

海河流域二元水循环模式及其演化规律

刘家宏^①, 秦大庸^{①②}, 王浩^①, 王明娜^①, 杨志勇^①

① 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100038;

② 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100038

E-mail: liujh@iwhr.com

2009-02-07 收稿, 2009-12-09 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB403401)、国家自然科学基金创新群体研究基金(批准号: 50721006)和重点基金(批准号: 40830637)资助项目

摘要 海河流域是我国乃至世界上受人类活动干扰最强烈的区域, 其水循环的二元演化特征十分明显, 水资源的利用和循环转化关系极为复杂. 社会(侧支)水循环通量的膨胀几乎吸干了所有的天然径流, 工业、农业及生活排污致使水质严重恶化, 流域呈现出有河皆干、有水皆污的局面. 传统的以天然水循环为主的“实测-还原”研究模式已不能适应现代水资源研究的需要. 以海河流域为原型对象, 通过科学抽象和理性思考, 勾勒出了二元水循环模式的系统图景, 分析了二元水循环的关键要素、平衡方程以及演变历程. 应用建立的二元水循环模式理论, 通过收集最新的数据资料, 研究了海河流域二元水循环十项关键要素的演化规律, 并在此基础上提出了海河流域的健康水循环模式及其调控方向.

关键词

二元水循环
水资源
社会水循环通量
人类活动
海河流域

由于人类社会活动的不断增强, 流域水循环过程变得越来越复杂, 由原来的主要依靠太阳辐射和地球引力驱动, 转变为“天然-人工”二元力驱动; 水质成分由原来相对简单的天然有机物、矿物质和泥沙, 转变为包含化肥、农药、工业洗涤剂、持久性有机物、医用抗生素、激素等上千种化学成分. 流域水循环从水量和水质两方面均呈现出明显的二元演化趋势. 1997年 Raskin 等人^[1]建立的第一个全球范围淡水资源评价模型没有考虑人类取水活动的影响, 之后, Döll 等人^[2,3]开发的 WaterGAP(Water-Global Assessment and Prognosis)弥补了这项不足, WaterGAP 由两大模块组成, 一部分是全球用水模块, 另一部分是全球水文模块, 这实际上第一个覆盖全球范围的二元水循环模型. 此外在区域尺度上, 有 SWAT 模型^[4,5], 在城市地块上, 有 Imbe 等人^[6]建立的城市水循环评价与修复模型. 国内王浩等人^[7]在研究黄河国家重点基础研究发展计划项目研究中提出了“二元水循环”的理论, 并开发了适用于大流域“天然-人工”二元水循环系统模拟的 WEP-L 模型^[8]; 在黑河科技攻

关项目中进一步研究了基于二元水循环模式的水资源评价理论方法^[9]. 王西琴等^[10]在“二元水循环”的理论框架下, 建立了一种河流生态需水的水量与水质计算方法. 李文生等^[11]在太子河流域建立了具有“天然-人工”二元结构的水循环模型, 对影响水循环的人工扰动因素进行了分析. 以往的研究执着于分离水循环过程的人工效应, 试图显式描述人类活动和社会经济因素对水循环通量影响的数量关系, 因而对模拟模型和因子相关性分析情有独钟. 本文拟在前人研究的基础上, 系统阐述二元水循环模式的定义、关键要素和演变历程, 并以海河流域水循环要素的演变为主线, 研究流域二元水循环的演化规律, 提出海河流域二元水循环的科学调控方向.

1 二元水循环模式

在人类活动对自然水循环的扰动强度较小的远古时代(天然水循环为主的时代), 流域的水循环主要由五大流通量和四大状态量来表征; 五大流通量即: 海洋水汽进入量、流域水汽输出量、降水量、蒸发量、

径流量；四大状态量为大气水量、地表水量、土壤水量、地下水量。在天然水循环为主的时代，五大流通量的多年平均值相对稳定，随着太阳辐射和大气运动的强弱呈周期性变化；四大状态量的时间序列也呈周期性变化，处于动态平衡之中。随着人类改造自然能力的加强，先后通过傍河取水、修建水库取水、开采地下水、跨流域调水等措施，极大地改变了原有的天然水循环模式，产生了由取水、输水、用水、排水、回归五个基本环节构成的人工侧支循环(也称作“社会水循环”)圈。现代流域水循环除了原有的太阳辐射和地球引力两种天然驱动力外，增加了人工动力系统这种新的驱动力，水流通道也有原来的天然河网演变为天然河网与人工管道、沟渠交错密布，整个水循环呈现出越来越强的“天然-人工”二元特征，图1是以海河流域为例绘制的流域二元水循环示意图。

1.1 定义

二元水循环模式是对“天然-人工”二元力驱动的水循环系统的抽象概括，典型的循环模式见图2。参与水循环的水汽来主要源于两个途径：随季风而来的海洋水汽(W_{sc})和流域内的蒸腾蒸发(W_{ET})。水汽通过凝结降水(W_p)到达地面，分三条路径回归大气或海洋：(1) 降水→土壤水(地下水)→植被水→大气

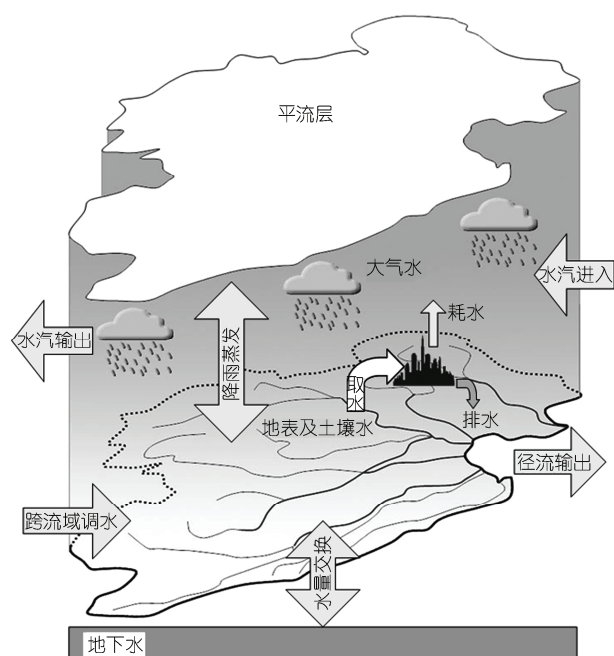


图1 海河流域二元水循环示意图

水，这条路径的通量为 W_{ETN} ；(2) 降水→径流(地下水)→人工取水→排水(或蒸发)→入海(或进入大气)，这条路径的通量为 W_s ，其中以蒸发的形式回归大气的水量为 W_{ETA} ，通过下渗回补地下水的水量为 W_1 ，以排水的形式入海的水量为 W_{dr} ；(3) 降水→径流→入海，这条路径的通量为 W_{nr} 。在半干旱半湿润流域，降水量 W_p 相对较少，由于工农业生产和生活所需要的社会水循环通量 W_s 较大，仅由降水性水资源无法支撑流域的可持续发展，于是随着人类干扰程度的加深，出现了地下水超采(ΔW_G)和跨流域调水(W_T)两个新的水源项。同时流域内的水汽在季风的作用下会向外耗散，形成一个水汽耗散项 W_L 。在水循环的水质演变方面，由于工农业生产和生活用水的劣变特性，社会水循环的排水含有大量污染物(C_w)，使得入海径流(W_r)的水质变差。

水循环按发生的空间领域分成三种类型，即大循环(又称“海陆间循环”)、海洋小循环(又称“海上内循环”)、陆地小循环(又称“陆地内循环”)，其中海上内循环对流域水循环的影响不大，不予考虑。陆地小循环是指水分由陆地输送到陆地，又回到陆地的循环^[12]。由于流域空间并不完全封闭，因此，从流域内陆地出发的水分子并不一定回到流域内，有可能耗散到流域外；同理，流域外的水分子也可能落到流域内，陆地内小循环实际上是一个相对的概念，即考虑这种动态交换下的流域内部水循环，其循环中的损失项列入水汽耗散项 W_L 。海陆间循环是指水分由海洋

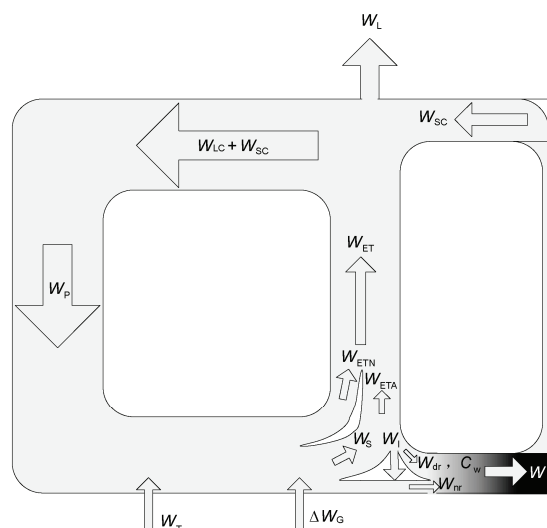


图2 二元水循环模式图

输送到大陆,又回到海洋的循环.由于大气水汽运动的全球联系性,降落在流域内的海洋水分子,不一定直接以本流域径流的方式回归大海,还可能通过其他流域回归大海,这部分量也记入水汽耗散项 W_L .为方便论述,定义一个水文周期内(一般为一年)参与陆地上内循环的水通量称为陆地内循环通量(W_{LC});参与海陆间循环的水通量称为海陆间循环通量(W_{SC}),二元水循环的各个参量之间存在如下的数量平衡关系:

$$W_p = W_{LC} + W_{SC}, \quad (1)$$

$$W_p + W_T + \Delta W_G = W_{ET} + W_r, \quad (2)$$

$$W_L = W_{ET} - W_{LC}, \quad (3)$$

$$W_{ET} = W_{ETN} + W_{ETA}, \quad (4)$$

$$W_S = W_{ETA} + W_l + W_{dr}, \quad (5)$$

$$W_r = W_{nr} + W_{dr}. \quad (6)$$

1.2 关键要素

二元水循环模式是由天然一元水循环模式演变而来,其水循环要素继承了天然水循环的海洋水汽进入量、流域水汽输出量、降水量、蒸发量、径流量五大自然通量和大气水量、地表水量、土壤水量、地下水量四大瞬时状态量,同时新增了跨流域调水量、超采量、社会水循环通量(取水量)、排水量、入河排污量五个人工通量和人工地表蓄滞工程(包括水库、塘坝、梯田等)蓄水量.考虑到人工地表蓄滞工程只是改变了地表水体的空间分布,即上游的水库蓄水往往以下游的湿地、河道干涸为代价,其蓄滞作用相互抵消,因此不把人工地表蓄滞量单独作为一个水循环要素来考虑,而是放在地表水量中综合考虑.在二元水循环模式的十个通量和四个瞬时状态量中,通量是关键要素,起着决定性的作用,瞬时状态量是通量循环的结果.

1.3 演变历程

二元水循环模式与天然一元水循环模式并没有明确的界限,自从有人类活动以来,单纯的一元水循环模式就不复存在.在人类社会与水循环共同演进的历程中,社会水循环通量(取水量)、排水量、入河排污量、超采量、跨流域调水量从无到有,越来越大;一些干旱半干旱地区的河流取水量甚至超过了地表径流总量,挤占了大量的生态水,挪用了长年难以更

新的深层地下水.图3粗略描述了二元水循环模式中五个人工要素的演变历程.自18世纪中叶英国工业革命以来,人类活动造成的社会水循环通量逐年上升,在21世纪初,一些发达国家随着经济转型和节水力度的加大,取用水量出现拐点.社会水循环的排水增长趋势与取水类似,20世纪末,随着水资源短缺的加剧,大量的排水被处理再生,循环利用,使得排水量的下降速度比取水量更快.工业生活污染自19世纪中叶在英国泰晤士河凸现,期间经历一个快速增长到缓慢下降的过程,污染物的增长趋势随着大规模污水处理厂的新建而得到遏制.地下水超采在20世纪60~70年代在人口集中的城市首先出现,80年代随着井灌技术的推广,一些缺水的平原地区也开始出现大范围成片的漏斗群.为缓解水资源危机,维持水生态平衡,跨流域调水在20世纪50年代开始出现,随着调水规模的扩大,地下水保护力度的加强,超采的地下水逐步被置换,地下水超采现象预计在21世纪中叶会消失.

从水循环要素的演变历程可以看出:天然一元水循环模式到二元水循环模式的转变也是经历一个从量变到质变的过程.根据联合国教科文组织《面向21世纪的世界水资源评估》^[13]报告数据,1995年全球社会水循环通量(取水量)约为 $37500 \times 10^9 \text{ m}^3$,排水量 $14800 \times 10^9 \text{ m}^3$,取用水量占全球可利用水量的8.4%.由于水资源和人口分布的不均匀性,全球有75%的人口生活在水资源开发利用程度高于20%的地区,例如南部和中部欧洲,水资开发利用率为24%~30%,美国尼亚拉加大瀑布地区为28%,中国海河流域则高达100%^[14].

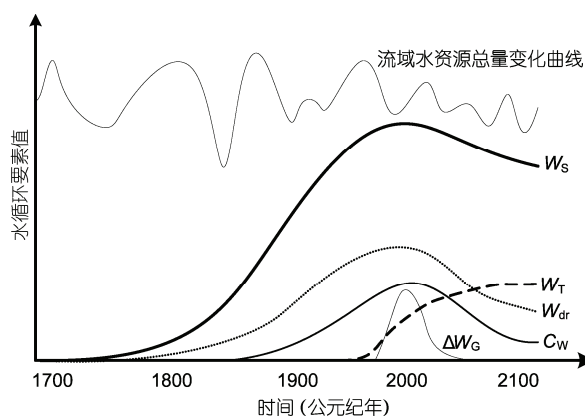


图3 二元水循环要素的演进历程

2 海河流域二元水循环要素的演化规律

海河流域是我国乃至世界上受人类活动干扰最强烈的区域,其水循环的二元演化特点十分突出,水循环要素的演变过程也极为典型.本文将应用最新的统计数据和已经发表的科学研究数据分析二元水循环通量的演化规律.由于第一次全国污染源普查工作还在进行之中,关于海河流域入河排污量的最新数据暂缺,只能使用海河流域水资源评价成果(主要是 2000 年数据).

2.1 海洋水汽进入量

海河流域上空的大气环流以辐合环流为主,其海洋水汽主要来自两个方向:一是东南方的太平洋水汽,一是西南方的印度洋水汽.海河流域的海洋水汽输入主要是自流域西南部进入的孟加拉湾水汽.张利平等人^[15]利用 1949~2002 年美国国家环境保护委员会/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析气候资料,分 8 层计算了海河流域夏季东南西北 4 个边界面(112°E-120°E, 35°N-43°N 围成的区域,约 $61 \times 10^4 \text{ km}^2$)的水汽通量,发现南边界和西边界为水汽输入面,北边界和东边界为水汽输出面.本文在此成果基础上,进一步推算了海河流域夏季海洋水汽的输入量和输出量(表 1).在海河流域降水偏丰的 20 世纪 60 年代,海洋水汽的进入量较大,其中南边界多于西边界,二者之比约为 3:2;流域夏季净水汽通量约为 $1396 \times 10^9 \text{ m}^3$,占 60 年代流域平均年降水量 $1781 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的 78.4%. 20 世纪 90 年代后,全球气候变化异常,海河流域夏季海洋水汽净输入大为减少,仅 $272 \times 10^9 \text{ m}^3$,衰减了 80%,尤其是南边界水汽进入量从原来的 $3591 \times 10^9 \text{ m}^3$,衰减到 $824 \times 10^9 \text{ m}^3$,相比西边界 $902 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的水汽进入量,南边界已经丧失了海河流域水汽主通道的位置.纵上所述,近 50 年来,海河流域海洋水汽进入量呈大幅减少的趋势,且以南通道减少为主,即来自西南方向的海洋水汽在 90 年代以后,越过黄河到达海河流域的几率减少.这主要是因为从 20 世纪 70 年代中后期迄今,热带中、东太平洋海温上升,并出现“类似于厄尔尼诺(El Niño)型”分布的年代际海温距平,使得从 1976 年之后迄今东亚夏季风变弱、西太平洋副热带高压偏南、偏西,不利于华北地区夏季降水^[16,17].

2.2 流域水汽输出量

从表 1 可见,流域水汽的输出量随着海洋水汽输入量的减少,也呈下降的趋势,相比 20 世纪 60 年代,水汽输出减少了约 60%. 同期的海洋水汽进入减少了 70%,水汽输出的减少比例小于海洋水汽输入的减少比例,说明同样来水条件下,流域水汽的耗散系数增加了,这与海河流域大量的人类活动用水相关.人类活动增加了流域蒸腾蒸发(evapotranspiration,简称 ET^[18,19]),使得流域内的原有存水加速耗散,造成流域地表水量和地下水量这两个瞬时状态量出现亏缺.

2.3 降水

海河流域多年(1956~2007 年)平均降水量 527 mm,属于半湿润半干旱季风气候.降水在年内分布很不均匀,汛期(6~9 月)雨量占全年的 75%~85%,其中 56%又集中在最大 30 天内(占全年 45%),降水量年际变差较大,且枯水年连续出现的情况,也较易发生,从 1470^[20]~2007 年的 538 年间,连续 12 年以上枯水发生 3 次,平均 180 年 1 次;连续 7 年以上枯水发生 15 次,平均 36 年 1 次;连续 3 年以上枯水发生 44 次,平均 12 年 1 次. 1956~2007 年 52 年的降水序列见图 4. 总体上海河流域的降水在近 50 年来处于一个缓慢下降的趋势,自 1978 年开始,出现了一个长达 30 年的枯水时段,而且仍在继续. 1978~2007 年的流域平均降水量仅 499 mm,比 1956~1977 年的平均值 565 mm 少了 66 mm.

2.4 蒸发

在人类活动的强烈干扰下,海河流域实际蒸发量总体呈上升趋势. 1956~1979 年,海河流域平均年蒸发量 470 mm (第一次全国水资源评价成果)^[21],同期的流域平均年降水量 560 mm,蒸发量小于降水量

表 1 海河流域夏季平均水汽通量(单位: 10^9 m^3)

时段(年)	输入边界		输出边界		净输入量	海河流域净输入 ^{a)}
	南	西	东	北		
1960~1969	3591	2269	1677	1391	2792	1396
1990~2002	824	902	734	447	544	272
1949~2002	1992	1396	1302	858	1228	614

a) 海河流域面积约为计算区域面积的一半,因此估算海河流域水汽输入为边界净输入的 1/2

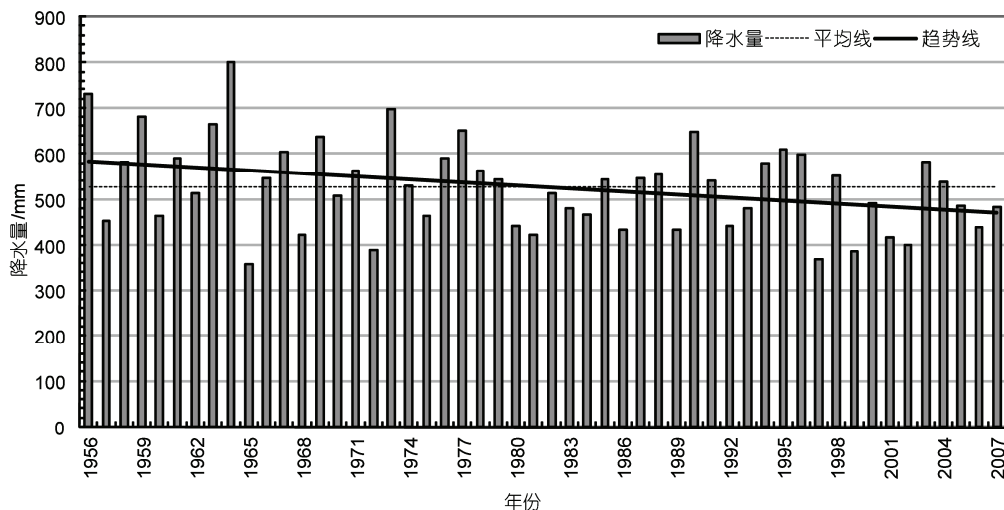


图4 海河流域1956~2007年降水系列图

90 mm. 随着人类活动的加剧,大量的跨流域调水和超采水量流入社会经济系统,工农业生产、生活和城市生态用水造成人工ET剧增,现在海河流域的蒸发量已经大于或接近同期的降水量.据海河973项目基线调查的成果,海河流域的蒸发量平均增加了20 mm (相对于20世纪50~70年代),对应的水量约为 $64 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中因人类活动增加的ET约为 $130 \times 10^9 \text{ m}^3$ (海河流域目前的总用水量约 $400 \times 10^9 \text{ m}^3$,比50年代末的 $200 \times 10^9 \text{ m}^3$ 增加了一倍,按综合耗水率65%计算,人工耗水ET增加约为 $130 \times 10^9 \text{ m}^3$),同期人类活动导致天然湿地和植被ET减少约 $66 \times 10^9 \text{ m}^3$.

2.5 径流

由于人类活动的干扰,海河流域的天然径流大大减少,现在海河入海水量,除滦河、徒骇马颊河还有少量天然径流外,大部分为工业生活污水,即:式(6)中 $W_{\text{nr}} \rightarrow 0$, $W_{\text{r}} \approx W_{\text{dr}}$,因此当前河道断面实测的径流已经不能代表流域的实际径流量.本文用“地表水资源量”(指河流、湖泊等地表水体中由当地降水形成、可以逐年更新的动态水量)来表征海河流域的径流量.据海河流域第一、二次水资源评价的结果^[22],海河流域1956~1979年系列多年平均地表水资源量为 $256.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,1980~2000年系列的平均地表水资源量衰减为 $170.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,减少33.5%,2001~2007年系列平均地表水资源量进一步衰减到 $105.9 \times 10^9 \text{ m}^3$,相比1956~1979年系列减少了58.7%.海河流域入海水量的减少幅度则更大,由1956~1979年系列的年均

$155.4 \times 10^9 \text{ m}^3$,减少为1980~2007年系列的 $33.6 \times 10^9 \text{ m}^3$,减少了78%,1998~2007年平均入海水量仅 $18.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ (依据公布的2001~2006年《海河流域水资源公报》以及2007年《中国水资源公报》数据).径流的减少一方面是全球气候变化带来的降水减少造成的,另一方面是人类活动取用水,侵占河道天然径流的结果.

2.6 取用水

根据《中国可持续发展水资源战略研究》综合报告关于1949年全国总用水量的数据分析,海河流域建国初的取用水量约为 $100 \times 10^9 \text{ m}^3$,之后随着灌溉面积的扩大和工业生活用水的增长,取用水量逐年增加,19世纪50年代末海河流域用水总量翻番,达到 $200 \times 10^9 \text{ m}^3$.1965年流域取用水量总量 $268 \times 10^9 \text{ m}^3$,在按上限值扣除引黄和侧渗水量 $50 \times 10^9 \text{ m}^3$ 后(实际上当时的引黄水量要低于 $50 \times 10^9 \text{ m}^3$),依然超过流域多年平均地表水资源总量 $216.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[14],从此开始了地下水的超采历程,并且愈演愈烈.1980年海河流域的总用水量达到 $396.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[22],之后受到水资源总量的约束,一直徘徊在 $344 \sim 440 \times 10^9 \text{ m}^3$ 之间,平均为 $399 \times 10^9 \text{ m}^3$.

(i) 工业取用水. 海河流域的工业取用水量经历一个快速上升和缓慢下降的过程(图5),20世纪90年代上半期是工业用水的快速增长期,之后受到水资源总量的约束,徘徊在 $70 \times 10^9 \text{ m}^3$ 左右.2001年随着工业节水力度的加大,循环用水技术的推广,工业取用水量开始下降,2003年以后,工业取用水量下降到

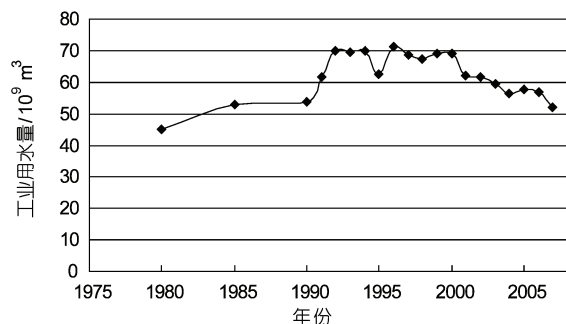


图5 海河流域工业用水量趋势图

$60 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以下, 相比高峰时下降了 $10 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

(ii) 生活取水. 海河流域的生活取水总体呈加速上升的趋势(图6), 1980年生活取水量仅为 $20.41 \times 10^9 \text{ m}^3$, 到2006年, 生活用水量已达 $56.55 \times 10^9 \text{ m}^3$, 增长了约 $30 \times 10^9 \text{ m}^3$; 2007年, 生活用水量 $56.3 \times 10^9 \text{ m}^3$, 与2006年持平, 其快速增长的趋势得到遏制。

(iii) 生态取水. 2003年以前, 海河流域生态用水量随着水资源的丰枯周期呈周期性变化。2003年以后, 随着社会对生态问题的重视, 生态用水量呈快速上升的趋势。从2003年到2007年, 五年间海河流域的生态用水量翻了近两番, 用水量增加了 $5.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

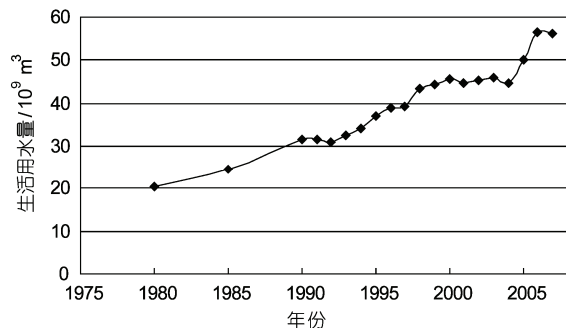


图6 海河流域生活用水量趋势图

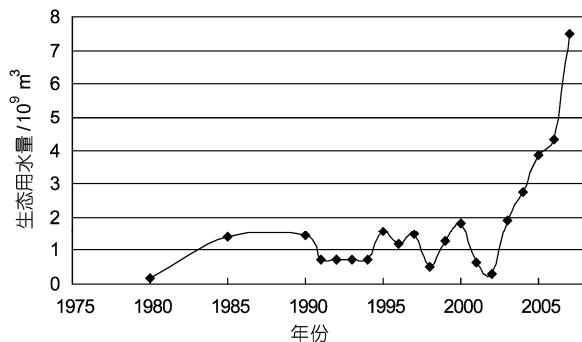


图7 海河流域生态用水量趋势图

2.7 排水

海河流域的排水主要包括农业灌溉退水和城镇工业生活排水两部分。根据《海河流域水资源公报》(1998~2006年)提供的数据, 本文推算了海河流域的农业退水和工业生活排水情况。

(i) 农业退水. 海河流域1998~2006年的农业退水量见表2。海河流域以旱地为主, 农业灌溉的退水主要通过土壤下渗回补地下水, 直接回归河道形成径流的水量较少。

(ii) 工业生活排水. 海河流域1998~2006年的工业生活排水量见表3。表3中同时给出了海河流域工业生活的用水量减排水量的数据序列, 可以看出用水量与耗水量的差值要大于公报中的排水量, 这说明排水的一部分被重复取用了。1998年的重复取用量比较大, 而当时中水回用的规模并不大, 这说明当时的回用模式主要是上游的排水被下游直接取用, 这种回用模式受水资源的丰枯影响明显, 丰水年回用多, 枯水年回用少。2005, 2006年的回用量比较高, 这时的回用除滦河和徒骇马颊河等长年有水的河流外, 基本都是污水处理回用, 即中水回用模式。

工业生活排水一般直接进入河道, 其去向包括三部分: (1) 通过河道下渗回补地下水, (2) 供河道生态消耗(包括河道水面蒸发), (3) 流入大海。据海河流域水资源公报资料, 1998~2006年平均入海水量 $18.4 \times 10^9 \text{ m}^3$, 考虑到滦河、徒骇马颊河每年平均还有 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 左右的天然径流, 由此推算, 工业生活排水中供河道生态消耗以及补给地下水的量约为 $36 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中河道生态消耗量约为 $16 \times 10^9 \text{ m}^3$, 补给地下水量约为 $20 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。加上农业灌溉对地下水的补给量 $56.3 \times 10^9 \text{ m}^3$, 工、农业、生活排水每年对地下水的补给量约为 $76 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

2.8 跨流域调水量

海河流域的跨流域调水主要包括南水北调东中线、引黄两部分。目前南水北调尚未通水, 因此只需研究引黄水量。图8给出了海河流域1994~2006年的逐年引黄水量(1994~1997的数据来源于文献[24]表1, 1998~2006年的数据来源于《海河流域水资源公报》), 13年平均年引黄水量为 $47 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。其引水量大体可分为两个阶段, 以2000年黄河实行干流水量统一调度为分界点, 1994~1999年, 黄河水量统一调度前, 平均年引黄水量 $54 \times 10^9 \text{ m}^3$; 2000~2006年, 黄河水量统一

表 2 海河流域农业退水量(单位: 10^9 m^3)

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	平均
农业取水	307.1	286.3	278.8	278.3	286.3	262.0	256.1	264.0	274.9	277.1
农业耗水	226.7	223.6	218.9	221.7	223.4	222.0	217.2	216.1	217.2	220.7
农业退水	80.4	62.6	59.9	56.6	62.9	40.1	38.9	47.9	57.7	56.3

表 3 海河流域工业生活排水量(单位: 10^9 m^3)

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	平均
用水量-耗水量	62.9	56.6	57.8	54.8	56.3	55.9	48.1	50.9	54.0	55.3
工业生活排水	56.1	56.2	54.0	54.0	53.6	51.1	48.0	44.9	48.3	51.8
污水重复利用量	6.8	0.4	3.8	0.8	2.7	4.8	0.1	6.0	5.7	3.5

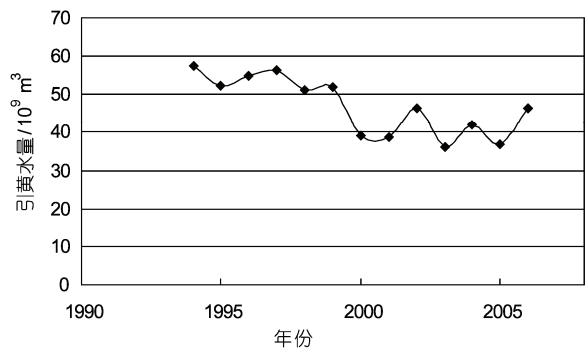


图 8 海河流域 1994~2006 年引黄水量

表 4 海河流域主要入河污染物排放量(万吨/年)

分类	COD	氨氮	总磷
点源	133.06	11.04	0.60
非点源	35.37	3.74	3.95
合计	168.43	14.78	4.55

表 5 海河流域 1999~2006 地下水超采量(单位: 10^9 m^3)

年份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	合计
地下水	69.9	32.2	55.5	61.92	15.26	18.01	36.36	42.6	331.73
消耗	(75) ^{a)}	(28) ^{a)}	(54) ^{a)}						(331.13) ^{a)}

a) 括号中的数据为文献[24]的研究数据, 其余为文献[14]的数据

调度后,更多地考虑了黄河下游的生态输沙用水和“不断流”约束条件,引水量大大减少,平均每年降为 $41 \times 10^9 \text{ m}^3$, 减少了 $13 \times 10^9 \text{ m}^3$.

2.9 入河排污量

海河流域水污染源分为点源和非点源两类,点源包括工业城镇生活,非点源包括城镇地表径流、化肥农业、农村生活污水、水土流失、分散式饲养禽畜废水等. 根据《海河流域水资评价》表 13-5, 13-11 的数据, 2000 年海河流域的入河排污量见表 4.

2.10 地下水超采量

海河流域地下水的大量超采始于 20 世纪 80 年代,平原区(不包括徒骇马颊河地区)1958~1998 年地下水累计消耗储量 $895.8 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中浅层地下水超采 $471.2 \times 10^9 \text{ m}^3$, 深层地下水超采 $424.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ [23]. 不同时期浅层地下水消耗量为: 1958~1975 年平均消耗 $8.56 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$; 1975~1985 年平均消耗 $13.84 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$; 1985~1998 年平均消耗 $14.41 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$. 不同时期

深层地下水消耗量为 1958~1975 年平均消耗 $4.59 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$; 1975~1985 年平均消耗 $16.31 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$; 1985~1998 年平均消耗 $14.11 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$. 1999~2006 年地下水的超采越发严重, 8 年累计消耗地下水约为 $332 \times 10^9 \text{ m}^3$ [14,23], 年均 $41.5 \times 10^9 \text{ m}^3$. 逐年消耗数据见表 5. 截至 2006 年, 海河流域地下水储量累计消耗约 $1228 \times 10^9 \text{ m}^3$.

3 海河流域二元水循环的科学调控

3.1 流域水平衡

流域水平衡包括大气水平衡、地表水平衡两个方面, 分别对应着两个抽象的水库(见图 9), 即“大气水库”和“地表水库”. 大气水库的“水”以气态存在, 地表水库的“水”包括常规意义下的地表水、土壤水和地下水.

(i) 大气水平衡. (1)和(3)式联立可得如下式(7). (7)式实质上反映了大气水平衡的一个基本假定, 即: 年初与年末大气水库的蓄变量为 0.

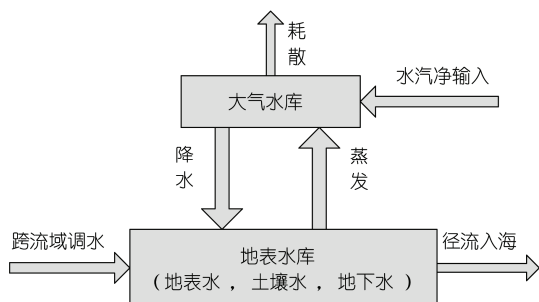


图9 流域水平衡示意图

$$W_p = W_{sc} + W_{ET} - W_L, \quad (7)$$

其中各符号的意义与公式(1)~(6)相同,在海河流域水汽的净输入主要在夏季,水汽耗散主要在秋、冬、春三季。由前文水循环要素的演化数据,可以计算出1960~1969年代水平和1990~2002年代水平的水汽耗散量分别是 $1092 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $330 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。计算过程中,1960~1969年的蒸发和降水分别取470 mm和565 mm,1990~2002年的蒸发和降水分别取518 mm和500 mm。

水汽耗散量明显减少,主要是由于气候变化异常致使海河流域夏季水汽净输入量减少造成的。在风速变化不大的前提下,水汽耗散减少,也说明海河流域秋、冬、春三季大气的干燥程度在加剧,这也是该地区植被退化、湿地等天然生态面积萎缩的结果。

由式(1)和表6中的数据,可得20世纪60年代陆地内循环通量 W_{LC} 约为 $412 \times 10^9 \text{ m}^3$,占总降水的23%;20世纪90年代后,陆地内循环通量增加到 $1328 \times 10^9 \text{ m}^3$,占总降水量的83%,海河流域陆地内循环通量大大增强,逐渐呈现出内陆河水循环的特点。

(ii) 地表水平衡。地表水的平衡式见式(2),20世纪60年代以前,地下水超采(ΔW_G)和跨流域调水(W_T)基本为零,降水大体等于蒸发量加径流量。近几年(1999~2007年),地下水超采年均 $41.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,引黄水量年均 $42 \times 10^9 \text{ m}^3$,入海水量平均 $14 \times 10^9 \text{ m}^3$,降水年均 $1502 \times 10^9 \text{ m}^3$ (合469 mm),蒸发年均 $1571 \times 10^9 \text{ m}^3$ (合491 mm),其中因人类活动造成的ET约为 $260 \times 10^9 \text{ m}^3$ (海河流域目前的总用水量约 $400 \times 10^9 \text{ m}^3$,综合耗水率为65%),占16.5%。

表6 海河流域大气水平衡要素(单位: 10^9 m^3)

时段	夏季水汽净输入量	蒸发	降水	秋冬春季水汽净输出量
1960~1969年	1396	1504	1808	1092
1990~2002年	272	1658	1600	330

表7 海河流域地表水平衡要素(单位: 10^9 m^3)

时段	降水量	外调水量	超采量	蒸发量	入海量
1960~1969年	1808	0	0	1504	304
1999~2007年	1502	42	41.5	1571	14

3.2 健康水循环模式

自20世纪50年代至今,海河流域水循环系统的演变可概括为“海弱陆强”:海弱,即夏季海洋水汽输送通量减少,强度减弱,在人类活动联合作用下,流域内地表水、土壤水、地下水加速耗散,直接导致流域水量亏缺,气候变干;陆强,即陆地内循环通量大大增强,由20世纪60年代占总降水的23%,增加到83%,水循环的内流域化趋势明显,社会水循环通量加大,伴随社会水循环的各类生物物质在地表水、土壤水、地下水中的富集度增高,水污染加剧。

海河流域水循环系统“海弱陆强”变化带来的水量亏缺和水污染加剧是当前水资源形势恶化的核心问题,也是二元水循环科学调控的关键。针对水量亏缺,调控措施为加大跨流域调水量;针对水污染加剧,调控措施为控制排污,同时增加河道生态基流,提高河流纳污能力。

在跨流域调水方面,南水北调东中线工程通水后,海河流域将新增跨流域调水量 $97.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[25],从而置换出现有的地下水超采量 $41.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,增加生态耗水 $15 \times 10^9 \text{ m}^3$,同时使入海水量由现在的年均 $14 \times 10^9 \text{ m}^3$ 增加到 $55 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

在河流污染防治方面,入海水量的增加将提高河流对污染物的输送能力,同时增加河水本身的自净能力。按照地表水III、IV、V类以及二级排放标准,海河流域在入海水量为 $55 \times 10^9 \text{ m}^3$ 时年输送主要污染物的总量表如下。

相对于表4列出的入河排污量来说,河流的纳污能力还太小,即使按最低的二级排放标准来控制,污染削减的任务依然相当艰巨,其中COD要在现状基

表8 海河流域主要污染物输送能力(单位:万吨/年)

污染物	III类	IV类	V类	二级排放
COD	11	16.5	22	82.5
氨氮	0.55	0.825	1.1	27.5
总磷	0.11	0.165	0.22	0.55

础上削减 51%，总磷要削减 88%。

在流域二元水循环的社会水循环一侧，要加强需水管理，维持社会水循环通量 W_s 的基本稳定，防止其继续增长；同时加强 ET 控制，减小人工 ET 量 W_{ETA} (见式(5))，增加入渗量 W_i ，补给地下水，降低流域水汽耗散，维持地表水、土壤水、地下水的年际平衡。

4 讨论和结论

流域水循环的二元演化是人类社会发展的产物，认识和掌握二元水循环的模式和规律是进行科学调控，促进流域自然、经济、社会健康发展的前提。本文在理论上总结已有研究成果，归纳并提出了二元水循环模式的定义，图解了二元水循环的关键要素及其转化途径，分析了各要素之间的数量关系，回顾了二元水循环的演变历程。在应用上，以海河流域为例，基于掌握的最新数据资料，研究了海河流域二元

水循环关键要素的演化规律，初步得到以下结论：(1)海河流域水循环要素的演变以夏季海洋水汽输送通量减弱、陆地内循环通量增强为主要特点，即“海弱陆强”，流域水循环逐渐显现出内陆河的特点；(2)“海弱陆强”导致流域水量持续亏缺，对外表现为径流衰减、湿地萎缩、地下水超采、生态退化、水质恶化等；(3)社会水循环通量随着人类活动的增强持续增长，1980 年以来受制于流域水资源总量的约束，最终稳定在 $400 \times 10^9 \text{ m}^3$ 左右。基于对海河流域二元水循环要素演变规律的分析，本文提出了跨流域调水和削减入河污染物两条调控措施，用于海河流域二元水循环系统的健康平衡。南水北调东中线工程通水并达到设计调水规模后，在维持社会水循环通量和人工 ET 稳定的前提下，海河流域的水量亏损状况将基本消除，并逐步偿还历史超采欠帐；但污染削减的任务仍相当艰巨，其中，COD 要在现状基础上削减 51%，总磷要削减 88%。

参考文献

- 1 Raskin P, Gleick P, Kirshen P, et al. Water futures: assessment of long-range patterns and problems. Background document for chapter 3 of the comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 1997. 1—77
- 2 Döll P, Kaspar F, Alcamo J. Computation of global water availability and water use at the scale of large drainage basins. Math Geol, 1999, 4: 111—118
- 3 Döll P, Kaspar F, Lehner B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. J Hydrol, 2003, 270: 105—134
- 4 Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling assessment Part I: Model development. J Am Water Resour Assoc, 1998, 34: 73—89
- 5 Jayakrishnan R, Srinivasan R, Santhi C, et al. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. Hydrol Process, 2005: 749—762
- 6 Imbe M, Ohta T, Takano N. Quantitative assessment of improvements in hydrological water cycle in urbanized river basin. Water Sci Technol, 1997, 36: 219—222
- 7 王浩, 王成明, 王建华, 等. 二元年径流演化模式及其在永定河流域的应用. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2004, 34(增刊 I): 42—48
- 8 Jia Y W, Wang H, Zhou Z H, et al. Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the yellow river basin. J Hydrol, 2006, 331: 606—629
- 9 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
- 10 王西琴, 刘昌明, 张远. 基于二元水循环的河流生态需水量与水质综合评价方法——以辽河流域为例. 地理学报, 2006, 61: 1132—1140
- 11 李文生, 许士国. 流域水循环的人工影响因素及其作用. 水电能源科学, 2007, 25: 28—32
- 12 芮孝芳. 水文学原理. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. 9—17
- 13 Shiklomanov I A. World water resources: A new appraisal and assessment for the 21st century. Paris: UNESCO, 1998. 24—26
- 14 于伟东. 海河流域水平衡与水资源可持续开发利用分析与建议. 水文, 2008, 28: 79—82
- 15 张利平, 夏军, 林朝晖, 等. 海河流域大气水资源变化与输送特征研究. 水利学报, 2008, 39: 206—211
- 16 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系. 大气科学, 2006, 30: 730—743
- 17 臧增亮, 包军, 赵建宇, 等. ENSO 对东亚夏季风和我国夏季降水的影响研究进展. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6: 394—398
- 18 秦大庸, 吕金燕, 刘家宏, 等. 目标 ET 的理论与计算方法. 科学通报, 2008, 53: 2384—2390

- 19 Liu J H, Qin D Y, Wang M N, et al. Theories and calculation methods for regional objective ET (evapotranspiration): Applications. *Sci China Ser E: Technol Sci*, 2009, 52:1390—1396
- 20 廖松. 充分利用海河流域水资源的几个问题. *水利规划与设计*, 1995, 1: 21—22
- 21 刘春霖, 刘志雨, 谢正辉. 近 50 年海河流域径流的变化趋势研究. *应用气象学报*, 2004, 154:385—393
- 22 任宪韶, 户作亮, 曹寅白, 等. 海河流域水资源评价. 北京: 中国水利水电出版社, 2007
- 23 费宇红, 李惠娣, 申建梅. 海河流域地下水资源演变现状与可持续利用前景. *地球学报*, 2001, 22:298—301
- 24 张士锋, 贾绍凤. 海河流域水量平衡与水资源安全问题研究. *自然资源学报*, 2003, 18: 684—691
- 25 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置. 北京: 科学出版社, 2003

· 动 态 ·

环形光晶格中的单原子阵列囚禁及旋转控制

利用激光囚禁和操控的单个中性原子和原子阵列, 是量子仿真和量子计算的理想候选量子体系, 是当前量子调控研究的难点和热点问题. 中国科学院武汉物理与数学所波谱与原子分子物理国家重点实验室詹明生和王谨研究组利用空间光调制器实现了独特的单原子全息光阱阵列, 从而成功实现了单个原子和单原子阵列的囚禁和操控. 该全息光阱阵列是由拉盖尔-高斯光模式叠加之后形成的具有

一维旋转对称性的环形光晶格. 通过播放全息位相影片对该光晶格进行了动态的旋转操作, 用时间分辨荧光成像技术, 成功观测到了原子二维圆周运动的信号, 实现了单原子、双原子在二维空间的旋转和单个光阱之间的受控转移. 相关研究论文发表在 2009 年 11 月 9 日 *Optics Express*, 17(23): 21007—21014 上.

(信息来源: 科学技术部《基础科学研究快讯》)

太赫兹频段双层石墨烯纳米带可增强光电导率

石墨烯具有丰富的物理内涵和重要的应用价值, 近年来已成为材料科学和凝聚态物理等领域的研究热点之一. 澳大利亚 Wollongong 大学张潮研究组与中国科学院上海微系统所信息功能材料国家重点实验室曹俊诚合作, 构造了一类对太赫兹/远红外光敏感的双层石墨烯纳米带材料结构. 理论研究表明, 这类双层石墨烯纳米带的手性和带间耦合使其在太赫兹/远红外频段的光学响应显著增强,

其峰值电导可达通常石墨烯普适电导的 80~140 倍. 该研究开辟了实现常温下工作的高灵敏度的双层石墨烯纳米带太赫兹探测器的可能途径, 克服了石墨烯在光电子器件领域应用的障碍. 相关研究论文发表在 2009 年 11 月 13 日 *Physical Review Letters*, 103, 207401 上.

(信息来源: 科学技术部《基础科学研究快讯》)