科学通报 2013 年 第 58 卷 第 12 期：1064 ~ 1077
专题：海河流域水循环与调控 论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
自然科学基金项目进展专栏
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟

王浩, 贾仰文, 杨贵羽*, 周祖昊, 仇亚琴, 牛存稳, 彭辉

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 100038
* 联系人, E-mail: guiyuy@iwhr.com

2012-02-06 收稿, 2012-06-25 接受, 2012-12-21 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2006CB403404)、国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(51021066)、国家自然科学基金重点项目(50939006)、国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-009-4)、国家科技支撑计划(2010BAC69B02)和国家自然科学基金(51109224)资助

摘要 在全球气候变化和高强度人类活动的影响下, 海河流域水资源短缺、水环境恶化及生态退化等问题日益凸显. 如何合理解决这些问题成为流域水资源管理中面临的紧迫任务. 由于水循环承载着每一滴水的形成和转化, 同时又与水生态、水环境等过程相伴生, 且相互作用, 只有将三者结合起来, 明确了解水循环演变驱动下的水生态、水环境的演变趋势, 才能有助于问题的根本解决. 为全面诊断和解决流域水资源、水生态与水环境的问题, 本研究在全面剖析流域水循环演变"自然-社会"二元特性的基础上, 构建海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟平台, 并以此为工具通过基于气候模式预测结果与水量控制条件的情景设置, 对水资源、水生态和水环境的未来演变情势进行了预估. 结果表明: 结合气候变化, 通过实施耗水控制管理和南水北调工程, 未来水平年(2030 年)海河流域在保证国民经济用水增长的同时, 水资源的消耗量、地下水的超采量、入海水量可实现良性发展, 与此相伴生的水环境恶化得到缓解, 自然生态系统和农田生态系统的生产能力将呈增长趋势. 这为开展流域水循环调控和实施最严格的水资源管理制度奠定了基础.

关键词
"自然-社会"二元特性
演变机制
水循环
水环境
生态
海河流域

随着经济发展和人口增加, 水资源短缺引发了一系列生态环境问题; 加之全球气候变化, 进一步增加了未来流域水资源演变的不确定性, 干旱与洪涝灾害发生频率增加, 水生态及水环境的脆弱性加剧. 这一系列与水相关的问题成为当前全球关注的焦点[1~8]. 然而, 不论水问题的表现形式如何, 都可归结于水循环过程的演化, 因为水循环承载着每一滴水的形成和转化, 同时又与水生态、水环境等过程相伴生, 且具有作用与反作用关系(如图 1). 因此, 如何合理利用好每一滴水, 协调好水循环过程中水资源、水生态、水环境三大系统间的相互作用关系, 维持健康的水循环过程, 直接关系着流域/区域的可持续发展. 但是由于高强度人类活动的影响, 流域水循环已由原来的"自然"一元模式占主导逐渐转变为"自然-社会"(或"自然-人工")二元耦合模式. 因此, 面对日益凸显的二元水循环特性, 仅以传统的"自然"一元水循环模式进行研究已不能完全揭示水循环及其驱动下的水生态、水环境演变机理. 立足于二元水循环模式, 开展水循环及其驱动下的水生态、水环境系统研究, 成为当前水循环及相关领域研究的热点之一. 如 1994 年美国农业部(USDA)的农业研究中心开发的 SWAT(soil and water assessment tool)模型[9], 在其后期的完善过程中, 先后增加了农业灌溉、城市用水等社会水循环成分, 引入了作物生长模型, 改进了河道中营养成分的水质方程以及对杀虫剂迁移的模拟, 在一定程度上实现了对二元水循环及其伴生的生态

引用格式: 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟. 科学通报, 2013, 58: 1064–1077
英文版见: Wang H, Jia Y W, Yang G Y, et al. Integrated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River Basin. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5371-0

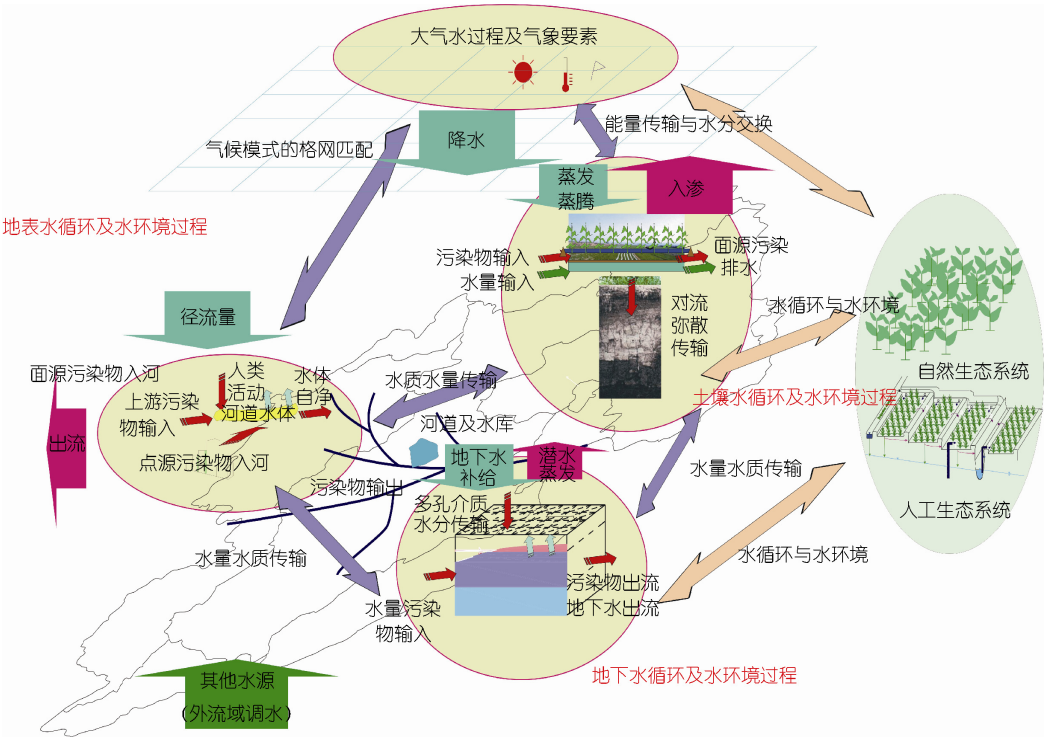

图 1　水循环、水环境及生态三大系统的相互作用关系

和环境的模拟. 然而, 该模型其优势仍是集中于对自然水循环过程的模拟, 缺乏对水资源的配置、水资源分配与宏观经济和产业结构等社会水循环要素的全面考虑, 这也使得与水循环相伴生的生态和环境的模拟也不完全. 欧洲的 SHE(european hydrological system)模型[10]亦是如此, 即在自然水循环过程中, 通过土地利用条件的变化和水环境模块的嵌入体现了社会水循环的要素和水环境的特性, 但是其核心对象仍是自然水循环过程, 并不具有更多模拟社会水循环过程的功能, 同时也缺乏对生态过程的模拟. 瑞典的 WEAP(water evaluation and planning system)模型[11] 尽管具有较强的对社会水循环模拟的功能, 但是由于缺乏对自然水循环过程、生态过程和水环境过程的模拟, 亦不具有开展二元水循环及其伴生过程综合模拟的能力. 另外, 尽管一些研究者亦对水循环的二元特性开展了较为全面的剖析[12], 但是其研究主要集中于对统计数据的归纳分析, 难以系统揭示水循环内部、水循环与水环境、生态之间的作用机制, 缺乏相应的定量化方法研究. 总之, 目前关于“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合定量模拟研究鲜有报道.

海河流域在高强度人类活动和全球气候变化的影响下, 水循环具有明显的“自然-社会”二元特性, 长期以来呈现出流域产流、河川径流、入海水量等自然水循环通量显著减少, 而供水、用水、耗水、排水等社会水循环通量日益增大的演变趋势; 加之流域水资源本底条件较差, 流域内水资源短缺、水生态退化和水环境恶化等问题日益突出. 为全面诊断和解决流域水资源、水生态与水环境的问题, 本研究在全面剖析流域水循环演变二元特性的基础上, 构建了海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟与预测模型平台, 并以此为工具模拟分析了不同情景下流域水资源、水生态和水环境未来的演变情势. 相关成果可为海河流域立足于水循环全过程, 开展基于水循环过程的调控和水资源管理提供支撑.

1　海河流域概况及其水循环的二元演化机制

1.1　海河流域概况

海河流域位于中国的东部, 介于 112°~120°E, 35°~43°N 之间, 包括北京、天津、河北等 8 个省(自治区、直辖市), 总面积 32×10^4 km^2, 占全国面积的 3.3%. 其中山丘区面积 18.9×10^4 km^2, 占 59%, 平原

区面积为 13.1×10^4 km^2, 占 41%; 是我国政治文化的中心和经济发达地区. 据统计, 到2008年, 全流域人口达到 1.37 亿人, 占全国的 10.3%; 城镇化率达到 37.4%, 远高于全国平均水平; GDP 达到 2.58 亿元, 占全国的13%. 然而, 流域内水资源状况不容乐观, 社会经济发展对水资源的需求已远远超出流域水资源的承载能力, 供需严重失衡, 且由此造成了一系列水生态、水环境问题.

据统计, 到 2005 年, 全流域人均水资源量为 202 m^3, 占全国平均水平的 13%, 远低于国际公认的人均 1000 m^3 缺水标准和 500 m^3 的极度紧缺标准; 亩均用水量仅为 213 m^3, 占全国平均水平的 12%[13]; 流域内用水量较大, 从黄河流域年均引水量超过 40×10^8 m^3, 水资源开发利用率高达 106%, 已远远超过 63%的水资源可利用率. 同时, 由于经济用水挤占生态用水, 使得流域内主要河流每年几乎全部断流, 白洋淀、七里海等 12 个主要湿地总面积较 20 世纪 50 年代减少了 5/6[14]; 为弥补水资源的不足, 地下水长期超采, 全流域累积超采量在 1000×10^8 m^3 以上, 占全国超采总量的 2/3, 超采造成的地下水漏斗呈集中连片的趋势[15]; 入海水量由 20 世纪 50 年代的 207×10^8 m^3 锐减到 21 世纪初的 17×10^8 m^3(详见图 2). 此外, 水污染严重, 目前全流域污染河长达 7057.0 km, 占评价河长的 59.8%, 其中严重污染河长占评价河长的 53.6%[16].

1.2 海河流域水循环的二元演化机制

海河流域地处温带半湿润、半干旱大陆季风气候区, 处于气候变化的敏感区, 同时又是我国政治、文化的中心区域, 处于国家经济发展第三极[17] (http://house.focus.cn/news/2009-10-04/768374.html). 海河流域水循环承受着自然变化和高强度人类活动的双重作用, 呈现出明显的“自然-社会”二元特性.

在自然因素方面, 由于全球气候变化, 流域内水循环的外在驱动条件发生改变, 使得本已较少且时空分布极不均匀的降水呈现下降趋势. 据统计, 全流域平均降水量近26年(1980~2005年)为 498.8 mm, 较前 24 年(1956~1979 年)的 566.5 mm 减小 11.9%; 而水资源量、地表径流量、入海水量减少的比例更大, 详见图 2.

在社会因素方面, 由于大规模的人类活动, 供水、用水、耗水、排水等社会水循环系统日益复杂, 对流域自然水循环系统产生了极大的影响, 集中体现在循环通量、循环结构和循环路径的变化上. 据统计, 近 26 年, 社会水循环通量整体呈增加趋势, 且与之相伴的循环结构随着供用水结构的变化而变化. 在供水方面表现为地表水减少、地下水增加, 外调水和非常规水增加的演变趋势; 在用水方面表现为生活、工业用水量增加, 农田灌溉用水量减少的变化格局. 全流域不同年代的供用水及其结构的变化见图 3.

此外, 水利工程的建设和土地利用格局改变引起的流域下垫面变化亦直接或间接影响着自然水循环过程. 一方面, 水利工程的建设以及随之而来的供用水过程, 增加了自然水循环通量转化的环节; 另一方面, 土地利用格局的改变影响了流域水资源的产生和消耗. 据统计, 到2005年, 全流域已建大型水库 34 座, 中型水库 114 座, 小型水库 1711 座; 有蓄水能力的塘坝 17505 座; 另外, 流域内还有向城市输水的引提水工程和引黄工程[18], 这直接影响了自然水循环的产汇流. 与此同时, 随着城市化和工业化

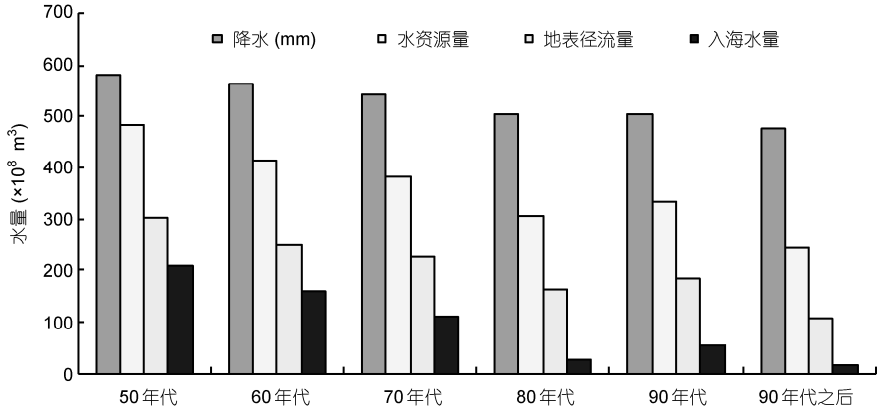

图 2 20 世纪不同年代海河流域水资源变化状况

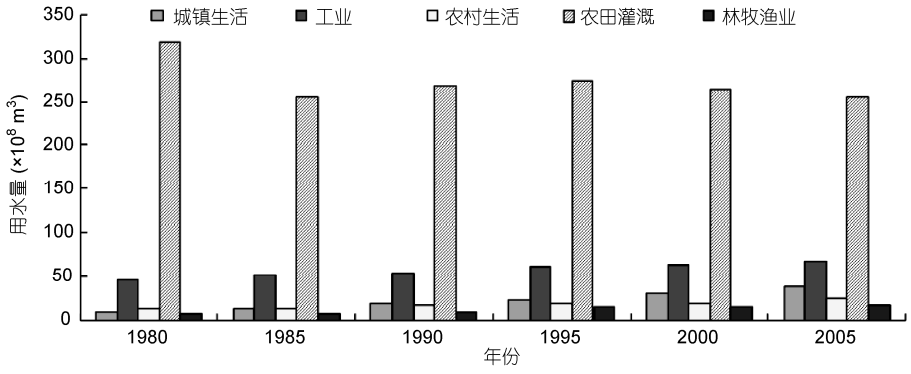

图 3　海河流域供用水变化状况

的发展, 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, 亦影响着水循环的路径和通量.

总之, 在全球气候变化和人类活动的共同作用下, 流域水循环在循环驱动力、循环结构和循环参数等方面均发生了深刻变化, 呈现出自然和社会水循环系统相互依存、此消彼长的融合过程, 并且在高强度人类活动影响下、循环环节不断增加、循环路径不断延长、循环通量不断变化的二元演化特性. 与此相伴生的流域水环境、生态系统亦随之改变.

2　海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟平台

由于水循环、水环境、生态 3 大系统间存在着错综复杂的作用关系, 而水又是其中重要的驱动因子, 对其他两大系统的演化起到至关重要的作用. 为全面揭示流域水资源、生态和水环境的演变特性, 本研究借助海河流域二元水循环及其伴生过程的综合模拟平台开展了相关研究. 图 4 为海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟平台的总体结构图. 其中 DAMOS, ROWAS 和 WEPLAR 构成二元水循环模型 NADUWA(natural-artificial dualistic water cycle model), 为综合模拟平台的核心模型, 进一步与流域水环境模型和流域生态模型 ECO 耦合, 形成二元水循环及其伴生过程的综合模拟模型 NADUW3E (natural-artificial dualistic water cycle model with economy, environment and ecology). 与此同时, 为揭示气候变化对水循环的影响, 基于空气动力学机制, 将全球气候模式和区域气候模式相嵌套, 可实现海河流域气候模拟与预测, 并与综合模拟模型进行耦合. 该平台根据水循环模型、水环境模型、生态模型及气候模式之间的耦合关系, 采用 Eclipse RCP 技术、组件技术、大规模优化模型求解技术等成熟的先进技术, 基于 GIS 平台, 将数据库与模型库集成一个整体, 可实现流域水资源、水环境和水生态历史演变规律分析和未来各种情景的预估.

以下对模型平台中的二元水循环模型、流域水环境模型、流域生态模型以及流域生态模型和流域环境模型与二元水循环的耦合关系作简要说明.

2.1　二元水循环模型

二元水循环模型(简称二元模型), 由分布式流域水循环模型 WEPLAR、水资源配置模型 ROWAS 和多目标决策分析模型 DAMOS 耦合而成, 可从宏观到中观, 再到微观, 层层分解, 嵌套模拟反馈, 实现“自然-社会”二元水循环过程的全面模拟. 其中 WEPLAR 模型处于最底层, 集中于相对微观尺度, 主要用以模拟不同水资源配置模式下自然和社会水循环耦合运动过程; DAMOS 模型处于最顶层, 集中于宏观尺度, 主要通过多目标综合决策将社会、经济、环境、水资源等子系统内部及相互之间的约束机制进行模拟, 分析社会发展对水资源的驱动和需求; ROWAS 模型, 处于中间环节, 侧重于社会水循环中的水资源的配置过程. 有关二元水循环模型开发和校验以及不同模型间的耦合关系等可参见文献[19].

2.2　流域水环境模型及其与二元水循环模型的耦合

流域水环境模型包括流域水质模型 WEQ(water quality model based WEPLAR)[20]和地下水水质模型[21]. WEQ 模型针对海河流域尺度大、污染来源复杂、人类活动强烈等特点, 构建了水循环伴生的流域

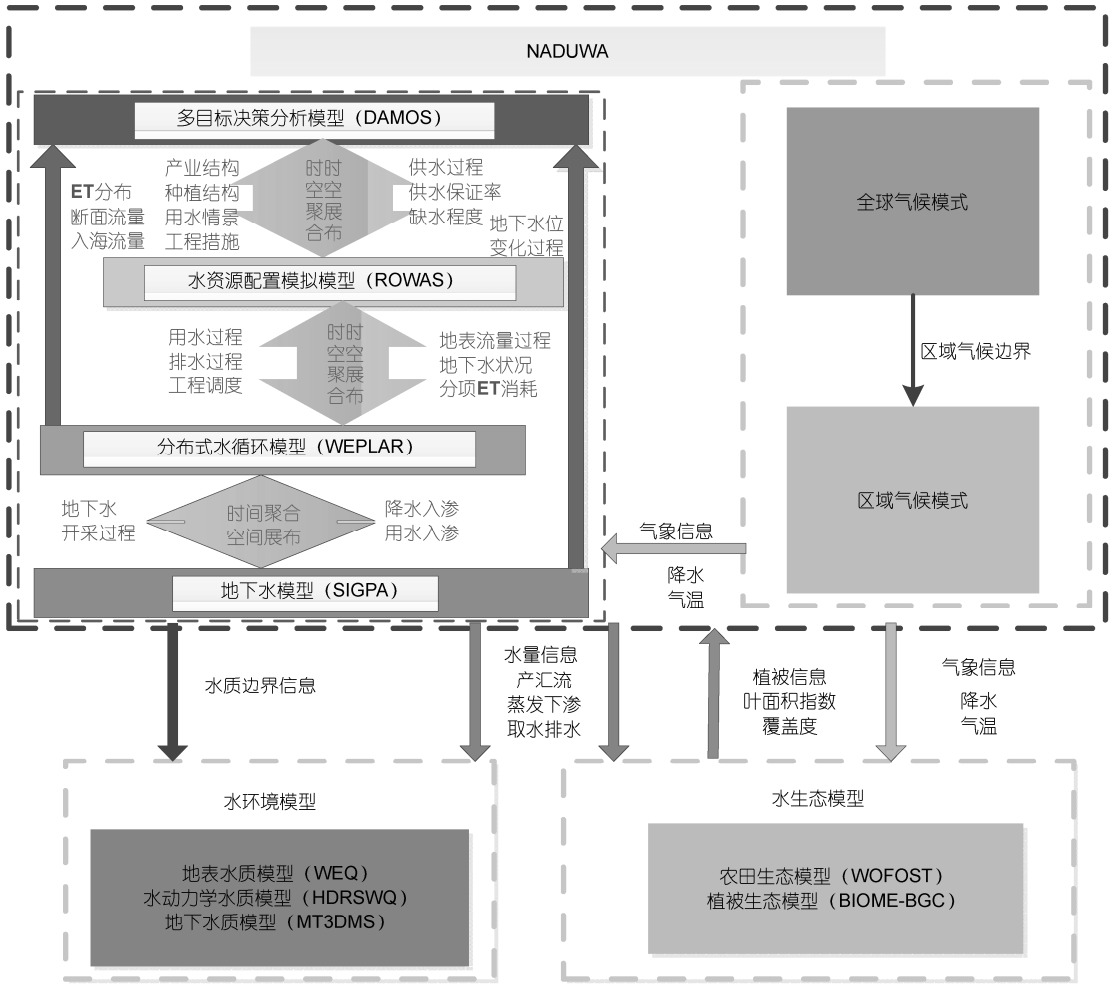

图 4 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟平台的总体结构

水质模型. 该模型可定量分析不同的社会经济发展模式, 污水处理水平下的污染物产生运移状况, 关键控制断面水质状况, 水功能区达标情况. WEQ 水质模型基于流域水循环的单元划分方式, 考虑点源(包括工业和生活)和非点源污染(包括农田、畜禽养殖、农村生活、水土流失、城镇径流)的产生、入河及其在河道中的迁移转化过程, 分别与流域水循环的产流、坡面汇流和河道汇流过程紧密联系.

地下水水质模型: 主要是针对海河流域平原氮、磷污染较为严重而构建的地下水氮、磷污染物溶质运移模型. 在模型的构建中, 以地下水水流模型为基础, 以专用于模拟地下水流和污染物在多孔介质中运移的计算软件 PMWIN(processing modflow for windows 的简称)为模拟平台, 选择其中包含的 MODFLOW 地下水水流模块, 和 MT3DMS 地下水污染物运移模型为主要模型工具, 采用一阶不可逆反应作为溶质运移模拟的化学反应项模拟, 其中磷和氨氮选用 Langmuir 非线性等温吸附模型, 硝态氮采用无吸附模式开展详细模拟.

在具体模拟过程中, 以上两模型与水循环模型均采用单向耦合方式(如图 5 所示), 实现污染物在陆域、河道以及地下的迁移转化过程. 有关流域水环境模型更详细的内容见文献[20,21].

2.3 流域生态模型及其与二元水循环模型的耦合

流域生态模型包括陆地植被生态模型和农田生态模型. 其中农田生态模型是以 WOFOST 作物生长模型为基础, 结合二元模型构建了分布式农田作物生长模型[22]. 该模型针对 WOFOST 模型[23,24]仅可模拟单一土壤和气候条件下一年生作物生长全部动态

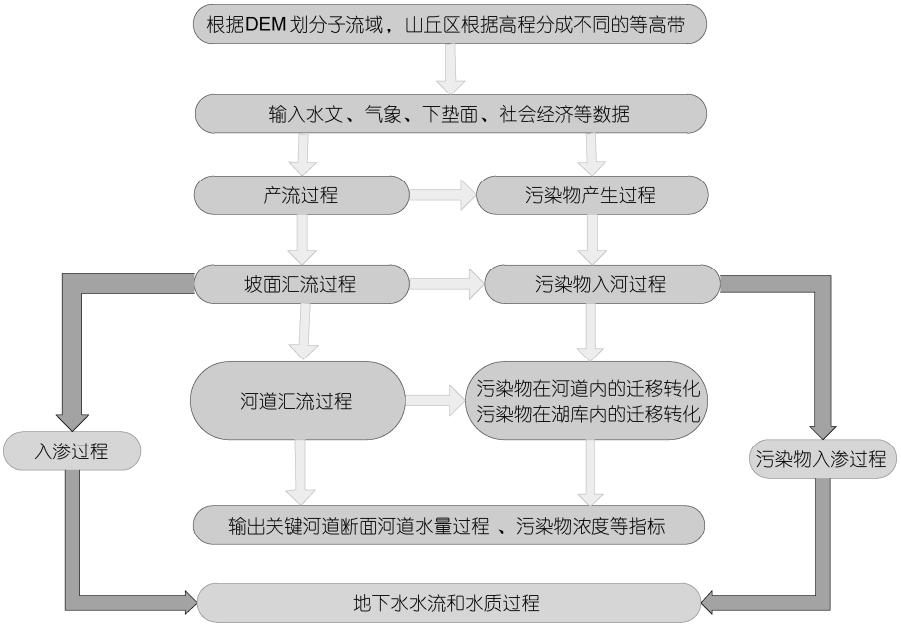

图 5　流域水环境模型与水循环模型耦合关系图

的不足，结合二元水循环模型在水循环模拟过程中的分布式特点，通过气象数据和农作物生理参数的相互交换，可全面考虑区域气候、土壤类型差异，农业生产中供、用、耗、排具体条件的不同，在重新编写一个主程序、气象数据生成模块、作物数据生成模块和土壤数据生成模块后，通过主程序来循环调用气象数据生成模块、作物数据生成模块、土壤数据生成模块和 WOFOST 模块，进而实现较大区域农田作物生长的分布式模拟.

陆地植被生态模型，以 BIOME-BGC 生物化学循环模型[25]为基础，结合二元模型构建了流域尺度的陆地植被生态模型[26]. 该模型针对 BIOME-BGC 模型仅能开展单点计算模拟，难以对大流域开展模拟的特点，重新改写了原 BIOME-BGC 模型的主程序，并通过为 WEPLAR 模型提供不同时期及生长季节的叶面积指数等生态参数，WEPLAR 模型将为植被生长模型提供温度、日照条件等数据交换，与二元水循环模型进行耦合，通过气象、地理位置、土壤、海拔等数据的循环调用，实现自然生态系统中“植物-土壤-大气”之间的碳、水分和养分循环模拟.

图 6 给出了流域生态模型与二元水循环模型的耦合关系. 有关流域生态模型的更详细内容见文献[12,26].

2.4　气候模式与水循环模型耦合

本研究采用区域气候模式 RegCM3(详见 http://users.ictp.it/~pubregcm/)，通过对参数化方案的选择和海河流域模拟范围的选取进行了调试，建立了海河流域的区域气候模式系统. 气候模式与水循环模型之间通过空间和时间降尺度处理实现相互耦合. 在空间上，本研究选用国际上应用较广泛的统计降尺度模型 SDSM (statistical down-scaling model)来进行气候模式的空间降尺度；在时间上，采用国家气候中心与瑞典哥德堡大学联合开发的适用于中国广大地区的中国天气发生器 BCCRCG-WG 3.00，最后通过对降水、气温等气象要素的降尺度处理，实现与水循环模型的耦合.

3　海河流域二元水循环及其伴生过程的综合模拟模型验证

为实现对水循环及其伴生过程的全面模拟，通过对模型系统参数灵敏度的分析，选择敏感度高的参数开展了模型参数率定和模型校验. 本研究主要校验的参数为：在气象要素方面包括降水和气温；在水循环方面包括河道径流量、蒸发蒸腾量、水库蓄变量和地下水位变化；在水环境方面包括河道水质、地下水水质；在水生态方面包括粮食单产、叶面积指

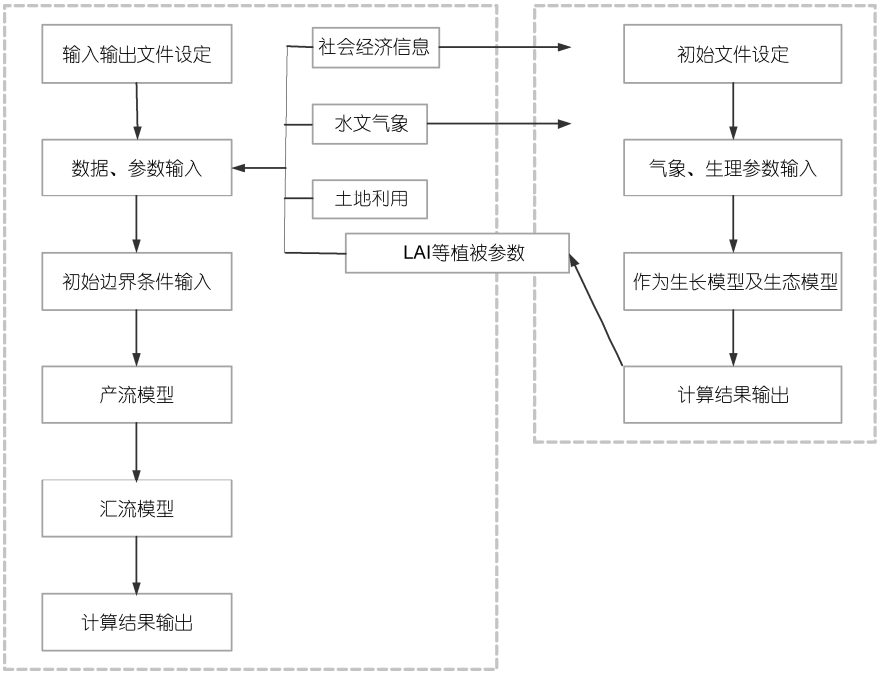

图 6 流域水生态模型与水循环模型耦合关系图

数以及净初级生产力 NPP. 以下对校验结果简要说明.

3.1 气象要素降尺度结果验证

在空间降尺度方面, 选择流域内 26 个气象站点实测气候资料和气候模式的预估结果, 以 1961~1990 年为率定期, 1991~2000 年为验证期, 分站点对模型进行参数率定和验证. 在时间降尺度方面, 利用该天气发生器对各站点 2021~2050 年逐月气候资料进行降尺度, 得到满足水文模型要求的日尺度资料. 结果表明, 各个站点降水和温度的降尺度结果比较令人满意, 图 7 是北京站降水和温度的空间降尺度结果与实测结果的对比.

3.2 二元水循环模型的验证

(1) 河道径流验证. 为进行模型验证, 在 1956~2005 年共 50 年历史水文气象系列及相应下垫面条件下进行连续模拟计算. 以 1956~1979 年系列为模型校正期, 以 1980~2005 年为验证期, 以典型水文站为验证站, 将计算结果与实测值进行对比, 结果见表 1. 由表 1 可见, 对于具有高强度人类活动影响的海河流域, 此模拟效果比较满意, 各水文站模拟与实测径流量的 Nash 效率系数在 0.6 以上, 相关系数在 0.8 以上. 详细的模拟过程见文献[19].

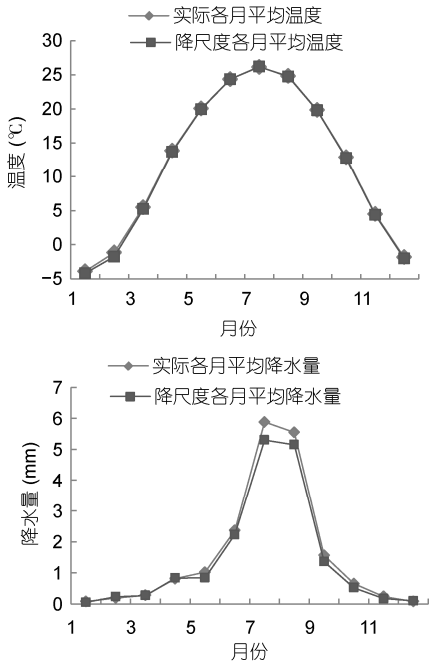

图 7 北京站月平均温度和降水降尺度结果与实测 (1961~2000 年)对比图

(2) 水库蓄变量验证. 在水库蓄变量的校验中, 本研究选取潘家口、密云、岳城、西大洋 4 个大型水库作为典型, 将 1980~2005 年模拟计算的蓄变量过程与实测过程进行对比. 结果表明, 模拟过程和实测

表 1　径流验证结果

水文站	韩家营	承德	滦县	戴营	密云水库	观台	黄壁庄
相对误差(%)	0.30	−5.80	−1.30	−4.00	11.80	3.60	−5.90
Nash 效率	0.70	0.72	0.60	0.65	0.79	0.81	0.68
相关系数	0.85	0.85	0.86	0.81	0.89	0.93	0.83

过程基本一致, 说明模型能较好地反映水库调度过程. 详细验证过程可参见文献[27].

(3) 地下水验证. 本次研究采用华北平原 1984, 2001 年, 2002 年浅层地下水等水位线, 2001, 2002 年深层地下水等水位线; 河北省 1975 年, 1985 年, 1992 年浅层和深层地下水等水位线; 以及地下水观测井 1993~2008 年地下水动态观测数据, 分别对地下水流场和 232 个观测井水位进行了校验. 模拟结果很好地再现了实测结果, 表明二元模型在地下水流场模拟中具有较高的精度. 图 8 为 2005 年所有浅层观测井计算地下水位与观测计算水位对比.

(4) 蒸发蒸腾量(ET)验证. 以 2002~2005 年为验证期, 将模型模拟的 ET 成果与 RS 反演 ET 值进行对比, 全流域平均相差 5.5%, 且由图 9 可见模拟结果与反演结果的演变趋势基本吻合.

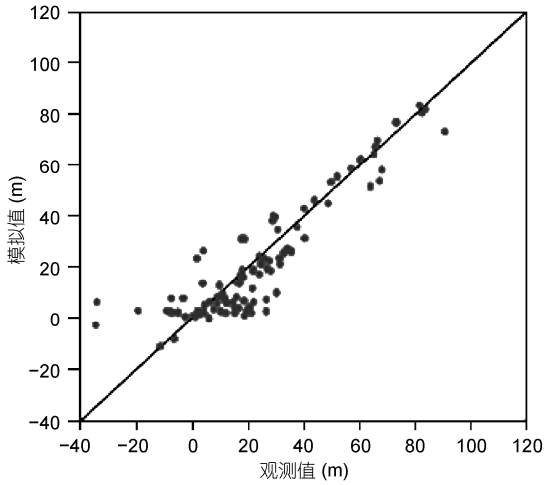

图 8　2005 年浅层观测井计算地下水位与观测计算水位对比

3.3　水环境模拟验证

(1) 流域水质模型验证. 流域水质模型的验证包括流域废污水排放量的验证、污染负荷的验证和关键水质控制断面的验证. 在流域废污水排放量的验证中, 本次研究以海河流域水资源评价中 2000 年海河流域内 1270 个工矿企业污染源的废水和污染物排放量为参考, 模拟与评价的废污水排放量的估算误差为 1.0%, 说明模型估算的废污水量与综合规划的评价量在流域总量上基本保持一致. 对于污染负荷的估算, 采用常用指标化学需氧量 COD 和氨氮 NH_3-N 进行模拟, 结果表明模拟过程和实测过程基本一致, 说明模型基本能模拟海河流域的水质状况,

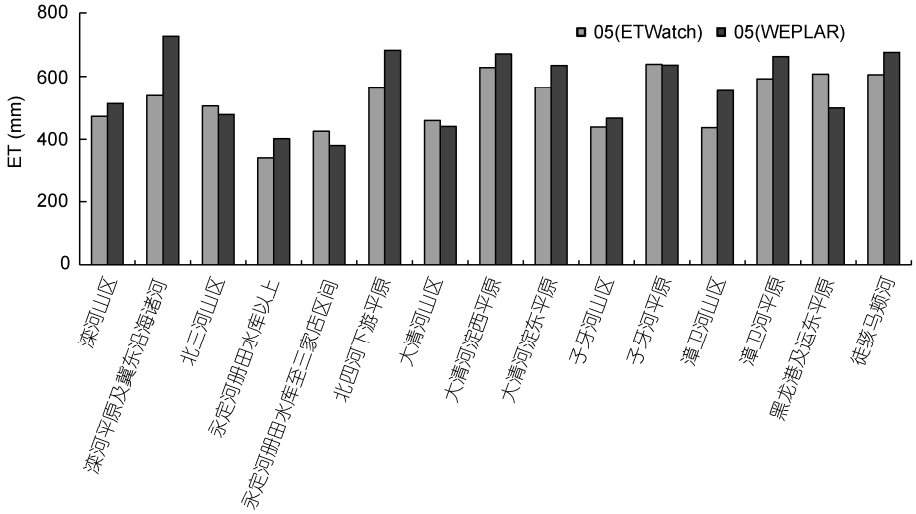

图 9　模型模拟的 ET 成果与 RS 反演 ET 对比图(2005 年值)

可满足流域规划、污染源削减、总量控制的需求. 详细的模拟结果参见文献[20].

(2) 地下水质模拟结果验证. 在大致估算出每个时期各污染物进入海河平原区地下水系统的数量之后, 对海河地下水水质模型进行率定, 率定的主要参数为各污染物在地下水中一介反应系数, 以及弥散度参数. 应用2004 年9 月各测站插值结果作为模型率定的参考, 模型能够很好地实现地下水污染物的迁移转化. 由于篇幅限制, 图 10 仅列出硝态氮的对比结果.

3.4 生态模型的校验

(1) 农田生态模型验证. 以冬小麦为主要农作物, 分别对叶面积指数、干物质进行校验. 在验证中采用 2007~2008 年大兴试验站实测结果与模拟结果进行了比较, 结果表明两种水分条件下, 冬小麦生长的模拟值与实测值都非常接近, 变化趋势也基本一致, 能较好地反映农作物的生长特点. 详细的验证过程可参见文献[22].

(2) 陆地植被生态模型验证. 对于陆地植被生态模型验证, 是基于 NTSG(numeric terra dynamic simulation group)研究组推荐的各类植被的生理学参数, 用南小河沟试验站刺槐光合作用观测试验数据和叶面积指数观测数据进行温带阔叶林生理参数率定后, 分别对温带阔叶林叶面积指数和净初级生产力 NPP 的模拟结果与实验数据进行了校验. 结果表明陆地植被模型基本能够反映自然植被的生长发育特点. 表 2 给出了叶面积指数的验证结果, 有关 NPP 验证见文献[26].

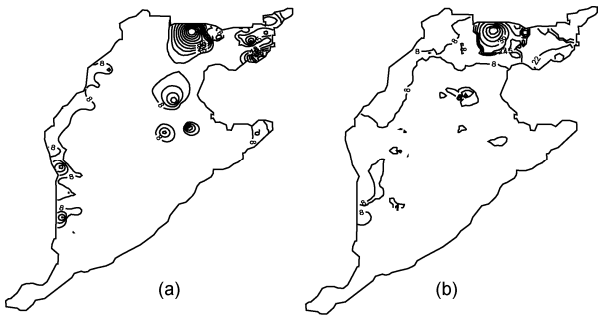

图 10 硝态氮模拟与实测对比

(a) 模拟结果; (b) 实验结果

4 海河流域水循环及其伴生过程未来演变趋势预估

为保障未来海河流域有限水资源的合理利用, 维持生态环境良性发展, 结合当前流域水资源条件和水环境现状, 在综合考虑社会经济、生态环境等要素的基础上设置了不同情景, 借助二元水循环及其伴生过程的综合模型平台分析了水量控制及气候变化条件下, 流域水循环及其伴生过程的未来演变. 对于历史演变规律的研究见文献[27].

4.1 情景说明

为增强流域水资源可持续性, 改善流域水环境及生态条件, 更好地发挥水资源在经济社会、生态环境中的作用, 本研究根据海河流域水资源状况和未来水资源调控措施, 综合考虑了以下 6 方面边界条件, 共设计了 17 个情景. 由于篇幅所限仅列出部分情景, 见表 3.

具体边界条件为: (1) 水平年: 现状 2005 水平年、未来 2015, 2020 和 2030 三个水平年. (2) 水文系列: 为全面反映流域水文的丰枯变化, 设置 2 个水文系列, 即 1980~2005 年 26 年短系列(偏枯系列)和 1956~2005 年 50 年长系列(丰枯交替系列). (3) 地下水利用[28]: 考虑现状地下水开采与规划压采方案, 结合南水北调工程通水规模和进度的变化, 经济增长对水资源的需求, 设置现状年均超采 80×10^8 m^3, 2015 年减少超采 1/3, 2020 和 2030 年基本实现采补平衡. (4) 入海水量: 结合流域不同年代实际入海水量, 制定了 3 种可能目标, 分别为: 35×10^8 m^3(1980~2005 年实测平均, 反映流域总水量均衡的最低要求)、55×10^8 m^3 (1980~2005 年平均天然河川径流量的 1/3, 维持流域近期水均衡状况)和 93×10^8 m^3(1956~2005 年

表 2 2009 年 7~9 月植被叶面积指数验证结果

月-日	07-05	07-11	07-23	08-01	08-11	08-23	09-01	09-11
模拟值	2.16	2.22	2.33	2.41	2.49	2.62	2.7	2.78
实测	2.24	3.33	2.44	2.085	2.2	2.23	1.96	1.695

表 3 水量情景方案设置(单位: $\times10^8$ m^3)

水平年	方案	水文系列	降水量	地下水超采	入海水量	南水北调(引江)		引黄
						中线	东线	
2005 现状水平年	S1	1980~2005	1596.2	80	35	0	0	46.2
2015 未来水平年	S2		1596.2	53	35	0	3.65	46.4
	S4[a)]		1596.2	53	55	56.4×50%	3.65	46.4
2020 未来水平年	S6		1596.2	0	55	58.7	14.2	47
	S10[a)]		1596.2	27	55	58.7	14.2	47
	S16		1596.2	55	55	62.4	16.8	51.2
2030 未来水平年	S11[a)]		1596.2	0	93	83.9	31.3	43.3
	S17		1596.2	36	55	86.2	31.3	51.2

a) 为推荐相对优选方案

实测平均, 维持长期的水量均衡状态). (5) 南水北调(引江): 以南水北调的规划方案为基础, 考虑通水时间和通水量的变化, 共设置 5 种可能情景, 即: 现状年不通水; 2015 年东线调水 3.65×10^8 m^3, 中线不通水和东线年调水 3.65×10^8 m^3; 2015 年中线年调水 28.2×10^8 m^3, 总调水量 31.85×10^8 m^3; 2020 年东线一期、中线完全通水, 总调水量 72.9×10^8 m^3; 2030 年东线二期工程通水, 总调水量 114.2×10^8 m^3. (6) 引黄水量: 现状年 46.2×10^8 m^3(1980~2005 年平均), 2015 年 46.4×10^8 m^3, 2020 年 47.0×10^8 m^3(包括黄河侧渗补给量 1.06×10^8 m^3); 2030 年引黄水量略有减少, 调水量 43.3×10^8 m^3.

4.2 水量控制及气候变化条件下的水循环演变预估

采用海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟平台, 对 17 个情景分别进行模拟, 分析了不同水资源条件下, GDP、粮食产量、ET、入海水量、用水量、减少地下水超采量和 COD 等的变化. 通过模拟结果与设置目标的对比, 给出保证经济和粮食持续发展, 生态环境良性循环发展条件下的优选方案(详见表 3), 并就此分析了对应水量控制条件下的水循环演变, 同时, 结合气候变化预测了未来 2020~2045 年水资源演变趋势. 以下仅列出短系列优选方案的模拟结果, 详见表 4~6.

(1) 水量控制下的水循环演变预估. 由表 4 可见, 在 1980~2005 年水文条件和水量控制条件下, 全流域现状水平年、2015, 2020 和 2030 未来 3 个水平年, 在保证总用水量增加的同时, 水资源的消耗量、地下水的超采量、入海水量均呈良性发展趋势. 其中, 最大可消耗的水资源整体呈逐渐增加的趋势, 但当地水资源(即扣除引江引黄水量)的消耗却呈减少趋势. 全流域地下水的超采量呈减少趋势, 到 2030 年基本实现零超采, 甚至有可能得到回补, 如 S11, 回补约 2.6×10^8 m^3; 入海水量呈增加趋势, 且在 2030 水平年可达到 60×10^8 m^3.

在社会侧支水循环方面: 全流域总用水量呈增

表 4 海河流域不同情景下的二元水循环要素统计(单位: $\times10^8$ m^3)

项目	现状水平年	2015 水平年	2020 水平年		2030 水平年	
	S1	S4	S16	S10	S11	S17
降水量	1596.2	1596.2	1596.2	1596.2	1596.2	1596.2
引黄、引江水量	41.3	74.7	134.4	117.3	157.0	166.0
ET(目标)	1660.6	1667	1695.8	1675.4	1685.2	1704.7
地下水蓄变量	−66.2	−54.5	−20.7	−18.9	2.6	−5.2
入海/出境水量	43.1	58.4	55.5	57	65.4	62.7
当地地表水供水量	135.6	169.5	127.4	110.0	110.4	114.7
地下水供水量	248.7	232	−	180.6	150.9	−
国民经济用水量	381.1	386.9	448.4	399.9	410.9	456.6
生态环境用水量	3.5	14.7	19.2	17.1	20.9	23.3
总用水量	384.6	401.6	467.6	417.1	431.8	479.9

表 5 海河流域未来气候变化与水量调控情景下的水量平衡表(单位: $\times10^8$ m^3)

项目			降水量	引黄、引江水量	入海水量	ET 量	蓄变量
2020~2045 年多年平均值	2020 水平年	S16C	1752.5	134.4	79.0	1821.2	−13.3
		S10C	1752.5	117.3	91.3	1785.5	−7.0
	2030 水平年	S11C	1752.5	157	104.2	1794.2	11.1
		S17C	1752.5	166	88.2	1831.2	−0.1

表 6 在气候变化和水量控制情景下的海河流域水资源量变化(单位: $\times10^8$ m^3)

情景		降水量	地表水资源量	地下水资源量		狭义水资源量	广义水资源量
				总量	不重复量		
2020 水平年	S10C	1752.5	157.7	205.4	147.4	305.1	1620.5
	S16C	1752.5	152.7	231.4	153.4	306.1	1616.1
2030 水平年	S11C	1752.5	166.1	201.9	133.4	299.5	1618.5
	S17C	1752.5	160.6	235.3	142.7	303.2	1614.8

长趋势, 且生态环境的用水量增加幅度较大, 国民经济用水量在节水措施的保障下, 增长较为缓慢. 在供水结构方面, 外调水趋于增加, 当地地表水相对稳定, 地下水供水量减少; 用水结构表现为, 农业用水减少, 工业和生活用水增加.

总之, 在以上水资源总消耗量和用水结构的控制下, 不仅能够保障社会经济的可持续发展, 而且能够合理有效地改善了河道水环境和渤海及其临近海岸带地区的生态环境.

(2) 气候变化条件下的水循环演变预估. 在保持2020水平年下垫面和以上方案用水条件下, 结合未来气候变化的趋势, 采用SRES-A1B模式, 模拟分析了2020~2045年海河流域水循环及水资源演变趋势. 结果(详见表5) 表明: 在流域未来降水量增加10.4%, 温度增加1℃的气候变化因素和水资源调控措施实施的共同驱动下, 全流域地下水超采得到有效缓解, 到2020年超采减少约80%, 2030年基本实现零超采并有望得到回补地下水; 入海水量总体呈增加趋势, 2020 年之后入海水量均维持在79.0×10^8 m^3 以上.

与此同时, 流域水资源亦发生相应变化. 比较2020和2030两个水平年的统计结果(见表6)发现: 在降水量增加, 而社会水循环结构和通量发生适当变化(适当加大了当地水资源的开发利用程度, 增加了外调水水源, 增加农业用水量的作用)的情势下, 水资源量的演变集中体现为: 地表水资源量减少, 地下水资源量增加, 不重复量增加, 狭义水资源量和广义水资源量变化不大.

4.3 水环境演变预估

以水利部门采用的水功能区和环保部门采用的水环境功能区整合后的功能区水质目标为约束, 采用综合模拟平台中的水质模型, 对 2015 水平年 S2, 2020 年 S4 和 S6 进行了排污总量控制计算. 结果表明, 由于南水北调水量的增加, COD 和 NH3-N 纳污能力整体呈增加趋势. 其中对应于 S2, S4 和 S6 水量方案下 2015 和 2020 各水平年的纳污能力 COD 分别为: 29.8, 32.3 和 34.3×10^4 t/a, NH3-N 分别为 1.45, 1.55 和 1.64×10^4 t/a.

另外, 结合水量控制情景, 按照海河流域水污染防治“十五”、“十一五”计划为控制水污染, 通过对不同水质控制方案(见表 7)的模拟分析了流域入海冲击负荷. 结果表明: 在现状水平年, 当污染物控制削减10%后, 流域内 COD 和 NH_3-N 的入河和入海污染负荷均随之减少; 在 2015 水平年海河流域在南水北调中线未通水的 S2E2 情形下, COD 和 NH_3-N 的入海负荷分别为 51.9×10^4 和 7.5×10^4 t; 当中线通水一半 S4E2 情形下, 由于入海水量的增加, 相应入海 COD

表 7 水量水质综合控制列表

	2005 水平年	2015 水平年		2020 水平年
	S1	S2	S4	S6
E1: 现状排污	S1E1			
E2: 削减 10%	S1E2	S2E2	S4E2	
E3: 削减 20%				S6E3

和 NH_3-N 负荷均有所增加; 2020 水平年 S6E3 方案, 污染物削减 20%的情况下, 与 2015 水平年相比, 由于水污染控制和水资源消耗量(ET)的控制, 入海水量进一步增加, 与此相伴生的 COD 和 NH_3-N 的入海负荷都有较为明显的增加. 不同方案下的详细模拟结果见表 8.

4.4 自然和人类活动影响下的生态演变预估

利用综合模拟平台中的农田作物生长模型分别对 2021~2050 年 SRES-A1B, SRES-A2 和 SRES-B1 三个情景下海河流域粮食产量进行了模拟. 结果表明(见表 9): 相对于历史条件, 在未来气候变化的影响下海河流域冬小麦平均单产将可能增长 7%左右.

对陆地植被生态系统, 通过将 IPCC 提出的 SRES 排放情景中的 A1B, A2 和 B1 情景, 与现状和 2020 规划水平年的两种下垫面情景相组合, 形成 6 种情景方案(见表 10), 分析了不同情景下海河流域陆地植被生态系统演变趋势. 模拟结果(见图 11)表明: 在未来气候变化情势下, 海河流域陆地植被生态系统的 NPP 有所增加, 但随着下垫面的不同, 变化率不同. 其中现状下垫面系列的情景 1、情景 3、情景 5 的 NPP 增加在 1%~2%左右, 2020 下垫面系列情景 2、

表 8 海河流域入海水量以及入河入海负荷表

方案设置	入海水量(×10^8 m^3)	产生量(×10^4 t)	入河量(×10^4 t)	入河系数	入海量(×10^4 t)	入海系数
			COD			
S1E1	57.6	801.7	183.3	0.229	47.6	0.26
S1E2	57.6	801.7	168	0.229	43.9	0.262
S2E2	64.6	812.8	175.7	0.236	51.9	0.296
S4E2	72.5	812.8	193.6	0.26	60.9	0.315
S6E3	92.3	831.1	229.2	0.332	83	0.362
			NH_3-N			
S1E1	57.6	83.6	20.4	0.244	6.7	0.328
S1E2	57.6	83.6	18.6	0.222	6.2	0.333
S2E2	64.6	84.7	19.5	0.23	7.5	0.385
S4E2	72.5	84.7	21.3	0.251	9	0.425
S6E3	92.3	86.6	25.6	0.296	12.6	0.493

表 9 气候变化情景下海河流域多年平均单产变化

内容	历史平均	SRES-A1B	SRES-A2	SRES-B1
多年平均单产(kg/ha)	5546.1	5938.7	5932.2	5928.7
变化率		7.08%	6.96%	6.90%

表 10 未来变化环境情景设定

情景设定	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	情景 6
气候条件	A1B	A1B	A2	A2	B1	B1
下垫面条件	现状	2020	现状	2020	现状	2020

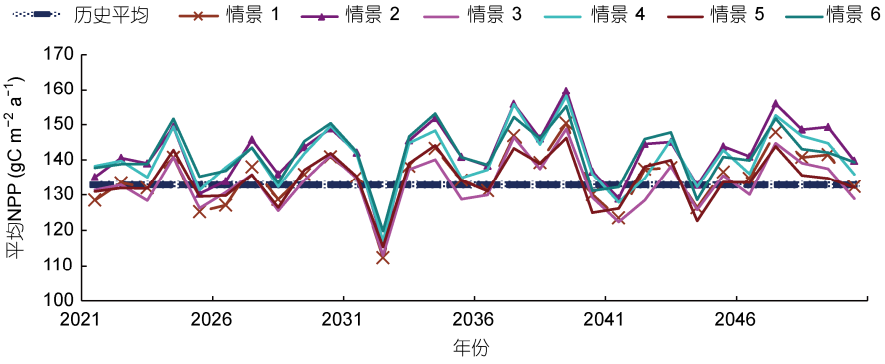

图 11 海河流域气候和下垫面变化情景下陆地植被年 NPP 变化趋势

情景 4、情景 6 的 NPP 增加在 5%~6%左右.

5 结论与讨论

在全球气候变化和高强度人类活动干扰下, 水资源短缺、水环境恶化及生态退化成为海河流域水资源管理中面临的紧迫问题. 由于三大问题间的关系错综复杂, 只有将水循环及伴生的水环境、生态问题结合起来开展研究, 才能有助于问题的根本解决. 为全面诊断和解决这些问题, 本研究在全面剖析海河流域水循环演变二元特性的基础上, 系统概述了海河流域二元水循环及其伴生过程的综合模拟平台后, 通过设置不同情景, 模拟分析了水量控制和气候变化条件下海河流域水资源、生态和水环境的未来演变情势, 为立足于水循环全过程, 开展水循环调控和水资源管理奠定了基础. 相关模拟结果如下:

(1) 在水资源方面, 在未来 2020~2045 年间, 当流域未来降水量增加 10.4%, 温度增加 1℃的气候变化自然因素和适当加大了当地水资源的开发利用程度, 增加了外调水水源, 增加农业用水量等社会因素的共同驱动下, 水资源的演变呈现为: 地表水资源量减少, 地下水资源量增加, 不重复量增加, 狭义水资源量和广义水资源量变化不大的演变; 届时全流域在总的最大可消耗水资源的约束下, 在保证总用水量增加的同时, 水资源的消耗量、地下水的超采量、入海水量均呈良性发展趋势.

(2) 在水环境方面, 在 2015 水平年和 2020 年水平年, 考虑南水北调水量的增加, 入海水量增大, COD 和 NH_3-N 纳污能力呈增加趋势, 与此同时入河、入海负荷亦将增加.

(3) 在生态方面, 在未来 SRES-A1B, SRES-A2 和 SRES-B1 排放情景下, 海河流域冬小麦平均单产将可能增长 7%左右; 自然生态系统 NPP 亦呈增长趋势.

应当看到, “自然-社会”二元水循环及其伴生过程的耦合机制十分复杂, 目前的研究仍处于探索阶段, 需要进一步研究, 相应的定量工具即海河流域二元水循环及其伴生过程的耦合模拟平台亦需进一步完善.

参考文献

1 Yu P S, Yang T C, Wu C K. Impact of climate on water resources in southen Taiwan. J Hydrol, 2002, 260: 161–175
2 张建云. 气候变化对我国淡水资源的阈值影响和综合评价. 技术报告. 2005
3 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
4 Trenberth K E. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. Clim Change, 1999, 42: 327–339
5 Chen Y N, Xu Z X. Plausible impact of global climate change on water resources in the Tarim River Basin. Sci China Ser D: Earth Sci, 2005, 48: 65–73
6 Ali U K, Ayhan E, Sukriye O. Possible impacts of climate change on soil moisture availability in the Southeast Anatolia Development Project Region (GAP): An analysis from an agricultural drought perspective. Clim Change, 1998, 40: 3–4
7 Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability in the central United States. Bull Amer Meteorol Soc, 1998, 79: 2693–2714
8 Wang Z W, Tang H Y, Zhang H T. Analysis of changing flood characteristic in south China during the recent 50 years. J Trop Meteorol, 2005, 11: 206–212
9 Arnold J G, Fohrer N. Swat2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrol Process, 2005, 19: 563–572
10 Singh V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch, Colorado: Water Resource Publisher, 1995
11 David Y, Jack S, David R, et al. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 1. Model characteristics. Water Int, 2005, 30: 487–500
12 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
13 于伟东. 海河流域水资源现状与可持续利用对策. 水文, 2008, 28: 79–82
14 韩鹏, 皱洁玉. 海河流域水资源高效利用与综合管理简析. 海河水利, 2008, 5: 4–7
15 王志民. 海河流域水生态环境恢复目标和对策. 中国水利, 2002, 4: 12–13, 71
16 海河水利委员会. 海河流域水资源质量状况(2005 年报). 天津: 海河流域水资源保护局, 2005
17 谢良兵. 环渤海: 中国经济增长第三极. 经济观察报, 2009 年 10 月 04 日

18 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2008. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
19 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
20 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: Norman E P, Valentina K, Ahti L, et al, eds. Proceedings of Symposium H014 Held During IUGG2011 in Melbourne, Australia. Australia: IAHS Publ.348, 2011. 165–171
21 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
22 Jia Y W, Shen S H, Niu C W, et al. Coupling crop growth and hydrologic models to predict crop yield with spatial analysis technologies. J App Remote Sens, 2011, 5: 053537-1–053537-20
23 Van Keulen H, Wolf J. Modeling of agricultural production: Weather, soil and crops. Wageningen: Simulation Monographs, Netherlands, Centre for Agriucltural Pubuishing and Documentation Simulation Monographs, 1986
24 Hijmans R J, Guiking-Lens I M, van Diepen C A. User guide for the WOFOST 6.0 crop growth simulation model. Wageningen, the Netherlands: Technical document 12, DLO Win and Staing Centre, 1994. 143–146
25 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
26 Peng H, Jia Y W, Qiu Y Q, et al. Eco-hydrological Simulation and Prediction in the Haihe River Basin by Coupling BIOME-BGC Model with WEP-L Model. In: Norman E P, Valentina K, Ahti L, et al, eds. Proceedings of Symposium H01 Held During IUGG2011 in Melbourne, Australia. Australia: IAHS Publ.348, 2011. 177–182
27 贾仰文, 王浩. 海河流域水循环及其伴生过程的综合模拟. 北京: 科学出版社, 2012. 168–193, 233–284
28 任宪韶. 海河流域水资源评价. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. 329–339