

文章编号: 1007-6301 (2003) 02-0111-07

我国水循环的生物学过程研究进展

于贵瑞, 王秋凤

(中国科学院地理科学与资源研究所生态网络综合研究中心, 100101 北京)

摘 要: 作为 IGBP 核心计划之一的水循环与生物圈相互作用 (BAHC) 研究一直是国际学术研究的前沿性热点课题。本文从森林水文生态、山坡水文学、防护林水土保持效益、水生生态系统净化作用等方面, 综述了我国在水循环与生物圈相互作用研究方面的进展。并指出了从水循环的生物过程来分析我国的水资源安全、西部地区的生态环境建设和经济开发战略问题, 探讨东西部协调发展模式和生态系统与水资源管理方略时必须解决的有关科学问题。

关 键 词: 水循环; 生物学过程; 西部开发; 水资源管理

中图分类号: P343; X144

1 序言

近年来, 以气温升高为重要特征的全球气候变化引起了冰川融化、海平面上升等一系列问题。这种全球水循环的变化将对陆地生物圈产生深刻的影响。科学家们十分关心全球气候变化所引起的全球水循环变化特征及其对农业、林业和水产业等带来的影响。为此, 作为 IGBP 核心计划之一的水循环与生物圈相互作用 (BAHC) 的研究一直是国际学术研究的前沿性热点课题。本文简要回顾了我国在该领域的研究进展, 并从森林水文生态、山坡水文学、防护林 (人工林) 水土保持效益、水生生态系统的净化作用研究等几个方面进行了阐述。

西部大开发战略的实施, 使中国西部受到全世界的关注。为此, 本文还探讨了从水循环的生物过程分析西部区域的生态环境建设和经济开发战略问题、探讨东西部协调发展模式和生态系统与水资源管理方略时必须解决的科学问题。以期西部乃至全国水资源的科学管理提供一些理论基础。

2 我国水循环的生物过程研究历程

我国对水循环生物过程的研究工作主要是从农业、林业和水产业的生产应用角度展开

收稿日期: 2003-02; 修订日期: 2003-03

基金项目: 国家杰出青年基金 (项目批准号 30225012) 和中国科学院重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”(KZCX1-SW-01-01A) 共同资助。

作者简介: 于贵瑞 (1959-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态系统管理、植物生理生态、碳循环及通量观测等方面的研究。曾在国内外发表学术论文 100 多篇, 独立或合作出版学术专著 7 部。E-mail: yuguirui@cern.ac.cn or yugr@igsnrr.ac.cn

的。20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期,主要是研究土壤的持水特征^[1~9]和水分运动的动力学及其数值模拟问题^[10~14]。80 年代中期,土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 概念引入我国,以农田生态系统为主要对象,就土壤、植物、大气之间的相互作用关系、SPAC 内的水分运动规律和通量的估算模型等开展了系列研究工作。在农田生态系统能量物质交换^[15]、作物与水分关系^[16]、农田蒸散的测定与计算方法^[17~18]、农田蒸发与作物耗水量^[19]、能量水分平衡与农业生产潜力^[20]、土壤-作物-大气系统水分运动^[21~28]等领域都有较多的研究。90 年代中后期,在深入开展上述研究的同时,更多地注重了作物耗水规律与节水农业技术的研究^[29]。1991 年,中国科学院成立了水问题联合研究中心,组织力量开展水资源与全球变化、区域和流域水资源开发利用、水环境与水质保护、与水有关的自然灾害及减灾对策、干旱和半干旱地区水问题、与国民经济建设有关的水问题的研究,并出版了《中国水问题研究》^[30]。

3 我国水循环的生物过程研究进展

3.1 森林水文生态研究

森林水文研究是水循环与生物圈相互作用的一个重要领域。我国从 20 世纪 60 年代以后开展了森林水文生态作用的集水区研究。流域面积从零点几平方公里到几千平方公里。研究的内容主要集中在探讨森林植被覆盖率变化与流域径流量变化的关系,其中包括植被盖度变化对年径流量及其季节分配、洪水量、洪水过程、径流组合变化等方面。从跨我国寒温带、温带、亚热带、热带的小集水区试验以及黄河流域、长江流域等较大集水区的研究结果来看,多数结论认为:森林覆盖率的减少会不同程度地增加河川年径流量^[31]。但是在四川省西部米亚罗高山林区、岷江上游冷杉林小集水区以及长江流域 4 大流域的对比研究中,却得出森林流域年径流量较无林或少林流域大的结论^[32,33]。森林流域与无林或少林流域径流量随时间动态变化的对比研究结果表明:森林可以调节径流的分配,增加旱季枯水流量,同时森林可以减少洪水流量,削弱洪峰流量,推迟或延长产汇流时间。但也有的研究结果得出森林覆盖率与枯水径流量呈显著的负相关关系或森林对洪水特性并无显著影响的结论^[34]。另外,我国学者还对不同气候带及其相应的森林植被类型林冠截流率,林冠截流模型^[35],林地土壤的入渗率、入渗量模型,森林水源涵养作用的评价,森林蒸散^[31]等森林水循环过程的各环节开展了研究。

3.2 山坡水文学研究

20 世纪 70 年代,山坡水文学研究得到发展,为径流形成机制理论的形成奠定了基础。从界面产流理论来看,大气可视为绝对透水层,在大气和包气带界面之间水力传导度的差异是超渗地表径流形成的条件;包气带在垂直方向上水力传导度的差异(土壤导水率一般沿土层深度的增加呈减小的趋势)为侧向壤中流运动提供了条件;如果上层包气带随水分供给逐渐饱和,当饱和带发展到地表就为形成饱和地表径流提供了基本条件;同样,地下水水面亦可视为绝对不透水界面,当水分通过包气带抵达地下水水面,是地下水径流形成的基本条件^[34]。

3.3 防护林(人工林)水土保持效益研究

因我国特殊的自然与社会经济条件,在此领域的研究比较深入和广泛。从研究的区域

上看,几乎遍布我国南北山区,从寒温带、温带的东北山地,到暖温带的黄土高原、亚热带秦岭-淮河以南广大地区以及热带区域。所研究的树种基本上涉及了这些区域极具代表性的所有森林植物种^[34]。大部分的研究结果都认为:林地和控制水土流失方面均具有十分显著的作用,尽管这种作用在不同地理区域、不同树种、不同类型的人工植被群落产生一定的变化。研究工作主要是与水文生态研究同步进行,研究方法以观测试验研究占绝对优势。标准径流小区、自然坡面集流区、小流域等空间尺度的实地观测研究都是最为广泛采用的研究方法。采用人工模拟降雨来研究不同人工林植被群落的防蚀效益,在干旱、半干旱等降水较少的地区作为天然降雨观测的补充也有较广泛的应用。

3.4 水生生态系统的净化作用研究

生态系统研究网络(CERN)胶州湾海洋生态系统定位研究站、大亚湾海洋生物综合实验站、太湖和东湖湖泊生态系统实验站的建立,推动了我国水体生态系统的研究。各实验站在水体生物种群、生态系统生产力以及水质等方面开展了相应的研究工作^[36~38]。在对工业污水的净化作用方面的研究表明,水生高等植物对工业废水中的主要污染物有明显净化效果。厦门环境保护监测站研究了水生植物芦苇、水葱、水葫芦和水花生对净化污水中硫化物的效果。对污水中硫化物,芦苇的平均去除率为62.8%;水葱、水花生和水葫芦的去除率都达50%以上;浮萍为29.6%。中国林业科学研究院林产化学研究所对4种水生植物对制浆造纸废水净化处理的研究表明:有水生物的溶解氧量大幅增加,水质清新不臭,溶解氧的含量水葫芦塘为4.9~6.7mg/l,比对照样高11倍;水花生、水浮莲分别为2.4~3.0mg/l和2.35~3.05mg/l,比对照样高5倍左右,对废水的净化效果明显。在针叶材化学浆及阔叶材化学浆以1:1混合的废水中,水花生具特别优异的净化效果,对COD_{Cr}去除率为79.1%,对COD_{Mn}的去除率为79.8%,色度去除率为91.3%。水生物在多级综合处理中,2种废水水葫芦对COD_{Cr}的去除率分别为50.7%和73.2%,对COD_{Mn}的去除率分别为42.8%和55.1%。江苏植物研究所在应用水生植物氧化塘生态工程处理炼油废水的研究结果表明:凤眼莲对酚的去除率为52.7%,对油的去除率为26%,对硫、氰等均有降低作用,BOD₅的去除率为58.57%,COD为24.80%,溶解氧增加,浊度明显下降,出水清澈^[34]。

4 急需开展研究的科学问题

我国西部地区的总面积545.2万km²,占国土面积的56.8%,耕地面积22523.7万hm²,占全国耕地面积的23.7%,全年平均水资源总量为13106.9亿t,占全国年平均水资源总量的47.7%。西部地区包含了两个不同类型的生态区域,其一是干旱和半干旱的西北地区,其二是水资源充沛的西南地区。两者的区域性生态环境特征和地理区位的差异决定了它们在中国国民经济发展中的战略定位以及自身的发展思路应该有所不同。从西部大开发的角度看,用水循环的生物过程来分析我国的水资源和粮食安全、西部区域的生态环境建设和经济开发战略问题,探讨东西部协调发展模式和生态系统与水资源管理方略时,科学家必须解决6个科学问题。

4.1 江河源区域生态系统的水源涵养功能与管理

我国的地理地貌特征决定了我国的重要江河都是起源于西部地区,东部地区的粮食生

产和社会经济发展很大程度上依赖于西部地区水资源的支撑。几千年的社会发展和变革形成了我国以黄河和长江流域为主线的东西走向的两大经济带、城市群和粮食生产基地。青藏高原作为天然的集水区和水资源库,不断地为这两大经济带、城市群和粮食生产基地的生命维持和发展注入新鲜的血液(水)。另外,珠江三角洲经济带和城市群的水资源主要来自于云贵高原的南盘江-红水河-黔江和右江/左江-郁江水系;辽阔的东北大平原的水资源也是主要来自于其西部的大兴安岭。因此,西部的江河源区域生态系统的水源涵养功能与综合治理研究是关系我国粮食安全和东部社会经济可持续性的重大战略性科学问题。研究的重点是:探讨江河源区域生态系统的水源涵养功能的评价和预警系统;阐明生态系统的水源涵养功能的形成过程和生态学机制;揭示全球气候变化可能对青藏高原冰川活动、天然降水和植被地理分布的影响;寻求兼顾国家整体利益和区域发展的综合治理途径、生态系统与水资源管理模式和政策。

4.2 绿洲生态系统的水循环与可持续性

在我国干旱和半干旱的西北地区,沿江沿河以及一些天然集水盆地,散布着大量绿洲生态系统,近年来在一些沙漠地带依靠深井开发地下水的灌溉绿洲也呈现发展的趋势。这些绿洲生态系统依靠外来水资源的补充或地下水资源开采,维持着较高的生态系统生产力,具有较发达的绿洲农业和相应的牧业生产规模,通常成为干旱区域中经济比较发达的产业或城镇分布地带,也是带动地方经济发展的先头区和人口集散地。值得注意的是,这些地区的蒸发散潜力通常为自然降水量的几倍或几十倍,农业灌溉方式落后,水分利用率极低。随着经济的发展和绿洲规模的扩大,水资源的开发能力和利用强度不断增大。这不仅可能造成十分有限的外来水资源和地下水资源的过度消耗,引发地下水位和绿洲周边植被环境的变化、绿洲土壤的次生盐碱化等众多问题的发生,进而导致维持绿洲生存的水资源的更新机制遭到破坏。同时,沿江、沿河的绿洲农业和城镇的发展使得水资源过度消耗,将会造成河流径流量减少和水质污染,给河流下游地区的工农业生产带来威胁。研究西部绿洲生态系统的水循环和持续性问题,不仅是绿洲生态系统自身发展的需要,也是区域发展和协调东西部关系的紧迫任务。研究的科学问题主要包括:绿洲生态系统的水循环和水资源消耗规律,生态系统演变和持续性机理,绿洲生态系统成立和维持的条件与生态阈值,绿洲生态系统发展的适度规模及其对区域生态环境的影响,绿洲生态系统可持续管理的技术体系。

4.3 雨养生态系统的水利用与社会经济承载力

雨养生态系统是指生态系统的水循环主要来自于自然降水,主要以系统内的自然降水资源来维持生态系统的结构和功能。我国西部地区除了一些散在的绿洲生态系统以外,大部分地区都是雨养生态系统。包括了西部大部分的农田、草地、天然林和人工林地。对于雨养农业、草地和森林系统来说,虽然人们已经不同程度地采用了各种生物和工程措施与技术来提高水分的利用效率,但是其生态系统的生产力还主要决定于自然降水量和植被的水分利用效率。即区域的自然降水量和植被的水分利用效率是决定生态系统生产力和社会经济承载力的关键。研究的主要科学问题有:依据植被与水分关系的造林种草规划,植被潜在的水分利用效率与开发的技术途径,农田节水与合理的种植制度,集水农业技术与适度规模,植物抗旱的生理生态学基础,雨养农业的粮食生产潜力和降水资源承载力。

4.4 土壤 - 植物 - 大气系统的水循环模型及生物控制作用

自 BAHC 启动以来, 通过野外观测实验研究, 确定土壤 - 植物 - 大气系统水循环中的生物控制作用, 建立各种时间和空间尺度的土壤 - 植物 - 大气系统能量和水分通量模型已成为该研究计划的核心问题。目前在植被斑块尺度上, 已经可用秒和小时为单位对蒸发散和能量输送通量进行实际测定, 其在地面边界层中的输送模型已经相当成熟。可是对于由不同植被构成的中尺度陆地表面而言, 如何估算区域的平均能量和水分输送通量还十分困难。近年来, 虽然在以 Penman - Monteith 模型或 Shuttleworth-Wallace 模型为基础的中尺度甚至全球尺度的土壤 - 植物 - 大气系统能量和水分通量模型开发方面取得了很大的进步, 提出了一些比较严密的数值模拟模型 (例如, CERES、ENWATBAL、SPACM、SWATR、SWEAT、SWIM 和 WATBAL、BATS、MAESTRO、SiB、SiB₂、SVAT 和 NEO SPAM 等), 但是把它们作为 GCMs 的地表过程模型, 其局限性还很大, 远不能满足实际的需要, 尤其这些模型主要是以湿润地区为对象的研究结果, 难以应用于干旱和半干旱的西北地区及地形地貌起伏很大的西南地区。另外, 植物的蒸腾和光合作用是生态系统物质能量循环的两个最基本的生理生态学过程, 两者同时受植被气孔行为所控, 以植被气孔内的 H₂O/CO₂ 扩散为接点, 把生态系统水循环与碳循环相耦合, 构建和开发生态系统生产力和水分利用的生理生态过程, 是研究土壤 - 植物 - 大气系统的水循环生物控制作用的重要途径。

4.5 生态系统植被变化与水循环相互作用

全球水循环变化主要是通过海洋作用于大陆而引起的。但是, 陆地表面过程可能会对海洋生态系统以及全球水循环产生反馈作用。陆地土地利用/土地覆被变化, 可能通过影响陆地表面的水热和辐射平衡来改变陆表温度分布, 改变大气压场的梯度方向和强度, 影响全球的大气环流和水循环。因此, 当前的西部地区植被恢复重建不仅需要以水热条件决定的自然植被的地域分异和生态适应性规律为指导, 同时也将对生态系统水循环产生深刻影响。为此, 西部地区的植被恢复重建, 必须从植被变化与水循环相互作用关系的角度, 阐述西部地区潜在的自然植被地理格局, 退耕还林的适度规模、适宜区域和植被类型, 以及植被变化对水循环的可能影响等科学问题。还必须探讨植被恢复重建工程的社会代价和生态效果, 实施策略与政策, 区域间的经济补偿机理与政策调控等生态经济学问题。

4.6 国家水资源安全和西部水资源管理问题

我国西部大开发战略的实施, 将会使西部的水资源需求总量不断增加, 从而会减少东部可利用水资源总量。因此, 我们必须从国家水资源安全的角度来研究西部的水资源管理问题, 这是关系到西部大开发战略能否成功的重大理论课题。研究的科学问题包括: 西部水资源在国家水资源安全体系中的科学定位, 西部水资源和东部经济的连动关系, 东西部的合作体制与经济补偿机制, 西部生态环境用水的理论与评价方法, 水资源所有权与水市场体系, 水价体系与水资源税收政策, 西部地区产业结构与水资源的开发利用、水资源的区域平衡与调配的宏观管理等。

参考文献

- [1] 陈志雄, 王仁莫. 中国几种主要土壤的持水性. 土壤学报, 1979, 16(3): 277 ~ 231.
- [2] 周有才, 洪书. 松伦平原土壤水分动态的研究. 土壤学报, 1979, 16(3): 305 ~ 305.
- [3] 杨金楼, 朱连龙. 上海地区土壤持水特性的研究. 土壤学报, 1982, 19(4): 331 ~ 343.

- [4] 张景略,苗付山.黄泛平原不同质地土壤的持水特性.土壤学报,1985,22(4):350~355.
- [5] 刘孝义,周桂芹.东北地区几种主要土壤持水特性的研究.沈阳农学院学报,1985,16(2):31~37.
- [6] 庄季屏,王伟.土壤低吸力段持水性能及干旱期土壤干旱的关系研究.土壤学报,1986,23(4):300~313.
- [7] 吴风彩.低吸力土壤水分特征曲线的计算.水利学报,1986,(1):49~55.
- [8] 蒋定生,黄国.黄土高原土壤入渗透速率的研究.土壤学报,1986,23(4):299~305.
- [9] 姚贤良.土壤物理.北京:农业出版社,1986,126~129,284~322.
- [10] 雷志栋,杨诗秀.非饱和土壤水一维流动的数值计算.土壤学报,1982,19(2):141~153.
- [11] 杨诗秀,雷志栋,谢森传.均质土壤水一维非饱和流动的通用程序.土壤学报,1985,22(1):24~34.
- [12] 张思聪.渗灌的非饱和土壤水二维流动的探讨.土壤学报,1985,22(3):209~222.
- [13] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学.北京:清华大学出版社,1988.
- [14] 谢森传.土壤水分通量法及其应用.灌溉排水,1988,7(2):1~16.
- [15] 牛文元,周允华,张翼等.农田生态系统能量物质交换.北京:气象出版社,1987.
- [16] 谢贤群,于沪宁.作物与水分关系.北京:中国科学技术出版社,1992.
- [17] 左大康,谢贤群.农田蒸发研究.北京:气象出版社,1991.
- [18] 谢贤群,左大康,唐登银.农田蒸发—测定与计算方法.北京:气象出版社,1991.
- [19] 程维新,赵家义.农田蒸发与作物耗水量研究.北京:气象出版社,1993.
- [20] 赵名茶.能量水平平衡与农业生产潜力网络试验研究.北京:气象出版社,1992.
- [21] 谭孝源.土壤-植物-大气连续体的水分运输.水利学报,1983,(9):1~10.
- [22] 罗远培.土壤-植物-大气连续体与系统动态模拟.灌溉技术,1986,5(1):8~14.
- [23] 康绍忠,熊运章,王振益.土壤-植物-大气连续体水分运移力能关系的田间试验研究.水利学报,1990,(1):1~9.
- [24] 于贵瑞,陈维新,刘孝义等.SPAC系统水分能量状态研究初报.中国耕作制度研究论文集.南京:南京大学出版社,1992,85~103.
- [25] 于贵瑞等.土壤的水分特征曲线与吸水特性研究.日本农业气象,1994,50(2):213~220.
- [26] 于贵瑞等.半干旱,半湿润地区的SPAC系统水势的变异性研究.日本沙丘学会杂志,1995,42(1):1~10.
- [27] 于贵瑞等.SPAC内的水流阻抗的分布特性.日本生态学会杂志,1997,47(2):261~273.
- [28] 刘昌明,于沪宁.土壤-作物-大气系统水分运动实验研究.北京:气象出版社,1997.
- [29] 董哲仁.中国节水农业技术问题论文集.北京:中国水利水电出版社,1999.
- [30] 刘昌明,何希吾.中国水问题研究.北京:气象出版社,1996.
- [31] 刘世荣.中国森林生态系统水文生态功能规律.北京:中国林业出版社,1996.
- [32] 马雪华.森林与水.北京:中国林业出版社,1987.
- [33] 马雪华.森林水文学.北京:中国林业出版社,1993.
- [34] 于志民,王礼先.水土保持林的功益研究.北京:中国林业出版社,1999.
- [35] 王礼先,解明曙.山地防护林水土保持水文生态效益及其信息系统研究.北京:中国林业出版社,1997.
- [36] 董金海,焦念志.胶州湾生态学研究.北京:科学出版社,1995.
- [37] 刘建康.东湖生态学研究(二).北京:科学出版社,1995.
- [38] 蔡启铭.太湖环境生态研究(一).北京:气象出版社,1998.

Advancement and Scientific Issues in Research on Biological Process of Water Cycle

Yu Guirui , Wang Qiufeng

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research , Beijing 100101 China)

Abstract : The interaction of vegetation with the physical processes of the hydrological cycle addressed by Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC) of the initial Core Projects of the IGBP is a focus in academia at all time. Water cycle and its biological process are of great importance to regional economic development and eco - environment establishment in China , especially for western development region. For this reason , we summarized the process of development in research on the interaction of vegetation with the physical processes of the hydrological cycle in China. At the same time , researches on Forest Water Cycle Ecology , Hillside Hydrology , Soil and Water Conservation Benefits of Protection Forest , and Purification Function of Aqua - Ecosystem are also covered in this paper , expecting to provide more information for water resources management and relevant research in China. It is necessary to analyze the water resource security , eco - environment establishment and economic development of west region based on biological process of water cycle in China. Relational scientific issues are also pointed. Finally , this paper discusses the harmonious development pattern of west and east in China and the strategy on ecosystem and water resource management.

Key words : Water cycle ; Biological process ; West development ; Water resource management ; Forest water cycle ecology ; Soil and water conservation