in the comparative basins of Dongtaigou in North China

又如,在华北平原的栾城和南皮实验站地下水测井的观测表明,地表埋深 2m 以内的土壤水势变化和降雨入渗补给过程变化比较复杂,为土壤水强变动带,土壤水势可以从-400mm 水柱变化到-1 200mm 水柱,土壤含水量可由 10%变化到 39%。3m 以上土壤水随深度变化过程的离差逐渐变小。这说明在大埋深条件下,土壤水在水量转化和农作物耗水中起到关键的作用。在华北平原水资源研究中,如何认识土壤水资源的的作用是一个关键的问题。

(2)积极开展流域分布式水文模拟平台建设。发展流域水文非线性系统理论,提出了流域分布式时变增益水文模型(DTVGM)及其在潮白河流域应用的成果^[19,20]。特色是:建立在 GIS/DEM 的基础上,通过 GIS/RS 提取陆地表面单元坡度、流向、水流路径、河流网络、流域边界和土地覆被等信息;将单元非线性时变增益(TVGM)水文模型拓宽到由 DEM 划分的流域单元网格上,进行非线性产流计算,并利用 DEM 提取出的汇流网络进行分级网格汇流演算;在流域蒸散发、河流汇流计算充分利用物理模拟的途径,从而得到流域水循环要素的时空分布特征以及流域出口断面的流量过程。DTVGM 是一种“水文循环机理—系统理论”相结合的研究途径,有比较好的理论与实用性,可定量模拟和分析土地利用/覆被变化(LUCC)、水利工程对入库径流变化的影响和降水变化对水文过程的影响。进一步,建立华北平原区地下水—地表水集成系统模型(SWAT/MODFLOW)以及海河流域大尺度陆面水文模型(图 3)。

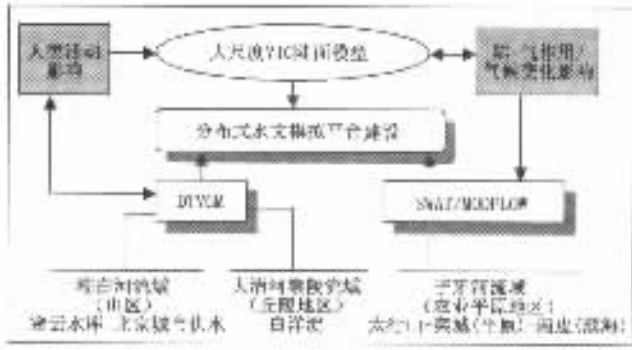


图 3 华北地区不同尺度水文模型与集成系统

Fig.3 Scheme of integration of hydrological models in different scales in North China

(3)在华北禹城、栾城实验站,建立了先进标准的作物水分关系实验场和功能相对完善的土壤水分物理研究实验室;田间实验获取了大量的一手资料。建立了黄河下游潘庄灌区引水、气象、土壤、作物等的空间数据库。利用基础实验研究基地,开展了冠层温度的作物水分亏缺研究,获得适合华北平原冬小麦的最小冠层阻力以及不同生育期的水分亏缺诊断指标体系。在作物根系吸水模型研究方面,提出考虑根系密度分布影响关系。改进后的根系吸水模拟较国际权威的 Feddes 模型提高了精度 7%以上。在作物节水的生理生态机理认识方面,发现品种间水分利用效率(WUE)存在差异,品种 WUE 的差异可达 15%~20%(图 4),建立了

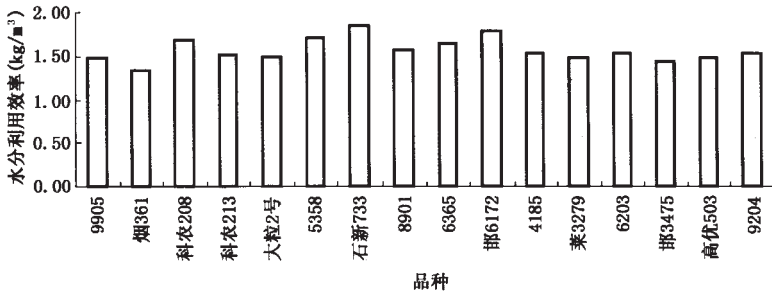


图 4 华北平原 16 个品种冬小麦之间存在明显水分利用效率差异(2002~2003 年)

Fig.4 Difference of water use efficiency observed in sixteen winter wheat breeds (2000~2003) in North China

冬小麦的 WUE 与 5 个因子的相关性关系:①光合速率;②功能叶片的比叶重;③功能叶片的蒸腾强度;④旗叶蜡质含量;⑤收获指数。进一步提出了抗旱节水评价关系。

在作物调亏灌溉研究方面,提出了冬小麦越冬和返青起身及灌浆后期是最佳控水时期;适度进行亏缺灌溉不会造成减产, WUE 提高 8%~13%;优化灌溉制度可减少灌水 60~120mm。

在节水耕作制度研究方面,认为秸秆覆盖具有明显的节水保墒效果(减少地表蒸发 20~35mm),提高作物 WUE (8%~13%);实现冬小麦和夏玉米秸秆全程机械覆盖,正常年分节约 1 次灌溉水量(60~80mm);少耕免耕也具有明显的节水和节能效果,但田间管理要配套。

表 1 不同耕作措施对冬小麦水分利用率的影响

Table 1 Impact of different farming practices on winter wheat water use efficiency

处理	土壤耗水(mm)	降雨量(mm)	灌溉量(mm)	总耗水(mm)	产量(kg/hm ²)	$WUE(kg \cdot mm^{-1} \cdot hm^2)$
深耕	73.76	133.8	222.8	430.4	21.27	0.049
旋耕	35.34	133.8	222.8	391.9	25.67	0.065
粉碎免耕	46.54	133.8	147.8	328.1	17.71	0.054
全免耕	-47.11	133.8	147.8	234.5	15.73	0.067

(4)在节水技术与区域节水模式研究方面,在井灌区建立了 5 种节水模式,即:模式 1:农艺节水模式(基本模式:灌水 3~4 次,小麦 2~3 次,玉米 1 次);抗旱节水品种+少耕覆盖+调亏灌溉制度;模式 2:工程农艺节水模式 1(简易模式):低压软管输水+基本模式;模式 3:工程农艺节水模式 2(一般模式):地下管道+闸管小白龙+基本模式;模式 4:工程农艺节水模式 3(通用模式):间深松蓄水技术+一般模式;模式 5:综合节水模式(综合模式):管道输水+喷灌+基本模式。这几种节水模式得到推广应用,减少用水 60~150mm,水分利用效率提高 20%~30%。通过模式的应用可减少当地地下水位下降速度 33%。在缺水盐渍区提出的“花红草绿”节水模式,在节水的同时,产生了明显经济效益。研究表明,农业节水潜力还是可观的(图 5)。在华北地区全面推行农业综合节水技术与模式,维持目前粮食总产的基础上,可节水 $80 \times 10^8 m^3$ 。通过结构调整、优化种植结构,缩减耗水量大的作物种植面积,增加耗水量少、经济效益好的作物种植比例,也是充分发挥节水效益的一个重要措施。对栾城县的分析表明,通过优化种植结构,可以达到每年减少农业供水 $0.454 8 \times 10^8 m^3$,经济效益增加 27%,具有明显的增收节水效果。

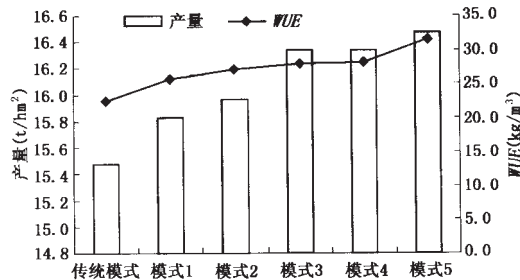


图 5 华北平原不同节水模式的产量和水分利用效率比较

Fig.5 Comparison of different water-saving models and water use efficiency in North China

(5)针对华北地区水资源安全问题,提出评价体系、对策与建议。水资源安全是指“在满足生态用水前提下,以可承受的价格,为居民生活和工业、农业、服务业生产提供符合水质要求的供水”。水资源安全评价层次与体系包括:社会安全,即人人都有安全的生活用水;经济安全,即水资源能够满足经济发展的正常需求;生态安全,即维持生态系统良性循环保证的最低水量。水资源安全的对策有:利用宣传教育、行政管理、经济刺激等手段,控制水资源的供给和需求,达到水资源满足社会经济合理需求的目的。在供水开源方面:除了南水北调、污

水和雨水利用,值得重视的是海水利用,应把海水利用作为保障华北水资源安全的一项战略措施。在节流方面,控制水资源需求的具体途径有:①各个行业内部提高用水效率、降低用水定额;②通过产业结构调整,压缩高耗水行(企)业、发展低耗水行(企)业,提高整个经济系统的用水效率;③对生活用水,良好的用水习惯等非技术性方法可以减少水资源浪费;④推广生活用水节水技术以减少生活用水量。总的观点:水污染治理是华北水资源安全的首要任务。由于华北地区常规水资源供给有限,即使考虑南水北调工程实施后增加的供水量,总的水资源供给还是很有限的。所以,华北地区水资源安全对策的重点应该是加强以节水和减少水污染为重点的水资源需求管理和非规水资源的供给潜力。

4 展望与建议

水文循环是联系地球系统“地圈—生物圈—大气圈”的纽带,是认识地球系统自然科学规律的重要方面。国际地圈生物圈计划代表国际地球学科发展前沿,其中除了碳循环外,21世纪核心的科学问题就是水循环和食物纤维问题。水资源问题直接关系到国计民生和社会经济可持续发展的基本需求,水资源的时间与空间变化又直接取决于水文循环规律的认识。因此,陆地水文水资源学科在地球系统和地理学科占据十分重要的地位。

长期以来,华北地区高强度的人类活动和社会经济发展与生态环境之间总是存在不可避免的冲突,尤其是近50年来水资源的需求矛盾愈来愈突出。有否二者共享的协调途径呢?从宏观的战略方面,可持续发展的理念为解决这对矛盾提供了准则,生态经济学的价值观为构建有利于华北地区自身环境的经济发展提供了实现可持续发展模式的可能。在未来的几十年内,随着对华北水资源以及与水相关的生态环境修复问题深入研究,可望在水循环基础研究、水生态环境演变及社会经济用水研究和综合集成模拟、调控与修复对策研究3个层面上有所进展。针对中国北方特别是华北地区的水文水资源科学研究与发展的几点建议:

(1)流域生态水文学研究:陆面植被及生境系统与水的关系极为密切,尤其是在我国北方半湿润、半干旱地区,水成为生态系统品质好坏的主要限制因子。目前,我国北方出现的河道断流、干涸,在很大程度上与人类活动如覆被变化和堤坝建设等有关。诸多现象表明,下垫面变化可增强局地水分小循环而减弱区域水文大循环,改变了水文循环的方向与速率,并影响到水量平衡各要素间的数量关系,进而影响到流域产水量和水资源评价。流域生态水文过程研究正是基于上述原因,以流域为平台,以下垫面变化、植被与水的关系为核心,通过水文过程监测,研究下垫面变化是如何影响到水文循环的各个环节,其相互作用关系及响应时间与强度等。主要内容为“土壤—植被—大气”(SVAT)界面过程研究;山坡水文过程影响机理试验研究;流域水量转化模式与量化研究;应用遥感技术进行流域植被参数化与流域蒸散发计算;土壤水变化与植被的相互作用机理研究;水利工程建设与水文变化;流域生态水文模型的研制;植被与水互馈作用的尺度效应研究;土地利用/覆被变化的流域水文过程响应的情景分析。

(2)流域物质迁移过程:流域物质迁移,是指以水循环为载体的物质迁移,包括泥沙、元素(C、N、P等)、化学物质(营养盐、污染物)的迁移。我国黄河等以多沙河流著称于世,长江等河流的泥沙问题也日趋严重。土壤侵蚀、土地退化和由此引起的河道、湖泊淤积,不但直接影响到径流的水质,而且也影响流域对径流的调节能力。因此,在流域水循环的体系中,必须研究水循环与泥沙循环的耦合关系,研究水与泥沙的相互作用。将以水循环为载体的各种形式的物质迁移统一在流域系统的框架中,建立有中国特色的水与物质循环理论。热点问题包括:流域系统中水沙、化学物质的耦合与相互作用;变化环境中的流域物质迁移过程;入海泥沙通量和元素通量(C、N、S、P)对全球气候变化和人类活动的响应;中国大江大河泥沙灾害的形成机理与防治。

(3)潜在水资源综合利用与替代途径:我国水资源紧缺,随着迅速发展的工业化和城市

化,水资源紧缺的矛盾将更加突出。农业是水资源的最大用户,农业水资源利用效率的高低直接影响到水资源可持续利用和整个国民经济的持续发展。因此,必须将农业水资源的高效利用与替代途径纳入到国家的中长期科技战略规划。内容包括:不同土地利用/土地覆被、不同作物结构、不同灌溉技术条件下农田水分养分运移规律、作物耗水规律、水肥耦合过程、农田水分养分循环过程等;农业水资源高效利用新理论、新技术,雨水和土壤水高效利用作物耕作制度,农业水资源高效利用新管理模式、新政策体系,农业水资源高效利用相关的决策支持系统等;盐水(陆地苦咸水和海水)资源安全高效利用技术和处理技术,污水(包括再生水)资源安全高效利用技术和处理技术;污水灌溉及其对水环境影响的研究;雨水资源化及雨水高效利用技术;洪水资源化与利用;海水淡化及其它技术的利用。

(4)水资源需求规律研究:在我国水安全研究中,生产、生活与生态系统对水资源需求的规律研究是一个热点问题。水资源需求规律及其预测研究对正确制定水资源开发利用战略具有重要意义。经验证明,过去的水资源需求预测往往偏大,造成了一些供水工程规模偏大和浪费。这说明我们对水资源需求规律还没有完全掌握。生产生活需水随社会经济发展水平提高的变化规律并不像人们想象的单调上升,而是可能上升也可能下降,值得深入探讨。随着可持续发展理念的深入人心,生态需水的重要性日益突出,对生态需水规律认识也需要加强。研究内容为:水权水价影响水资源需求的规律;产业结构升级对水资源需求的影响;城市化对水资源需求的影响;水资源需求随人均GDP上升的变化规律;生态需水观测与不同尺度的生态需水估算;水资源需求管理制度与方案设计

(5)水文模型与流域综合管理:流域是自然水循环的基本单元,也是水资源开发利用、水环境保护和水资源合理配置和高效利用的基本系统。气候变化以及人类活动对流域水循环过程影响的响应规律和机理,包括流域水文—生态过程、水沙过程以及随水迁移的点源与非点源污染物质的输移、扩散和化学过程、土壤侵蚀与输移过程的规律和机理,是国际水文科学研究的前沿和热点。流域水文模型为定量模拟提供了分析工具和操作平台。在我国,水资源管理水平与发达国家相比还有很大差距,缺水、水污染、洪涝灾害以及水土流失仍然非常严重,尤其中国的北方地区。流域综合管理是水资源可持续利用的手段和保证,是解决我国水问题特别是北方水危机的有效途径,有很大的国家需求。流域综合管理模型可进行不同需水管理的情景分析,为解决国家水问题提供科学依据。目前,亟待研究和解决的科学问题有:考虑气候变化和土地利用覆被变化影响的流域水循环分布式模型;考虑面源污染的陆地表层过程的“水文—生态—水环境”综合模拟模型;生产、生活、生态共享的流域综合管理模式;现状与未来水资源开发利用工程、土地利用变化、城市化对流域水循环和水资源的影响机理;产业布局与产业结构的调整、水价政策等对水资源需求影响;清洁生产、节水工艺技术推广等需水管理措施对水资源需求影响;潜在水资源(雨水、微咸水、海水、污水回用等)利用潜力分析;变化环境下流域综合管理不同情景与响应对策分析。

通过制定满足国家需求和长远发展的水文水资源方面前沿性研究课题,通过科学院和国家的支持,渴望达到国内领先、国际先进、部分国际领先的战略目标。

参考文献 (References) :

- [1] 王志民,任宪韶,郭宏宇.面向21世纪的海河水利[M].天津:天津科学技术出版社,2000.[WANG Zhi-min,REN Xian-shao, GUO Hong-yu. Haihe Water Resources Facing the 21st Century. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press,2000.]
- [2] 施雅风.华北地区水资源合理开发利用[M].北京:水利电力出版社,1990.[SHI Ya-feng. Rational Exploitation and Use of Water Resources in North China. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press,1990.]
- [3] 刘昌明,魏忠义.华北平原农业水文及水资源[M].北京:科学出版社,1986.[LIU Chang-ming,WEI Zhong-yi. Agricultural Hydrology and Water Resources in the North China Plain. Beijing: Science Press,1986.]
- [4] 许新宜,王浩,甘泓.华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,1997.[XU Xin-yi,WANG Hao,

- GAN Hong, *et al.* Theory and Approach to Macroeconomic Water Resources Planning in North China. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press,1997.]
- [5] 陈志恺.持续干旱缺水对华北平原生态环境的严重影响[A].中国工程院第六次院士大会学术报告文集[C].2002.90~97. [CHEN ZI-kai.The serious impact of the lasting drought and water shortage on eco-environment of the North China Plain. In: Proceedings of the Sixth Academician Conference of Chinese Academy of Engineering.2002. 90~97.]
- [6] 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.[QIAN Zheng-ying,ZHANG Guang-dou.Strategic Studies of Water Resources for Sustainable Development in China, vol. 1 . Beijing:China Water Resources and Hydropower Press, 2001.]
- [7] 陈志恺.管好、用好、保护好有限的水资源[J].水问题论坛,1996,(2):2~7. [CHEN Zhi-kai.Management, utilization and protection of the limited water resources. *Water Problems Forum*,1996,(2):2~7.]
- [8] 陈梦熊,马凤山.中国地下水资源与环境[M].北京:地震出版社,2002. [CHEN Meng-xiong,MA Feng-shan.Groundwater Resources and Related Environments in China. Beijing: Earthquake Press,2002.]
- [9] 吴凯,唐登银,谢贤群.淮海平原典型区域的水问题和水管理[J].地理科学进展,2000,19(2):136~141.[WU Kai, TANG Deng-yin, XIE Xian-qun.Water resource and management in the typical regions of the Huaihai Plain.*Progress in Geography*,2002,19(2):136~141.]
- [10] 夏军.华北地区水循环与水资源安全:问题与挑战[J].地理科学进展,2002,21(6):517~526.[XIA Jun. A perspective on hydrological base of water security problem and its application study in North China.*Progress in Geography*,2002,21(6): 517~526.]
- [11] Rodda J. Whither World Water? [J] *Water Resources Bulletin*, 1995,31(2).
- [12] IWRA.Proceedings of XI World Water Congress[C]. Madrid,Spain:5~9 October, 2003.
- [13] World Water Council. World Water Vision 2025 [M].London,UK:Earthscan Publications Ltd.,2000.
- [14] 夏军.水文学科发展与思考[J].中国科学基金,2000,14(5):293~297.[XIA Jun.Development and thought on hydrological science.*China Science Fund*,2000,14(5):293~297.]
- [15] XIA Jun,K Takeuchi.Barriers to sustainable management of water quantity and quality[J].*Hydrological Science Journal*(Special Issue),1999,44 (4):503~505.
- [16] 夏军,谈戈.全球变化与水文科学新的进展与挑战[J].资源科学,2002,24(3):1~7. [XIA Jun,TAN Ge. Hydrological science towards global change: progress and challenge. *Resources Science*, 2002,24(3):1~7.]
- [17] 左大康,等.华北平原水量平衡与南水北调研究文集[C].北京:科学出版社,1985.[ZUO Da-kang, *et al.* Proceedings of Water Balance and South to North Water Transferring in North China Plain. Beijing: Science Press,1985.]
- [18] 刘昌明,何希吾,等.中国 21 世纪水问题方略[M].北京:科学出版社,1996.[LIU Chang-ming,HE Xi-wu,*et al.*China's Water Problems and Strategies in the 21st Century.Beijing:Science Press,1996.]
- [19] 王纲胜,夏军,谈戈.潮河流域时变增益分布式水循环模型研究[J].地理科学进展,2002,21(6):573~582.[WANG Gang -sheng,XIA Jun, TAN Ge.A research on distributed time variant gain model: A case study on Chaohe River Basin. *Progress in Geography*,2002,21(6):573~582.]
- [20] 夏军.水文非线性系统理论与方法[M].武汉:武汉大学出版社,2002.11.[XIA Jun. Hydrologic Nonlinear System Theory and Approach. Wuhan:Wuhan University Press,2002.11.]
- [21] 陈家琦,王浩.水资源学概论[M].北京:中国水利水电出版社,1996.1~6. [CHEN Jia-qi, WANG Hao.Conspectus of Water Resources. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press,1996.1~6.]
- [22] 李秀彬.土地利用变化的解释[J].地理科学进展,2002,21(3):195~203. [LI Xiu-bin. Explanations for land use change. *Progress in Geography*,2002,21(3):195~203.]
- [23] 陈家琦.现代水文学发展的新阶段——水资源水文学[J].自然资源学报,1986,1(2):46~53.[CHEN Jia-qi. The new stage of modern hydrology—Water resources hydrology. *Journal of Natural Resources*,1986,1(2): 46~53.]
- [24] 王礼茂,郎一环.中国资源安全研究的进展及问题[J].地理科学进展,2002,21(4):333~340. [WANG Li-mao, LANG Yi-huan. Progress and problems in Chinese resources security research. *Progress in Geography*,2002,21(4):333~340.]

- [25] 张国良.21 世纪中国水供求[M].北京:中国水利水电出版社,1999.[ZHANG Guo-liang.Water Supply and Demand in China in the 21st Century. Beijing:China Water Resources and Hydropower Press, 1999.]
- [26] 杨晓光,陈阜,宋冬梅,等.华北平原农业节水实用措施试验研究[J].地理科学进展,2000,19(2):162~166. [YANG Xiao-guang,CHEN Fu,SONG Dong-mei,*et al.*Experimental studies on practical measures for agricultural water saving in the North China Plain. *Progress in Geography*,2000,19(2):162~166.]
- [27] 傅国斌.引黄灌区节水灌溉分区与节水途径初探[J].地理科学进展,2000,19(2):167~172. [FU Guo-bin Water-saving irrigation regionalization and water-saving measures in the irrigation districts of the Huanghe River basin.*Progress in Geography* 2000,19(2):167~172.]
- [28] 金凤君.华北平原城市用水问题研究[J].地理科学进展,2000,19(1):17~24. [JIN Feng-jun. The study on urban water supply and consumption of North China Plain. *Progress in Geography*,2000,19(1):17~24.]
- [29] 贾绍凤.工业用水零增长的条件分析——发达国家的经验[J].地理科学进展,2001,20(1):51~58. [JIA Shao-feng. The linkage between industrial water use decrease and industrial structural upgrade—Experience of developed countries. *Progress in Geography*,2001,20(1):51~58.]
- [30] 傅肃性,张崇厚,曹桂发.南水北调西线工程与区域持续发展[J].地理科学进展,1997,16(2):32~39. [FU Su-xing, ZHANG Chong-hou,CAO Gui-fa.West-line project of water transferring from south to north and regional sustainable development. *Progress in Geography*,1997,16(2):32~39.]
- [31] 张岳.中国水资源与可持续发展[M].南宁:广西科学技术出版社,2000.[ZHANG Yue. Water Resources and Sustainable Development in China. Nanning: Guangxi Science and Technology Press,2000.]

Water security problem and research perspective in North China

XIA Jun^{1,3}, LIU Meng-yu², JIA Shao-feng¹, SONG Xian-fang¹, LUO Yi¹, ZHANG Shi-feng¹
(1.Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences & Natural Resources
Research,CAS, Beijing 100101, China; 2.Shijiazhuang Institute of Agricultural Modernization,CAS,
Shijiazhuang 050021, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower
Engineering Sciences,Wuhan University,Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper addresses the emergency water security problems in North China in terms of the researches on water cycle and water resources security supported by the Key Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences.Development of international research related to water issue is also reviewed.Moreover,research program and advances on water cycle to the changing environment,water-saving agriculture,and countermeasures of water security in North China are introduced.The key issues and suggestions of this research in the future are proposed.The aim is to approach key issues of water resources management and water security in the long terms development of North China.

Key words: water cycle; water resources; water security; North China; environmental change