

流域“自然-社会”二元水循环理论框架

秦大庸, 陆垂裕*, 刘家宏, 王浩, 王建华, 李海红, 褚俊英, 陈根发

中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100044

* 联系人, E-mail: CyLu@iwhr.com

2013-02-19 收稿, 2013-05-10 接受

国家重点基础研究发展计划(2006CB403401)、国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(51021006)和国家自然科学基金(50809076, 51009149, 51279209)资助

摘要 流域水循环的“自然-社会”二元演变是导致近年来水问题和水危机的本质原因。实现缺水地区供用水、水环境、水生态安全的国家目标, 必须依靠以流域水循环为统一基础的水资源科学调控, 其首要的科学基础是对高强度人类活动干扰下的流域水循环与水资源演变的内在机理及其规律的认知。本文从我国二元水循环演进历史、流域二元水循环理论、典型流域水资源演变规律、流域二元水循环模式与概念模型 4 个方面进行探讨, 为变化环境下水循环的基本认知模式、现代环境下水资源衰减规律等提供研究参考。

关键词

二元水循环理论
水资源演变
人类活动
水循环模式
海河流域

近几十年来由于全球气候变化和人类活动的加剧, 水循环过程和水资源状况产生了深刻的改变, 很多地区发生了严重的水问题和水危机, 其主要原因是流域水循环的驱动力、循环结构、循环参数在人类活动的影响下发生了二元演变效应, 呈现出明显的“自然-社会”二元特性, 并导致了径流性水资源衰减、水体污染和环境污染、天然生态退化等各种不良后果。

自 20 世纪中叶以来, 国内外广泛开展了变化环境下的流域水循环与水资源可持续利用研究, 并成为现代水文水资源与地球科学的核心命题^[1,2], 其中人类活动对水文循环和水资源形成与演化过程的干扰, 虽已引起了广泛关注, 并成为当前的研究热点^[3~5]。但是, 人类活动对于流域水循环系统的作用机制和水资源演变机理是复杂的, 天然水循环与社会水循环的耦合研究仍处于起步阶段, 对于强人类活动下的流域水循环机理与水资源演变研究仍缺乏系统性, 尚未形成相应的基础理论与方法体系, 难以支撑认知当今缺水地区水短缺、水污染和水生态退化的问题, 不能满足建设资源节约型、环境友好型社会

建设的实践需求, 因此迫切需要开展相关研究^[6~8]。

1 流域二元水循环的演进历史

人类经济社会的发展过程也是人类对自然水循环的逐渐介入过程, 在我国可大致分为 4 个阶段: 采食经济阶段、农耕经济阶段、大规模农田灌溉及工业化起步阶段、大规模工业化和城市化阶段(图 1)。

在采食经济阶段, 人类沿河流、森林边缘居住, 采集、狩猎和捕鱼是他们生产活动的主要内容。该阶段人类尚无主动地改造自然获取生活资料或者规避风险的意识, 当洪水来临时采取迁徙躲避的策略, 对自然水循环几乎没有影响干预能力。

农耕经济阶段。随着人类社会的发展, 人口不断增多, 食物供给的需求逐渐增大, 原始采集逐渐发展为原始农业, 狩猎逐渐发展为原始畜牧业。农业发展使人口和生产逐渐从山区集中和转移到河流两岸的平原。由于生产资料不能随意迁徙, 防洪开始成为人类必须面对的问题。据记载, 公元前 21 世纪, 禹即主持治水, 平治水土, 疏导江河。早期的农耕改变了水循环的下垫面, 引水灌溉和防洪则改变了水体的天

引用格式: 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 等. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架. 科学通报, 2014, 59: 419-427

英文版见: Qin D Y, Lu C Y, Liu J H, et al. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-013-0096-2

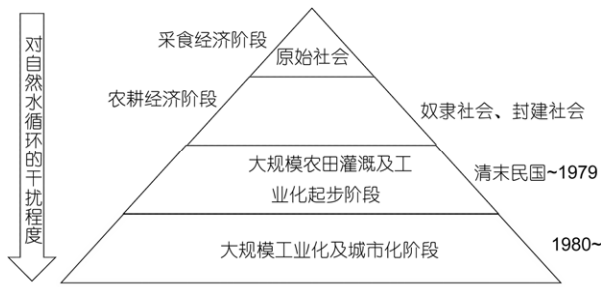


图1 二元水循环演进的4个阶段

然流路。因此，早期的农耕和防洪标志着人类已经开始影响水循环。从春秋战国到清中期，中国经历了2000多年的封建社会发展时期，四川的都江堰工程、关中的郑国渠、西北地区的坎儿井、隋朝修建的大运河等，体现了人类经济社会发展作为水循环的动力其作用逐渐增强。在这个漫长的历史阶段，经济发展主要依靠农业，由于技术手段的制约，其影响范围和深度的增长趋势相对缓慢。

大规模农田灌溉及工业化起步阶段。该阶段为清末民国时期至20世纪80年代前期。特别是在新中国成立后，社会稳定、卫生条件改善，人口数迅猛增长，全国开始大规模的水利建设，农田水利和防洪工程成为当时水利工程的重心。1949年，全国只有不到2000座大、中、小型水库，2.4亿亩的灌溉面积，全国总用水量1031亿 m^3 ；到1978年底共建成大、中、小型水库8.6万座、灌溉面积达到了7.3亿亩，农业灌溉用水增长很快，浅层地下水已经被大规模开发，在某些地区已经开始开采深层地下水，总用水量达到4317亿 m^3 。大量防洪工程和农田灌溉工程的修建，说明人类活动对水循环的介入更加深入。从清末的“洋务运动”开始，我国有了原始的工业。但是从清末到1949年，我国工业发展速度非常缓慢，1949年，工业用水不到30亿 m^3 ，到1978年，工业用水增长到近500亿 m^3 。

大规模工业化和城市化阶段。1978年后，改革开放政策带来了我国经济的腾飞。工业发展是全社会经济发展的主要因素，工业用水到2008年达到了1397亿 m^3 ，工业用水增加是中国用水量猛增的主要原因。城市化进程也在加快，1978年到2008年的城镇化率从17.97%增加到了45.7%。快速的城市化使我国的生活用水也快速增长，从1978年的不到70亿 m^3 增加到了2008年的729亿 m^3 。期间全国农业用水一直维持在4000亿 m^3 左右。工业、农业和城市生活

用水的增加使部分地区的水资源系统不堪重负，水资源的开发已经从地表水和浅层地下水的开发向深层地下水发展，外流域调水也不断成为支撑当地发展的重要水源。流域水循环中的人类作用已经相当显著。

2 流域二元水循环基本认知与作用机制

流域水循环，是指流域尺度下主要包括降水、消耗、径流、输送运移及流域储水量等变化在内的整个过程。流域水循环系统中水分、介质和能量是水循环的基本组成要素，其中水分是循环系统的主体，介质为循环系统的环境，能量是循环系统的驱动力。

在没有人类活动或人类活动干扰可忽略的情况下，流域水分循环过程只在太阳辐射、重力势能等能量下驱动，也称为“一元”流域水循环。自人类活动出现以来，随着对自然改造能力的逐步增强，人工动力大大改变了天然水循环的模式，现代环境下在部分人类活动密集区域甚至超过了自然作用力的影响，水循环过程呈现出越来越强的“天然-人工”二元特性。

2.1 流域二元水循环的认知模式

流域水循环的二元化有4个重要特征：水循环服务功能的二元化、水循环结构和参数的二元化、水循环路径的二元化、水循环驱动力的二元化。其中服务功能的二元化是其本质，循环结构和参数的二元化是其核心，循环路径的二元化是其表征，驱动力的二元化是其基础(图2)。

服务功能的二元化。现代环境下水分在循环过程中同时支撑自然生态环境系统和人类社会经济系统。水循环对自然生态环境系统的服务支撑包含5个方面：一是水在循环过程中使水资源得到更新；二是水循环维持了自然水体的动态平衡；三是水在循环过程中进行能量交换，调节了能量收支和气候条件；四是水循环过程中形成的物质搬运力塑造了地表形态，并维持了生态群落栖息地的稳定；五是水是生命体的重要组成成分，对维系生命体代谢有不可替代的作用。水循环对人类社会经济系统的服务支撑主要包括3个方面：一是水循环过程支撑了人类的日常生活，是人类生存的基本要素；二是水循环过程支撑了人类生产活动，包括一产、二产和三产；三是水循环过程支撑了人居环境用水，美化了人类生活环境。在没有人类社会经济系统之前，水循环只服

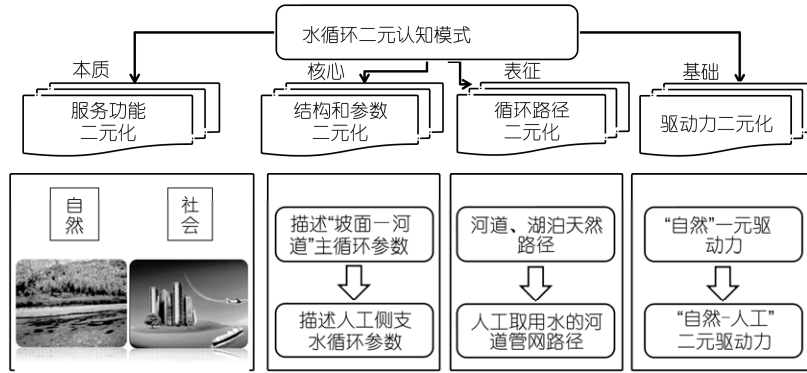


图2 流域水循环二元认知模式

务于自然生态环境系统，人类对自然水循环系统的影响和改造，其目的归根结底是利用水循环系统为人类社会经济发展服务，因此二元水循环的本质是服务功能的二元化。

循环结构和参数的二元化。自然状况下，流域天然水循环具有“大气-坡面-地下-河道”自然水循环结构。在人类活动参与下，形成了由“取水-输水-用水-排水-回归”5个环节构成的社会水循环结构，因此流域水循环结构产生二元化。在流域水循环参数二元化方面，一是人类活动对原有的“大气-坡面-地下-河道”循环参数产生了深刻的影响，包括水土保持、水利建设等对天然的坡面产/汇流参数产生影响，城市化、农业耕种、地下水开采等使流域下垫面的渗透参数、蒸发参数、补给参数发生变化等。二是在“大气-坡面-地下-河道”水循环之外形成的社会水循环结构，已经不能用天然水循环的参数来描述，而需要一套用于描述和刻画社会水循环的参数体系，如包括需水量、供水量、耗水量、回归量、管网漏失率、虚拟水、用水效益与效率等体现社会水循环特征的参数，以反映水在人类经济社会系统中的循环过程和作用。需要指出的是，人类社会经济系统水循环特征存在地区、部门、单元间的差异，如南方地区和北方地区、农业部门和工业部门、农村单元和城市单元等，参数体系将有显著的不同，一般需要区别描述。由于流域水分的循环结构和循环参数体现了水循环系统的属性与特点，同时也是变化环境下水循环研究试图重点揭示的内容，因此二元水循环的核心是循环结构和参数的二元化。

循环路径的二元化。自然水循环的路径包括水汽传输路径、坡面汇流路径、河道水系路径、地下水

径流路径、土壤水下渗路径等。人类社会经济系统出于自身生产、交通、生活等需要，发展了各种人工水循环路径，如长距离调水工程、航运工程、人工渠系、城市管网系统等。一方面在自然水循环路径之外形成了新的水循环路径，另一方面各种人类活动还对自然水循环路径产生了显著干预。如人工降雨干预了水汽的输送路径，水土保持干预了坡面汇流路径，使坡面水分在当地滞留；人工开挖干预了河道水系路径，使原本无水力联系的河道相互连通；地下水的开发干预了地下水的径流路径，使原本流向下流的地下水围绕局地开采漏斗汇流；道路、居工地建设等硬地地面干预了土壤水的下渗路径，阻隔了土壤水的向下运移通道；调水行为直接将属于不同水系甚至不同流域的地表水进行重新分配等。以上直接和间接的行为产生了水循环路径的二元化。人类活动对水循环路径的改造和影响是实现其对流域水循环干预的主要手段和水循环二元化的外在体现，因此水循环二元化的表征是循环路径的二元化。

驱动力的二元化。天然状态下，流域水分在地球自转与公转、太阳辐射能、重力势能和毛细作用等自然作用下不断运移转化，其循环内在驱动力表现为“一元”的自然力。而在人类社会经济系统的参与下，流域水循环的内在驱动力呈现出明显的二元结构。人工驱动力的技术手段主要包括通过水利工程的修建抬高水体水位，改变水体自然状况下的能态沿程分布，从而驱使水体按人类的意愿循环流动，如修建水库或枢纽等；或通过能量之间的转化直接将处于低势能的水体传输到高势能地点，如机电井抽排等；或通过加工将水分通过产品的形式进行转移等。在以上技术手段作用下，水分进入社会水循环环

节,在人类社会经济系统中分配并服务.驱动水分分配和服务的内在驱动机制与人类社会经济的运行息息相关,可总结为四大驱动机制.一是公平机制,水是人日常生活必不可少的部分,首先在兼顾用水的重要性等级、社会公平与和谐的需求下进行分配;二是效益机制,在利益驱动下,水一般由经济效益低的区域和部门流向经济效益高的区域和部门;三是效率机制,在区域水资源缺乏或环境容量有限的情况下,出于提高承载力的需求,用水效率低的部门将受到制约,被迫提高用水效率或进行用水转让等;四是国家机制,即出于区域主体功能或宏观战略等原因决定水的分配或流向.现代环境下人类活动的影响越来越深远,受人工驱动力作用,强人类活动干扰地区的社会水循环通量甚至成为主要的循环通量,因此在研究流域水循环的驱动机制时,必需把人工驱动力作为与自然力并列的内在驱动力.流域水分的循环流动主要基于驱动力的作用,因此水循环二元化的基础是驱动力的二元化.

2.2 二元水循环耦合作用机制

现代环境下,流域水循环演变规律受自然和社会二元作用力的综合作用,具有高度复杂性,是一个复杂的巨系统.水循环在驱动力、过程、通量三大方面均具有耦合特性,并衍生出多重效应(图3).

在驱动力方面,体现为自然驱动力和人工驱动力的耦合,即流域水分的驱动机制不仅基于自然的

重力势、辐射势等,也受人工驱动力如公平、效益、效率、国家机制等作用.自然驱动力是流域水循环产生和得以持续的自然基础,人工驱动力是水的资源价值和服务功能得以在社会经济系统中实现的社会基础.自然驱动力使流域水分形成特定的水资源条件和分布格局,成为人工驱动力发挥作用的外部环境,不仅影响人类生产、生活的布局,同时影响水资源开发利用方式和所采用技术手段.人工驱动力使流域水分循环的循环结构、路径、参数变化,进而影响自然驱动力作用的介质环境和循环条件,使自然驱动力下的水分运移转化规律发生演变,从而对人工驱动力的行为产生影响.流域水循环过程中两种驱动力并存,相互影响和制约,存在某种动态平衡关系.需要指出的是,相对而言自然驱动力的稳定性和周期性规律较强,但人工驱动力则存在较大的变数,动态平衡阈值的破坏往往源自于人工驱动力不合理的扩张和过度的强势.

在过程耦合方面,体现为自然水循环过程与人工水循环过程的耦合.自然水循环过程可划分为大气过程、土壤过程、地表过程和地下过程.在过程耦合作用机制上,人工水循环过程较多体现为外在干预的形式.自然水循环四大过程中的每一个环节,人工水循环过程均有可能参与其中.如大气过程中人工降雨过程、温室气体排放过程等;地表过程中的水库拦蓄过程、水利枢纽分水过程、渠系引水过程等;土壤过程中的农业灌溉过程、低渗透性面积建设过程

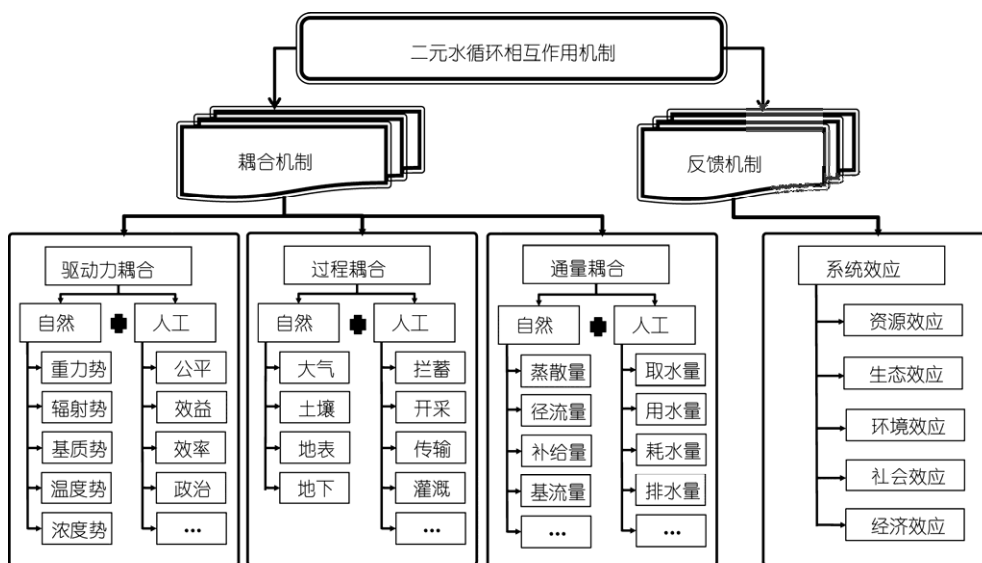


图3 二元水循环耦合作用机制

等; 地下过程中的地下水开采、回补等. 以上自然过程和人工过程的耦合显著增加了流域水循环整体过程的复杂性和研究的难度.

在通量耦合方面, 现代环境下的自然水循环通量与社会水循环通量紧密联系在一起. 二元水循环通量的耦合与过程的耦合有直接的因果关系. 在水循环过程二元耦合情况下, 水循环通量的二元耦合是必然的. 二元水循环系统中自然水循环的各项通量, 如蒸散量、径流量、入渗量、补给量等, 与社会经济系统的取水量、用水量、耗水量、排水量等既是构成系统整体通量的组成部分, 又相互影响, 此消彼长, 存在对立统一的关系. 传统的水资源评价方法相对于现代环境下的水资源评价技术需求存在五大缺陷: 评价口径狭窄; 一元静态评价; 要素分离评价; 时空集总式评价; 缺乏统一的定量工具. 这样可能导致水资源评价结果对水循环过程和规律认知上出现失真, 不能反映水循环过程的全部有效水量和利用效率的高低. 为客观评价二元水循环系统的通量, 需要发展新的评价理论与技术方法, 进行全口径层次化动态评价^[3].

驱动力、过程、通量耦合的综合作用下, 二元水循环系统产生资源、生态、环境、社会、经济五维反馈效应. 一是水资源次生演变效应, 大多表现为径流性水资源衰减; 二是伴生的水环境演变效应, 主要表现为水体污染和环境污染, 三是伴生的水生态演变效应, 主要表现为天然生态退化和人工生态的发展, 四是社会反馈效应, 主要表现为生产力布局、制度与管理、水价值观与水文化、科技水平等变化, 五是经济反馈效应, 表现为经济发展状态、产业结构调整、水的经济价值与流向等变化. 必须建立二元水循环理论辩证地分析人类社会经济系统和生态环境系统的关系, 科学指导人工经济社会系统用水, 合理设置生态环境保护目标, 实现人工经济社会系统与生态环境系统的协调发展.

3 变化环境下的海河流域二元水循环演变

海河流域位于中国的东部, 介于 112°~120°E, 35°~43°N, 包括北京、天津、河北等 8 个省(自治区、直辖市), 总面积 32 万 km². 其中山丘区面积 18.9 万 km², 占 59%, 平原区面积为 13.1 万 km², 占 41%. 海河流域既是我国政治文化中心地区, 也是全国重要的经济重心和粮食生产基地之一, 其中环渤海经济

带已成为继长江三角洲、珠江三角洲后国家经济发展的“第三极”^[9], 在全国经济社会发展格局中占有十分重要的战略地位.

全流域各主要河流已兴建大、中、小型水库约 1900 多座, 总库容 294 亿 m³, 控制海河流域径流量的 95%, 引水工程约 1 万处, 提水工程约 8200 处, 地表水资源开发利用率达 90% 以上, 地下水机电井约 120 万眼. 流域内土地利用格局发生明显改变, 耕地面积逐年下降, 城镇用地稳定增加.

海河流域是我国乃至全世界人类活动对于流域水循环扰动强度最大、程度最深、类型最复杂的地区, 其高强度人类活动干扰下的流域水循环与水资源演变特征明显, 具有典型性^[10,11].

3.1 降水变化

近百年来, 海河流域年降水量整体上呈现前段偏枯后段回升的宏观规律. 以保定站 1914~2008 年的降水资料为例(图 4), 从数据分析看, 百年来降水在 1947 年存在一个显著的突变, 将降水划分为两个阶段: 1947 年前的偏枯期, 年平均降水量为 445 mm; 1947 年后的偏丰期, 年平均降水量为 545 mm. 其中 1947~1964 年阶段是海河流域降水回升最明显的时期, 此后至 80 年代前期, 降水处于相对平稳变化阶段. 20 世纪 80 年代至 1996 年, 海河流域降水表现为前期减少后期增大的小阶段起伏. 1996 年后海河流域降水偏枯趋势明显, 但从 2007 年开始, 海河流域降水逐渐转丰, 2007 和 2008 年保定站的降水均超过了 570 mm, 可能预示海河流域将结束近 10 年的连续枯水期^[12].

3.2 城市化发展

海河流域是我国城市人类活动、城区建设及经济

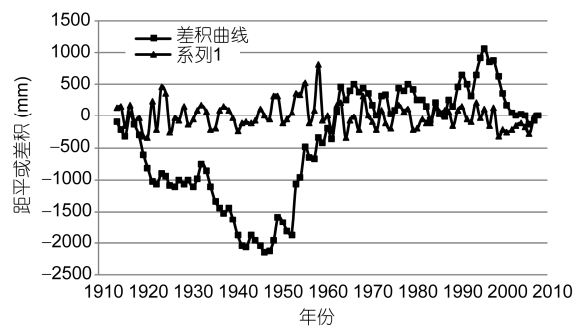


图 4 海河流域代表站(保定站)1914~2008 年降水变化

开发历史最早的流域之一。海河流域城市建设用地面积为0.76万 km²，仅占全流域面积的2.4%，但城市是人类活动最为强烈的地区，是人口、财富及其文明的集中地，是社会经济发展最活跃的区域。随着城市数量的增加和城市规模的扩大，海河流域人口不断向城市集聚。1952年流域总人口为0.57亿，2005年增加了1.3倍，达1.33亿；城镇人口则从1952年的0.09亿人发展到2005年的0.55亿人，增加了5.2倍(图5)。从近50多年城市发展的历史过程看，海河流域正处于快速城市化的阶段。

总体上看，自20世纪50年代以来海河流域城市化进程的加快，导致城市用水量迅速增加。如图6所示，海河流域城市用水量从1952年的8.0亿 m³，增加到1999年的最高值97.4亿 m³，之后出现波动下降并趋于稳定。2008年城市用水量为93.1亿 m³，是1952年用水量的11.6倍。1999年工业用水和城市总用水量出现转折点，之后呈现缓慢下降趋势，主要是由于加大了节水力度。

3.3 农业灌溉用水变化

2005年全海河流域耕地面积为15921万亩，其

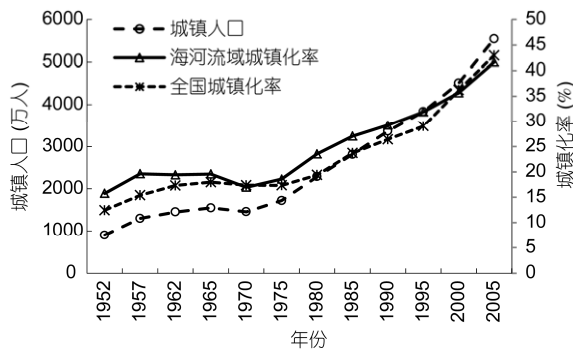


图5 海河流域近50年的城市化进程

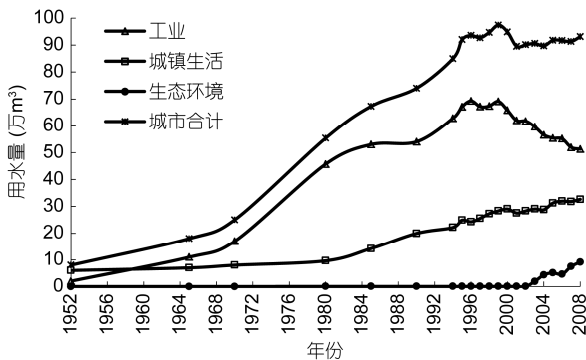


图6 近50多年来海河流域城市用水变化

中农田有效灌溉面积为11058万亩，当年农田实灌面积9591万亩，占耕地总面积的60%。

农业水循环是海河流域人工循环通量的主体。1949~1980年，海河流域农业用水量迅速增长，人工供水主要依赖地表水，基本上用于灌溉，供水水源环境相对较好。1986~1995年，海河流域农业用水总量呈缓慢下降态势。在地表水持续衰减的情况下，地下水开采量不断增加(图7)。据水资源公报统计，1991~2005年，海河流域年平均人工灌溉水量为293亿 m³，其中地表水取水量占40%，地下水取水量占60%。

3.4 地下水开采

自1980年以来，海河流域地下水开采量一直保持在200亿 m³/a之上。进入20世纪90年代地下水开采量明显增大，至2000年达到263.6亿 m³/a，开采强度达到18.73万 m³/(km² a)，其中山东、河北和北京是地下水开采量增大的主要影响区，相对80年代它们的开采强度分别增大71.98%，33.51%和11.85%。2003年之后，由于地下水压采与限采，地下水开采量出现下降趋势(图8)。

从总体上来讲，自20世纪80年代以来，地下水成为海河流域的主要供水水源，开采量不断增大，在总水量中的比重由1980年的52%增至2006年的66%。1980年总开采量为205.1亿 m³，2002年达到270.2亿 m³，2005年为253.1亿 m³，2009年为236亿 m³。

3.5 水文变化

近50年来，随着土地利用格局的改变和水利工程建设因素等，海河流域下垫面发生了显著性变化，成为导致降雨-径流关系变化的重要因素。通过海河

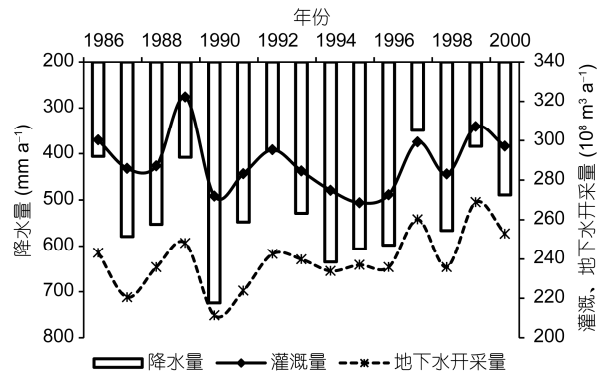


图7 1986年以来降水、农业开采量和灌溉量变化

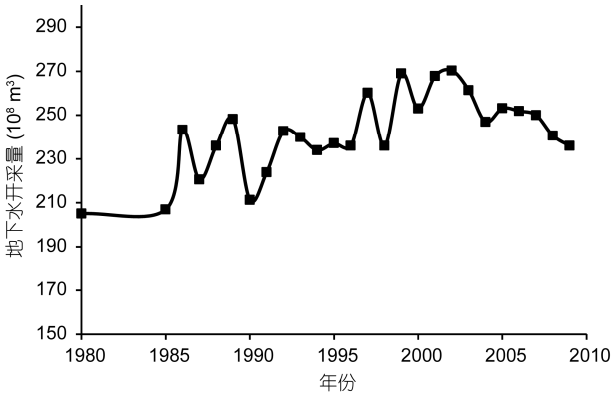


图 8 近 30 多年来海河流域地下水开采量变化

流域主要水文站资料分析 1956~1979 年下垫面和 1980~2005 年下垫面的降水-径流关系(见图 9)以及降水-入海水量关系, 可以发现在 1980~2005 年下垫面条件下, 降水-径流关系曲线明显下移, 表明在相同的降水条件下, 1980~2005 年下垫面条件下产生的天然径流显著少于 1956~1979 年下垫面. 海河流域降水-入海水量关系的分析结论与之类似, 但比较而言衰减程度更为显著(图 10). 经分析, 1980~2005 年降水较 1956~1979 年减少约 11.7%, 但天然径流却减少约 38.1%, 入海水量减少高达 77.4%. 天然径流衰减的原因中, 降水减少的因素占 72.8%, 下垫面变化的因素约占 27.2%; 入海水量衰减原因中, 降水减少的因素占 52.9%, 下垫面变化的因素占 47.1%(表 1).

4 流域二元水循环模式与概念模型

4.1 流域二元水循环模式构成

对于受人类活动强烈干扰的流域, 就其所具有的自然-社会复合型水循环功能来说, 可以视为一个完整的系统. 其陆地水循环系统的外部环境是水循环的大气系统、流域下垫面、地下含水层以及人类社会经济圈, 还包括海洋. 而在流域系统内部, 水循环的实现是通过地表水系统、土壤水系统、地下水系统和人类城市圈系统、人类农业控制系统的相互作用来

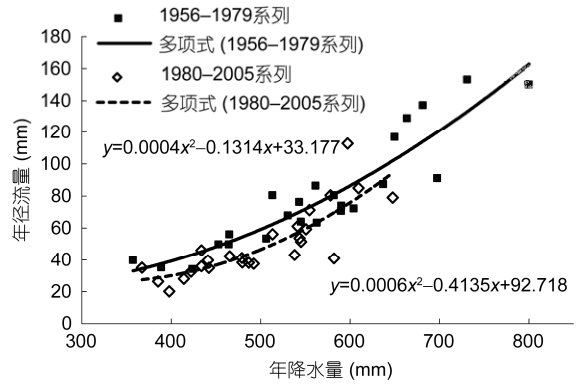


图 9 海河流域不同下垫面对降雨-径流关系的影响

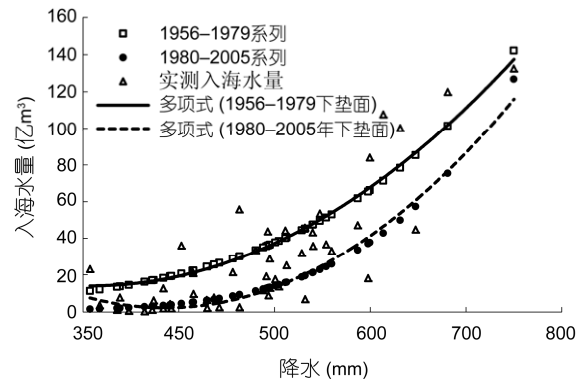


图 10 海河流域不同下垫面对降雨-入海水量关系的影响

实现的, 可概化为五类水循环模式进行描述(图 11).

海陆水循环模式主要描述流域与外界的水汽循环通量, 流域水循环模式以海陆水循环模式作为大气循环边界条件. 城市水循环模式是描述人类社会参与自然水循环过程的高级形式, 具有水循环通量集中、人工控制程度高、通量过程受气象影响小、通量具有持续性等特点. 农业水循环是人类社会参与自然水循环过程的传统形式, 具有影响范围广、水循环绝对通量大、单位面积通量低、与气候和作物生长特点相关性强、通量过程具有频率性等特点. 自然的林草、荒地、湖泊/湿地等受扰下垫面水循环模式仍以自然循环过程为主, 但在人类活动下循环通量受到扰动, 如人工灌溉后的退水、渠道旁侧渗漏进

表 1 海河流域径流衰减因素分析结论表

对比项	实测减少 (1980~2005 年较 1956~1979 年)			降水因素 引起		下垫面因素 引起	
	年降水量	天然径流	入海水量	径流	入海	径流	入海
	水量(亿 m ³)	211.9	97.3	120.3	70.8	63.6	26.5
百分比(%)	11.7	38.1	77.4	72.8	52.9	27.2	47.1

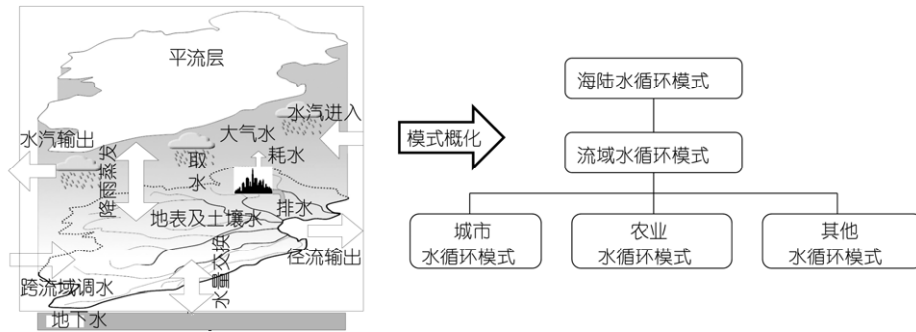


图 11 流域水循环模式关系

入受扰下垫面，地下水调蓄过程与人工控制的下垫面构成空间水力联系等^[13-15]。

4.2 流域二元水循环概念模型系统

流域二元水循环概念模型可综合气候模型(如 NCAR 模型^[16])、多目标决策模型(如 DAMOS 模型^[13])、水资源优化配置模型(如 AWB 模型^[17])和流域水循环模拟模型(如 MODCYCLE 模型^[18])构成(图 12)。不同模型具有其明确的层次和功能分工。

气候模型在模型体系中的主要功能是进行气象预测预报，为模型系统中的其他模型提供气象情景数据基础；多目标决策模型将水资源、投资和环境、生态经济等目标进行有机结合，通过多目标之间的权衡来确定社会经济发展模式及其投资和供水组成，用于宏观层次水资源需求驱动分析；水资源优化配置模型对多目标决策模型给出的宏观水资源供需情景方案进行细化分解，优化人工侧支水循环过程，进行水资源的多目标决策配置，采用多水源、多工程、多水量传输的系统网络描述法，使水资源系统中的

各种水源、水量在各个节点处的调蓄状况及水量关系得到客观、清晰的描述，用于中观层次水资源配给分析。流域水循环模拟模型对水文气象信息及水资源优化配置模型给出的供水信息和工程调度信息等，在流域进行空间展布，进行自然水循环过程和人工干扰下的水循环过程的细致刻画和模拟，以从流域/区域角度研究水文气象变化、土地利用格局变化、水资源开发利用等过程对流域水循环整体及分项过程的综合影响^[19-21]。通过以上模型耦合，流域二元水循环概念模型系统将可实现统筹考虑水资源、宏观经济与生态环境的流域水资源综合管理分析功能的目标。

不同的模型存在时空尺度差异，如水文模型单元划分小时间步长较大，气候模型单元划分大而时间步长小，同样的问题也存在于多目标决策模型与水资源优化配置模型之间、水循环模型与水资源优化配置模型之间^[18]。因此耦合模拟的关键问题为模型之间的尺度转换，解决方式为合理的降尺度分解和整合嵌套技术^[22-24]。

5 结论与讨论

本文阐释了水循环二元特征的演进历史。随着人类对自然水循环干扰程度的加深，将水循环的演进划分为 4 个阶段：(1) 采食经济阶段；(2) 农耕经济阶段；(3) 大规模农田灌溉及工业化起步阶段；(4) 大规模工业化及城市化阶段。讨论了流域二元水循环的科学内涵，建立了流域二元水循环理论框架，提出了水循环“二元化”的 4 个重要特征，认为水循环“二元化”的本质是服务功能的二元化，核心是循环结构和参数的二元化，表征是循环路径的二元化，基础是驱动力的二元化。以海河流域为对象，解析了其在变化环境下的流域二元水循环演变历程。经抽象凝炼，提出了海陆、流域、城市、农业和受扰下垫面五类水

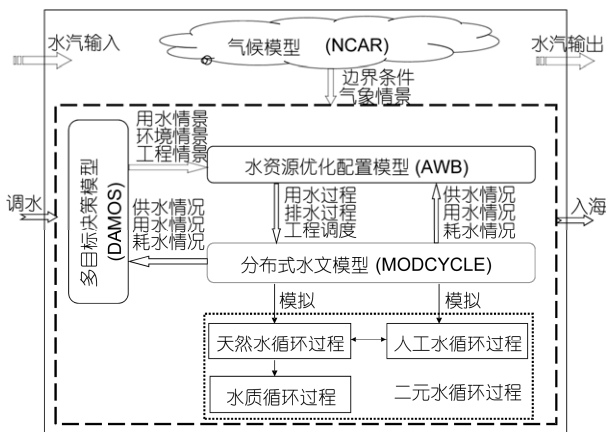


图 12 流域二元水循环概念模型系统

循环模式,并开发了相应的支撑模型系统。

以4个“二元化”为核心的流域“自然-人工”二元水循环理论框架的提出,可以辩证地认识人类经济

社会系统发展和生态环境系统持续发展的相互关系,为协调人类社会用水和生态环境系统用水提供科学依据,为水资源的合理开发利用提供理论基础。

参考文献

- 1 Yu P S, Yang T C, Wu C K. Impact of climate on water resources in southern Taiwan. *J Hydrol*, 2002, 260: 161–175
- 2 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究. 北京: 科学出版社, 2007. 214
- 3 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法. *水利学报*, 2006, 37: 1496–1502
- 4 Ali U K, Ayhan E, Sukriye O. Possible impacts of climate change on soil moisture availability in the southeast anatolia development pro-ject region (GAP): An analysis from an agricultural drought perspec-tive. *Climat Change*, 1998, 40: 3–4
- 5 Wiberg D A, Kenneth M. The impact of climate change on regional surface water supply from reservoirs storage in China. In: *Proceedings of the 1st International Yellow River Form on River Basin management*, 2003 Oct 21–23, Zhengzhou. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Publishing House, 2003. 248–266
- 6 2005年海河流域水资源公报. 海河水利委员会, 2005
- 7 任宪韶. 海河流域水资源评价. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. 339
- 8 王浩, 王成明, 王建华, 等. 二元年径流演化模式及其在无定河流域的应用. *中国科学: 技术科学*, 2004, 34(增刊 1): 42–48
- 9 郝素秋. 环渤海区域经济一体化现状分析与对策. *经济论坛*, 2010, 9: 89–91
- 10 刘家宏, 秦大庸, 王浩, 等. 海河流域二元水循环模式及其演化规律. *科学通报*, 2010, 55: 512–521
- 11 卢路, 刘家宏, 秦大庸, 等. 海河流域水文特性. *海河水利*, 2011, 6: 1–4
- 12 David Y, Jack S, David R, et al. WEAP21–A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 1, Model characteris-tics. *Water Int*, 2005, 30: 487–500
- 13 贾仰文, 王浩, 周祖昊, 等. 海河流域二元水循环模型开发及其应用——I. 模型开发与验证. *水科学进展*, 2010, 21: 1–8
- 14 Jia Y W, Shen S H, Niu C W, et al. Coupling crop growth and hydro-logic models to predict crop yield with spatial analysis technologies. *J Appl Remote Sens*, 2011, 5: 1–20
- 15 Hijmans R J, Guiking Lens I M, van Diepen C A. User’s Guide for the WOFOST 6. 0 Crop Growth Simulation Model, 1994
- 16 Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. Description of The NCAR Community Atmosphere Model (CAM3.0). Boulder, Colorado: NCAR, 2004
- 17 桑学锋, 周祖昊, 秦大庸, 等. 基于广义 ET 的水资源与水环境综合规划研究 II: 模型. *水利学报*, 2009, 40: 1153–1161
- 18 陆垂裕, 秦大庸, 张俊娥, 等. 面向对象模块化的分布式水文模型 MODCYCLE I: 模型原理与开发篇. *水利学报*, 2012, 43: 1287–1295
- 19 Niu C W, Jia Y W, Wang H, et al. Assessment of water quality under changing climate conditions in the Haihe River Basin, China. In: *Proceedings of symposium H014 held during IUGG2011*, 2011 Jun 28–July 7, Melbourne, Australia. IAHS Press, 2011. 165–171
- 20 Liu J, Zheng C, Zheng L, et al. Ground Water Sustainability: Methodology and application to the North China Plain. *Ground Water*, 2008, 46: 897–909
- 21 James D F, Barry S, Johanna W, et al. Climate change in the Arctic: Current and future vulnerability in two Inuit communities in Canada. *Geogr J*, 2008, 174: 45–62
- 22 Running S W, Hunt R E. Generalization of A Forest Ecosystem Process Model for Other Biomes, BIOME-BGC, and An Application for Global-Scale Models. San Diego: Academic Press, 1993
- 23 Trenberth K E. Conceptual framework for changes of exams of the hydrological cycle with climate change. *Clim Change*, 1999, 42: 203–218
- 24 贾仰文, 王浩. 流域水循环及其伴生过程综合模拟. 北京: 科学出版社, 2011. 368