

海河流域农田水循环模式与水平衡要素

邵薇薇¹,李海红¹,韩松俊¹,黄昊¹,吕华芳²

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100038; 2. 清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要:基于海河流域农业的现状与发展,分析了海河流域农田水循环的驱动机制,提出了海河流域农田综合二元水循环模式,揭示了农田水循环的机制,并根据农田水循环的结构与模式分析了海河流域农田水循环的各项输入输出等水平衡要素。对海河流域农田水循环模式和通量的分析结果表明,海河流域种植结构和耕作方式的改变使有效降水利用量增加,蒸散发的输出量整体增加,农业系统退水量减少。根据海河流域农田水循环模式和通量的分析结果,提出了海河流域农田水循环的调控措施,包括节水灌溉、发展旱地农业等。

关键词:海河流域;农田二元水循环;水循环模式;水平衡要素

中图分类号:S271 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)05-0015-06

Agricultural water cycle scheme and flux in Haihe River Basin//SHAO Weiwei¹, LI Haihong¹, HAN Songjun¹, HUANG Hao¹, LÜ Huafang² (1. *Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Based on the present status and development of the agriculture in the Haihe River Basin, the driving mechanism of the agricultural water cycle is analyzed and the agricultural dualistic water cycle scheme is proposed in this paper. The agricultural water cycle mechanism is also presented. Water balance factors such as the input water volume, drainage water volume, plant water volume, and the evapo-transpiration were calculated according to the structure and pattern of agricultural water cycle. The analysis of the dualistic water cycle scheme and the calculated fluxes indicates that the effective utilization of precipitation and the evapo-transpiration of farmlands is increasing, and the agricultural system return flow is decreasing due to the changes of planting structure and farming mode. Based on the analyzed results, some regulation measures for the Haihe River Basin were proposed, including the water-saving irrigation as well as the dry land farming development.

Key words: Haihe River Basin; agricultural dualistic water cycle; water cycle scheme; factors of water balance

1 海河流域农业现状

1.1 现状概况

海河流域占全国国土面积 2.25%,聚集了 7.2%的人口和 11.3%的经济总量。2005 年海河流域耕地面积为 1061.4 万 hm^2 ,其中农田有效灌溉面积为 737.2 万 hm^2 ,实灌面积 639.4 万 hm^2 ,占耕地总面积的 60%。海河流域大田作物包括冬小麦、水稻、夏玉米;经济作物主要有谷子、高粱、薯类、大豆、棉花、花生、芝麻以及瓜菜类等;农田作物种植集中于海河南系平原区。20 世纪后期至 21 世纪初,海河流域粮食作物播种面积呈现明显下降趋势,特别是北京市 2003 年粮食播种面积仅为 1980 年的

25.8%,这一时期经济作物和蔬菜瓜果播种面积呈缓慢增加态势;而 2003—2011 年,海河流域各地区粮食播种面积转而逐年增加,上升趋势明显^[1]。

1.2 农业种植结构变化

海河流域农业种植结构变化是由海河流域自然条件和社会经济综合发展共同驱动的,主要受土壤条件、水资源本底条件、经济发展、社会消费需求、国家宏观调控政策和作物品种改良等约束。总的来说,水资源短缺的胁迫导致高耗水作物播种面积减少。1980—2003 年海河流域粮食作物播种面积大幅下降,以北京市为例,1999 年开始玉米、小麦和稻谷播种面积均大幅下降(图 1,数据来自北京统计年鉴)。但玉米和小麦的播种面积于 2003 年后又开始

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51109222);科技部创新方法工作专项(2009IM20100);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB403401)

作者简介:邵薇薇(1981—),女,江苏南通人,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: shaoww@iwhr.com

缓慢回升,而稻谷由于单位面积用水量,与区域水资源紧缺条件不相适应,2003 年后仍持续下降。玉米因单位面积用水量小,抗旱能力较强,对灌溉水依赖程度较低,因此 2003 年后播种面积增加幅度远高于其他作物。可见,改良作物品种以及种植灌溉制度变化,导致单产大幅增加,使农田种植系统在播种面积减少的情况下保证了近年来海河流域的粮食总产量,保障了粮食安全,这也是农田种植系统适应海河流域特殊水资源条件和发展用地需求的自我调节的有效手段。

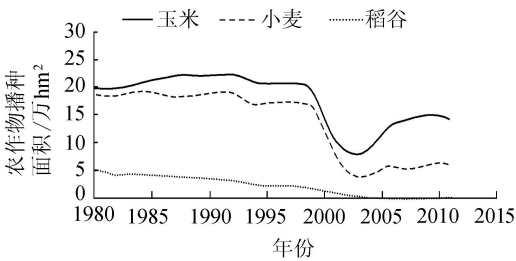


图1 北京市各类粮食作物播种面积

2 海河流域农田水循环驱动机制

海河流域农田水循环服务于农业生产的水分流转,是典型的自然-社会二元驱动。一方面遵循天然水循环转换机制,另一方面又在人类活动干扰下改变其循环通量数量或产汇流方向,形成独特的自然-社会二元水循环系统。

在农田水循环的各个物理过程中,都受到自然驱动力的作用,包括太阳能、重力势能、土水势能和生物势能等。太阳辐射通过热量的供给,主要影响蒸散发等过程。重力势能影响农田水循环的各个方面,降水和下渗甚至田间排水等过程均符合水在重力势能下的运动形式。土水势能则是土壤吸附力和表面张力共同作用的结果,不仅影响土壤水分的吸持,而且影响土壤水分的运动。另外,生物势能和空气对流运动等其他因素也对水循环过程产生影响。

农田水循环系统的人工驱动力主要体现在灌溉水的输配过程,是针对径流性水资源的可调控特性,在人工外力(如水泵电能、人力)作用下,通过蓄、引、提水工程措施以及输水措施克服水的重力,干预自然水循环过程,将灌溉水源输送到田间的过程。在海河流域,虽然自然降水是农田系统水分的主要补给来源,但由于海河流域是半湿润半干旱地区,还需要进行补充灌溉以保证土壤水分适宜作物的需要,并通过排水过程排除过剩的土壤水分。灌溉和排水等人工作用改变了农田原有的天然水循环系统,取而代之的是人工和天然共同作用的二元水循环系统。

3 海河流域农田水循环模式

对海河流域农田水循环机制的解析,可以为海河流域的粮食安全保障和节水型农业建设提供理论依据。海河流域的农田按照其水分来源的不同主要分为雨养农田和灌溉农田,具有不同的水循环模式。下面通过对农田水循环模式的认知来揭示海河流域农田二元水循环的机制。

3.1 雨养农田水循环模式

雨养农田中作物的水分获取完全来自于大气降水,虽然雨养农田水循环通量和过程在一定程度上受到人类活动的干扰,但其循环利用完全依赖于自然水循环的降水、蒸发、入渗和产流机制等。大气降水和蒸发是雨养农田水循环的输入输出源,农田上的降水在太阳能、重力势能和土壤吸力的驱动下,经作物植被冠层截留、地表洼地蓄留、地表径流、蒸散发、入渗、壤中径流和地下径流等迁移转化过程,部分重返大气,部分排入水域,并再次从水域或陆面蒸发循环往复。图1为海河流域雨养农田水循环结构示意图。

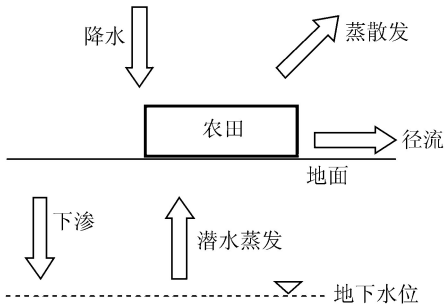


图2 雨养农田水循环结构

雨养农田种植虽然通过对土地利用方式的改变影响了陆地表面的覆盖率、植物分布方式和土壤质地,并通过采取集雨调蓄利用等措施调控降水而深刻影响着农田区域入渗、产流和蒸散发过程,与完全不受人工干扰的自然水循环过程存在显著不同,但依然遵循自然水循环的基本物理机制,体现在降水入渗、作物蒸散发和产汇流各个环节:①降水入渗。农业耕作和施肥措施等改变了土壤和岩层状况,或者通过坡改梯、平整土地等改变地表覆被状态,影响了水量入渗的时空规律,但是水分入渗机制均与自然水循环状态的入渗机制一样,不同的只是由于受到人工调节,使得土壤入渗通量的大小和时空发生变化。②作物蒸散发。农田取代了自然土地的水分利用和消耗过程,农田节水采取的调控田间蒸散发措施也影响了农田蒸散发过程,但农田蒸散发仍基于热力学机制,遵循自然水循环的热量平衡原理。③产汇流。农田产流过程仍然遵循自然水循环的蓄

满、超渗或者二者同时发生的产流机制,但由于农田土壤含水率受人类活动的干扰导致了产流量与时空过程发生变化。农田水流汇集过程仍然根据地形坡度的变化,并在流动过程中逐渐汇集,最后汇集到排水沟或者河道。农业耕作方式和种植结构调整等都不同程度地影响了农田地表的产汇流量。

下面通过公式来表达农田水循环的机制,反映出农田水循环的结构和影响因素。雨养农田水循环模式就是流域农田在自然驱动力作用下的农田水资源形成与演化基本模式,其概念性通式可以简要表述为

$$R_1 = f(S_1(P_n, G_n), U_1(A_n), E_1(E_{Yn}, E_{Pn}, E_{Sn}), O_1(O_{Sn}, O_{Gn})) \quad (1)$$

式中: R_1 为雨养农田水资源; S_1 为供水函数,由降水 P_n 、地下水自然补给 G_n 构成,其中 P_n 与区域气候、降水过程有关, G_n 与农田土壤质地、农田作物特性有关; U_1 为用水函数,由作物降水利用 A_n 构成,与农田土壤状况、作物的生长期、植株高度、根系深度以及作物叶面积有关; E_1 为耗水函数,由农田作物冠层截留蒸发 E_{Yn} 、作物腾发 E_{Pn} 、农田土壤蒸发 E_{Sn} 构成,其中 E_{Yn} 与农田作物生理特性等有关, E_{Pn} 与作物类型、区域气候等有关, E_{Sn} 与农田土壤状况、作物生长状况、地下水位有关; O_1 为排水函数,由农田降水径流 O_{Sn} 和地下径流 O_{Gn} 构成,其中 O_{Sn} 与降水过程、农田作物类型等下垫面有关, O_{Gn} 与降水下渗、农田土壤属性及墒情有关。

3.2 灌溉农田水循环模式

由于受到人类土地利用和直接引提水的影响,灌区天然一元的水循环结构被打破,形成了自然-社会二元水循环结构,如图 3 所示。为了满足农业生产水资源的需求,人类从地表和地下水源中取水,通过渠首及其附属建筑物向农田供水,经由田间工程进行农田灌水,形成了包括取水、输配水、用水和排水的四大部分,并参与到灌区大气水、地表水、土壤水和地下水自然循环转化过程中,人类活动外力成为太阳能、重力势等之外的灌溉农田水循环的另一个主要驱动因素。

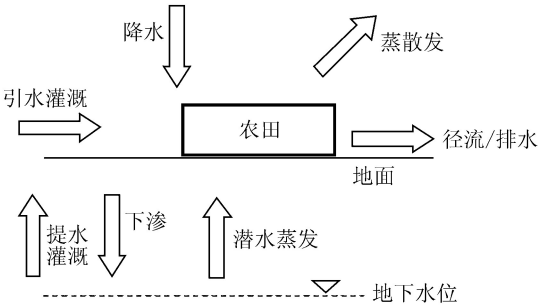


图 3 灌溉农田水循环结构

灌溉农田水循环和天然条件下的雨养农田水循

环系统结构形式有所差异。灌溉农田水循环系统一般包括取水系统、输水系统、用水系统和排水系统几个子系统,但复杂程度不一。灌溉农田的输-排水系统的结构比较复杂,其输水系统一般分为干、支、斗、农、毛等数级渠道,有的大型灌区在干渠之上还有总干渠,各级输水渠道在运行时遵从一定的续灌和轮灌制度。排水系统也分为干、支、斗、农等数级渠道,不受控制的自流排水系统的基本原理和结构形式类似于天然河道系统,很多平原圩区的排水系统设有很多控制性闸门或者泵站,遇到大水时各级排水渠道需要遵从一定的运行制度。对于水资源统一调度和管理的流域来说,一般包含多个受人工控制的农田水循环系统,各个农田水循环系统互相配合、统一调度,共同为区域社会经济系统和生态系统总体利益最大化服务。

所谓灌溉农田水循环模式就是流域农田自然-社会二元驱动力作用下的农田水资源形成与演化基本模式,其概念性通式可以简要表述为

$$R_2 = f(S_2(P_n, I_h, G_{n,h}), U_2(A_n, A_h), E_2(E_{Yn,h}, E_{Pn}, E_{Sn,h}), O_2(O_{Sn,h}, O_{Gn,h}, O_{Dn,h})) \quad (2)$$

式中: R_2 为灌溉农田水资源; S_2 为供水函数,由降水 P_n 、人工灌溉 I_h 、受人类活动影响的地下水补给 $G_{n,h}$ 构成,其中 I_h 与农田作物、农田区域气候、作物灌溉制度有关, $G_{n,h}$ 与农田土壤质地、农田作物特性、人为影响(如打井等)有关; U_2 为用水函数,由作物降水利用 A_n 、作物灌溉水利用 A_h 构成,其中 A_h 与灌溉过程及农田作物的生长期、植株高度、根系深度以及作物叶面积有关; E_2 为耗水函数,由农田作物冠层截留蒸发 $E_{Yn,h}$ 、作物腾发 E_{Pn} 、农田土壤蒸发 $E_{Sn,h}$ 构成,其中 $E_{Yn,h}$ 与农田作物生理特性、灌溉方式等有关, $E_{Sn,h}$ 与作物类型、灌溉方式、地下水位有关,而其中灌溉方式对农田的无效蒸发控制有极大影响; O_2 为排水函数,由人类活动影响下的农田降水径流 $O_{Sn,h}$ 、地下径流 $O_{Gn,h}$ 、农田人工排水 $O_{Dn,h}$ 构成; P_n 、 A_n 、 E_{Pn} 与式(1)含义相同。

3.3 流域农田水循环综合模式

海河流域农田水循环过程,一方面遵循自然水循环的机制与过程,如入渗、蒸散发和产汇流等,另一方面又受到人类活动影响,如取水-输水-蓄水-用水-耗水-排水等社会水循环的作用,最终形成了农田自然-社会二元水循环系统。通过对雨养及灌溉农田水循环模式解析,海河流域农田水循环综合模式可以表述为以下概念性通式:

$$R = R_1 \cup R_2 = f_1(S_1(P_n, G_n), U_1(A_n), E_1(E_{Yn}, E_{Pn}, E_{Sn}), O_1(O_{Sn}, O_{Gn})) \cup f_2(S_2(P_n, I_h, G_{n,h}), U_2(A_n,$$

$$A_h), E_2(E_{Yn,h}, E_{Pn}, E_{Sn,h}), O_2(O_{Sn,h}, O_{Gn,h}, O_{Dn,h})) = f(G(n, h), Y(n, h), H(n, h), P(n, h)) \quad (3)$$

式中: R 为农田水资源; G 为供水函数,包括降水和人工灌溉水及地下水补给; Y 为用水函数,包括降水利用量和灌溉利用量; H 为耗水函数,包括农田土壤蒸发、农田作物蒸散发; P 为排水函数,包括降水径流、灌溉径流及农田排水; n 为自然驱动力; h 为社会驱动力。

从式(3)可以看出,由于社会驱动项的作用,二元模式下的农田水资源演变过程与一元模式相比发生了系统变化,人类从地表和地下水源中取水,通过渠首及其附属建筑物向农田供水,经由田间工程进行农田灌水,完全改变了农田水资源量及其时空变化;作物品种改良、农艺措施改进、农田增墒保墒、灌溉制度及方式的科学制定则可以改变农田用水系统的水资源利用效率和效益,同时也会影响农田蒸散发的效率及效益;农田排水系统以及农田排水制度的科学制定则会影响农田径流以及农田退水的时空变化。因此,人类灌排活动的参与对整个农田系统的产汇流过程进行直接控制,完全改变了天然状态下农田水循环相互转化过程。可见,农田二元水循环模式客观体现了农田水循环系统的演变过程,反映了人类活动对现代农田水循环的全面影响。

4 海河流域农田水循环要素分析

对海河流域农田二元水循环模式的认知,将有助于对农田水循环要素进行分析。通过对海河流域农田水循环结构分析,可知农业用水有 3 种供给来源:一是天然降水;二是通过农业工程供水进行的灌溉补充水量;三是通过土壤毛细作用直接利用的浅层地下水,即潜水蒸发补给量。田间水分竖直方向耗散有两种方式:一是向大气的土壤蒸发、作物蒸腾和叶面截流蒸腾,二是向地下的渗流;水平方向有地表径流,最终形成地表地下退水。对于农业耕种,只有作物蒸腾是有效耗散。随着海河流域社会经济的飞速发展,社会经济用水量远超过水资源承载力,竞争性用水导致农田水循环通量正发生着巨大变化^[2]。下面对海河流域农田水循环的天然降水量、灌溉用水量、潜水蒸发量、退水量、农作物水分转移量、蒸散发量等各项水平衡要素进行分析。

4.1 天然降水量

根据综合海河流域主要作物(冬小麦、水稻、夏玉米、谷子、高粱、薯类、大豆、棉花、花生、芝麻、蔬菜瓜果类)种植时间、各省(市、区)降水年内过程、海河流域分省(市、区)作物播种面积,计算得到 2000 年和 2005 年海河流域进入农业系统的天然降水量

为 375.58 亿 m^3 和 413.87 亿 m^3 。

4.2 灌溉用水量

4.2.1 灌溉用水总量变化

如图 4 所示,1991—2005 年,海河流域农田灌溉用水量呈现稳定下降趋势。经分析,对于不同作物类型,菜田灌溉用水量增加趋势明显,稻田和大田(小麦、玉米等)灌溉用水量显著减少,其中 2005 年稻田灌溉用水量仅为 1991 年的 48%,大田灌溉用水比 1991 年减少 26 亿 m^3 。

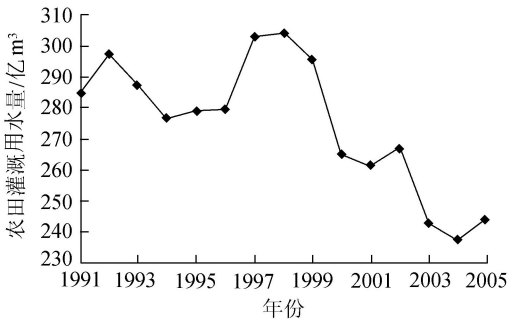


图 4 1991—2005 年农田灌溉用水量

4.2.2 灌溉方式变化

海河流域节水灌溉始于 20 世纪 60 年代,主要通过输水渠道的衬砌提高输水效率。20 世纪 80 年代以后,灌溉缺水日趋严重,农业节水技术得到了较快发展,平原渠灌区以渠道防渗为主,井灌区以低压管道为主,果树及大棚蔬菜以喷灌、微灌为主;山丘区以发展集雨水窖和微型节水灌溉工程为主。2004 年全流域节水灌溉面积比例达 44%,其中北京市由于社会经济水平高,水资源短缺程度更为严重,节水灌溉率高达 85%,因此可以说灌溉方式的改变也是资源胁迫的结果^[3]。

4.2.3 灌溉水源方式变化

海河流域由于水资源匮乏,很多大型水库转为以保障城市供水为主,加之近几年地表水资源大量减少(特别是 2001—2006 年,地表水资源全部属于枯水年,年平均只有 107 亿 m^3 ,仅为 1956—2000 年多年平均的 42%),因此,尽管海河流域农田地表水与地下水灌溉用水量均呈下降趋势,但是总体来讲,海河平原地区农田人工灌溉用水中,地表水减少幅度大,地下水所占比例略有增加(表 1)。目前在海河流域,以地下水为主要水源的灌区基本上采用井灌方式,灌溉水利用率相对于渠灌区来讲较高,因此实际上进入农田的灌溉水总量中,地下水所占比例更高^[4]。

表 1 海河流域农田灌溉用水情况

年份	地表水/亿 m^3	地下水/亿 m^3
1995	118.1	160.9
2000	107.2	157.7
2005	98.7	156.0

此外,由于水资源的短缺,城市再生水也逐渐成为农业灌溉用水的另一重要水源,其中海河流域再生水回用以北京市为主。2005 年,北京市污水处理回用于农业灌溉的水量为 2.02 亿 m³,占当年全国总量的 40%。

4.3 潜水蒸发量

海河流域社会经济总用水量逐年增加,地下水超采严重,根据中国地质环境监测院等单位的地下水位观测数据,1995—2005 年海河流域整体潜水位逐渐降低,仅滨海平原地区地下水位变化较小,且地下水位埋深在 5 m 以内。而一般情况下,地下水埋深超过 4 m 时基本不考虑潜水蒸发。海河流域滨海平原区存在总量约 40 亿 m³ 的潜水蒸发量,由于该区域地下水矿化度较高,农业种植面积较少,占全区域面积的 1/8 左右,因此估算海河流域农田水循环系统约有 5 亿 m³ 的耕地潜水蒸发量。

参考北京统计年鉴,设定海河流域复种指数为 1.5,通过计算,海河流域 2000 年农业总供水量为 646 亿 m³,其中天然降水总量为 376 亿 m³,农田灌溉用水量为 265 亿 m³,潜水蒸发补给量为 5 亿 m³,分别占总供水的 58.2%、41.0% 和 0.8%。2005 年海河流域农业总供水量为 674 亿 m³,其中有效利用降水总量为 414 亿 m³,农田灌溉用水量为 255 亿 m³,潜水蒸发补给量为 5 亿 m³,分别占总供水的 61.4%、37.8% 和 0.8%。

4.4 退水量

农业系统的退水来源于两部分:一是遇到高强度降水时形成的少量径流;二是灌溉输水过程中的输水损失。本次研究假定降至农业系统的雨量除有效降水直接利用量外均形成退水。

4.4.1 天然降水形成的农业系统退水

有效降水利用量与降水特性、气象条件、土地和土壤特性、土壤水分状况、地下水埋深、作物特性和覆盖状况以及农业耕作管理措施等因素有关。一般而言,很少有足够的实测资料可用于定量描述控制降水有效性的过程,而影响有效降水的过程又很多,有关的参数也难以确定。因此,本研究在计算有效降水利用量时,一方面参考我国学者提出的次有效降水量的确定方法^[5],将 0~50 mm 的旬降水量视为全部有效,另一方面也借鉴美国土壤保持局提出的旬有效降水量的预测方法,当降水量大于 40 mm 时,确定各旬有效降水量^[6-8]。计算公式如下:

$$P_e = 40 + S_i [0.049310862 (P_i - 40)^{0.82416} - 0.11556] \times 10^{9.551181 \times 10^{-4} E_e} \quad (4)$$

式中: P_e 为旬平均有效降水量,mm; P_i 为旬平均降

水量,mm; E_e 为旬平均作物需水量,mm; S_i 为土壤水分贮存因子。如果用式(4)计算得到的旬有效降水量大于该旬的作物需水量,则将该旬的作物需水量视为有效降水量。海河流域由于水资源本底条件差,通过增加作物种植密度、平整土地、修田坎等措施,大幅度减小地面径流;采用深耕、耙磨、防止土壤板结等方式增加入渗;加强灌溉管理,采用人工补充灌溉制度,多种措施使有效降水利用系数大幅提高。降水有效利用系数根据月降水量的大小确定,当月降水量小于 50 mm 时,假定为 1;当月降水量为 50~150 mm 时,假定为 0.80;当月降水量大于 150 mm 时,假定为 0.75,以此为依据对研究区域以月为时段进行有效降水量计算。

综合海河流域分省(市、区)作物播种面积、有效降水利用系数和各省(市、区)降水年内过程,计算得到 2000 年和 2005 年海河流域农业有效降水量分别为 327 亿 m³ 和 363 亿 m³,进而计算得出 2000 年和 2005 年海河流域天然降水形成的农业系统退水(表 2)。

表 2 海河流域农业系统天然降水形成的退水量

年份	天然降水量		有效降水利用量		天然降水退水量	
	水量/ 亿 m ³	折合水 深/mm	水量/ 亿 m ³	折合水 深/mm	水量/ 亿 m ³	折合水 深/mm
2000 年	376	470	327	408	49	61
2005 年	414	517	363	454	51	64

4.4.2 农田灌溉形成的农业系统退水

综合海河流域井灌区和渠灌区的灌溉水利用效率情况,假定 2000 年和 2005 年渠系水利用系数分别按照 0.65 和 0.70 计算^[9],由灌溉用水量可计算得到 2000 年和 2005 年渠道渗漏水量分别为 93 亿 m³ 和 76 亿 m³。表 3 为海河流域农业系统的总退水量。

表 3 海河流域农业系统的总退水量

年份	天然降水退水量		灌溉水形成的退水量		总退水量	
	水量/ 亿 m ³	折合水 深/mm	水量/ 亿 m ³	折合水 深/mm	水量/ 亿 m ³	折合水 深/mm
2000 年	49	61	93	116	142	177
2005 年	51	64	76	95	127	159

4.5 农作物水分转移量

农产品的产出和流通从农田水循环系统中带走了一部分水分^[10]。本研究对海河流域农业系统农作物水分转移量进行了估算。根据 2000 年和 2005 年海河流域主要作物产量,经过计算得到 2000 年和 2005 年海河流域主要农作物水分转移量为 0.98 亿 m³ 和 1.15 亿 m³(未考虑由于品种改良、秸秆质量下降所带来的水分转移量的削减),可见农作物水分转移量较小。由于种植结构的变化,2005 年较 2000 年农作物水分转移量大幅增加。

4.6 蒸散发量

海河流域 2005 年较 2000 年降水量大,玉米、蔬菜等生长期与雨季匹配的作物播种面积增加,因此有效降水利用量增加幅度较大。根据水量平衡原理,虽然 2005 年进入田间的灌溉用水较 2000 年减少约 10 亿 m³,但由于 2005 年降水量大,且退水量较少,当年农业系统蒸散发量较 2000 年增加约 53 mm。

5 海河流域农田水循环特征及调控

通过对海河流域农田水循环模式和通量的分析,可知在水资源极其短缺条件下海河流域农田水循环表现出以下两方面特征:①水循环通量特征。对一个闭合的农田系统而言,水循环过程的输入项是降水或灌溉或地下水补给,输出项包括水平方向的径流(即退水项)和垂直方向蒸散项。经过分析可知,海河流域水循环通量总量近年来并未减少。在输入项方面,种植结构和耕作方式的改变使有效降水利用量增加,2005 年与 2000 年相比提高了 11%;农业系统的用水竞争劣势位置可能导致灌溉用水量降低,2005 年与 1995 年和 2000 年相比分别减少约 24 亿 m³ 和 10 亿 m³;全流域地下水位下降,田间土壤包气带逐渐增厚,潜水蒸发能力下降,导致广大区域的地下水难以通过潜水蒸发补给田间水分。另外,在全球气候变化的影响下,海河流域未来降水在一定程度上可能有所增加,有效降水直接利用量在农业系统用水总量中所占比例将会进一步加大。在输出项方面,在人类活动作用下,海河流域农田系统一个突出的水循环效应就是垂向蒸散发的输出整体增加,而水平方向的径流输出不断减少,反映在水资源的高效利用措施使农业系统退水量急剧降低。而根据水量平衡原理,在一个较长的时段内农田系统储水量看作基本不变的话,水平方向径流量的减少量必然等于垂直方向蒸散量的增加。②人工灌溉水结构特征。海河流域人工灌溉水源以地下水为主,正在实施节水灌溉。2005 年海河流域地下水灌溉量占人工灌溉总量的 60% 以上,地下水灌溉有利于计量监测实施与节水灌溉方式的采用,全流域节水灌溉率达到 44%。但是,由于地下水长期超采所带来的一系列问题,海河流域逐步落实地下水压采方案,再加上南水北调工程东、中线调水的实施,未来一些灌区将逐渐恢复地表水灌溉,农田灌溉用水水源结构也将会随之发生改变。

海河流域农业要想实现节水与高效用水,由农田水循环模式和通量分析可知,需要对农田水循环实施调控^[5],主要措施如下:①在地下水已超采的井灌区,可以采用节水灌溉制度(调亏灌溉)和综合

节水措施,尽可能降低作物实际耗水量,并保证农作物基本不减产,甚至增产;②在地下水尚有开采潜力的渠灌区,例如徒骇马颊河平原,结合灌区改造,推广井渠结合,既可以减少地下水的潜水蒸发,有利于防治土壤盐碱化,又可以减少地表水使用量,改善河道水生态环境;③海河流域现有旱地面积较大,在采取综合农业措施的情况下,利用天然降水发展旱地农业仍具有很大潜力;④在大中城市郊区、经济条件较好的井灌区和蔬菜果树经济作物区,有条件地推广喷灌、微灌等先进灌溉技术,加强节水灌溉。

6 结 语

农田水循环是人类社会参与自然水循环过程的典型方式,具有水循环绝对通量大、与气候和作物生长特点相关性强等特点。本文提出了海河流域农田水循环的二元综合模式,分析了农田水循环的各项通量及特征,并探讨了海河流域农业实现节水与高效用水的调控措施,可为海河流域建设节水型农业和水资源合理利用提供理论依据和科学指导。

参考文献:

[1] 马文奎,王建刚,阎永军. 海河流域防汛抗旱减灾体系建设[J]. 中国防汛抗旱, 2009 (19): 117-124. (MA Wenkui, WANG Jiangang, YAN Yongjun. The flood control and drought relief system construction in Haihe River basin [J]. China Flood & Drought Management, 2009 (19): 117-124. (in Chinese))

[2] 王中宇. 海河流域水之忧[N]. 科学时报, 2007-07-09 (A5).

[3] 华北灌溉农田减蒸降耗增效节水技术集成与示范[R]. 郑州: 河北省农林科学院, 2011.

[4] 刘群昌, 谢森传. 华北地区夏玉米田间水分转化规律研究[J]. 水利学报, 1998 (1): 62-68. (LIU Qunchang, XIE Senchuan. A study on field soil water balance for summer corn in north China plain [J]. Journal of hydraulic engineering, 1998 (1): 62-68. (in Chinese))

[5] 丛振涛, 姚本智, 倪广恒. SRA1B 情景下中国主要作物需水预测[J]. 水科学进展, 2011, 22 (1): 38-43. (CONG Zhentao, YAO Benzhi, NI Guangheng. Crop water demand in China under the SRA1B emissions scenario [J]. Advances in Water Science, 2011, 22 (1): 38-43. (in Chinese))

[6] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. 水利学报, 1998 (10): 36-39. (LIU Changming, ZHANG Xiyong, YOU Maozheng. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large-scale weighing lysimeter and micro lysimeter [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998 (10): 36-39. (in Chinese))

(下转第 25 页)

会出现纵向裂隙,纵向裂隙会加速岸滩挫落崩塌的发生。

b. 岸滩挫落崩塌沿河岸一般呈较小宽度的条形崩塌,崩塌过程简单和短暂,破坏面为平面,崩体沿破坏面进入河道的方式主要有倒塌和滑塌两种。

c. 通过岸滩崩体受力和稳定分析,建立了挫落崩塌的分析模式,给出了挫落崩塌的稳定分析方程;结合岸滩临界崩塌高度的分析,野外和室内实测资料检验表明该分析模式是合理的。

参考文献:

[1] 王延贵. 冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析与试验研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2003.

[2] 张幸农,蒋传丰,陈长英,等. 江河崩岸的影响因素分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009,39(1):36-40. (ZHANG Xingnong,JIANG Chuanfeng,CHEN Changying, et al. Influencing factors for bank collapse in fluvial rivers [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009,39(1):36-40. (in Chinese))

[3] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报:2010 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

[4] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报:2011 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[5] 王延贵,匡尚富. 岸滩临界崩塌高度的研究[J]. 水利学报,2007,38(11):1158-1165. (WANG Yangui,KUANG Shangfu. Critical height of bank collapse[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1158-1165. (in Chinese))

[6] 蔡伟铭,胡中雄. 土力学与基础工程[M]. 北京:中国建

筑工业出版社,1991.

[7] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京:清华大学出版社, 1984.

[8] ASCE Task Committee on Hydraulic, Bank Mechanics, and Modeling of Riverbank Width Adjustment. River width adjustment I :processes and mechanisms[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1998, 124(9):881-902.

[9] THORNE C R, TOVEY N K. Stability of composite riverbanks[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1981,6:469-484.

[10] JUMIKIS A R. Soil mechanics [M]. Princeton: D. Van Nostrand Company, Inc. 1962.

[11] 王延贵,匡尚富,黄永健,等. 洪水期岸滩崩塌有关问题的研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2003,1(2):90-97. (WANG Yangui, KUANG Shangfu, HUANG Yongjian. Study on bank collapse during flooding periods [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003,1(2):90-97. (in Chinese))

[12] 王延贵,匡尚富. 河岸淘刷及其对河岸崩塌的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(4):251-257. (WANG Yangui, KUANG Shangfu. Study on bank erosion and its influence on bank collapse[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005,3(4):251-257. (in Chinese))

[13] 官厅水库坍岸研究小组. 水库滩岸研究[M]. 北京:水利电力出版社,1958.

[14] ABAM T K S. Factors affecting distribution of instability of river banks in the Niger Delta[J]. Engineering Geology, 1993, 35:123-133.

(收稿日期:2012-11-29 编辑:熊水斌)

(上接第20页)

[7] 刘晓敏,张喜英,王慧君. 太行山前平原区小麦玉米农艺节水技术集成模式综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2011,19(2):421-428. (LIU Xiaoming, ZHANG Xiyi, WANG Huiun. A comprehensive evaluation of wheat/maize agronomic water-saving modes in the piedmont plain region of the Mount Taihang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2011,19(2):421-428. (in Chinese))

[8] 李勇,杨晓光,叶清,等. 1961—2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报,2011,27(9):175-183. (LI Yong, YANG Xiaoguang, YE Qing, et al. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961-2007 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 175-183. (in Chinese))

[9] 海河流域节水和高效用水战略研究报告[R]. 天津:天津市中水科技咨询有限责任公司,2008.

[10] 曹永强,姜莉,张伟娜,等. 海河流域京津冀地区农产品

虚拟水实证研究[J]. 水利经济,2010,28(5):11-14. (CAO Yongqiang, YANG Li, ZHANG Weina. et al. An empirical study on the agricultural product virtual water in the Beijing-Tianjin-Hebei region of Haihe River basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2010, 28(5):11-14. (in Chinese))

(收稿日期:2012-10-31 编辑:熊水斌)

