

水循环基础研究的观念、方法、问题和可开展的工作

Thoughts on the Ideas, Methods and Problems of Water Circulation Research

丑纪范

(中国气象局,中国科学院院士 北京 100081)

一、水问题的重要性

1. 社会经济层面上

(1) 涉及资源 水是一种宝贵的自然资源,农业要水、工业要水、生活要水、维持生态不退化也要水。人口的增长和对更高生活标准的渴望带来了淡水的更大需求。前联合国秘书长加利曾说过:“中东的下一场战争将为水而战,而不是为政治。”对 10 多亿人口的我国来说,水资源安全的难点是,水源不能依赖进口,不像矿产资源那样。

(2) 涉及灾害 大气降水是地球上淡水的主要来源。降水过多、过于集中,常常引起大江大河出现洪涝灾害。从趋势看,我国洪涝灾害日益加剧。从 1950 年至 1989 年,我国平均每年洪涝面积约 1.2 亿亩;而 1990 年至今,平均每年洪涝面积达 2.5 亿亩。洪涝灾害波及的范围越来越大,造成的经济损失也越来越重。降水过少、长期不降水则又引起旱灾。干旱的影响虽然较缓慢,但它却是所有气象灾害中最具破坏性的灾害。我国旱灾的威胁也在不断加剧。从 1950 年至 1989 年,我国平均每年干旱面积约 3 亿亩;1990 年至今,平均每年干旱面积达 3.4 亿亩。而且干旱、黄河断流、沙漠化等问题往往又彼此交织、相互促进。

(3) 涉及环境 工业废污水和城市生活污水已造成严重水污染。被污染的水体,不仅危及水生生物,还通过灌溉,降低了土壤的品质。水污染已成了严重的环境问题。

2. 科技技术层面上

(1) 从实用的角度看 一是我国是水资源严重不足的国家,尤其是中西部地区。据估计我国水资源的总量为 28 124 亿立方米,人均占有的水资源仅为 2 300 立方米,约为世界人均水资源的 1/4,排在联合国公布的 149 个国家中的第 109 位,属于第 13 个贫水国家之一。二是随着人口增长、农业发展、工业增长、城市化建设加快,以及随着旅游业的发展、

改善生态环境和生物养殖用水增长,将使水资源消耗持续增长,水资源短缺与需求增长是我国将长期面临的矛盾。增水、节水、保护水资源免受污染,将是几代人必须付出巨大努力的事情。三是我国一方面为缺水问题所困扰,另一方面水资源的时空分布又极不均匀。如何合理调配水资源是面临的紧迫问题。这给工程技术方面提出了许多问题。本文不拟全面讨论这些工程问题,仅仅从基础理论的角度和学科发展的角度谈一些相关思考,因为工程技术问题的研究不可能也不应该脱离大的背景。

(2) 从基础理论的角度看 水循环问题涉及 3 个方面。一是地球各个圈层——众多学科交叉的领域。以大气科学为例。大气科学研究的是水汽通过气流在大气中传输,水汽凝结成小的云滴和晶体,云滴通过碰并形成大的液态和固态水滴以降水的形式落到陆面和洋面,仅此而已。但水汽从何而来?是由固态和液态水从海洋和陆地蒸发到大气中而来。这个蒸发过程就不仅与大气状态有关,也与海洋和陆地的表面状态有关,如研究视角仅局限在大气科学领域就难以把握。再从海洋学方面考虑。海面的蒸发和河流的径流是驱动海洋温盐环流的重要因子,对海表温度年代际的变化有重要作用,这个问题与大气科学、陆地水文有密切联系。这方面的研究就很不够。现有的海洋环流模式很少考虑蒸发(降水)对水份变化的影响,甚至采用“刚盖近似”(我国曾庆存院士率先提出消除这一“近似”)。地球上的水存在 3 种物理状态:固态、液态和气态。这 3 种状态在地球各圈层间不停地转化,但是在我们研究的时间尺度(小于数百年)内,全球 3 种状态的总和是一个不变量。全球蒸发量与降水量、大陆的降水量与通过江河流入海洋的水量,虽然不是绝对相等,但至少应是处于准平衡态的。水循环问题正是要求在这种制约下集中研究各圈层交界面上进行的过程,以揭示其间规律。这是地学各学科的交叉领域。二是驱动机理。水热平衡是重要制约因素。大气和海洋的运动是由太阳辐射不均匀所引起

的。“万物生长靠太阳”，“如果没有太阳辐射引起的排斥运动，地球上的一切都会停止”（恩格斯）。在地（海）气交界面上进行的水的相变需要热量，在定量上受到热量的制约，这也就是地表面的热量平衡方程。地表吸收的太阳辐射与放射（吸收）的长波辐射，上、下的感热输送与蒸发的潜热均保持平衡。水的循环与热的传送实是一个硬币的两面。我们可以分别地考查，但它们实际上是分不开的。水循环问题与热输送问题密不可分，它们是地球系统科学的重要组成部分。三是关于地学发展的生长点。海洋占地球表面积的 71%，但对海洋上的降水没有实测资料，所以降水实况不明。蒸发，在自然界中是十分复杂的过程，其中决定实际蒸发量的因素，我们迄今并没有搞清楚。现在在探测上，遥感技术、人造卫星正获得大的进展，数值模拟和资料同化技术也有和将有大的进展。及时地利用最新发展的高新技术，揭示水和热量在地球各圈层间的循环规律，将极大地促进地学的发展。由此可见，从基础理论的角度看，水循环的研究是地学中十分重要的问题。

二、观念和方法

关于水的问题，国内外已做过大量工作。这些工作主要是针对实际存在的问题，属于工程型、应用型的。比较起来，从基础理论、学科的角度做的工作就显得不足。两者间似应进一步相辅相成、互相促进。这里从基础理论的角度，研讨一下研究水问题应有的观念和方法。

1. 观念问题是指从什么观点出发来看问题

（1）是“坐井观天”还是“放眼世界” 对某一地区的水问题是就这个地区孤立地进行研究，还是作为整个地球的一部分来考察？显然，水是作为地球上的统一系统而活动的，它的各个部分彼此间有很强的相互影响，某一部分的变化不仅决定于该地区的状态，而且还取决于所有其余部分的状态。换句话说，水循环过程不可避免是全球性的，应该从全球各圈层的相互作用来研究。水循环的研究势必应从局部（或区域）的研究走向全球性研究。

（2）是“天不变，道亦不变”还是“万物皆流，永不重复” 虽然天气每天在变，年与年也不相同，但是在 20 世纪 50 年代初，世界气象组织曾规定取 30 年的平均就可以视为“准平均”，加上“极差”（最大值减最小值）和“标准离差”就可构成对气候的描述。也就是说一个地方的气候情况，包括降水、蒸发等水资源情况，只要分析得出过去 30 年的状况，就可代表该地方的情况。过去许多水问题的工作是不是在这种观念下做的呢？然而，50 年代以后，人们逐渐认识到，30 年的平均值并不是一成不变的。一个地区的气候在各种时间尺度上变化着，水状况也不

例外。所以当我们讨论水问题时，总是与一个特定的时间长度紧密相连的，不论这个时间长度是多少，如 1 个月、1 个季度、1 年、几十年或者 100 年，等等；但是这个时段内，水状况的平均值或者统计特征都不是不变的。现在我们主要关心的是两种时间尺度的变化，一是季节和年际的变化，另一是未来 50~100 年的可能变化。因此，水问题的研究需要观念上的转变，由地理学上的气候概念发展为气候系统的概念。其实质是由局部的、静态的、线性的研究和考察变为全球的、动态的、非线性的。

2. 方法问题是指怎样来研究，它与观念问题既有区别，又有联系

在地理学的静态的气候概念下，长期来一直采用区域统计学的方法来研究；而在气候系统的动态的气候概念下，则应该采用全球的动力学的数值模拟方法来研究。面对涉及全球大气、海洋、冰雪和陆面上层等各个圈层的复杂的水循环系统，我们无法设计真实的实验，但我们并不是无计可施。数值模式是人类知识的结晶。它用数学语言描述各圈层的状况及其相互作用，可以成为了解人类活动及其气候环境系统变化与响应的工具。利用数值模式进行数值试验可以告诉我们：面对变化的水循环状况，如果我们人类这样做，水循环情况将会有怎样相应的变化。

三、可考虑研讨的基础理论问题

关于水循环问题，从实用的角度可以提出许多课题，如：华北地区的缺水问题如何解决？长江流域水资源如何调控？西北地区空中水资源如何利用？这些无疑是很重要的问题。另一方面从学科角度、基础理论的角度也可以提出许多问题。为了更好地解决实用问题，基础理论问题也是不容忽视的。基础理论问题也不能仅根据需要提，而应考虑到是否有解决的可能。以下问题是可以考虑研讨的。

1. 水循环的实况如何

这个问题带有基础性。如果我们不只局限在局部区域，而是从全球看，不搞清楚水循环的实况，不讨论水循环的变化、趋势，不确定全球水是否在加速循环以及人类活动对其影响程度等，就没有牢靠的基础。水循环实况是指蒸发、降水、水通过陆地河流和含水水层流入海洋等情况下的水量，以及大气中水汽含量的时、空变化情况。蒸发、降水的时空分布很不均匀。某一点上、某一瞬间的蒸发量和降水量不过是数学上理想化的量，实际上总是一个有限区域和有限时段的价值。最先考虑的可以是宏观的角度上掌握全球的水循环。

2. 我们感兴趣的区域和时段的降水，其水汽的

来源和多年的平均情况和变率如何

在地球表面(主要是海洋)蒸发进入大气中的水汽随着气流输送到凝结的地方,到那时遂以降水的形式落到地面;反过来,在某地凝结下落的降水的水汽是此前某个时候、某个地方蒸发进入大气的。对我国的某处区域、某个时段的降水的水汽来源的判断,将揭示出该地水汽来源是逐年变化很大呢?还是变化很小呢?其源地的蒸发量与降水量关系又为何?这些既有理论意义也有实用价值。

3. 当某年的降水和大气情况给定后,地表状况(植被分布、水库、湖泊情况)和人类活动(用水情况和堤防或分洪等)的差异对陆地水文过程会影响到什么程度

诸如:对长江流域而言,若1998年降水发生在1954年或1954年的降水发生在1998年各是什么情景?黄河流域在不同的植被状况和用水情况下导致的水文过程(蒸发、流量)的差别将如何?在其他条件都不变的情况下,三峡水库、南水北调工程对水循环变化影响到什么程度?黄河流域的最佳植被状况和工农业、生活用水的最佳调控应是怎样的?

4. 水循环过程是否存在某些“遥相关”

在气象学中“遥相关”是指相隔一定距离的气候异常之间的联系,这些异常事件在空间上相距遥远、在时间上有所不同,这使人很难相信一个事件会对远方另一事件产生影响,但这种联系的确存在。大气科学中已经出现一个研究领域,该领域的研究人员专门研究那些已经提出的遥相关现象的物理机制,以增进人们对它的理解。例如:统计表明,热带太平洋地区反映对流活动的OLR(Out Lang of Radiation)长程热辐射变化的最大方差位于菲律宾东部周围地区,这说明该地区对流活动的年际变化很大。当其对流活动强时,则长江中、下游地区和淮河流域的降水偏少;当其对流活动弱时,则长江中、下游和淮河流域的降水偏多。这一遥相关现象就是与水循环过程有联系的。青藏高原上冬春雪盖与我国长江流域的南部汛期降水的遥相关也是与水循环过程有联系的。看来水循环过程中大尺度的遥相关现象很可能是存在的。叶笃正先生提出:水循环过程中是否还存在中、小尺度的遥相关现象?人工增雨作业是否不仅要研究作业区的效果,还要研究对作业区以外的地区的影响?这种影响可以归入中、小尺度的遥相关范畴。如果存在这种遥相关,人们就可以通过甲地的作用去影响乙地。

5. 全球变暖和海平面升高对我国的水循环过程可能引起的变化如何量化

根据气候模式的预测,全球变暖最显著的表现就是增进了全球的水循环,这将导致全球降水的增加、蒸发的加快、天气和水文环境的恶化等。至于区域的具体变化就不那么清楚了,而且有相当大的不

确定性。海平面升高将影响长江口的水文状况,从而成为上海市必须关注的问题;气温升高导致雪线上升、冰川消退。这些都不应只停留在定性的描述上。应在承认不确定性的前提下,给出未来50~100年我国水循环可能变化的情景(当然不只限于1个),并包括在水循环研究计划中。

四、积极开展下列水循环研究

关于水循环研究可开展的工作很多,这里仅就为了回答上节提出的那些问题,建议积极开展下列工作。

1. 及时地充分利用新近出现的高新技术取得的观测资料,结合已有的实况历史资料和气候数值模式、四维资料同化方法进行诊断。反演出全球时变的水循环实况,揭示出客观存在的现象

先从大尺度开始,即时间尺度为月、空间尺度为百公里,利用卫星资料估算降水、GPS资料估算大气中的水汽含量,从数值模式得出的地表的蒸发潜热估算蒸发量,并收集河流的径流量等,建立这些量的逐年逐月全球分布的数据库。由于这些量是独立反演得到的,而在所研究的时间内,全球水的总量(液态、固态水和水汽的总和)可以认为是一个不变量,据此可以估算这些数据的可信度,结合陆地上已有的资料估算其误差。

2. 建立一个能计算出 $t_1 \sim t_2$ 期间全球降水量的数值模式。该模式可根据全球湿度在 $t = t_1$ 时的初始分布和全球大气流场、温度场和地表蒸发量在 $t_1 \sim t_2$ 的时变状况算出全球在 $t_1 \sim t_2$ 的降水量

采用 σ 坐标系中的网格。初始时刻 t 时每个格点上的水汽含量是知道的。由于 t_1 到 $t_1 + \Delta t$ 时间内大气的流场已知,采用半拉格朗日方法积分水汽方程,可以获得 $t_1 + \Delta t$ 时的每个格点上的水汽含量。这里仅仅是在最接近地面那层的格点上增加已知的蒸发量。由于每个格点在 t_1 到 $t_1 + \Delta t$ 时的温度是已知的,不难获得达到凝结的水份完全降落到地面时的估算量(下落过程的蒸发和时间均不考虑)。这样便获得了 t_1 到 $t_1 + \Delta t$ 时刻的全球的降水。这个过程可以反复进行下去,当算到 $t_1 + n\Delta t = t_2$ 时,就得出 $t_1 \sim t_2$ 期间的降水量。

利用NCEP/NCAR的再分析资料提供的全球大气的流场、温度场和地表潜热通量数据LHTEL,及 t_1 的初始湿度分布,该模式可算出逐年的全球降水。计算得到的降水与有实测资料的降水的差异是可知的,这就是该模式的误差。也许真正的大量工作就在模式的计算过程和有关参数的选取上,由此能获得最接近实况的结果。如果模式能够调试到对于NCEP/NCAR的数十年资料都能得到令人满意的结果,那么这将是一个可以用来进行数值试验的模

式。通过数值试验它可以回答一系列的问题,如局地蒸发的变化(三峡工程的完成、南水北调的实现等)对我国降水的影响、局地的人工增雨对降水的影响,等等;还可以揭示出我们感兴趣的区域降水的水汽来源。

3. 建立一个能计算出 $t_1 \sim t_2$ 期间我国长江流域和黄河流域地表水文状况的数值模式。该模式能根据 $t_1 \sim t_2$ 期间的降水分布和已知的地表状态(植被、土壤状况、水库、湖泊、河流状况等)计算出 $t_1 \sim t_2$ 期间地面水的时空变化过程

落到陆面的降水通过地表和河流含水水层的流动传输,相对于大气中的水汽传输要简单一些。在现有地理信息系统提供的详细的地表状况下,建立这样一个数值模式并不是太困难的事情。在气候的数值模拟中,陆面过程模式已经取得很大进展。可以选一个(比如,选戴永久博士在美国主持设计的那个模式)作为基础加以改进。因为这里要着重描述的不是地-气的感热、潜热、动量的通量,而是落在地表的水的传输、地表的径流和地下水的流动以及蒸发的耗损等。值得注意的是,对长江流域而言,重点考虑的是防洪;对黄河流域而言,重要的是干旱和半干旱地区水资源的合理利用。两者的目的不同,模式中可以省略和不可省略的过程也不同。

(上接第 19 页)

自身转化及与介质的作用,过程的模拟和验证十分困难。在风险评价中,要抓住影响评价的主要环节,正确拟定评价的目标参数,这里就不详述了。

五、抓紧示范工程,积极推广应用

污水地下回注再生循环利用技术研究的目的大规模应用于工程实际,为缓解我国北方水资源短缺提供技术支撑手段。为此目的,清华大学核研院与高碑店污水处理厂联合建立了一项研究性质的二级污水回注示范工程。该示范工程得到了北京市相关部门及德国柏林工业大学的资助。通过该工程的探索,我们力图建立一套可以实施的污水地下回注的设计参考规程。

并不是所有的地下含水层都适合于污水回注工程。土地使用历史、土壤断面构成、地质条件、导水率的分布、地下水深度都是影响回灌工程是否成功的因素。如回注区存在阻流岩层时,将会引起上层的过度滞水。在地下多孔介质净化回注的二级污水的同时,水中的污染物质也进入地下,威胁原已存在的地下水,特别是与水源或者潜在用户邻近的地区。所以一方面需要控制回灌到地下的污水的水质,另一方面,须保证回灌水在地下介质中有足够的停留时间使得微生物能降解污染物到可以接受的程度。

高碑店污水处理厂地下回注示范工程的场地

故而,要建立的是两个模式而不是一个模式。利用数十年的资料根据实况降水算出地面水的时空变化过程,将计算的结果与实况比较就可以知道模式的误差。也许真正的大量工作就在于对模式进行改进和对参数进行调整,从而获得最接近实况的结果。如果模式的结果能够令人满意,那么这将是一个可以用来进行数值实验的模式。通过数值试验不仅可以回答我们感兴趣的种种问题,而且在“自然控制论”(曾庆存)思想的指导下,必将对长江流域防洪的调控和黄河流域水资源的合理利用起到积极作用。

4. 研讨全球水循环模式

虽然全世界已有数十个气候模式(海-陆-气耦合,并考虑冰雪过程)都描述了水循环过程,但这些模式并不能解决水循环问题。关键在于缺乏海面、陆面蒸发的描述。全球水循环模式的建立似应依据现有的全部资料,首先作为一个反(逆)问题探讨蒸发的计算方法。这个方法要满足全球水热平衡的制约关系。这是一个十分值得研讨的问题。

总之,为了更好地解决面临的有关水的实际问题,应该加强水循环的基础理论研究。

(参考文献略)

(责任编辑 蔡德诚)

选择在厂内一块南北走向的区域。回注池设计为 π 型的 3 个相邻的池子,干湿交替作业,以利于清理池底物理与生物堵塞、增加回注量。在回注池边缘及回注池的南方一定距离内,设置一系列的观测井用于检测和试验。其中,离回注池中心 150 米处是一口抽水井,以增大地下水的压力梯度,加快地下渗流,缩短示范工程所需时间。

通过这一示范工程,将获得一些必要的数据与经验。在此示范工程的基础上,以 2002 年 10 月投入运营的北京清河污水处理厂为依托,在奥运会规划区内建立一个中等规模的二级出水地下回注工程。这一示范工程的成功实施,将使污水地下回注再生利用技术得到进一步的推广应用,为缓解我国北方严重的水资源短缺、支持国民经济可持续发展起到一定的作用。

参 考 文 献

- [1] 宋秀杰,丁庭华.北京市地下污染的现状 & 对策.[J] 环境保护,1999(11)
- [2] 李俊义.华北出现巨大漏斗区.北京青年报,2002-9-3
- [3] 张宪宏.关于南水北调有关问题的探讨.[J] 科技导报,2002(5),3-5
- [4] 成徐洲,吴天宝,陈天柱.城市污水地下回灌技术现状 & 发展.[J] 中国给水排水,1999(6),20-21
- [5] 程盛高,张聪辰主编.环境影响评价 & 环境规划,中国环境科学出版社,1999

(删去全部 12 篇英文参考资料 6 篇中文参考资料)

(责任编辑 王宏章)