

水文水资源系统对气候变化的响应

沈大军

(中国水利水电科学研究院 北京 100044)

刘昌明

(中国科学院地理研究所 北京 100101)

摘 要 分别从水文系统的降水、蒸发、径流和土壤水分及水资源系统供水、需水和水资源管理等方面综述了区域水文水资源对气候变化的响应,提出了作者的看法。

自从工业革命以来,由于人类改造自然界的能力日益增强,使大气中 CO_2 及其它温室气体的浓度大幅度上升,导致温室效应,使全球气候变暖,对天气系统、生态系统及水文水资源系统等带来重大的影响。

关键词 气候变化 水文响应 水资源管理

分 类 中图法 P33

1 区域水文系统及水文情势对气候变化的响应

气候变化对区域水文系统的影响主要通过温度和降水变化对各主要水文要素产生直接或间接的影响。

(1) 降水。降水是一切水资源的总来源。气温升高将使水文循环更加激烈,导致更多的蒸发和降水,引起某些地区严重的干旱和暴雨^[1]。根据 IPCC 1990 的报告,若温度升幅越大,降水量增加越多。各 GCM 模拟结果表明,至 2050 年,在 $2 \times \text{CO}_2$ 条件下,全球平均降水将增加 3% ~ 15%,其中高纬度地区全年降水都增加,中纬度地区冬季降水增加,热带地区的平均降水量增加(尽管部分地区降水减少),亚热带干旱地区的变化较小。

NCARGCM 的输出结果表明^[2],在 $2 \times \text{CO}_2$ 下,中国东部是全年降水增值区,中部为减值区,西部为增值区。东北地区年均降水将增加 200 mm ~ 400 mm。华北东部、江淮中下游东部沿海地区年均降水将可能增加 200 mm ~ 800 mm。黄土高原、四川盆地和云贵高原一带约减 0 mm ~ 600 mm。西北广大地区,除陕西和甘肃东部外,年降水量增加约 100 mm ~ 200 mm; 青藏高原降水也增加,幅度为 200 mm ~ 400 mm。

另外,区域气候模型研究的 $2 \times \text{CO}_2$ 下加利福尼亚中部和北部地区的响应结果表明^[3],1 月份,太平洋沿岸的高海拔地区年降水增加,区域降水变幅为 -261 mm ~ 388 mm,平均增加 16 mm,增加约 37%; 7 月份,降水变幅为 -17 mm ~ 39 mm,平均增加 3 mm,增加约 46%。

(2) 蒸发。一般认为,若假设其它条件没有太大的变化,气温升高将导致区域潜在蒸发增加,而实际蒸发还受其它因素的影响。IPCC 1990 年的研究报告表明,在 $2 \times \text{CO}_2$ 下,2050 年全球平均蒸发将增加 3% ~ 15%,若气温升幅越大,增幅越大。

在蒸发的年和季节响应上,比利时的 3 个流域显示^[4],各个季节潜在蒸发都增加,年潜

在蒸发增加约 50 mm, 增加约 9%, 其中增加最多的是春夏季, 秋冬季尽管净辐射稍有减少, 潜在蒸发仍增加。瑞士 Murg 流域的潜在蒸发也将增加约 10%, 实际蒸发增加约 9%, 3 月~7 月的潜在蒸发量增加均在 6 mm 以上, 但只有 3 月~6 月的实际蒸发增加在 6 mm 以上^[5]。东地中海地区的研究结果^[6], 在 $2 \times \text{CO}_2$ 下, 冬季蒸腾每天增加约 0.4 mm, 约增加 14%, 夏季蒸腾增加 13%, 年增加约 219 mm。

但在区域水文水资源对气候变化响应的研究中, 大多数没有论及蒸发或潜在蒸发对 $2 \times \text{CO}_2$ 的复杂响应过程, 这主要是由于模型中的蒸发计算均是温度、辐射或土壤水分的函数, 没有涉及风速等其它因素。

区域蒸发包括水面蒸发、土壤蒸发和植物蒸腾三个部分。水面蒸发速率由空气和水面的水汽压差和风速决定, 季节或年的自由水面蒸发并不同气温存在很好的关系。土壤蒸发受风速和水分的影响, 但水分子还必须克服土水势。植物蒸腾受叶面生理作用控制, 受大气的蒸发能力、土壤水分和植物气孔调节作用的影响。蒸腾对短时期 CO_2 浓度升高的响应已有研究^[7]。在 $2 \times \text{CO}_2$ 下, C_3 和 C_4 植物的响应不同, C_3 植物反应强烈于 C_4 植物, 单位叶面的蒸腾量都将减少。但对于生态系统水平的长期变化还没有较多研究, 尽管科学家们认为单位叶面的蒸腾量将减少, 但他们并不确定随着 CO_2 浓度的升高, 生态系统水平的总叶面积是否增加。

(3) 径流。径流是气候变化中水文水资源系统响应研究的重点。但在不同的区域和不同的研究方法上, 所获结果大相径庭。

应用 Langbein 等估计的年径流量、年均温度和年降水的经验关系对美国 7 个主要流域的研究表明^[8], 若温度增加 2°C , 降水减少 10%, 径流减少 40%~76%。但 Langbein 等的经验关系忽略了许多重要的物理因子, 如地质、地貌、流域面积、植被等^[9]。Nemec 等的研究表明^[10], 气候的适度变化将导致径流的明显变化, 若气温升高 1°C , 降水减少 10%, 干旱和湿润区的径流变化可分别达 25% 和 50%。区域水文建模研究美国五大湖地区 4 个流域的径流变化表明^[11], 若气温增加 2°C , 降水减少 25%, 将导致径流减少 50%。相反, Idso 和 Brazel 认为^[12], 若 CO_2 浓度加倍, 干旱区流域的径流量将增加 40%~60%, 他们同样应用了 Langbein 经验关系, 但考虑了 $2 \times \text{CO}_2$ 条件下的反蒸腾效应 (anti-transpiration), 将减少 1/3 的植物蒸腾量。

Mimikou 等研究认为^[13]: 山区积雪和具有保水特征的地中海地区, 随着气温的升高, 将导致年平均流量的严重减少, 更为严重的是夏季水量减少和冬季水量增加; 在温暖湿润区或区域特征限制水分滞后的流域, 径流对温度的敏感性稍小。气候变化下, 降水变化反映在径流上将加剧, 流域干燥度似乎同径流对降水变化的响应成正比, 积雪积累与融化是流域水量平衡对气候变化响应的最重要和决定性因素。

为验证 Revelle 和 Waggoner 及 Idso 和 Brazel 的结论, Skiles 和 Hanson 运用复杂的 SPUR 生态系统模型模拟了 CO_2 浓度升高对美国西部 3 个流域^[14] 即 Pawnee、Sheep Creek 和 Lucky Hills 的水量平衡影响, 他们选用了 Idso 和 Brazel 的气候变化情景。结果表明, 降水减少和温度上升将导致径流减少; 若考虑“气孔关闭”, 径流将增加; 同时考虑温度升高 2°C 、降水减少 10% 和反蒸腾效应, 径流没有增加, 而是减少。但同时指出, 在这些干旱、半干旱流域, 径流的减少幅度并不大, 在假设气候情景下, 将有一定减少; 若 CO_2 浓度增加而没有气候变化, 径流将会稍许增加, 若 CO_2 浓度增加和日温度上升, 将有稍许的径流

增加; 但若降水减少, 温度和 CO_2 浓度增加, 地表径流将不会有短期增加。另外指出, CO_2 浓度增加将使干旱区冬季洪水发生频率增加。

在不同的 GCM 间, Cohen 用 Thornthwaite 水量平衡模型研究了不同的 GCM 输出结果对加拿大 Saskatchewan 河的影响^[15], 由于降水增加, GISS 情景导致落矶山区格点的径流增加; 由于年均降水减少 41%, GFDL 80 情景在相同地点的径流大幅度减少, 当气温增幅达到 3.7 时, 径流将消失。在 8 个 GCM 情景之间, 加利福尼亚 Sacramento 流域, 夏季径流减少幅度为 40% ~ 68%, 冬季增加幅度为 16% ~ 81%; 季节径流的偏差也明显变化, 冬季径流标准差增加 8% ~ 45%, 夏季径流标准差减少 30% ~ 76%。发生这种变化的原因, 一是温度升高是导致冬春季融雪径流时间分布改变的主要动力; 二是尽管降水变化对径流变化有重要作用, 但决定径流时间分布的仍是温度变化^[16]。

Bultot 等的研究认为^[4], CO_2 浓度增加, 冬季降水增加, 11 月 ~ 3 月的径流量明显加大, 将使比利时十分湿润区域的冬季洪水发生频率增加。Semois 和 Zwalm 夏季径流量减少, 而 Dyle 增加。

Miller 和 Russell 研究了现状和 $2 \times \text{CO}_2$ 条件下河流的河川径流变化后发现^[17], 大多数世界主要河流的河川径流量增加。由于降水增加最多, 高纬度地带的河川径流量增加最多, 平均增加约 28%。

Chiew 等在研究了气候变化对澳大利亚 28 个代表流域的影响后认为^[18], 降水的变化反映在径流响应上常被扩大, 特别是在干旱流域。在潮湿和温带地区, 径流变化百分率约是降水的 2 倍, 而在干旱区, 降水大幅度增加时径流增加的百分率是降水变化百分率的 5 倍多。同降水变化影响相比, 温度变化的影响是微不足道的。用 GCM 输出情景模拟表明, 2030 年, 澳大利亚东北部的湿润热带流域年径流将增加 25%, 东南部年径流变幅为 $\pm 20\%$, Tasmania 地区年径流增加 10%, 以冬季降水为主流入南澳大利亚湾流域的年径流将减少 35%, 冬季降水为主的澳大利亚西南部海岸的年径流变化为 $-45\% \sim 35\%$ 。

Kwadijk 等用不同温室气体排放情景研究了气候变化对莱茵河的影响。结果表明^[19], 在阿尔卑斯地区河川径流在冬季增加, 夏季减少, 冬季增幅在 30% ~ 60% 之间; 下游地区, 在高 (降水增) 情景下, 冬季径流增加; 在低 (降水减) 情景下, 径流减少。在河口, 最优估计情景下的年径流量变化很小, 冬春季径流增加, 而夏秋季减少。并指出, 年季径流量对降水变化较敏感, 温度升高并不能大幅度增加蒸发和抵消降水的增加。同时气候变化将使莱茵河从以雨水和融雪混合补给的河流向以雨水补给为主的河流转变。

我国水利部水利信息中心^①根据 4 个 GCM 情景研究了中国典型流域后认为: 在未来气候变化情景下, 松花江流域径流增加的可能性大, 辽河流域径流既可能增加, 也可能减少; 京津唐、黄河上中游及淮河流域年径流减少的可能性大, 汉江年径流变化不明显, 东江流域径流减少量较小, 而年径流量增加较大。在华北地区, 若气温升高 2 , 青龙河、唐河和沙河年径流量大致减少 10% ~ 20%, 白河减少 40% 以上; 降水减少 10% 时, 上述 4 个中小流域的径流减少 15% ~ 25%。对热带地区研究表明, 相同的气候变幅, 热带和温带的响应不同, 若温度升高 2 , 降水减少 10% 时, 华北地区河川径流减少 40% ~ 60%, 而海南万泉河流域仅减少 25.6%^[20]。

① 水利部水利信息中心. 气候变化对水文水资源的响应及适应对策专题技术报告, 1996.

以上这些研究表明, 尽管世界各地径流对气候变化的响应程度和结果各不相同, 但有两点基本一致, 即融雪地区或高纬度地区的冬季或春季的融雪径流将大大增加, 夏季径流减少; 区域径流的响应程度大于降水变幅。由此说明, 在水文循环中, 径流是一个十分活跃的因素, 对气候变化的响应十分敏感。

(4) 土壤水分。土壤水分影响着区域蒸发和径流的形成, 在气候变化下, 其含量也将受到影响而改变现有的时空分布规律。据 Manabe 等的报告^[21], 在气候变化下, 全球土壤水分变幅为-50%~100%, 其中欧亚大陆大部分地区减少10%~50%, 阿拉伯半岛和印度半岛增加10%~100%, 非洲大部分地区减少0~70%, 北美地区减少0~50%, 南美大部分地区增加0~20%。IPCC 1990年的报告指出, 在季节变化上, 冬季高纬地区土壤水分增加, 夏季北半球中纬度大陆地区减少。

在10个假设气候情景下, 加利福尼亚 Sacramento 流域农业区夏季土壤水分下降达8%~44%, 冬季7个情景土壤水分减少, 月土壤水分含量也稳定下降; 8个GCM情景表明, 夏季土壤水分含量下降14%~36%, 3月~10月土壤水分含量也有6个情景下降^[6]。

降水变化反映在土壤水分的响应上将缩小, 10%的年降水变化反映在年土壤水分变化上仅2%~4%或4%~9%; 几乎所有气候情景的年均土壤水分含量都减少, 夏季平均土壤水分减少, 即使降水增加20%。夏季土壤水分最大减幅可达70%^[13]。

气候变化下, 土壤水分的响应程度低于径流的响应程度。在温带地区, 降水变化只给土壤水分带来轻微影响, 而在干旱流域, 土壤水分的变化百分率将大于降水的变化百分率^[18]。温度单独上升对澳大利亚北部温暖流域的土壤水分几乎没有影响, 但将少量减少澳大利亚南部的土壤水分含量。在所有情景中, 相对于降水对土壤水分的影响, 温度变化的影响可忽略不计。模拟结果表明, 2030年, 澳大利亚东北部海岸的潮湿热带流域年土壤水分含量将增加10%, 东南部地区年土壤水分含量变化为 $\pm 10\%$, 在 Tasmania 地区, 年土壤水分没有明显变化, 冬季降水为主流入南澳大利亚湾的流域年土壤水分含量将减少20%, 澳大利亚西南海岸地区的年土壤水分含量的变化为-25%~15%。

根据NCARGCM的输出^[2], 中国年平均土壤水分含量增加, 一般在0~1%左右, 但在长江以南华东、华中地区和华南地区, 增加幅度较大, 为1%~3%, 年平均土壤水分含量减少出现于云贵高原、四川盆地南部和广西西部、陕西、宁夏两省和甘肃东部、冀东及渤海沿海地区, 减幅一般在0~2%之间。

2 气候变化对社会经济的水资源系统及水资源管理的影响

气候变化下, 水资源系统的承载力将发生变化, 其中最主要的是可供水量。未来气候条件下, 社会经济活动也将影响水资源需求量。气候变化对水资源的影响通过两个途径, 即自然转变和人为干扰。自然转变过程是通过气候因子的变化, 引起水文循环中各个要素和区域自然条件的转变, 影响水资源质量和时空分布特征; 人为干扰过程则是人类对水资源开发利用导致区域水资源中各要素的再分配, 及水资源演变规律的变化。

(1) 供水影响。气候变化对未来供水的影响十分复杂, 不仅包括气候变化对水资源量和质的影响, 还涉及区域水资源的开发利用规划等问题, 存在很大的不确定性。对于干旱区, 即使是小的径流变化也将影响供水, 总径流量的减少和干旱发生频率的增加将明

显降低蓄水水库的有效性和可靠性^[22]。

Nemec 和 Schaake 分析了降水对水库供水影响的研究表明^[10], 年降水量减少 1%, 将减少 2% 的水库供水量, 并指出, 干旱区若降水减少 25%, 为保持相同供水量和可靠性, 将要求增加 400% 的水库库容。

美国能源部 (DOE) 的 MINK 计划研究表明^[23], 在 2030 年, MINK 地区的农业水资源供给量将比 80 年代更少, 灌溉供水将不能满足要求。若 1931 年~1940 年的干旱气候重现, 水资源将更加稀少, 地下水储量将加快减少, 区外入境水量将减少。

莱茵河流域的水文水资源响应研究表明^[24], 在不同情景之间, 可利用水量相差很大。在最优估计下, 常规情景可供水量变化为-4%~10%, 在采取政策限制 CO₂ 排放的情景下, 可供水量变化为-2%~2%; 但在降水减少估计下, 常规情景的可供水量变化为-40%, 在采取限排情景下, 为-30%; 在降水增加估计下, 可供水量都将增加。

(2) 需水影响。气候变化下水资源需求变化, 由于其复杂性和不确定性, 至今对其研究很少, 大多集中在作物水分需求。

Allen 研究了气候变化对以色列灌溉需水的影响^[25], 结果表明, 在 2×CO₂ 条件下, 苜蓿、玉米和冬小麦的净灌溉需水量将增加 40%, 并从东向西增加。但由于叶面积数量和大叶面气孔阻力增加的不确定性, 实际灌溉需水量的变化难以获得。

张翼等用 SCCM 模式估算了气候变化对黄淮海平原土壤水分平衡各分量的影响^[2]。由于温度升高, 使作物蒸腾及生理需水量增加; 冬小麦全生育期生长期缩短, 作物需水量下降。这两方面的相互作用, 使黄淮海平原未来温度升高 2 时, 全生育期作物需水下降 2%。对夏玉米来讲, 这两方面作用相互加强, 使黄淮海平原夏玉米全生育期需水量在温度上升 1、2 时分别增加 18% 和 31%, 夏玉米的农业用水量也增加, 年灌溉总量随着降水量的减少而急剧上升, 当年降水量减少 20% 时, 温度上升 1 和 2, 年灌溉水量将分别上升 65.9% 和 84.3%。

在进行中国气候变化研究国家报告时得出^①, 由气候变暖造成 2030 年 3 种不同保证率 (50%、75%、95%) 下的缺水量, 京津唐地区为 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3 \sim 14 \times 10^8 \text{ m}^3$, 淮河蚌埠以上为 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3 \sim 35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 黄河为 $21 \times 10^8 \text{ m}^3 \sim 130 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。东江可能出现的多水量为 $12 \times 10^8 \text{ m}^3 \sim 19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(3) 气候变化对水资源管理的影响。气候变化对水资源管理的影响是十分复杂和深远的, 因为至今我们还不能给出气候变化下水资源变化的一个确定答复。在最不利情景对干旱半干旱和湿润地区水资源管理的影响, 供水、防洪、水力发电及水环境管理是其中的主要问题^[22]。Houghton 认为^[26], 由于全球变暖在 21 世纪可能因争夺水资源而发生战争, 特别是在一些分享大水系水资源的国家和地区, 如尼罗河、约旦河和幼发拉底河, 并将不得不部署联合国部队隔离那些为争夺河流和湖泊而争斗的国家的军队和居民。因此, 气候变化下的水资源管理将显得尤为重要。

长期以来水资源管理的思想是提供可靠的供水满足需求和控制洪水, 并尽量减少其中的不确定性, 包括气候的影响。水资源对气候变化敏感的地区是天然供给和利用密切匹配的地区。在气候变化下, 干旱半干旱地区的径流减少将给供水带来严重影响, 总径流量减

① 水利部水利信息中心. 气候变化对水文水资源的响应及适应对策专题技术报告, 1996.

少和干旱发生频率的增加将严重减少蓄水水库的供水有效性和可靠性,可能导致的泥沙输入量增加将缩短水库寿命,危及供水。干旱半干旱区地下含水层只有在不经常出现的湿润年份才能得到补充,气候变化若导致这种湿润年的发生频率减少,将大大减少地下含水层的可开采量。半干旱地区的径流季节转换将引起径流的不均匀分配,也可能导致水库蓄水量和地下水补给量的减少。

防洪问题是气候变化对水资源管理影响的另一重要问题,特别是对湿润地区。目前,世界上大多数高产农田和城市位于低洼的洪积和冲积平原,用堤防和水库保护,免受洪水危害。气候变化导致的洪水发生频率增加,将使这些工程的防洪标准和有效性降低,将扩大洪积平原。另外,河流的冲淤变化也将影响防洪,河流冲刷危及防洪大堤,淤积又将提高洪水水位。许多研究表明,气候变化有使湿润地区洪水发生频率和洪量上升的趋势。水利部水利信息中心^①对中国南方部分流域洪水响应研究表明,当气温升高 2℃,降水增加 10% 和 20% 时,东江博罗站 20 年一遇洪峰流量分别增加 10.2% 和 24.6%; 汉江花园的洪峰流量分别增加 10.1% 和 25.9%; 东江博罗站洪峰流量 6 000 m³/s 的出现频率将从当前的 0.166 增加到 0.297~0.402。在常规排放情景下,莱茵河荷兰德国交界处 P=50% 的洪峰流量将从 7 000 m³/s 增加到 7 500 m³/s, 7 500 m³/s 的发生频率也从 3 年一遇变为 2 年一遇^[27]。

水环境管理也是气候变化影响的一个重要因素。河流水质受流速、流量及混浊度的影响。对于干旱区水量少的季节性河流,河流水质将会受到严重影响。流量减少和季节变换将波及鱼类及水生生态系统,半干旱区的常年流水河流也可能因干旱发生频率的增加而向季节性河流转变。

在对气候变化引起的水资源危机的可能管理对策中,Williams 认为应采取以下措施^[22]: 水资源的再分配,把工业和城市用水放在优先位置,而把农业用水放在次要地位;对水资源严格计价收费;刺激对其它(少耗水)农业的发展,如旱地农业、少水作物(种植)、滴灌和雨水利用等;刺激能源保护;加强洪水综合管理;加强流域管理;在水资源管理中综合生态系统要求;水利工程设施的重新设计。

水利部水利信息中心在气候变化对中国水资源管理影响的适应对策中认为^①,气候变化下的适应对策具有新的含意,它属于某一种调整,不管这种调整是被动的、主动的或预先采取的,都将减少与气候变化有关的预测的不利后果,而且适应对策不能仅仅理解为避免、减少或消除不利的气候变化影响,它有两个目的:促进社会可持续发展,减少脆弱性。并认为其对策按照时间尺度可分为长期战略对策、中期战术对策、短期应急对策和分析对策四类。对于我国水资源的适应对策提出八点建议:加强水利基础设施建设;增加节水投入,增强节水意识,提高节水水平;加强现有工程的管理挖潜;多种途径开辟新水源;积极地有步骤地实施跨区域调水工程;加速污水资源化;加强水利管理和法规建设;制定非常情况下应急措施。

Riebsame 在适应气候变化下的供水和洪水管理中认为^[28],适应性措施应在水资源管理过程中的不同点实施。对于管理者,一个简单的适应理论是通过常规地更新水文气候资料 and 同决策有关的可靠性计算方法,继续对(水资源的)敏感性和引起的气候风险作出反

① 水利部水利信息中心. 气候变化对水文水资源的响应及适应对策专题技术报告, 1996.

应。如果气候变化引起的敏感性和危害将使系统迈出一些可靠性的临界阈值, 就对供水、需求或防洪措施进行调整, 以使其能在允许的范围内运行操作。

同时又提出, 事实上, 一些因素将阻碍水资源管理对气候变化的顺利和合理适应。首先, 水文分析方法明显假设气候的稳定性, 因此, 规划者只有在气候变化对系统操作产生十分剧烈的变化时, 才能认识到气候变化的存在。这就意味着, 气候变化将使传统水文分析中认为: 过去是未来的写照 (The past is the key to the future) 的准则无效。

由此可见, 由于水资源对于气候变化响应的较大不确定性及水资源管理对气候变化响应的更大不确定性, 对水资源管理的气候变化响应研究是十分困难的, 而且也都是假设气候变化下的水资源管理不出现新的问题的条件下分析的。水资源管理不仅涉及水源等自然因素, 更受社会、经济等因素的影响, 因此, 具有一定确定性的气候变化响应结果的获得还要经历很长的旅程。

以上分别从水文系统和水资源系统两个方面综述了气候变化的影响, 气候变化将影响水文水资源的每一方面, 不仅包括数量、质量, 还涉及时空分布和转换规律。对于社会经济持续发展影响最大的是气候变化下的水资源开发利用战略和管理对策。由于气候变化研究中存在的较大不确定性, 尽管我们能获得世界各地一定确定性的气候变化下的水文要素变化规律, 但仍无法获得水资源管理的适应对策, 改善传统的水资源管理模式须作很大努力。目前区域水文水资源对气候变化响应研究的方法和理论还存在许多不确定性和不够完善之处, 还有待进一步改进。但无论如何, 这些研究提供了一个研究框架, 使我们能从大量的不确定的东西中获得许多可信的结果。

参 考 文 献

- 1 Houghton J. Danger signal. *Our Planet*. 1996, 7(5) 9~11
- 2 张翼. 气候变化及其影响. 北京 气象出版社, 1993. 3 Stamm J F, Gettelman A. Simulation of the effect of doubled atmospheric CO₂ on the climate of Northern and Central California. *Climatic Change*, 1995, 30 295~325
- 4 Bultot F etc. Repercussions of a CO₂ doubling on the water cycle and on the water balance——a case study for Belgium. *Journal of Hydrology*, 1988, 99 319~347
- 5 Bultot F etc. Repercussions of a CO₂ doubling on the water balance——a case study in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 1992, 137 199~208
- 6 Segal M etc. Some assessment of the potential 2×CO₂ climatic effects on water resources components in the Eastern Mediterranean. *Climatic Change*, 1994, 27 351~371
- 7 Callaway J M, Currie J W. Water resources systems and changes in climate and vegetation. In White M R (ed.). Characterization of Information Requirements for Studies of CO₂ Effects——Water Resources, Agriculture, Fisheries, Forests, and Human Health. U. S. Department of Energy, Washington, D. C., 1985. 23~67
- 8 Stockton C W, Boggess W R. Geohydrological implications of climate change on water resource development. U. S. Army Coastal Engineering Center, Ft. Belvoir, Virginia, 1979.
- 9 Revelle R R, Waggoner P E. Effects of a CO₂—induced climatic change on water supply in the western U. S. . pp. 419~431. In *Changing Climate*, Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee. National Academy Press, Washington, D. C., 1983.
- 10 Neme J, Schaake J. Sensitivity of water resource systems to climate variation. *Hydrologic Science Journal*, 1982, 27(3) 327~343
- 11 Idso S, Brazel A. Rising atmospheric carbon dioxide may increase streamflow. Letter to Nature. *Nature*, 1984, 312

51 ~ 53

- 12 Flaschka I etc. Climatic variation and surface water resources in the Great Basin region. *Water Resources Bulletin*, 1987, **23**(1) 47 ~ 57
- 13 Mimikou M etc. Regional hydrological effects of climate change. *Journal of Hydrology*, 1991, **123** 119 ~ 146
- 14 Idso S, Brazel A. Rising atmospheric carbon dioxide may increase stream flow. Letter to nature. *Nature*, 1984, **312** 51 ~ 53
- 15 Cohen S J, Allsopp T R. Potential impacts of a scenario of CO₂—induced climatic change on Ontario, Canada. *Journal of Climatology*, 1988, **1**(7) 669 ~ 681
- 16 Gleick P H. Regional hydrologic consequences of increase in atmospheric CO₂ and other trace gases. *Climatic Change*, 1987, **10** 137 ~ 161
- 17 Miller B A, Brock W G. Potential impacts of climate change on the TVA reservoir system. In J. B. Smith, and D. Tirpak (eds.), the Potential Effects of Global Climate Change on the U. S., Appendix A Water Resources. U. S. EPA, Washington, D. C., 1989, 9.1 ~ 9.47
- 18 Chiew F H S, McMahon T A. Application of the daily rainfall-runoff model MODHYDROLOG to 28 Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 1994, **153** 386 ~ 416
- 19 Kwadijk J, Rotmans J. The impact of climate change on the River Rhine—a scenario study. *Climatic Change*, 1995, **30** 397 ~ 425
- 20 傅国斌. 全球变暖对区域水资源影响的计算分析. *地理学报*, 1991, **46**(3) 22 ~ 26
- 21 IGBP of ICSU. Global Change Newsletter, 1994, 15
- 22 Williams P. Adapting water resources management to global climate change. *Climatic Change*, 1989, **15** 83 ~ 93
- 23 Department of Energy. Processes for identifying regional influences of and responses to increasing atmospheric CO₂ and climate change—The MINK project. Report . DOE/RL/01830T ~ H6 ~ 10, 1991.
- 24 Kwadijk J, Middelkoop H. Estimation of impact of climate change on the peak discharge probability of the River Rhine. *Climatic Change*, 1994, **27** 199 ~ 224
- 25 Arnell N W. Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment. *Journal of Hydrology*, 1992, **132** 321 ~ 342
- 26 参考消息. 全球变暖将导致水资源争夺加剧. 北京 新华通讯社, 第 13521 期.
- 27 Riebasme W E. Adjusting water resources management to climate change. *Climatic Change*, 1988, **13**(1) 69 ~ 97
- 28 Chiew F H S etc. Simulation of the impacts of climate change on runoff and soilmoisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 1995, **167** 121 ~ 147

作 者 简 介

沈大军, 男, 1969 年 11 月生, 中国水利水电科学研究院博士后, 水文水资源专业。已在各类学术刊物上发表有关水文水资源的文章近 20 篇。

HYDROLOGICAL AND WATER RESOURCES RESPONSES TO CLIMATIC CHANGE ~ A REVIEW

Shen Dajun

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)

Liu Changming

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

The paper reviewed the climatic change effects on regional hydrological systems and water resources systems, and forwarded the comments on these researches.

Researches on hydrological system response to climatic change focused on four fields: precipitation, evapotranspiration, soil moisture and runoff. Under climatic change, precipitation would be redistributed, with increase in some regions and decrease in others, as well as soil moisture. The potential evaporation would increase due to temperature rising, but the actual evaporation would vary with the different climatic change scenarios. Runoff response to climatic change is the most interested to the researchers. Affected by temperature and precipitation change, runoffs from research results differed greatly from various research methods and regions. But runoff in high latitude zones or ice ~ cover riverbasins would mostly increase, particularly in the Spring.

Research on water resources management under climatic change attracted researchers' much attention in the fields of water supply, water demand and water resources management. But thanks to larger uncertainties in hydrological responses to climatic change research, it is far away to practice positive countermeasures to climatic change. On the other hand, some traditional hydrological analysis methods would hinder smooth adjustment to climatic change. But these researches on climatic change and water resources and hydrology still formulated a research framework and we could get some uncertainties from them.

Key words climatic change, hydrological response, water resources management