

我国水资源管理的研究发展方向

——综合及生态的水资源管理模式

郭劲松^{1,2} 朱友利³

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院; 2. 中国科学院水库水环境重点实验室
3. 重庆大学城市建设与环境工程学院 400045)

摘 要:随着我国经济的飞速发展和城市化水平的不断提高,健康的水文水资源循环遭到破坏,致使水体污染加剧、水资源供需矛盾更加尖锐,极端气候(包括洪水和干旱)频发等一系列与水有关问题的产生,这使得水资源管理面临极大地挑战。本文简要介绍了水文循环过程,水文循环和水资源的关系,并重点综述了水文水资源综合、生态管理的理论研究进展(即将各相应学科的知识充分、有机的融合在一起并结合现有的水文水资源相关的模型软件,构建耦合的生态-水文水资源的集成模型,并用于水文水资源的模拟研究),在此基础上结合我国水资源应用及管理的现状,分析了存在的问题,探讨研究解决此类问题的方案、措施,对我国水资源可持续的开发利用、水资源保护、流域治理与环境保护都具有十分重要的意义。

关键词:水资源综合管理 水文循环 综合水文模型 生态水文 方案研究

随着社会经济的飞速发展、城市化水平的不断提高和人类活动的日趋频繁,健康的水文水资源循环遭到破坏,导致了一系列与水相关的问题,如年平均降水量和径流量减少、湖水咸化、湖泊萎缩、流域内水土流失、水污染加剧、水环境恶化、水资源供需矛盾更加尖锐、水生生物多样性下降、水生态问题突出、极端天气事件频发等^[1]。尤其是在温带和高纬度地区,人类活动导致的全球气候变化,将改变未来淡水的供应量、需求量、水的质量及水生态环境状况;而气候变化造成极端气候现象频发,增加了旱涝气候的频率和严酷程度。我国西南地区东部由于其特殊的地理位置加之人类活动频繁,是夏季极端天气(旱涝天气)发生频率较高的地区之一,并且近年来其强度和频率都有增加趋势,该地区的水文水资源健康循环遭到极大的破坏,水资源的合理使用也面临着严重的问题,如1998年的特大洪涝和2006年的特大干旱都给当地造成了特别严重的损失^{[2]-[3]}。高原对水汽通量的分布及其季节变化有很大影响,进而影响高原地区水文循环过程及水资源的利用。我国云贵高原位于青藏高原的东南侧,受青藏高原热力作用和东亚季风的共同影响较大,且海拔较高、立体气候明显,加之近20年来该区人类活动加剧,这些均可能导致该区域地表总辐射量发生变化,而辐射量的变化影响到地面温度、水汽蒸发、地面径流和水文水资源的健康循环^{[4]-[5]}。

人类活动导致碳、氮、水文水资源循环失衡,造成全球气候变化,空气、水体污染等一系列的环境生态问题。现在,人类不得不面对极端气候灾害频发、生存环境恶化等的残酷事实。预计到2025年,全球将有约50%的人口生活在水资源紧张的状态中;到2090年左右,全球地表面积极端

干旱的比例,从目前的1%~3%上升到30%;每百年极端干旱的事件数和平均干旱的持续时间分别增加1倍和5倍^{[1],[6]~[7]}。Corwin等^[6]认为,淡水资源的可得性,尤其是清洁饮用水的可得性,将是21世纪人类面临的最重要的挑战之一;水资源的可持续开发、利用与保护被认为是全球最急迫的,亟需解决的问题。水文循环与水资源分布、储量及其使用息息相关,水文健康循环的受阻将直接导致水资源健康循环的破坏,所以在描述水资源分布使用状况时习惯将二者联系在一起。针对以上与水资源有关的问题,目前国内外都做了相关的大量研究,主要包括水文水资源资料的实际观察和理论方面的研究(主要是综合集成水文模型的构建及其定量分析,预测)。本文主要在理论研究方面重点综述了近年来水文水资源综合集成模型在水资源开发、应用及管理中的最新应用研究进展,并在此基础上结合我国水资源的现状,分析了其存在的主要问题并探讨了研究解决这些问题的方案、措施,对我国水资源可持续的开发利用、水资源保护、流域治理与环境保护都具有十分重要的理论和现实意义。

1 水文循环

1.1 水文循环的概念及其机理

水文循环又称水循环,是指地球上各种形态(固态、气态和液态)的水,在太阳辐射和地心引力等作用下,通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗以及地面径流等环节,不断发生相态转换和周而复始的运动过程,如图1所示,其主要机理是水的三态(即气态、固态和液态)的相互转化,水的蒸腾作用和太阳辐射、地球引力的综合作用。水文循环过程主要环节包括:水汽蒸发、水汽输送、凝结降水、水分入渗、地表和地下径流几部分。在较长的时间范围内,同一流域的水文循环过程所包括的主要环节之间存在一定的数量统计关系,这是能构建综合集成的水文水资源模型并对其进行定量分析研究的关键^{[1]~[9]}。

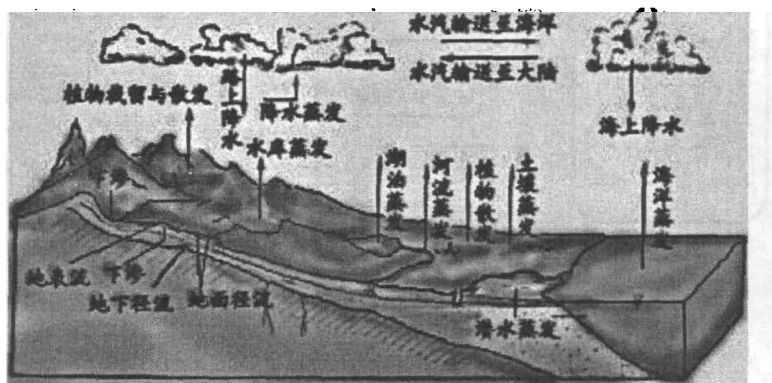


图1 水文循环示意图

Fig. 1 the schematic of hydrologic cycle

1.2 水文循环的作用

水文循环大致可分为全球水文循环、流域或区域水文循环、水-土壤-植物系统水文循环三种不同的尺度。其中全球水文循环是空间尺度上最大的,也是最完整的水文循环,它涉及大气、海洋和陆地之间的相互作用,与全球气候,水资源储量等的变化密切相关,全球水文循环是全球水文学

或大尺度水文学研究的核心;流域或区域水文循环可看作是流域降雨径流形成的过程,它是一个开放式的水循环系统,是流域水文学或径流形成学研究的核心;水-土壤-植物系统水文循环是自然界空间尺度最小的水文循环,它对土壤和植物之间水分的输送有重要作用。但不管是那种水文循环,都在自然界的水生态平衡、水资源开发利用、大气能量输送等中起着至关重要的作用^{[7]-[11]}。

2 水文水资源综合管理的理论研究与应用

2.1 水文水资源综合管理模型

水循环涉及的范围广,跨度大,可能与自然界各个圈内的物质接触,若人类活动一旦使水健康循环遭受严重破坏,可能对自然界的水环境和水生态造成难以恢复的影响(如滇池流域),同时还会影响到其它循环,所以对水循环和水资源的综合管理显得至关重要,传统的水资源管理方式亟待改进。

传统的水文水资源管理方法比较单一,预测管理效率也较低。传统的水文模型只限于水文学科范畴内,而随着气候的不断恶化和人类活动影响的加剧,水环境污染严重,人们对水文循环过程认知的不确定性大大增加,传统的水资源管理方法、水文模型不再满足要求,这就需要充分将各相应学科(如物理、化学、生物学科等)的知识融合在一起并考虑到与之相关循环的平衡(如物质平衡、能量平衡),结合现有的或开发新型的相关模型软件,建立耦合的水文生态集成模型(如 IM-

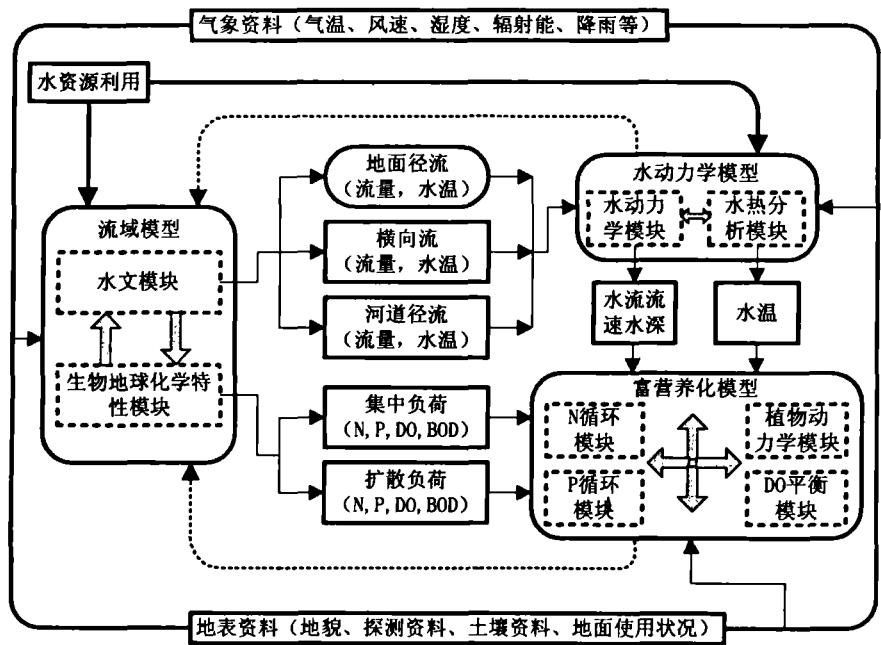


图2 IMWRMS 的框架结构示意图

Fig.2 The frame structure diagram of IMWRMS

WRMS、IWAS-ToolBox 模型,气候环境模型等),这也是水资源综合管理理论研究的方向^{[12]-[15]}。在社会经济快速发展和自然环境日益变化的情况下,经相似水文资料校正后的水文生态耦合模型可很好的对水资源的数量、质量及相应的生态状况进行预测,这对水资源的综合管理有很好的指导意义^{[14]-[15]}。本文以 IMWRMS 为例阐述水文综合模型的构建和应用。

IMWRMS 的构建主要是为模拟、描述小牧场流域的水文学和生物地球化学过程,但在大流域

中如果能很好的确定边界条件,IMWRMS 依然能够很好的使用。IMWRMS 一般由三个模型模块组成,即流域模型、水动力学模型和富营养化模型,如下图 2 所示。IMWRMS 所含的三个模型模块相互作用,并将物理、化学和生物方面的相关知识综合在一起,所以能很好的评估、描述流域系统的综合特性^[16]。IMWRMS 中的流域模型用于模拟流域的水文学和生物地球化学过程,可得出与流域产水量和营养物负荷相关的定量信息;水动力学模型用来评估流域水体的水动力学和热力学特性;富营养化模型则用于计算流域内营养物和生物量的分布^[16]。构建完整的水资源综合模型应用流程图和水资源综合管理流程图分别如下图 3、4 所示。

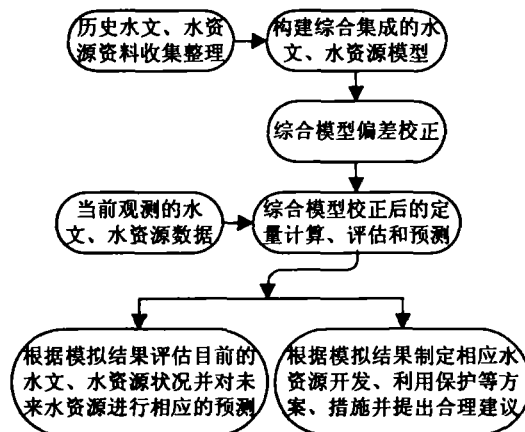


图 3 水资源综合集成模型应用流程图

Fig. 3 The flow chart of application of water resources integration models

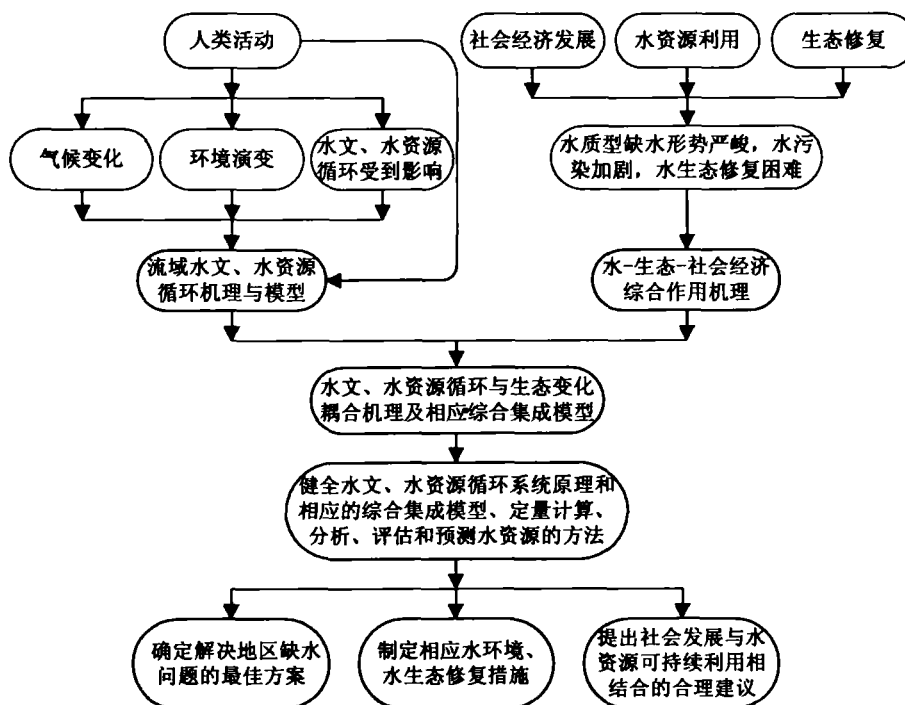


图 4 水资源综合管理流程图

Fig. 4 The flow chart of integrated water resources management

2.2 水资源综合管理的理论研究应用

(1) 水资源管理综合理论更新研究

水文循环系统是自然界中一个开放系统,其自身存在很大程度的未知性和不确定性。熵被视为系统无序、杂乱或不确定性程度的度量,为研究水文循环过程中的不确定性,将熵及其相关理论引入水文水资源管理领域,起到了十分重要的作用。目前该理论已在水文资料信息传输、概率分布推导和参数估计、熵谱预报、水文站网布设、水质水环境的预测预报评估等方面取得了丰硕的研究

成果^[17]。

环境生态的相关理论引入水文水资源管理领域后也起到很好的效果,所形成的生态水文是一种能明晰生物与水文循环相互调节的定量关系的科学途径,能缓解人类行为对自然系统的影响,增强流域水生生态系统服务能力,也能为环境退化带来的水文循环的紊乱寻求到一种平衡的解决方法^[18]。

水文循环各内在的组成部分都同与之相应的自然资源和生态系统相互影响、相互联系,所以与水文水资源循环相关的其它理论也可引入到水文水资源管理领域中不断完善其理论及方法体系,以便能更加精确地对水文水资源进行管理。在对水资源进行评估时,一般都需将对其有影响的因素综合考虑构建集成综合模型^[19]。

(2) 水资源综合管理模型的研究应用

水文水资源综合模型的构建对于水资源的管理至关重要,可通过综合模型对水资源进行分析、预测、评估估算等。Band L E 等^[20]建立稳定的分水岭斜坡稳定性分析模型对分水岭流域的水文循环进行分析,结果表明斜坡稳定性的整合可以看作是水文、生态系统和地貌形成过程的综合函数,在分析斜坡稳定性的同时能分析出水文的循环状况,取得很好的结果。廖朝轩等^[21]以 Dunne 入渗模式, Penman-Monteith 蒸发散公式及降雨-径流模式为水文循环理论基础构建了一个适宜的城区水循环模式,并通过该模型分析评估不同透水铺面设置对降雨径流量、入渗量和蒸发量的影响,结果表明该种城区水循环模式能很好的评估预测土地利用的改变而造成的水文量的改变,并将其用于城区防洪及多元供水策略研究上也能取得很好的效果。Mingliang L 等^[22]采用动态地面生态系统模型(Dynamic Land Ecosystem Model, DLEM)描述 1961—2005 年期间中国东部蒸散和地面径流的时空分布模式,并在此基础上进一步量化各相应环境因素对其产生的影响,结果表明气候的改变是蒸散和地面径流年际变化产生的主要原因,在较长的时间范围内土地的利用形式也会对蒸散和地面径流的时空分布产生重大影响。Dejuan M 等^[23]应用 IPCC SRES A2 和 IPCC SRESB2 并结合 GCMS 预测气候的变化对松花江流域年径流量的影响,结果表明在该流域年降雨量对年径流量的影响较大,而年蒸发量分别受温度、风速、蒸汽压力和日照时间的影响。气候的变化对河川径流的影响较大,英国新开发的 UKCP09 计算模型,清晰的考虑了气候模型参数的不确定性,能评估未来气候变化对河川径流的影响从而可对水资源进行适应性规划,这对水的健康循环和水资源的可持续利用具有很好的指导意义^[24]。Islam A 等^[25]用基于模块化模型系统的降雨径流模型系统(Precipitation Runoff Modeling System (PRMS))估算气候的变化对印度婆罗门河流域流水量的影响,PRMS 模型先根据研究区域进行校正后在进行验证,通过对选定的用于研究的土地每日和每月的观察情况、模拟的径流水位线和不同的统计学指标来评价该模型的模拟情况,结果表明 PRMS 模型的模拟预测和实际的观察情况相吻合,校准和建模期间的建模效率范围分别为 0.69 ~ 0.93, 0.85 ~ 0.95。Wijesekara G N 等^[26]用校正后的 CA(Cellular Automata)/MIKE-SHE-11 组合模型对加拿大亚伯达南部的肘部河流域 2006 ~ 2031 每 5 年的时间间隔内土地的利用改变对水文循环的影响,分析结果表明 CA/MIKE-SHE-11 组合模型是一种评估土地利用改变对水文循环影响的有用工具,并能很好的理解肘部河流域各水文循环要素之间的联系,并在此基础上分析水文循环和地下和地表水资源之间的相互作用,对水资源管理方案的制定有很好的知道作用。Hua Z 等^[16]将一个流域模型、水动力学模型和水体富营养化模型整合成一个灵活的多能级流域-水库模型系统(Multi-level Watershed-Reservoir Modeling System (MWRMS)),经校正后用于一个小牧场流域的水文和生物地球化

学过程的验证,结果表明 MWRMS 能全面的描述小牧场流域内不同空间尺度内流域的水文和生物地球化学过程并能有效的处理小牧场流域特殊的水系结构。这样 MWRMS 模拟分析结果能为水资源管理和水质保护方案的制定提供理论支持。Ying M 等^[27]用校正后的 Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP)模型对亏缺灌溉的田间水循环进行模拟,模拟结果的平方误差和相对误差分别为 2.4% 和 8.0%,该模型对水循环的预测值和实测值几乎完全一致。SWAP 能准确的模拟田间水循环并能很好的评估和优化灌溉方式。

(3) 水资源综合管理评估估算的应用研究

在水资源的综合管理中,水资源相关数值的评估估算是非常重要的一环。Depeng Z 等^[28]采用彭曼蒙特斯公式对我国渭河流域 1959-2008 期间 21 个气象站的每日潜在蒸发散进行估算,并用样条插值法和突变 M-K 检验法进行分析,并得出渭河流域从东北到西南年平均潜在蒸发散和季度平均蒸发散一般呈下降趋势,相对湿度是潜在蒸发散最敏感的变量。Pe'rez J J 等^[29]将传统的地质学方法和水文地质方法与创新性的水文学方法(如洞穴潜水技术)相结合对喀斯特地貌含水层的水动力学特性、储水量、更新速率、水力传导系数等进行描述、评估并获得较好的结果。近年来网格技术已经被成功的证实了能用于改善洪水的评估预测效果,并也能很好的用于地下水资源的综合管理^[30]。在水资源的综合管理中,在缺乏水质资料时可采用国际公认的环境绩效指数(Environmental Performance Index (EPI))、水质指标(Water Quality Index (WATQI))的计算方法(Hot-deck 设算法),可参照类似的水质监测资料,扩宽 EPI、WATQI 的适用范围,并能很好的反映出水质污染的类型及范围,便于及时的采取措施应对^[31]。

3 我国水文水资源研究应用、管理现状及存在的问题与相应的对策

3.1 我国水文水资源应用及管理现状

我国幅员辽阔,人口众多,水资源丰富,但人均占有的淡水资源量少,属于世界上水资源最缺乏的国家之一。随着我国工农业的快速发展和人口的不断增加,水资源开发力度和用量剧增,而污水处理率较低。在工业生产中,“跑、冒、滴、漏”现象普遍造成水利用效率低下。在水资源的管理方面主要以国家或地方政府制定的相关水法律、法规或水管理方案为指导并以定性的分析、描述为主,缺乏与经济、环境等相联系的综合定量分析管理模式。

3.2 我国水文水资源存在的问题

我国水资源的现状产生了很多的问题,如经济的快速发展和人口的不断增加,水资源开发力度和用量剧增,加之污水处理效率低下导致水资源供需矛盾尖锐、水环境污染严重、水生态遭到难以恢复的破坏、地面沉降、下陷时有发生、旱涝天气频发等;在管理方面由于缺乏公众及社会相关团体、机构的参与、重要的水文水资源资料和综合的定量分析模式,常使水资源法律法规与实际管理的可操作性、技术的可达性相脱节,致使水资源管理预测效率低下。

3.3 我国水文水资源存在问题的相应对策

我国位于地球环境变化最为激烈的季风区,在地理纬度、海陆位置和青藏高原等因素作用下形

成了东亚独特的季风环流,决定了该区域(流域)水资源形成和转化过程中的水循环机制具有复杂性和易变性,以及降雨在时空分布上的不均匀性,使得我国水资源的分布也极不均匀,加之我国经济发展迅速、水资源用量大等造成了以上诸多的水环境及水资源管理问题^{[2],[32]}。为解决以上问题,防止或尽量减小水文循环对环境、生态产生的不利影响,并使水循环过程对环境与生态带来益处,除了提高社会公众、专业人员和决策者的水资源管理意识外,还需重点加强以下几方面的工作:

(1) 设立必要的城市或区域水文站

在必要的城市或区域的重点位置设立水文水资源观测站,对重要的水文、水资源资料进行观察收集。这可减少水资源管理中相关指标预测的不确定性,能更加精确的评估预测气候变化对水资源的影响,促进水资源的可持续利用^{[33]-[35]}。

(2) 研发设备、完善城市水循环管理

随着我国科技的发展和城市化进程的加快,越来越多的水资源相关仪器需要更新,更多的城市管网需要不断完善,市政配套设施需要加强。政府应加大节水节能技术及仪器的研发,加大节水技术及仪器的研究-示范-推广力度。

(3) 增加我国绿地等透水面积

在我国无论是城市还是农村都应增加绿地绿化面积,这样可以改善地面径流的下渗界面,增大地下水的补给,促进水的健康循环和水资源的可持续利用,同时还能防止地面水土流失。

(4) 水资源管理的公众参与

我国水资源的管理主要还是以国家或地方政府的统一管理为主,公众的参与较少。适当的让公众、社会团体或相关机构积极参与供水及水资源的管理,充分发挥各自的优势,确保饮用水的水质和水量不失为一种解决饮用水供应的适宜方法,在必要时国家实施调整。这种方式在印度和非洲都得以很好的应用^{[36]-[37]}。

(5) 绿色建筑的推广使用

绿色建筑即在建筑物的规划、设计、建造、监测、管理维护各个阶段都使用绿色环保、可持续性的理念、标准作指导进行相应的工作,并确保建筑环境的质量及对人体的健康。主要体现在建筑物的能源利用效率、能源节约、资源回用,减少污染等方面(如构建雨水收集回用系统,中水回用系统,健康的环境管理体系等),所以绿色建筑的推广使用对于水资源的可持续利用具有很现实的使用意义^{[38]-[39]}。

(6) 生态工程管理的推广应用

随着经济的发展,环境问题日益恶化,这将直接影响水文的健康循环和水资源可持续利用。随着我国可持续发展战略的不断落实推进,有效的工程管理中应渗入生态工程的理念,即将生态工程的基本理念特性应用于工程管理中,把工程管理和生态工程有机地结合起来(Ecological Engineering based Engineering Management (EMEE)),真正实现发展-环境生态可持续一体化的发展模式,减少环境污染,促进水健康循环和水资源的可持续利用^[40]。

(7) 水文水资源的综合管理模式的应用

水文水资源的综合管理包括水文水资源资料收集、综合集成模型的构建及使用,评估计算方法的选取等。综合集成模型(如 ANEMI 模型)紧密结合了实际的观察研究,并考虑了水文循环系统

的复杂性及敏感地区的水文循环、物质循环和能量平衡等,可很好的预测土地利用形式、气候变化对水文循环和水资源的影响,量化各种相应的自然和人为因素对水通量的干扰作用,同时还可以对一些水资源管理策略进行评估。这对于提高水资源的管理效率和促进水资源的可持续利用是非常重要的^{[41]~[45]}。

4 结语

水是地球上生命存活所必须的资源,而可用的淡水资源无论在质上还是在量上都正在成为越来越多的地区经济发展和生态稳定的限制性因素,同时水资源的管理也越来越受到极大地挑战。确保人类生存和生态稳定所需的充足的淡水资源的质量是水环境综合治理和可持续发展的一个重要方面,也是水资源综合管理的一个重要环节。为达到以上目的,水资源综合管理今后应加强以下几方向的研究:

①加强水文水资源理论与其它相关学科理论的融合,不断精确水文水资源相关的评估、计算、模拟等方法,提高水资源的综合管理效率;

②加强生态水文和数字水文的结合,并以其理论为指导研究更加完善、精确的生态水文水资源集成模型,提高水资源管理的评估预测效率;

③源于自然资源的可再生能源的开发(如潮汐能、波浪能的开发利用)。由于传统的碳氢能源的开发和应用都将对环境造成很大的污染,对健康的水文水资源循环造成破坏,从而影响到水资源的可持续利用,所以开发源于自然资源安全的、可持续再生能源显得势在必行,同时也能缓轻水污染带来的水资源短缺压力^[46]。

参考文献

- [1] 陈重西,孙瑾,胡艳芳,等. 水文循环、生态环境和气候变化[J]. 青岛大学学报(工程版),2011, 26(2):57-68.
- [2] 李永华,徐海明,高阳华,等. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征[J]. 气象学报,2010,68 (6):932-943.
- [3] 李永华,卢楚翰,徐海明,等. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J]. 大气科学,2011,35(3):422~434.
- [4] 刘波,翟建青,高超,等. 1960—2005 年长江上游水文循环变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):95~99.
- [5] 郑小波,王学锋,罗宇翔,等. 1961~2005 年云贵高原太阳辐射变化特征及其影响因子[J]. 气候与环境研究,2011,16(5):657~664.
- [6] Corwin D L,Bradford S A. Environmental Impacts and Sustainability of Degraded Water Reuse[J]. Journal of Environmental Quality,2008,37(5):1~7.
- [7] Gleick P H. Water in Crisis(A Guide to the World'S Fresh Water Resources)[M]. Oxford:Oxford University Press,1993.
- [8] 李广贺,张旭,张思聪,等. 水资源利用与保护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

- [9] 黄廷林,马学尼,张世芳. 水文学[M]. (第四版). 北京:中国建筑业出版社,2006.
- [10] 张济世. 物理水文学:水循环物理过程[M]. 郑州:黄河水利水利出版社,2007.
- [11] Dorsett A, Cherrier J, Martin J B, et al. Assessing hydrologic and biogeochemical controls on pore-water dissolved inorganic carbon cycling in a subterranean estuary: A C-14 and C-13 mass balance approach[J]. MARINE CHEMISTRY, 2011, 127(1-4): 76 ~ 89.
- [12] Kalbacher T, Delfs J O, Haibing S, et al. The IWAS-ToolBox: Software coupling for an integrated water resources management[J]. Environment Earth Sciences, 2012, 65(5): 1367 ~ 1380.
- [13] Rodriguez M R, López A J G R, Rosillo S M. Changes in water level, land use, and hydrological budget in a semi-permanent playa lake, Southwest Spain[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(2): 797 ~ 810.
- [14] Kun Y, Baisheng Y, Degang Z, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau[J]. Climatic Change, 2011, 109(3-4): 517 ~ 534.
- [15] Bring A, Destouni G. Relevance of Hydro-Climatic Change Projection and Monitorin for Assessment of Water Cycle Changes in the Arctic[J]. AMBIO, 2011, 40(4): 361 ~ 369.
- [16] Hua Z, Huang G, Dunling W, et al. An integrated multi-level watershed-reservoir modeling system for examining hydrological and biogeochemical processes in small prairie watersheds[J]. Water Research, 2012, 46(4): 1207 ~ 1224.
- [17] 牟萍,艾萍,方彦舒. 熵理论在水文循环过程中的应用研究综述[J]. 水电能源科学, 2011, 29(10): 5 ~ 7.
- [18] HARPER D, ZALEWSKI M, PACINI N. Ecohydrology: Processes, models and case studies: An approach to the sustainable management of water resources [M]. Wallingford: CAB International, 2008.
- [19] Romanelli A, Massone H E, Qutrozl O M. Integrated Hydrogeological Study of Surface & Ground Water Resources in the Southeastern Buenos Aires Province, Argentina[J]. International Journal of Environmental Research, 2011, 5(4): 1053 ~ 1064.
- [20] Band L E, Wang T H, Hales T C, et al. Ecosystem processes at the watershed scale: Mapping and modeling ecohydrological controls of landslides[J]. Geomorphology, 2012, 137(1) 159 ~ 167.
- [21] 廖朝轩,詹丽梅,陈家梁,等. 城区水文循环机制与改善策略分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 49 ~ 53.
- [22] Mingliang L, Hanqin T, Chaoqun L, et al. Effects of multiple environment stresses on evapotranspiration and runoff over eastern China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 426-427(3): 39 ~ 54.
- [23] Dejuan M, Xingguo M. Assessing the effect of climate change on mean annual runoff in the Songhua River basin, China[J]. HYDROLOGICAL PROCESSES, 26(7): 1050 ~ 1061.
- [24] Prudhomme C, Young A, Watts G, et al. The drying up of Britain A national estimate of changes in seasonal river flows from 11 Regional Climate Model simulations[J]. HYDROLOGICAL PROCESSES, 2012, 26(7): 1115 ~ 1118.
- [25] Islam A, Sikka A K, Saha B, et al. Streamflow Response to Climate Change in the Brahmani River Basin, India[J]. Water Resources Management, 2012, 26(6): 1409 ~ 1424.

- [26] Wijesekara G N, Gupta A, Valeo C, et al. Assessing the impact of future land-use changes on hydrological processes in the Elbow River watershed in southern Alberta, Canada[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 412-413(4): 220 ~ 232
- [27] Ying M, Shaoyuan F, Zailin H, et al. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, 54(3-4): 1044 ~ 1052.
- [28] Depeng Z, Zongxue X, Hong Y, et al. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China [J]. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 2012, 26(8): 1149 ~ 1160.
- [29] Pe'rez J J, Sanz E. Hydrodynamic characteristics and sustainable use of a karst aquifer of high environmental value in the Cabrejas range (Soria, Spain) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(3): 467 ~ 479.
- [30] Lecca G, Petitdidier M, Hluchy L, et al. Grid computing technology for hydrological applications [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 403(1-2): 186 ~ 199.
- [31] Srebotnjaka T, Carrb G, Sherbinin A D, et al. A global Water Quality Index and hot-deck imputation of missing data[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 17(6): 108 ~ 119.
- [32] 张亚丽, 许秋瑾, 席北斗, 等. 中国蒙新高原湖区水环境主要问题及控制对策[J]. *湖泊科学* 2011, 23(6): 828 ~ 836.
- [33] Quevauviller P. Adapting to climate change: reducing water-related risks in Europe-EU policy and research considerations[J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(7): 722 ~ 729.
- [34] Qiu Z, Hong J, Changhui P, et al. Effects of future climate change, CO₂ enrichment, and vegetation structure variation on hydrological processes in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80-81(1): 123 ~ 135.
- [35] Forsythe N, Fowler H J, Kilsby C G, et al. Opportunities from Remote Sensing for Supporting Water Resources Management in Village/Valley Scale Catchments in the Upper Indus Basin[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(6): 845 ~ 871.
- [36] Reilly K O, Dhanju R. Hybrid drinking water governance: Community participation and ongoing neoliberal reforms in rural Rajasthan, India[J]. *Geoforum*, 2012, 43(3): 623 ~ 633.
- [37] Mazango N B M, Munjeri C. Water management in a hyperinflationary environment: Case study of Nkayi district in Zimbabwe[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2009, 34(1-2): 28 ~ 35.
- [38] Rashida Y R, Sulaimanb M S, Azizc A, et al. Greening government's office buildings: PWD Malaysia Experiences[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 21(1): 1056 ~ 1060.
- [39] Al-Mo'eh A, Taib S, Mujeebu M A, et al. Analysis of sectoral energy conservation in Malaysia [J]. *Energy*, 2009, 34(6): 733 ~ 739.
- [40] Jiuping X, Zongmin L. A review on Ecological Engineering based Engineering Management[J]. *Omega*, 2012, 40(3): 368 ~ 378.
- [41] Qiu Z, Hong J, Changhui P, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China[J]. *Ecological Modelling*, 2011,

222(14)2414 ~ 2429.

- [42] Davies E G R, Simonovic S P. Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(6): 684 ~ 700.
- [43] 任立良, 江善虎, 袁飞, 等. 水文学方法的演进与诠释[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 586 ~ 592.
- [44] José A S, Leandro Andrei B D D, Marcos A V, et al. Extreme Events of Droughts and Floods in Amazonia: 2005 and 2009[J]. Water Resources Management, 2012, 26(6): 1665 ~ 1676.
- [46] Yun T S, Lee J S, Lee S C, et al. Geotechnical Issues Related to Renewable Energy[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(4): 635 ~ 642.