

中国水文循环与水体研究进展

储开凤, 汪静萍

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 根据 2002 - 2005 年中国公开发表的关于水科学研究的论文及国家重大攻关项目和国家自然科学基金项目的科研报告, 综述了近年来中国在水文循环诸要素如降水、径流、蒸发, 水文模型, 河流与泥沙、湖泊、沼泽与湿地、冰川与冻土以及地下水与土壤水等方面研究取得的主要成果和进展。

关键词: 水文循环; 地表水; 地下水; 土壤水; 研究; 进展; 中国

中图分类号: P343; G853.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2007)03-0468-07

全球变化与地球系统科学研究在全球广泛开展, 中国积极参与国际 IHP, IAHS 等国际科学组织的科学活动, 研究领域涉及了当前国际科学合作计划的诸多方面, 并取得丰硕成果。针对国际水科学发展前沿、国家“十五”科技发展和国家重大需求中遇到的水问题的复杂性与不确定性的热点和难点问题, 本文分别叙述在这些方面取得的成果和进展。

1 水文循环要素研究

1.1 降水

(1) 气候变化对中国降水时空分布的影响 张存杰等^[1]分析了在全球气候变暖背景下, 西北地区秋季降水的时空变化特征和主要影响因素。由于北太平洋大范围持续的海温异常引起了次年夏季大气环流的异常, 导致了淮河流域夏季降水异常^[2]。信忠保等^[3]研究指出, El Nino 年份的春季和冬季淮河流域降水明显增多, 而在 La Nina 年份降水普遍减少, 尤其以 7 月减少最为显著。刘晓东等^[4]揭示了全球平均气温偏高(低)与黄河中游地区年降水量偏少(多)存在一定的对应关系。龚道溢等^[5]分析了春季北极涛动的变化对随后夏季长江中、下游地区降水的影响, 如果春季北极涛动强, 造成长江中、下游地区降水的减少和北方降水的增加, 为汛期降水的预测提供了信号。姜彤等^[6]研究指出, 全球大幅度变暖, 可能导致 21 世纪长江流域降水增加 10%。此外, 潘蔚娟等^[7]用蒙特卡罗方法分析发现, 中国夏季大尺度降水与全球气温场密切相关, 印度洋地区春季气温和北美洲北部及北太平洋西南部夏季气温偏高时, 长江中下游夏季易涝, 而且它们与长江中下游夏季降水的相关均有阶段性, 相关密切程度随时间有所增强。由此可见, 20 世纪 90 年代以来, 长江洪水的频繁发生是对气候变暖的响应。但这些研究还是初步的, 今后应当在揭示新事实的同时, 加强影响机制的研究。

(2) 区域降水量变化 王秀荣等^[8]研究指出, 西北地区夏季降水区域性较强, 存在多种时空尺度特征, 且平均具有准 3 年和 4.8 年的周期变化。范广洲等^[9]揭示了青藏高原隆升对西北地区降水量有明显影响。隆升前, 西北地区年降水量比现在偏多约 150 mm; 随着高原隆升, 西北地区年降水量逐步减少。刘洪兰等^[10]分析了河西走廊春末夏初干旱的基本气候特征, 指出 20 世纪 80 年代为近 50 年来降水最多的 10 年, 90 年代又有所减少, 20 世纪末至 21 世纪初有明显增加。杨志峰等^[11]研究指出, 黄河流域兰州以上降水主要受青藏高原大尺度气候影响, 具有全区同步降水偏多(少)一致性特征, 从时间尺度上降水有减少的趋势, 由于其水资源量占黄河流域水资源量的一半以上, 研究黄河上游兰州以上区域降水时空结构变化具有重要意义。谢志清等^[12]计算并分析了长江三角洲地区年最大日降水量、年最大一次连续过程降水量的极端降水特征, 结果表明, 长江三角

收稿日期: 2006-06-20; 修订日期: 2006-08-25

作者简介: 储开凤(1965 -), 女, 江苏海安人, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: Chukf65@sina.com

洲一次连续过程的降水量极大值的空间分布相对集中。姜彤等^[13]研究指出,近40年来,长江流域降水量略有增加,夏季降水量增加显著,尤其是20世纪90年代增加更为明显。降水量增加的地区主要分布在长江中下游地区的洞庭湖、鄱阳湖以及太湖流域,主要是由于20世纪90年代长江中下游地区暴雨日数(频率)增加所致。

根据中国国际气候变化委员会办公室2003年公布的报告,近50年来中国年平均降水量在减少,平均减少2.9 mm/10a,但最近10年(1991-2000年)略有增加。华北大部、西北东部和东北地区降水明显减少,平均减少20~40 mm/10a,而华南与西南地区降水明显增加,平均增加20~60 mm/10a,西北地区西部降水也有增加。降水变化的另一个特点是,年降雨日数减少,而降水变率增大。

降水量时空变化是水资源时空配置的重要依据,因此,关于降水时空分布的研究应与水资源开发与利用研究紧密结合。

1.2 径流

(1) 降水变化对径流的影响 王云璋等^[14]利用黄河兰州以上地区降水量资料,分析了降水变化对径流量的影响。结果表明,20世纪70、80年代降水变化对天然年径流量的影响不甚明显,而90年代以来影响十分显著,其影响幅度达10%~20%。许炯心等^[15]以黄河流域的降水量、实测径流量、天然径流量、净引水量以及上中游流域的水土保持措施的面积等资料为基础,研究了近50年来黄河入海径流通量的变化与降水和人类活动的关系。结果表明,不同的径流来源区降水的变化对入海径流通量的影响是不同的。

(2) 径流变化趋势 河川天然径流量变化与趋势预测研究对陆地水循环与水量平衡研究和水资源利用等均有重要意义。穆兴民等^[16]对黄河天然径流量年际变化和未来趋势进行了分析,预测在2010年天然径流量开始恢复到多年平均水平。王琦等^[17]分析了干旱化趋势对黄河中游径流量的影响,其影响程度基本与人类活动的影响相当。蓝永超等^[18]分析了黄河上游唐乃亥以上流域年径流序列的长期变化特征,并预测未来10年内,黄河上游年径流量的变化将呈震荡递增的趋势。秦年秀等^[19]研究长江流域径流趋势表明,20世纪90年代长江流域径流量呈微弱增加趋势,但不显著且地区分布不均,中上游减少,下游增加;而季节性夏季和冬季径流量增加趋势明显,尤其是7月和1月径流量增加最突出;更重要的是90年代汛期径流量也呈现出增加趋势,汛期径流量的增加在一定程度上加大了洪灾发生的可能性,这可能是导致洪灾频繁的原因之一。这些都是近年来具有代表性的成果。

1.3 蒸发

蒸发一直是水文循环要素中研究较为薄弱的方面,但近年来受到了许多研究者们的关注。

(1) 蒸发量减少现象普遍受到关注 车洪军^[20]通过海河流域部分长系列代表站分析表明,随着全球气候的变暖,全球气温逐年升高,水面蒸发量不但没有增加,反而呈明显减小的趋势。郭军等^[21]分析发现,近50年来黄淮海流域蒸发量减少十分显著,其变化速率一般在-50 mm/10a,平原地区最大变化速率达到-80 mm/10a以上。蒸发量下降最明显的季节是春季和夏季。王艳君等^[22]利用长江流域1961-2000年的观测数据,计算分析结果表明,近40年来,长江流域中下游地区蒸发量的变化趋势明显比上游地区显著,尤其表现在夏季。尽管近20余年长江流域气温不断升高,但太阳净辐射和风速的显著下降,可能是导致蒸发量持续降低的主要原因。

(2) 蒸发观测与计算方法研究 目前,已发展了从传统方法、模拟方法到遥感方法的多种方法用于估算蒸散发量。代表性成果如曹建生等^[23]提出了一种根据动态水量平衡来测定水面蒸发量的新方法,介绍了该系统的实际应用情况。该方法与传统的测定方法相比,可以人为设定系统的采样间隔,从而较准确地测定水面蒸发的日变化过程。利用卫星遥感技术监测蒸发量是一种技术可行、精度较高、可实现大范围监测的先进方法^[24]。遥感方法以其能够获知大范围地表特征信息的优势为较准确估算地表蒸散发提供了可能,从而受到人们的日益重视。牛振国等^[25]建立了基于数字高程模型的区域参考作物蒸散量的分布式模型。模型的建立与实现提高了区域蒸散发估算的精度,对于区域水量平衡研究和分布式地理模型以及沙质荒漠化防治模式研究具有重要意义。此外,庞治国等^[26]也提出了基于能量平衡的遥感反演蒸散发量的计算模型。采用经验、半经验公式反演计算了模型中各参数。证明该模型具有很强的实用性,并且可为旱情监测系统运行提供依据。

区域面蒸发量的计算和不同条件下的植被蒸散量的计算依然是进一步研究的重点,而揭示蒸发量普遍减少的原因可能会带动环境和边界层理论的研究。

1.4 水文模型

基于 DEM 的分布式水文模型是研究变化环境下水文循环与水资源演化规律的理想工具之一,代表了水文模型的最新发展方向^[27]。随着地理信息系统技术、数值方法、测雨雷达技术和水文学理论的不断进步,分布式水文模型必将得到越来越广泛的应用^[28]。胡和平等^[29]针对干旱地区平原绿洲水土资源利用的特点,建立了干旱区平原绿洲散耗型水文模型。吴险峰等^[30]也提出了一种松散耦合型结构的分布式水文模型,模型以小时为时段,主要用于洪水模拟。模型适用于人类活动较少的、半湿润和半干旱地区,在黄河小浪底-花园口区间洛河卢氏以上流域得到应用。

传统的水文模型主要侧重水文物理过程,但只有充分耦合植被生态过程,才能从机制上揭示森林植被参与水文循环的调控作用。TOPMODEL 是一种以数学方式表示水文循环过程的基于物理过程的半分布式流域水文模型,该模型结构明晰,参数较少且具有明确的物理意义,不但适合于坡地集水区,还能用于无资料流域的产汇流估算^[31,32]。

基于大气-土壤-水-植被系统的物理过程和充分采用高新技术(如计算机技术、3S 技术等)应当是水文模型研究的方向。

2 地表水体研究

20 世纪后半叶以来,气候变化和人类活动强烈地改变着地表和地下水体的状态和性质,其反馈也对人类自身带来了严重的资源环境问题,因此,变化环境下的地表、地下水研究在这几十年里一直成为研究的基本课题。

2.1 河流与泥沙研究

(1) 河道演变研究 中国黄河、长江河道演变是一个重要的研究课题。姚文艺等^[33]为预测黄河下游游荡性河道大规模整治后对河床演变的作用,以黄河下游游荡性河道典型河段为对象,研究了河床过程对河道整治的复杂响应关系。李茂田等^[34]利用地理信息系统(GIS)与数字高程模型(DEM)技术,模拟了 40 年来长江九江段的冲淤过程,指出 1963 - 2002 年,九江河床总体表现为冲刷。长江九江河段 40 年的演变是河床的边界条件、上下游来水来沙及人类活动耦合的结果。中下段南岸的不断刷深和南偏对九江的防洪带来更大的压力。

(2) 河流健康研究 中国学者近年来开始对河流健康研究予以关注。如董哲仁^[35]提出了河流健康的内涵。李国英^[36]以黄河为例,论述了 21 世纪维持黄河健康生命的治河方略,从理论体系、生产体系和伦理体系三个不同的视角,阐述了这一治河理念的内涵、目标及实现战略。构建人类和河流间的和谐关系,从而使黄河的健康生命得以恢复及维持。吴阿娜等^[37]在探讨国外河流健康状况开展情况的基础上,指出我国迫切需要构建一套适合国情的河流健康状况评价体系,从河流健康角度评价国内主要河流的生态环境质量,并为广泛开展河流恢复项目提供基础数据和决策依据。基于河流健康保护和恢复的河流可持续管理模式等研究仍然将会是今后河流研究的热点问题。

(3) 泥沙研究 在泥沙理论研究方面,非恒定流输沙、环境泥沙学、生态泥沙学和经济泥沙学正成为新的生长点。在应用研究方面,对三峡工程建设中和建成后的泥沙运动和沉积规律进行了大规模的验证测量,将检验现有的泥沙理论和研究方法,大大推动泥沙科学的发展。石伟等^[38]利用水库群调水调沙试验成果,指出使小浪底水库以造床流量、高含沙水流输沙,是目前推荐的黄河下游节水减淤高效输沙入海的主要方式。从黄河下游河型沿程变化的实际出发,韩其为^[39]利用建立的河相系数与流量的关系以反映这种变化,进而深入研究了黄河下游有关输沙和冲淤的一些问题。研究黄河干流的非恒定水沙输移规律以及库区泥沙的淤积问题极为重要,陈前海等^[40]应用圣维南方程组以及非恒定泥沙连续方程建立了非恒定非均匀泥沙含沙量计算公式,并根据沙量平衡方程推求出三门峡库区河底高程的变化规律。严军等^[41]根据 1950 - 2000 年黄河下游河道实测水沙资料,计算了三门峡水库运用不同时期黄河下游河道输沙水量与单位输沙水量的变化过程,得到了黄河下游河

道输沙水量与单位输沙水量的计算公式。李义天等^[42]通过分析历史和近期长江中游的泥沙输移变化，深入剖析了该区域洪灾形势愈演愈烈的原因。随着中上游人类活动加剧，区域水沙灾害发展趋势恶劣。周济福等^[43]指出河口泥沙运动与河口地区湿地演变和浮游生物生长环境的关系是当前河口泥沙运动研究的两大热点。在国际上，中国泥沙研究水平依旧保持着国际领先的态势。

2.2 湖泊研究

(1) 湖泊萎缩严重 目前，洞庭湖的严重泥沙淤积，已经造成了湖泊调蓄长江中游洪水功能的严重衰退，危及长江中下游地区的防洪安全，研究洞庭湖的湖盆冲淤演变具有重要意义。黄群等^[44]研究了近50年来洞庭湖区的内湖变化，由于人类活动的强烈作用，内湖与洞庭湖一样呈现出急剧萎缩的态势，1 km²以上内湖的数量由20世纪50年代的255个减少到目前的122个，湖泊面积也由1534.4 km²缩小至644.2 km²，其衰亡的速度甚至超过了洞庭湖。青海湖在1975-2000年的25年间，湖岸形态发生了较大变化，李凤霞等^[45]分析了造成湖岸形态变化的主要原因是气候暖干化、湖水位下降、土地沙漠化和人类活动的共同影响。由上述研究成果可见，人类活动影响和气候变化是造成中国湖泊萎缩的重要原因。

(2) 湖泊富营养化 中国东部地区主要以湖泊污染和富营养化问题为主。在长江流域干支流N、P营养盐现场观测资料的基础上，张恩仁等^[46]分析了三峡水库对上游营养盐的截流效应，三峡工程可减缓长江下游及长江口区的富营养化趋势，但却在一定程度上加剧了长江中下游营养盐N/P比上升的趋势。朱广伟等^[47]对太湖不同污染状况和生态系统状况的湖区沉积物中磷的地球化学形态及其分布进行了研究。研究表明，浅水湖泊中水生生物状况、风浪扰动状况对沉积物中磷的地球化学行为有至关重要的影响。

2.3 沼泽与湿地研究

(1) 沼泽面积缩小 李颖等^[48]定量分析和研究了1986-2000年三江平原沼泽景观的动态变化，结果表明，三江平原沼泽的面积正在日益缩小，沼泽正在大幅度地转化为耕地，沼泽已经到了完全破碎化的边缘。

(2) 湿地研究 国际重大研究计划如IGBP, IHP等，都列有湿地水文与水资源研究的内容，特别是国际水文计划(IHP)第六阶段计划(2002-2007年)将湿地作为重要研究内容。主要目标是：评估作为水文循环调节器的湿地的重要性；研究湿地恢复方法与开展监测；鼓励湿地的保护。

青藏高原湿地是中国特有的湿地，在全球变化研究中占有特殊的重要地位，已经引起国内外学者的关注。白军红等^[49]提出了未来的重点研究领域：高原湿地景观格局与过程研究；高原湿地格局动态变化与全球气候变化研究；退化高原湿地的恢复、重建与保育研究。

根据对与青藏高原湿地退化有关的水分、温度和日照等气候背景条件变化趋势及其生态环境效应的研究成果，罗磊等^[50]揭示了全球和区域气候变化是青藏高原湿地退化的重要原因，今后应该加强对高原湿地蒸散发过程和模式的研究，才能真正阐明湿地退化的机理。

2.4 冰川积雪和冻土研究

(1) 冰雪对河流的补给 对中国西北干旱区冰川融水径流补给比例大的内陆河，进行冰川变化对水资源影响的研究，为如何合理开发和利用冰川融水资源提供依据，已经成为中国水科学界共同关注的话题。康尔泗等在中国西北干旱区的水资源研究中，分别计算冰川融水和积雪融水对河川径流的补给量和所占比重，其结果表明，积雪融水在西北内陆河流的径流补给中占30%左右。同时指出，冰川近期变化是“小冰期”以来冰川变化的继续。近40年来冰川退缩加快，反映了全球变暖对冰川的影响^[51,52]。

(2) 冰川变化研究 蒲健辰等^[53]研究指出，近百年来，青藏高原的冰川仍然呈明显的波动退缩趋势。随着全球气候的波动变暖，特别是进入20世纪80年代以来的快速增温，使高原冰川末端在几十年间出现了快速退缩，显示出青藏高原冰川对气候变化的响应在边缘山区较中腹地区更为敏感。杨建平^[54]以位于青藏高原长江源头的各拉丹冬地区和黄河源区的阿尼玛卿山地区冰川为例，分析了冰川变化对河川径流的影响。结果表明，长江源各拉丹冬地区1969-2000年冰川总面积减少了1.7%，而黄河源阿尼玛卿山地区冰川面积减少是长江源区的10倍，同期，长江源区冰川末端的最大退缩速率为每年41.5 m，而黄河源区每年为57.4 m，与黄

河源区相比, 长江源区冰川退缩速度不是太大, 基本上处于稳定状态, 且有前进冰川存在。张杰等^[55]对河西内陆河流域上游的祁连山区积雪、冰川的光谱特征进行了判识, 并分析了积雪面积和雪线高度变化。

(3) 冻土变化研究 吴青柏等^[56]对 1995 - 2004 年青藏高原多年冻土温度监测资料进行分析, 结果表明, 在全球气候变暖影响下, 近 10 年来多年冻土发生了显著的变化, 青藏高原多年冻土变化对气候变暖有明显的响应关系。青藏高原冰川和湖泊变化是气候变化敏感的指示器, 鲁安新等^[57]利用遥感资料和其它相关研究文献资料, 分析了青藏高原典型地区的冰川和湖泊变化情况。

3 地下水及土壤水研究

3.1 地下水研究

(1) 地下水分布研究 蒋秀华等^[58]采用最新资料分析计算了西北诸河各水资源二级区地下水资源量, 并结合降雨、水文地质及人类活动影响等因素全面阐述了西北地下水资源的分布特征和规律, 为西部地区的水资源规划、利用及其社会经济发展提供基础依据。地下水数值模拟是目前定量研究地下水水量和水质的重要手段, 卢文喜^[59]对地下水运动数值模拟过程中边界条件的涵义和处理方法进行了分析和讨论。指出随着人类活动影响强度的日益增大, 边界条件的处理要面临一些新的更为复杂的问题。薛禹群等^[60]将多尺度有限元法应用于非均质多孔介质中的流动问题, 计算结果的对比表明, 多尺度有限元法比传统有限元法有效, 既节省计算量又有较高的精度。为了揭示人类活动对喀斯特地下水文地球化学环境的影响, 郎赞超等^[61]研究了贵州省贵阳市不同岩性含水层地下水和地表水的化学特征。为喀斯特地区地表水地下水资源的保护和利用提供了科学依据。在昌吉地下水均衡试验场, 选择该平原的 3 种代表性土壤(粉质轻粘土、细砂、砂砾石), 利用地中渗透仪观测冻结-冻融期的地下水补给与损耗。冻融期地下水补给量及其补给特点与非冻结期有显著差异, 因此, 冻结-冻融期地下水的补给观测与研究显得尤为重要, 对于了解内陆盆地冻结-冻融期的地下水补给和准确评价地下水资源具有重要现实意义^[62]。

(2) 地下水污染研究 由于人类活动的长期影响, 我国的地下水污染日益严重。为此, 我国学者对污染物在含水层中的运移、控制、修复进行了大量的研究工作。其中包括: 污染物在地下水中运移的模拟和预测; 防止污染源扩散的方案设计; 海水入侵问题等等。并指出三维弥散、各向异性含水层介质中污染物的迁移、非饱和和土层中的污染物多相迁移和吸力的关系等将成为今后地下水污染研究备受关注的问题^[63]。

3.2 土壤水研究

胡安焱等^[64]研究干旱内陆区土壤水分运移规律以及土壤盐分运移规律, 根据水量平衡和盐量平衡原理, 建立了土壤水盐模型, 计算土壤水盐迁移量, 并对干旱内陆区土壤水盐运移规律做了初步研究。陈洪松等^[65]对黄土高原沟壑区荒草坡地不同水文年土壤水平衡进行了数值模拟, 预示黄土高原地区在干旱年和平水年土壤水分易收支负平衡, 从而形成土壤干层。田立德等^[66]根据 1998 年夏季测得的青藏高原中部那曲地区降水和土壤水中稳定同位素, 分析了不同层位土壤剖面中稳定同位素的变化规律及其与水分迁移的关系。周启友等^[67]利用反演计算和土壤电阻率与含水量之间的关系, 探讨了土壤水在三维空间上的分布特征及其在时间上的稳定性。结果表明, 试验区的土壤含水量在三维空间上的分布是非均质的和各向异性的。刘海隆等^[68]系统分析了研究区不同坡度下土地利用方式对土壤水分的影响。分析结果表明, 在不同坡度之间, 土壤水分的变化差异极为显著。符素华等^[69]介绍了国内外土壤侵蚀量预报模型研究的主要成就, 指出了现有模型的不足。在总结前人工作的基础上, 提出了我国土壤侵蚀模型今后的发展方向。

4 结 论

回顾 2002 年以来, 中国在水文循环要素、地表水、地下水等方面取得的重要进展。近年来, 中国在水科学研究领域中, 特别重视全球变化与可持续发展的研究, 且取得了一些成果, 但与国际前沿仍有相当差距。变化环境下的水循环研究仍是 21 世纪水科学发展的一个十分重要的发展方向, 仍需结合国家需求对敏感地区的水问题开展基础研究。

参考文献：

- [1] 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2):157 - 164.
- [2] 王 慧, 王谦谦. 淮河流域夏季降水异常与北太平洋海温异常的关系[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(1):45 - 54.
- [3] 信忠保, 谢志仁. ENSO 事件对淮河流域降水的影响[J]. 气象科学, 2005, 25(4):347 - 354.
- [4] 刘晓东, 安芷生, 方建刚, 等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化[J]. 地理科学, 2002, 22(5):513 - 519.
- [5] 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关[J]. 科学通报, 2002, 47(7):546 - 549.
- [6] 姜 彤, 施雅风. 全球变暖、长江水灾与可能损失[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2):277 - 284.
- [7] 潘蔚娟, 施 能, 谌 芸. 我国夏季降水与全球气温场的关系[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(3):334 - 341.
- [8] 王秀荣, 徐祥德, 庞 昕. 西北地区夏季降水异常的时空特征分析[J]. 气象科学, 2002, 22(4):402 - 409.
- [9] 范广洲, 程国栋. 青藏高原隆升对西北地区降水量变化的影响[J]. 高原气象, 2003, 22(s1):67 - 74.
- [10] 刘洪兰, 李栋梁, 郭江勇. 河西走廊春末夏初降水的空间异常分布及年代际变化[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1):55 - 60.
- [11] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域上游降水时空结构特征[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2):27 - 33.
- [12] 谢志清, 姜爱军, 杜 银, 等. 长江三角洲强降水过程年极值分布特征研究[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(2):267 - 274.
- [13] 姜 彤, 苏布达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005(2):65 - 68.
- [14] 王云璋, 康玲玲, 王国庆. 近 50 年黄河上游降水变化及其对径流的影响[J]. 人民黄河, 2004, 26(2):5 - 7.
- [15] 许炯心, 孙 季. 近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流量的影响[J]. 水科学进展, 2003, 14(6):690 - 695.
- [16] 穆兴民, 李 靖, 王 飞, 等. 黄河天然径流量年际变化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2):1 - 5.
- [17] 王 琦, 张亚民, 康玲玲, 等. 黄河中游干旱化趋势及其对径流的影响[J]. 人民黄河, 2004, 26(8):34 - 36.
- [18] 蓝永超, 丁永建, 康尔泗, 等. 黄河上游径流长期变化及趋势预测模型[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3):321 - 326.
- [19] 秦年秀, 姜 彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5):589 - 594.
- [20] 车洪军. 气候变暖对水面蒸发的影响[J]. 海河水利, 2004(6):13 - 14.
- [21] 郭 军, 任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5):666 - 672.
- [22] 王艳君, 姜 彤, 许崇育, 等. 长江流域 1961 - 2000 年蒸发量变化趋势研究[J]. 气候变化研究进展, 2005(3):99 - 105.
- [23] 曹建生, 韩淑敏, 张万军, 等. 基于动态水量平衡的水面蒸发自动测定系统及其应用[J]. 水文, 2003, 23(3):29 - 33.
- [24] 孙敏章, 刘作新, 吴炳方, 等. 卫星遥感监测 ET 方法及其在水管理方面的应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3):468 - 674.
- [25] 牛振国, 李保国, 张凤荣, 等. 参考作物蒸散量的分布式模型[J]. 水科学进展, 2002, 13(3):303 - 308.
- [26] 庞治国, 付俊娥, 李纪人, 等. 基于能量平衡的蒸散发遥感反演模型研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3):364 - 369.
- [27] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5):430 - 439.
- [28] 芮孝芳, 黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(2):55 - 58.
- [29] 胡和平, 汤秋鸿, 雷志栋, 等. 干旱区平原绿洲散耗型水文模型——模型结构[J]. 水科学进展, 2004, 15(2):140 - 145.
- [30] 吴险峰, 刘昌明, 郝芳华. 黄河小花区间暴雨径流过程分布式模拟[J]. 水科学进展, 2004, 15(4):511 - 516.
- [31] 孙鹏森, 刘世荣. 大尺度生态水文模型的构建及其与 GIS 集成[J]. 生态学报, 2003, 23(10):2116 - 2124.
- [32] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 基于地形指数的 TOPMODEL 研究进展与热点跟踪[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4):117 - 121.
- [33] 姚文艺, 杨邦柱. 黄河下游游荡河段河床演变对河道整治的响应[J]. 水科学进展, 2004, 15(3):324 - 329.
- [34] 李茂田, 陈中原. 长江九江段 40 年来河道演变的 DEM 研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3):330 - 335.
- [35] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利, 2005(4):15 - 18.
- [36] 李国英. 维持河流健康生命——以黄河为例[J]. 人民黄河, 2005, 27(11):1 - 5.
- [37] 吴阿娜, 杨 凯, 车 越, 等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展, 2005, 16(4):602 - 608.
- [38] 石 伟, 王光谦. 黄河下游输沙水量研究综述[J]. 水科学进展, 2003, 14(1):118 - 123.
- [39] 韩其为. 黄河下游输沙及冲淤的若干规律[J]. 泥沙研究, 2004(3):1 - 13.
- [40] 陈前海, 方红卫, 王光谦. 三门峡库区一维非恒定非均匀泥沙输移数学模型[J]. 水科学进展, 2004, 15(2):160 - 164.
- [41] 严 军, 胡春宏. 黄河下游河道输沙水量的计算方法及应用[J]. 泥沙研究, 2004(4):25 - 32.
- [42] 李义天, 孙昭华, 邓金运, 等. 泥沙输移变化与长江中游水患[J]. 泥沙研究, 2004(2):33 - 39.
- [43] 周济福, 曹文洪, 杨淑慧, 等. 河口泥沙研究的进展[J]. 泥沙研究, 2003(6):75 - 81.

- [44] 黄 群, 姜加虎. 近 50 年来洞庭湖区的内湖变化[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 202 - 206.
- [45] 李凤霞, 李 林, 沈 芳, 等. 青海湖湖岸形态变化及成因分析[J]. 资源科学, 2004, 26(1): 38 - 44.
- [46] 张恩仁, 张 经. 三峡水库对长江 N、P 营养盐截留效应的模型分析[J]. 湖泊科学, 2003, 15(1): 41 - 48.
- [47] 朱广伟, 高 光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 714 - 719.
- [48] 李 颖, 张养贞, 张树文. 三江平原沼泽湿地景观格局变化及其生态效应[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 677 - 682.
- [49] 白军红, 欧阳华, 徐惠风, 等. 青藏高原湿地研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, 23(4): 1 - 9.
- [50] 罗 磊. 青藏高原湿地退化的气候背景分析[J]. 湿地科学, 2005, 3(3): 190 - 199.
- [51] 邓 伟, 潘响亮, 栾兆擎. 湿地水文学研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 521 - 527.
- [52] 康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源和出山径流[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [53] 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 517 - 522.
- [54] 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595 - 602.
- [55] 张 杰, 韩 涛, 王 建. 祁连山区 1997 - 2004 年积雪面积和雪线高度变化分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 649 - 654.
- [56] 吴青柏, 陆子建, 刘永智. 青藏高原多年冻土监测及近期变化[J]. 气候变化研究进展, 2005(1): 26 - 28.
- [57] 鲁安新, 姚檀栋, 王丽红, 等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 783 - 792.
- [58] 蒋秀华, 孙海洋, 刘 东, 等. 西北诸河区各水资源分区地下水资源量及其分布特征[J]. 地下水, 2005, 27(6): 415 - 419.
- [59] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨[J]. 水利学报, 2003(3): 33 - 36.
- [60] 薛禹群, 叶淑君, 谢春红, 等. 多尺度有限元法在地下水模拟中的应用[J]. 水利学报, 2004(7): 7 - 13.
- [61] 郎赞超, 刘丛强, 赵志琦, 等. 贵阳市地表水地下水化学组成: 喀斯特水文系统水 - 岩反应及污染特征[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 826 - 832.
- [62] 郭占荣, 韩双平, 荆恩春. 西北内陆盆地冻结-冻融期的地下水补给与损耗[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 321 - 325.
- [63] 叶为民, 金 麒, 黄 雨, 等. 地下水污染试验研究进展[J]. 水利学报, 2005(2): 251 - 254.
- [64] 胡安焱, 高 瑾, 贺 屹, 等. 干旱内陆灌区土壤水盐模型[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 726 - 729.
- [65] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地土壤水平衡的数值模拟[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 353 - 359.
- [66] 田立德, 姚檀栋, M TSUJIMURA, 等. 青藏高原中部土壤水中稳定同位素变化[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 289 - 295.
- [67] 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 683 - 690.
- [68] 刘海隆, 蒋太明, 刘洪斌, 等. 不同土地利用方式对岩溶山区旱坡地土壤水分时空分异的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 428 - 433.
- [69] 符素华, 刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 78 - 85.

Advances in the research on hydrological cycle and water in the China

CHU Kai-feng, WANG Jing-ping

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on a large number of the papers published in journals of China from 2002 to 2005 and the important national projects and project research reports of the national natural science foundation of China in the recent years, this paper reviews the main study results and progressions in the China in the elements of hydrologic cycle such as precipitation, evapotranspiration and runoff, water balance, stream sediment, lake, swamp, wetland, glacier, frozen earth, and groundwater and subsurface water.

Key words: hydrological cycle; surface water; ground water; subsurface water; research; advance; China