

WACM4.0 模型模拟内蒙古河套地区山水林田湖草系统水循环

毕彦杰^{1,2}, 赵晶^{1*}, 张文鸽³, 赵勇²

(1. 华北水利水电大学, 水资源学院, 郑州 450046; 2. 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; 3. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 内蒙古河套地区是中国重要的商品粮、油生产基地。区域内耕地密布, 长期大规模河道外引水, 引排水渠系纵横交错, 人类活动剧烈, 改变了原来的水循环环境, 水循环要素变化具有时空变异性, 水分转化与运动过程及其复杂。为厘清河套地区山水林田湖草系统的水循环演变规律, 该研究在“自然—人工”复合水循环理论基础上, 构建了适用于强人类活动地区的分布式水循环模型(Water Allocation and Cycle Model, WACM4.0), 系统模拟分析了河套地区山水林田湖草各系统的水循环演变规律与水分运动过程。结果表明: 乌梁素海、引排水渠道水循环特征以引水—排水的横向运动为主; 乌海滩涂水循环特征以地下水补给—蒸发的垂向运动为主; 海子水循环以垂向与横向综合运动为主; 耕地水循环特征为灌溉水入渗—蒸散发的垂向运动; 人工林、草地、未利用地与居工地的水循环特征为降雨—入渗—潜水蒸发的垂向运动。山水林田湖草系统整体水循环特征以灌溉(降雨)—下渗—蒸发垂向水循环为主。河套地区地下水量逐年亏损, 地下水循环过程为“负水平衡”垂向运动。河套地区引水灌溉平均每年致使黄河径流量减少约 42.0 亿 m³。其中耕地耗黄水量最多, 其次为引水渠道、乌梁素海、排水渠道、海子、草地。研究可为河套地区灌溉管理、水资源开发利用与山水林田湖草生态保护提供基础支撑。

关键词: 水循环; 水均衡; WACM 模型; 山水林田湖草; 河套地区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.018

中图分类号: P339 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-14-0148-11

毕彦杰, 赵晶, 张文鸽, 等. WACM4.0 模型模拟内蒙古河套地区山水林田湖草系统水循环[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 148–158. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.018 <http://www.tcsae.org>

Bi Yanjie, Zhao Jing, Zhang Wenge, et al. Simulation of hydrological cycle for mountain-water-forest-cropland-lake-grass system in Hetao region, Inner Mongolia of China by WACM4.0 model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 148–158. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.018 <http://www.tcsae.org>

0 引言

在太阳辐射和地心引力等自然驱动力的作用下, 地球上各种形态的水通过蒸发蒸腾、水汽输送、降雨、土壤入渗、地表径流、地下径流和湖泊海洋蓄积等环节, 不断地发生相态转换和周而复始运动过程, 称为水循环(或水文循环)^[1]。在全球气候变暖的大背景下, 人口扩张、城镇化进程加快、社会经济高速发展等人类活动导致世界范围内一些流域/区域的陆地水循环发生了明显变化^[2-3], 引起水循环要素时空分布与水资源数量变化, 进一步影响区域的水生态、水环境系统。变化环境下水循环特征与演变规律研究已成为目前国内外水科学、水文学领域研究的热点。关于陆地水循环, 国内外已开展了大量研究, 水循环受气象条件与地形、土壤、植被、地质等地理条件影响^[4-5]。近年来与人类活动密切相关, 人

类活动通过改变土壤水、地表水、地下水的时空分布影响水循环^[6-7]。不少学者对此进行了大量的试验与数值模拟研究, 促进了对区域水循环特征的认识^[8-10]。各种人类活动, 如水利工程建设、工农业发展、城市化、人工取用水等正在不断干扰水循环过程^[11-13]。城镇化使得城镇周边的农田、林地等转变为城镇及建设用地, 增加了大量地表不透水面积, 影响降雨形成径流与水分下渗^[14]。水利建设项目、围湖造田与毁林造田等一系列人类活动改变了下垫面条件, 影响降雨—土壤水—地下水转化规律^[15]。农田灌溉、工业与生活取用水等人类活动改变了径流量、土壤水、地下水等水循环要素变化的自然规律^[12,16-17], 直接引起水资源演变规律发生变化。城镇化引起的土地利用/土地覆盖变化与人工取用水是人类活动影响水文过程的最主要方式^[18]。

国内外关于山水林田湖草系统的研究刚刚起步, 研究主要针对山水林田湖草系统均衡的内涵特征、机制、管理路径和启示作用等^[19-22], 大部分仍停留在政策层面; 也有部分研究针对山水林田湖草生态保护修复研究, 如生态修复标准体系^[23]、生态保护修复模式^[24]、山水林田湖草的生态功能评价^[25]、生态问题系统诊断^[26]等, 但均为定性研究, 有学者构建山水林田湖草空间信息图谱, 采用空间自相关分析方法探究其时空演变特征与生态变

收稿日期: 2020-03-20 修订日期: 2020-06-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401407, 2017YFC1502405, 2017YFC0405805-03); 华北水利水电大学高层次人才科研基金(201702016)
作者简介: 毕彦杰, 博士, 讲师。主要从事流域水循环模拟与实验、气候变化方面研究。Email: 835938470@qq.com。

※通信作者: 赵晶, 博士, 讲师。主要从事水利经济与水资源管理研究。
Email: zhaojing19870515@163.com。

化过程^[27]。但关于山水林田湖草各系统水循环演变过程与规律的定量化研究仍缺乏。

内蒙古河套灌区是亚洲最大的一首制灌区和全国 3 个特大型灌区之一,也是国家和自治区重要的商品粮、油生产基地。河套地区地处中国干旱的西北高原,降雨量少、蒸发量大,当地水资源匮乏,其生产生活用水主要依赖过境黄河水。年引黄水量约 47 亿 m^3 ,占黄河过境水量的七分之一。2019 年习近平在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上指出坚持山水林田湖草综合治理、系统治理、源头治理,推动黄河流域高质量发展。解决黄河流域水资源与水生态相关问题的前提是厘清流域山水林田湖草系统的水循环演变特征。河套地区耕地密布、河泊湿地众多,有大面积草地、人工林,属于典型山水林田湖草系统,河套地区内引排水渠系纵横交错,水分转化与运动过程及其复杂,水循环要素具有很大的时空变异性,该地区山水林田湖草各系统水分运动与水循环是一个极其复杂的动态过程,亟需深入研究。张银辉等^[28]应用 DEHYDROS 水循环模型研究河套灌区的水循环特征,但未涉及到山水林田湖草各系统水分运动过程与水循环规律。

综上,本研究从山-水-林-田-湖-草各系统水量消耗过程入手,以不同类型耗水系统的水平衡机制和灌区尺度水循环要素标定为突破口,考虑地表水供水平衡、土壤水平衡、地下水平衡,通过蒸发、入渗以及单元间的水量交换将各个平衡系统联系起来,构建适用于强人类活动地区的分布式水循环—WACM(Water Allocation and Cycle Model)模型,系统模拟分析河套地区山水林田湖草各系统的水分运动过程与水循环演变规律,为河套地区灌溉管理、水资源开发利用与山水林田湖草生态保护提供基础支撑。

1 分布式水循环模型构建

WACM(Water Allocation and Cycle Model)模型是由中国水利水电科学研究院自主开发的基于自然水循环过程和人工影响过程构成的自然-人工复合水循环系统模型,尤其适用于人类活动频繁平原区水循环过程模拟^[29]。经过了十几年的发展,相继开发出 WACM1.0、WACM2.0、WACM3.0 与 WACM4.0 共 4 个版本^[29-31]。可为水资源配置、自然-人工复合水循环模拟、物质循环模拟、气候变化与人类活动影响等提供模拟研究的技术方法。

1.1 模型原理及结构

模型主要内容包括蒸散发、融雪、土壤水运动、地下水运动、产汇流、灌区的引水、灌水、排水、工业生活取水、湖库闸坝、调水等水利工程的模拟计算及植物生长计算、水资源配置计算等。

1) 蒸散发模块主要包括水面蒸发、裸地/植被覆盖和不透水域蒸发,采用 Noilhan-Planton 模型、Penman 公式和 Penman-Monteith 公式按照植被-土壤-大气通量交换方法等进行计算。

2) 融雪模块分 2 层:表层积雪和下层积雪。

3) 土壤水划分为 3 层:地表贮流层、浅层与深层,

应用 Richards 方程进行计算。

4) 地下水分平原区与山区分别模拟,山区采用水均衡法,平原区地下水为 2 层:浅层和深层,采用二维地下水连续性方程计算。

5) 山区汇流利用简单的几何框架和简化的圣维南方程组来模拟天然坡面流。平原区坡面汇流计算时,按照就近入流的原则进行汇流计算。即通过地理信息获取每个平原区计算单元最近的排水渠道,按照距离以及实际排水条件分时段汇入排水渠。河道汇流选择一维运动波方程来模拟单个河道以及人工排水干沟的水流过程。

6) 灌区引水模块,在渠灌区设置一条引水干渠,根据灌区渠系工程图的支渠引水节点位置,从上而下,逐个节点进行引水模拟,将水量从支渠分配到各个水循环单元。灌水模块需要计算每个水循环计算单元的“当日灌水量”,由作物灌溉制度和农田小气候决定,模型考虑了作物轮作以及复种对作物灌溉的影响,设置最大可接受轮作次数为 3 次。对于灌区排水,农沟、斗沟、支沟概念性的概化到各水循环单元内,体现在排水沟底板高程和渗漏损失上,而排水干沟在每个子流域均设置一条,子流域内属于灌区的单元格按照一定的方式坡面汇流到排水干沟,再通过排水干沟汇到子流域的主河道,而子流域内不属于灌区的单元格,按照天然的方式直接汇到子流域的主河道。

7) 工业生活取水:将生活与工业用水系统内部变化概化为黑箱,根据水资源配置的成果或实际调查统计与规划资料,来进行每个水循环单元的生活与工业的取水、用水、耗水、排水、补给地下水和转化水量的计算。

8) 模型对水利工程的模拟,将各类水利工程概化为流域计算河网上的节点,通过按照一定规则和要求来计算节点的水平衡的方式,完成对水利工程的模拟。水库调度过程分为非汛期与汛期两种情况考虑。

9) 植物生长模块主要考虑能量和温度作用以及水分受限对植物生理过程的影响。主要通过积温及相关气象、土壤条件计算植物生长速率,通过光合、呼吸、生长等生物过程完成碳循环过程;并以上述过程为载体完成水循环的耦合。

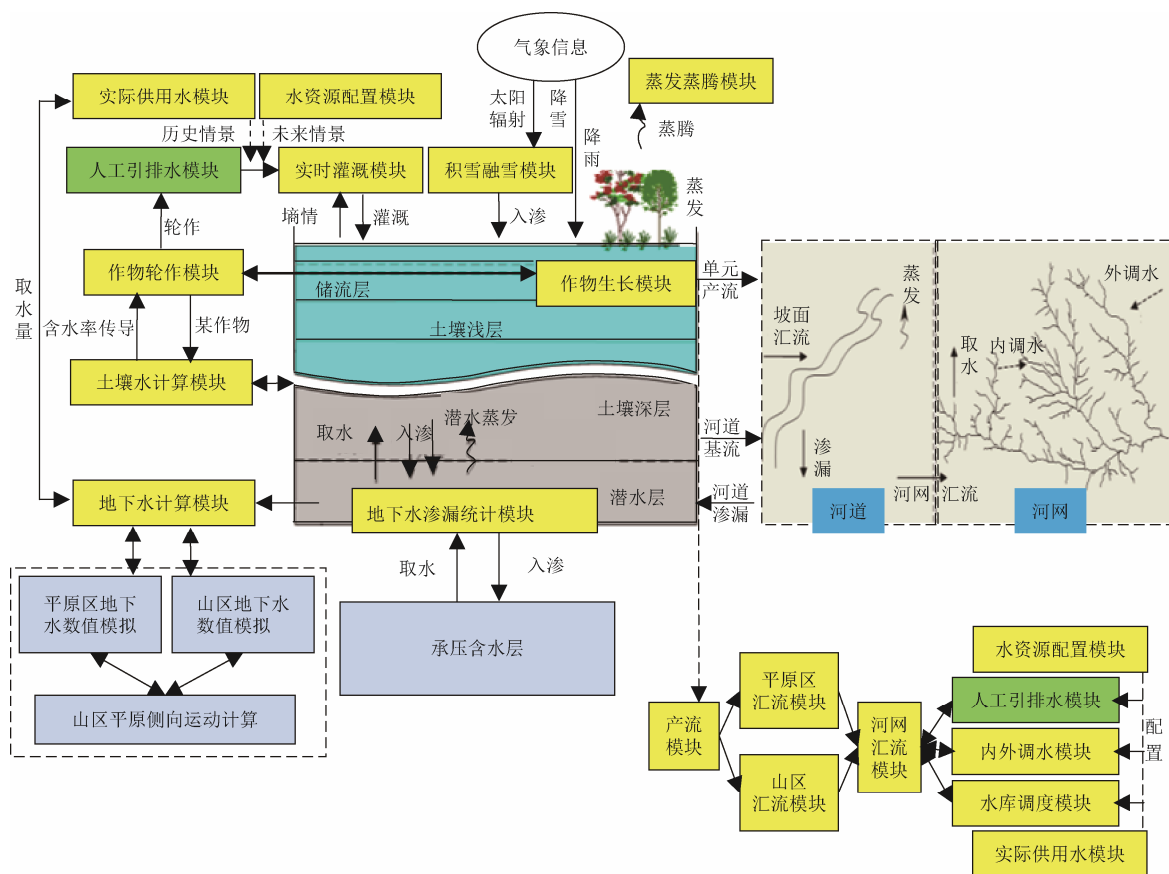
10) 水资源配置模块首先按照流域套行政区的方式,根据区域特点将整个水资源系统概化成由诸多计算单元、计算节点以及输水网线构成的系统网络图,每个单元和节点有其单独供需水平衡方程,在弄清各单元和节点之间联系和约束条件后,可形成一个线性方程组。

各模块具体计算详见文献[30-32]。WACM 模型结构见图 1 所示。

1.2 WACM4.0 模型构建

1.2.1 研究区概况

内蒙古河套灌区(以下简称河套灌区或灌区)位于 $40^{\circ}15'N \sim 41^{\circ}18'N$, $106^{\circ}20'E \sim 109^{\circ}19'E$ 之间,巴彦淖尔市境内,东西长 250 km,南北宽 50 km。河套灌区地势平坦开阔,土层深厚,为一湖相沉积平原。土壤中土颗粒细、渗透性差,地形西南高而东北低,灌溉排水必须从西南流向东北然后从东南流入黄河^[33]。

图1 WACM 模型结构^[30-32]Fig.1 Structure of Water Allocation and Cycle Model (WACM) ^[30-32]

河套灌区地处干旱、半干旱、半荒漠草原地带，冬季严寒少雪，夏季高温干热、蒸发大、降雨少、无霜期短，为典型的大陆性气候区，易发生干旱，春旱尤其严重，必须靠灌溉发展农业。千百年来形成了独特而又复杂的引水和排水渠系网络。灌区引水系统包括总干渠 1 条，干渠 13 条，分干 48 条，支渠 204 条，以及复杂的斗区、农渠和毛渠共七级引水渠系；排水系统包括总排水干沟 1 条，干沟 12 条，分干沟 59 条，支沟 210 条，以及更小的排水沟，与当地的河湖水系共同构成纵横交错的排水网络。

灌区内有 300 多个天然湖泊，湖泊湿地总面积约 440 km²，类型繁多，是候鸟迁徙的主要场所，在维持生物多样性和区域生态平衡中起着巨大作用，是中国北方地区重要的生态屏障。其中灌区东端的乌梁素海面积最大，约 293 km²，是灌区农田退水、工业废水及生活污水唯一的承泄渠道，接纳了灌区 90% 以上的农田排水，致使乌梁素海水水质偏差。乌兰布和沙漠东缘重建了长 154 km 的大型防风固沙林带，有效地防止乌兰布和沙漠东侵。

1.2.2 模型输入数据

河套地区涵盖 7 个市县，分别为临河市、磴口县、杭锦后旗、五原县、乌拉特前旗、乌拉特中旗和乌拉特后旗。气象数据资料来自河套灌区管理局监测站点及国家气象局网站共享数据，包括 2009—2018 年 7 个气象站点（乌拉特中旗、五原、磴口、杭锦后旗、临河、乌拉

特前旗与乌拉特后旗）的日降雨、最高与最低气温、平均气温、平均风速、相对湿度、日照时数等。研究区 DEM 信息采用美国国家航空航天最新发布的 2009 年的全球 DEM 数据，数据采样精度为 30 m，海拔精度为 7~14 m。土壤分布信息采用南京土壤所公布的全国土壤分布图，主要土壤类型为盐土（43.3%）、盐化灌淤土（28.3%）和潮灌淤土（15.9%）。考虑到整个含水层的水文地质条件和水力特性，模型分为 2 层，第一层厚度变化不大（设置平均厚度 7.4 m），第二层厚度 20~300 m，含水层自东向西，自南向北逐渐增加，总体规律是由东南向西北变厚。浅层地下水采用平面二维数值方法进行模拟计算。除山前区域外，灌区大部分区域的给水度较小，位于 0.02~0.05 之间。灌区社会经济用水数据根据巴彦淖尔市水资源公报、水资源综合规划等整理得到。

土地利用数据来自巴彦淖尔市自然资源局提供的 2009 年与 2017 年土地利用图，包括耕地（水浇地与旱田）、水域（乌梁素海、海子、水库、坑塘、乌海滩涂、排水渠系、引水渠系）、林地（果园、其他园地、有林地、灌木林地、其他林地）、草地（天然牧草地、人工牧草地、其他草地）、居工地（铁路用地、公路用地、农村道路、水工建筑用地、设施农用地、城市、建制镇、村庄、采矿用地、风景名胜及特殊用地）、未利用地（田坎、沙地、盐碱地与裸土地）等共 32 种类型。土地利用空间分布图见图 2，各部分土地利用面积见表 1。其中耕地覆盖面积最大，占地区总面积的 58.34%；其次为

未利用地、草地、居工地、水域、林地, 分别占地区总面积的 14.00%、8.58%、8.40%, 7.72%与 2.98%。

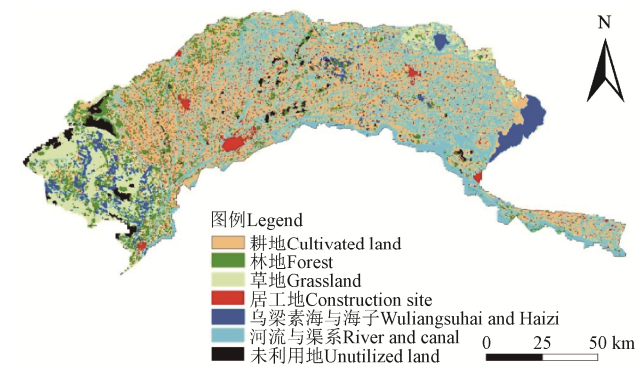


图 2 研究区土地利用图

Fig.2 Land use map of the study region

表 1 2017 年研究区土地利用面积

Table 1 Land use area in the study region in 2017

类型 (一类)	土地类型编号	土地类型 (二类)	面积	面积占比
Land type (Type 1)	Land type label	Land type (Type 2)	Area/km ²	Area ratio/%
耕地	012	水浇地	6 490.63	58.03
	013	旱地	34.28	0.31
林地	021	果园	20.84	0.19
	023	其他园地	26.86	0.24
	031	有林地	103.72	0.93
	032	灌木林地	114.93	1.03
	033	其他林地	66.84	0.60
草地	041	天然牧草地	660.69	5.91
	042	人工牧草地	8.27	0.07
	043	其他草地	290.70	2.60
水域	112	乌梁素海	293.00	2.62
		海子	48.54	0.43
	113	水库水面	1.09	0.01
	114	坑塘水面	51.57	0.46
	116	乌海滩涂	83.05	0.74
	117	引水渠系	276.13	2.47
未利用地		排水渠系	110.45	1.0
	123	田坎	0.04	0.00
	124	盐碱地	1 202.45	10.70
	126	沙地	365.88	3.30
	127	裸地	0.93	0.00
居工地及其他用地	101	铁路用地	12.38	0.10
	102	公路用地	59.35	0.50
	104	农村道路	7.42	0.10
	118	水工建筑用地	9.28	0.10
	122	设施农用地	55.95	0.50
	201	城市	51.82	0.50
	202	建制镇	117.38	1.00
	203	村庄	557.51	5.00
	204	采矿用地	34.36	0.30
	205	风景名胜及特殊用地	29.46	0.30
合计 Total			11 185.80	100.00

1. 2. 3 研究区计算单元划分

计算单元空间划分需兼顾子流域、行政区划、灌区

范围等特征信息。首先, 依据河套地区所在的黄河流域水资源三级分区范围与河套地区行政区划范围确定研究区外边界, 这也是提取 DEM、土地利用与土壤等信息的边界; 其次, 根据河套地区现状灌溉范围和 DEM 分布特征, 考虑与河套地区具有显著水力联系的毗陵区域确定研究区内山区与平原区边界范围, 然后对山区按照子流域汇流特征划分计算单元, 平原区则考虑引排水渠系分布特征进行单元划分。

模拟山区水循环过程主要是为了给平原区单元提供地表汇流和山前侧渗补给的边界信息。因此, 在山区单元计算中, 主要依据山区 DEM 信息对其汇水单元进行划分和提取, 得到 40 个计算单元。根据河套灌区总干渠、干渠、分干渠和支渠分布情况, 以末级渠段对应的灌溉范围为依据, 同时兼顾行政区范围, 划分引水灌域单元共 354 个。根据灌区总干沟、干沟、支沟和分支沟的分布, 以末级排水沟对应的排水范围为依据, 同时兼顾行政区范围, 划分排水域单元共 421 个。为便于地下水数值模拟计算, 将平原区 1 km×1 km 正方形栅格进行划分, 得到 11 779 个计算单元, 见图 3。

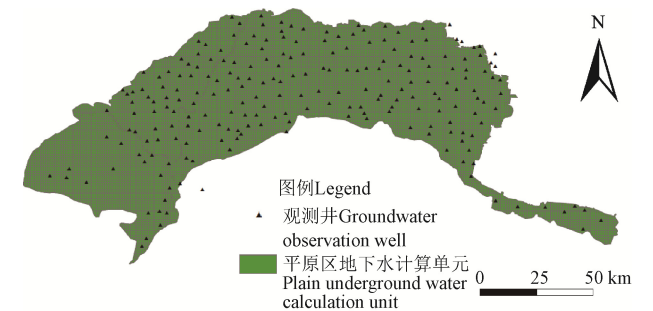


图 3 河套地区地下水计算单元

Fig.3 Groundwater calculation units in Hetiao region

将划分的栅格单元与上一步得到的引排水单元进行空间叠加, 建立栅格单元与引排水单元的拓扑关系, 即明确了每个栅格单元所在的引水域、排水域及行政区, 便于模型进行信息输入和统计输出。将山区和平原区划分的单元进行合并, 即得到模拟计算所需的单元共计 11 819 个, 见图 4。根据确定的计算单元, 对土地利用、土壤信息、水文地质参数等按照单元范围进行提取, 得到每个单元各种土地利用类型、土壤类型的分布面积与水文地质参数分区值。

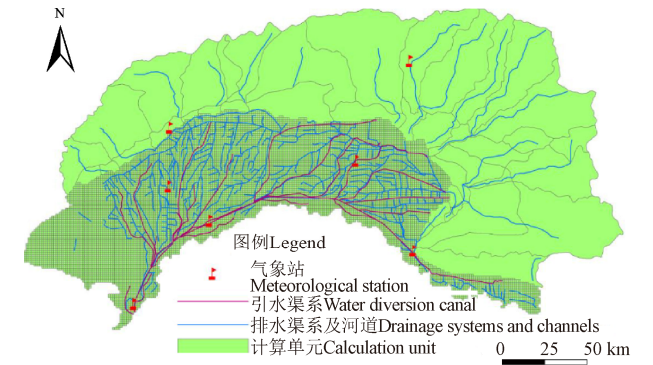


图 4 研究区总的计算单元

Fig.4 Total calculation unit in study region

1.2.4 参数率定和模型验证

本文所构建的分布式水循环 WACM4.0 模型, 模拟时间 2009—2018 年, 其中 2009—2014 为参数率定期, 2015—2018 年模型验证期。通过对比分析逐月水面蒸发、灌区排水过程、地下水实测值与模拟值验证模型。

1) 水面蒸发验证

将研究区各县监测的水面蒸发资料(2009—2018 年)与模拟结果进行对比, 结果见表 2。相对误差均在 11%以内, 相关系数在 0.85 以上, 纳什效率系数在 0.82 以上, 模拟值与观测值一致性较好。

表 2 各县区水面蒸发量的率定与验证

Table 2 Calibration and verification of water surface evaporation in various district and county

项目 Item	磴口 Dengkou	杭锦后旗 Hangjin Houqi	临河 Linhe	五原 Wuyuan	乌拉特前旗 Wulate Qianqi
相对误差 Relative error/%					
率定期 Calibration period	1.0	1.5	1.2	-0.5	3.6
验证期 Validation period	5.5	5.9	10.4	9.9	4.5
相关系数 Correlation coefficient					
率定期 Calibration period	0.951 2	0.952 3	0.863 4	0.967 8	0.934 5
验证期 Validation period	0.960 1	0.942 3	0.945 6	0.958 9	0.921 2
纳什系数 Nash coefficient					
率定期 Calibration period	0.889	0.854	0.943	0.920	0.911
验证期 Validation period	0.867	0.901	0.953	0.912	0.887

2) 灌区排水过程

将灌区 22 条主要排水干沟及总排干 4 个控制断面 2009—2018 年长系列月流量数据与模型结果进行对比。结果见表 3。相对误差均在 20%以内, 相关系数在 0.86 以上, 纳什效率系数在 0.72 以上, 模拟值与观测值一致性较好。

表 3 排水过程率定与验证

Table 3 Calibration and verification of drainage process

排水沟 Drainage trench	相对误差 Relative error/%		相关系数 Correlation coefficient		纳什系数 Nash coefficient	
	率定期 Calibration period	验证期 Validation period	率定期 Calibration period	验证期 Validation period	率定期 Calibration period	验证期 Validation period
一排干	-3.9	5.5	0.875	0.888	0.756	0.823
二排干	-1.2	6.2	0.912	0.922	0.856	0.989
三排干	-8.2	-6.2	0.930	0.912	0.854	0.832
四排干	-11.2	-4.2	0.945	0.831	0.871	0.832
五排干	-10.2	4.2	0.943	0.912	0.886	0.812
六排干	4.3	4.5	0.940	0.901	0.867	0.857
皂沙	7.8	3.2	0.885	0.815	0.779	0.759
七排干	12.5	15.2	0.923	0.901	0.720	0.702
义通干渠	11.9	4.2	0.913	0.899	0.812	0.799
总排红圪卜	9.7	6.2	0.947	0.921	0.901	0.866
八排干	6.9	9.9	0.934	0.901	0.880	0.839
九排干	11.2	12.2	0.954	0.912	0.899	0.843
新安	10.0	6.9	0.940	0.924	0.821	0.812
十排干	11.6	15.6	0.935	0.912	0.934	0.900

3) 地下水验证

将河套地区 224 眼浅层地下水观测井 2009—2018 年逐月埋深序列资料与模型输出的地下水模拟结果进行对比, 其中 2018 年地下水埋深模拟值与实测值的空间分布对比结果见图 5, 可以看出, 模拟结果中地下水漏斗区存在位置与观测值存在位置一致, 模拟的地下水埋深空间变化与观测结果一致性很好。本文所构建的 WACM4.0 模型率定和验证状况良好。



注: 图中数据为地下水埋深, m。

Note: The data in figure is the groundwater depth, m.

图 5 2018 年地下水埋深空间变化模拟与观测结果对比

Fig.5 Comparisons of simulation and observation results of groundwater depth spatial change in 2018

2 结果与分析

2.1 “湖”水分通量特征

“湖”主要包括乌梁素海、乌海滩涂与海子。

2.1.1 乌梁素海

根据 WACM4.0 模型模拟结果, 乌梁素海水分输入项为入乌水量与降雨。因排水渠道的水几乎都排到乌梁素海内, 由乌梁素海的乌毛计退水闸排水至黄河, 故乌海水分来源大部分为排水入乌水量, 占水分总输入量的 95% (包括三部分: 生态补水量、农田退水量与山洪水), 降雨量仅占水分总输入量的 5%。乌梁素海水分输出项为排水入黄与蒸发, 排水入黄量 4.53 亿 m^3 , 蒸发量 3.80 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 52%、48%。乌梁素海水

循环特征以引水—排水的横向运动为主。

图 6a 为 2009—2018 年乌梁素海水分通量变化特征, 随着引黄水量的减少, 农田退水量减少, 近几年生态补水量增多, 排水入黄量也随之上升, 尤其是 2018 年, 生态补水量高达 6.50 亿 m^3 , 排水入黄量明显增多。

2.1.2 乌海滩涂

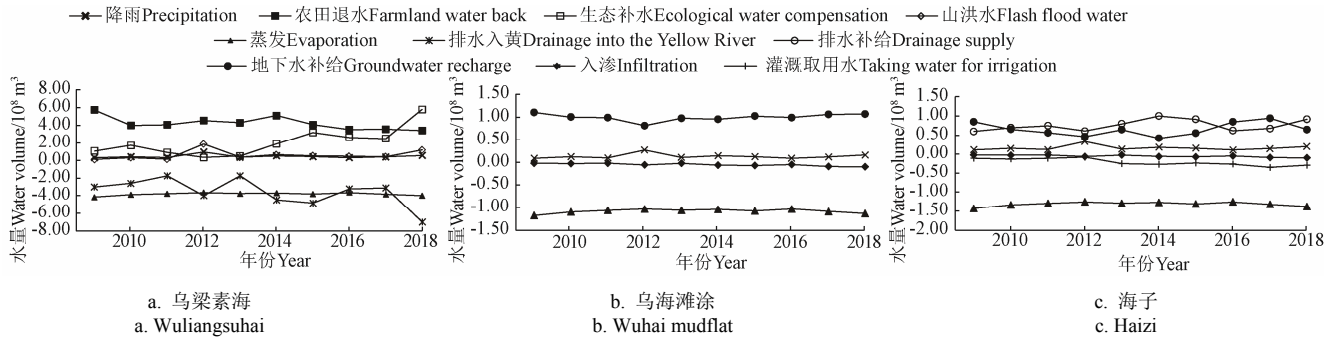
2009—2018 年乌海滩涂水分通量特征见图 6b, 乌海滩涂水分输入项为降雨与地下水补给, 10a 平均降雨量 0.13 亿 m^3 , 地下水补给量 1.00 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 12%和 88%。水分输出项包括蒸发量 1.08 亿 m^3 , 入渗量 0.05 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 95.5%和 4.5%。乌海滩涂水循环特征以地下水补给—蒸发的垂向运动为主。地下水补给量呈先降后升趋势, 降雨量、蒸发量受

当地气候与乌海滩涂面积影响, 呈波动式变化。

2.1.3 海子

2009—2018 年海子水分通量特征见图 6c。当地降雨稀少, 海子主要依靠排水补给与地下水补给。排水补给量与地下水补给量分别占水分总输入量的 48%和 42%。水分输出包括蒸发量 1.32 亿 m^3 、灌溉取用水量

0.21 亿 m^3 、入渗量 0.05 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 83%、3%和 13%。海子水循环以垂向与横向综合运动特征为主。排水补给整体呈先升后降趋势, 地下水补给呈先降后升趋势。蒸发为海子水分输出的主要方式, 呈先降后升趋势。随引黄水量的减少, 灌溉取用水量逐年增加。



注: 正值表示水分输入, 负值表示水分输出。下同。

Note: Positive value represents the water input, negative value represents the water output. The same below.

图 6 2009—2018 年“湖”水分通量特征

Fig.6 Characteristics of water flux in “Lake” from 2009 to 2018

2.2 “林”“田”“草”水分通量特征

“林”主要指人工林。2009—2018 年人工林水分通量特征见图 7a, 人工林水分输入项为降雨、潜水蒸发, 10a 平均降雨量 0.91 亿 m^3 , 潜水蒸发量 0.5 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 65%和 35%。水分输出项包括蒸散量 1.33 亿 m^3 、地表产流量 0.04 亿 m^3 、入渗量 0.04 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 94%、3%和 3%。人工林水循环特征为降雨—入渗—潜水蒸发的垂向运动。受地下水位影响, 潜水蒸发整体呈减少趋势。地表产流与下渗量变化不大。

2009—2018 年耕地水分通量特征见图 7b。耕地水分输入项为降雨、黄河水经引水渠道进入田间的灌溉水量、潜水蒸发, 10a 平均降雨量 10.57 亿 m^3 , 灌溉水量 23.19 亿 m^3 , 潜水蒸发量 22.61 亿 m^3 。分别占输入水量的 19%、41%和 40%。水分输出包括蒸发量 43.72 亿 m^3 、农田排水

量 6.48 亿 m^3 、入渗量 5.75 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 78%、10%和 12%。耕地水循环特征为灌溉水入渗—蒸散发的垂向运动。随着引黄水量的减少, 灌溉水量整体呈减少趋势, 潜水蒸发受地下水位影响整体呈下降趋势。受当地气候因素与耕地面积影响, 降雨量整体呈略微上升趋势, 蒸散量整体呈略微下降趋势。

2009—2018 年草地水分通量特征见图 7c。草地水分输入项为降雨、潜水蒸发, 10a 平均降雨量 1.49 亿 m^3 , 潜水蒸发量 1.21 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 56%和 44%。水分输出包括蒸发量 2.0 亿 m^3 、地表产流量 0.20 亿 m^3 、入渗量 0.62 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 71%、7%和 22%。草地的水循环特征为降雨—入渗—潜水蒸发的垂向运动。潜水蒸发呈逐年减少趋势, 水分消耗以蒸散发为主。下渗量与产流量变化不大。

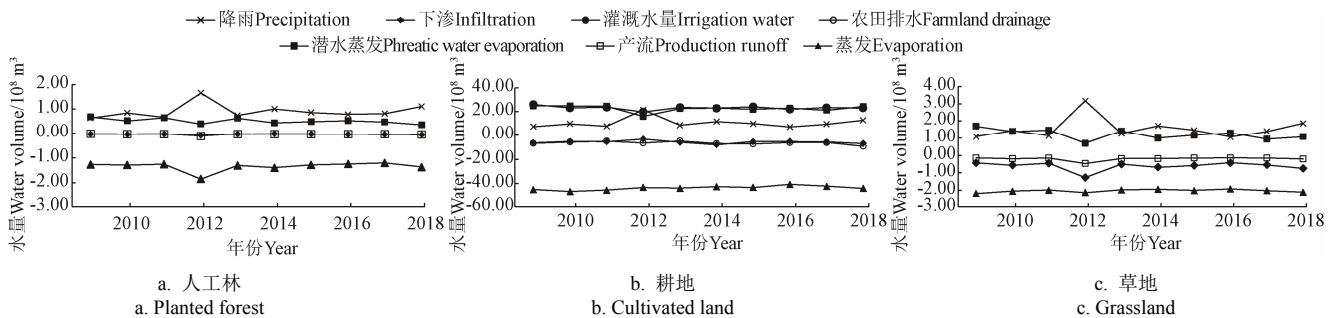


图 7 2009—2018 年“林、田、草”水分通量特征

Fig.7 Characteristics of water flux in “planted forest, cultivated land, grassland” from 2009 to 2018

2.3 “水”水分通量特征

引水渠道 2009—2018 年水分通量特征见图 8a。引水渠道水分输入项包括降雨量 0.45 亿 m^3 , 潜水蒸发量 0.01 亿 m^3 , 引黄水量 45.31 亿 m^3 , 引地表水量 0.21 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 1.0%、98.5%、0.5%和 0.04%。水分输出包括田间水量 22.98 亿 m^3 、渗漏量 19.41 亿 m^3 、蒸

发量 3.62 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 50%、42%和 8%。引黄水量呈逐年下降趋势, 由 2009 年的 51 亿 m^3 下降到 2018 年的 45 亿 m^3 。

排水渠道 2009—2018 年水分通量变化特征图 8b。水分输入项包括降雨量 0.18 亿 m^3 , 地表产流与排水量 6.42 亿 m^3 , 地下水补给量 3.55 亿 m^3 , 工业生活排水量

0.26 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 2%、62%、34%和 3%。水分输出项包括排出水量 3.64 亿 m^3 , 蒸发量 1.43 亿 m^3 , 补给湖泊量 0.74 亿 m^3 , 渗漏量 4.97 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 31%、14%、7%和 48%。随着工业快速发展与人口增多, 工业生活排水量呈上升趋势, 因引黄水量的减少, 地表产流与排水量整体呈下降趋势。

2.4 未利用地与居工地水分通量特征

2.4.1 未利用地

未利用地 2009—2018 年水分通量变化见图 9a。水分输入包括降雨量 2.54 亿 m^3 , 潜水蒸发量 1.51 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 63%和 37%。水分输出包括蒸发量 2.97 亿 m^3 , 地表产流量 0.013 亿 m^3 , 入渗量 1.06 亿 m^3 , 分别占水分输出量的 73.3%、0.3%和 26.4%。未利用地水循环特征为降雨-入渗-潜水蒸发的垂向运动。潜水蒸发呈逐年减少趋势, 下渗量与产流量变化不大。

2.4.2 居工地

居工地 2009—2018 年水分通量变化特征见图 9b。水分输入项包括降雨量 1.51 亿 m^3 , 潜水蒸发量 2.51 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 37%和 63%。输出水量包括产流量 1.769 亿 m^3 , 取用地下水量 1.56 亿 m^3 , 蒸散量 0.44 亿 m^3 , 入渗量 0.29 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 43%、39%、11%和 7%。居工地的水循环特征以降雨—入渗—潜水蒸发的垂向运动为主。潜水蒸发呈逐年减少趋势, 下渗量与产流量变化不大。

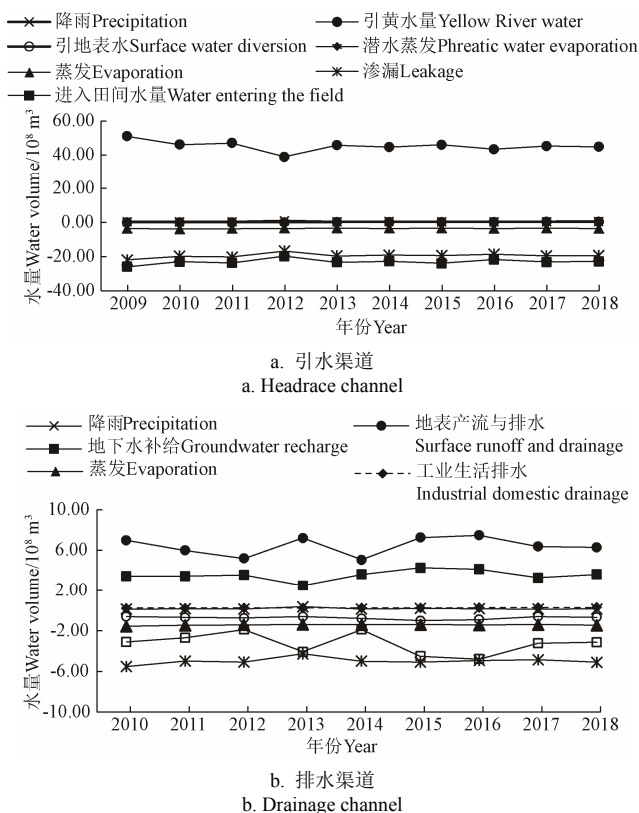


图 8 2009—2018 年“水”的水分通量特征

Fig.8 Characteristics of water flux in “water” from 2009 to 2018

2.5 地下水均衡特征

浅层地下水均衡特征见图 10。水分总输入量 31.89 亿 m^3 , 包括渠系入渗量 24.38 亿 m^3 、土壤入渗补给量 5.75 亿 m^3 、

山前侧渗补给量 1.73 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 77%、18%、5%。总排泄量 33.17 亿 m^3 , 包括潜水蒸发量 20.89 亿 m^3 、农田灌溉开采量 4.67 亿 m^3 、补给渠道量 3.55 亿 m^3 、补给河湖湿地量 1.66 亿 m^3 、地工业生活开采量 1.66 亿 m^3 、地下水深层渗漏量 0.85 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 63.0%、14%、11%、5%、5%与 3%。水分总输入量较总排泄量少 1.3 亿 m^3 , 意味着河套地区每年地下水储存量减少 (亏损量) 1.3 亿 m^3 , 可以称这种水循环过程为“负水平衡”垂向水循环。

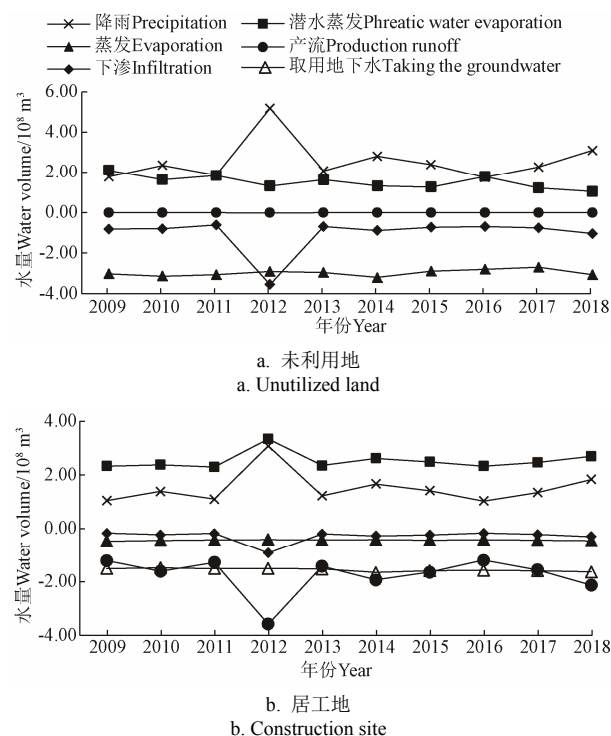


图 9 2009—2018 年未利用地与居工地水分通量特征

Fig.9 Characteristics of water flux in unutilized land and construction site from 2009 to 2018

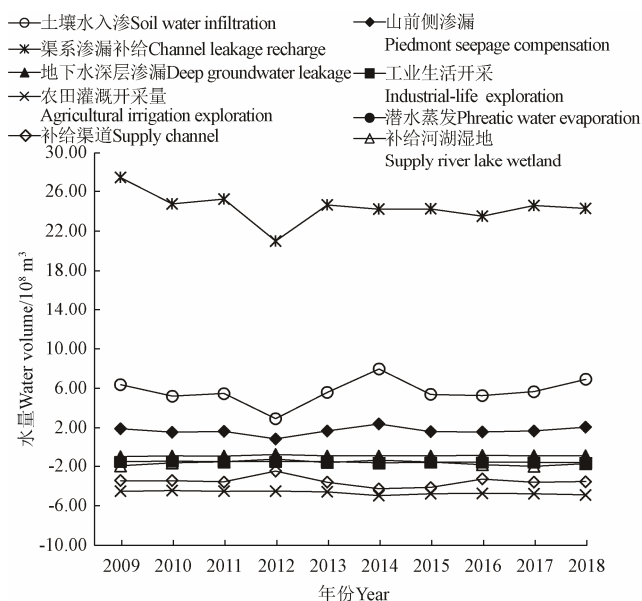


图 10 2009—2018 年地下水均衡

Fig.10 Groundwater equilibrium from 2009 to 2018

2008—2009 年渠道渗漏补给量因引黄水量的下降

整体呈下降趋势, 土壤水入渗量呈先降后升再降趋势, 山前侧渗漏补给与黄河侧渗漏补给量变化很小。潜水蒸发整体呈逐年下降趋势。工业生活开采与农田灌溉开采量呈逐年上升趋势。地下水深层渗漏、补给河湖湿地与补给渠道排泄量整体变化不大。地下水亏损量逐年增加, 2018 年有所减缓, 是由于其生态补水明显增加。

2.6 灌区水分通量特征

灌区水分输入项包括降雨量 18.39 亿 m^3 、引黄河水量 45.31 亿 m^3 、山前及黄河侧渗漏补给量 3.23 亿 m^3 , 分别占水分总输入量的 27%、68% 和 5%, 水分输出包括蒸发量 62.01 亿 m^3 、排水量 4.92 亿 m^3 , 分别占水分总输出量的 93% 与 7%。

图 11 为灌区 2009—2018 年不同年份水量平衡结果, 受大气环流与云量的影响, 降雨量整体呈先降后升的波动式变化趋势, 引黄水量整体呈下降趋势, 排水量呈波动式变化。受气温、日照时数、风速与相对湿度及太阳辐射的影响, 蒸发呈波动式变化, 整体呈下降趋势。山前侧渗漏补给量主要受降雨影响, 整体呈下降后升的波动式变化趋势。

2.7 灌区水分运动过程

解决水问题的关键在于将水循环的各个环节联成整体、厘清区域水分运动过程。河套地区水分运动过程 (见图 12): 2009—2018 年 10 年平均引黄灌溉水量 45.31 亿 m^3 , 先经过引水渠道进入田间, 产生渗漏量 19.41 亿 m^3 到达地下水层。进入田间的水量经过农田

蒸散发 (43.72 亿 m^3)、下渗 (5.75 亿 m^3 , 包括降雨在内) 剩余的水量进入排水渠道 (6.48 亿 m^3)。排水渠道的水量经过渗漏 (4.98 亿 m^3)、补给海子 (0.76 亿 m^3) 与蒸发 (1.45 亿 m^3) 后排到乌梁素海 (7.84 亿 m^3 , 也包括农田退水、生态补水与山洪水)。进入乌梁素海的水量经过水面蒸发 (3.80 亿 m^3 , 包括降雨在内) 后经乌毛计退水闸排水入黄 (4.53 亿 m^3 , 包括降雨在内)。经过引水渠道、耕地与排水渠道下渗到地下水的水量 (地下水补给的主要来源) 补给乌海滩涂 (1.00 亿 m^3)、海子 (0.66 亿 m^3), 另一部分水量经过人工林 (0.51 亿 m^3)、耕地 (23.19 亿 m^3)、草地 (1.21 亿 m^3)、未利用地 (1.506 亿 m^3) 与居工地 (2.53 亿 m^3) 潜水蒸发消耗。

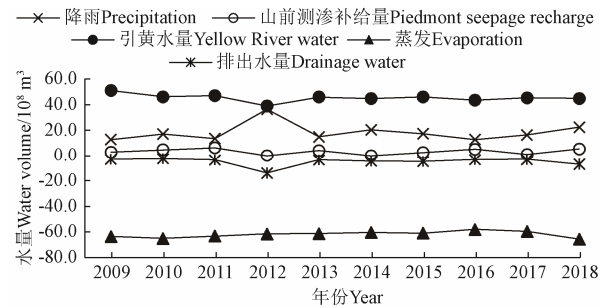
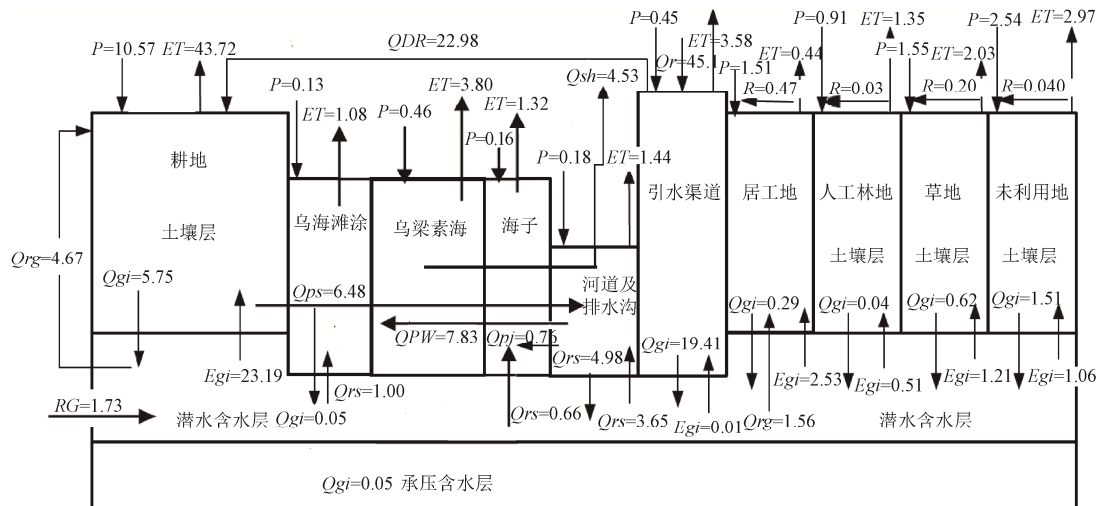


图 11 河套地区 2009—2018 年水分通量特征

Fig.11 Characteristics of water flux in Hetao region from 2009 to 2018



注: P 表示降雨, 10^8 m^3 , ET 表示蒸散发, 10^8 m^3 , R 表示径流量, 10^8 m^3 , Qgi 为下渗量, 10^8 m^3 , Egi 为潜水蒸发, 10^8 m^3 , Qrg 取用地下水, 10^8 m^3 , QR 引黄水量, 10^8 m^3 , QDR 进入田间水量, 10^8 m^3 , RG 山前侧渗漏补给, 10^8 m^3 , Qrs 地下水补给, 10^8 m^3 , Qps 农田排水量, 10^8 m^3 , Qsh 排水入黄, 10^8 m^3 , Qpw 排水入乌, 10^8 m^3 , Qpj 排水补给, 10^8 m^3 。

Notes: P indicates precipitation, 10^8 m^3 , ET indicates evapotranspiration, 10^8 m^3 , R indicates runoff, 10^8 m^3 , Qgi is infiltration, 10^8 m^3 , Egi is phreatic water evaporation, 10^8 m^3 , Qrg is taking from groundwater, 10^8 m^3 , QR is Yellow River water, 10^8 m^3 , QDR is water entering the field, 10^8 m^3 , RG is piedmont seepage compensation, 10^8 m^3 , Qrs is groundwater recharge, 10^8 m^3 , Qps is farmland drainage, 10^8 m^3 , Qsh is drainage into the Yellow River, 10^8 m^3 , Qpw is drainage into the Wuliangsu Hai, 10^8 m^3 , Qpj is drainage supply, 10^8 m^3 。

图 12 山水林田湖草各系统水循环过程

Fig.12 Hydrological cycle of mountain—water—forest—cropland—lake—grass system

3 讨论

内蒙古河套地区属于典型的大陆性干旱气候, 年平均降雨量小于 200 mm (6—9 月雨量占全年的 70%~

80%), 年平均蒸发量 $1500 \sim 2000 \text{ mm}$ 。年径流深在 10 mm 以下, 径流系数小于 $0.05^{[28]}$, 这是河套地区天然水循环状况。目前河套地区通过引水渠道人工引导部分黄河水加入到区域内的水分运动过程中, 最终通过排水

渠道将多余水分回置到区域外水体的天然水循环中, 引水灌溉改变了该地区水循环规律, 呈现明显的人工复合水循环特征。除了在灌溉引水排水工程系统内的增强外, 人类活动对水循环的影响还表现为水平径流输出减弱, 垂向蒸散发、下渗输出的增加^[34]。目前河套地区内山水林田湖草系统的水循环以灌溉(降雨)一下渗—蒸发垂向水循环为主。其中耕地以灌溉水垂向入渗—植物蒸散发消耗的垂向运动为主, 与郝芳化等^[34]研究结论一致; 海子以地下水补给—蒸发消耗的垂向运动为主, 与王国帅等^[35]研究结果一致; 人工林、草地、未利用地与居工地以降雨—潜在蒸发—蒸发消耗的垂向运动为主。因引黄水量的减少, 区域多年平均灌溉水与降雨总入渗补给不能满足区域地下水的总消耗, 区域地下水埋深呈逐年下降趋势, 地下水逐年亏损, 与郝芳化等^[34]研究结论一致。本文研究结果可靠, 可为山-水-林-田-湖-草系统水资源分析提供重要参考。

河套灌区引水灌溉过程中大量的黄河水消耗于蒸发和作物蒸腾作用, 使黄河径流量减少。2009—2018 年每年致使黄河径流量平均每年减少约 42.00 亿 m^3 , 其中耕地耗黄水量最大, 为 30.02 亿 m^3 , 占总耗黄水量的 71.48%, 其次引水渠道 (3.09 亿 m^3)、乌梁素海 (2.89 亿 m^3)、排水渠道 (1.25 亿 m^3)、海子 (1.16 亿 m^3)。可见, 接近 82% 左右的黄河水消耗于农业引水灌溉过程, 仅 18% 左右的黄河水通过排水进入乌梁素海、通过渠道渗漏与土壤水下渗进入地下水, 再补给海子、林草地与荒地等的水分消耗, 可称为生态耗水量。这部分水量对维持河套地区的生态环境需水至关重要。

本研究深入开展了河套灌区山水林田湖草系统的水循环演变特征与规律研究。但未涉及山水林田湖草系统适宜水量的计算, 该地区适宜水量影响因素众多, 如气象条件、地下水位、水盐平衡、节水措施、乌梁素海水质要求或生态保护目标等等都会对各土地利用类型的适宜水量产生影响, 亟需进一步深入系统研究。

4 结 论

本文从山-水-林-田-湖-草各系统水量消耗过程入手, 构建了适用于强人类活动地区的分布式水循环模型 WACM4.0, 通过对比逐月水面蒸发量、灌区排水过程、地下水位实测值与模拟值验证模型, 模拟值与观测值一致性很好, 可应用到河套地区。

1) 河套地区水量输入以引黄河水 (68%) 为主, 水分输出以蒸发 (93%) 为主, 山水林田湖草系统的水循环特征以灌溉(降雨)一下渗—蒸发垂向水循环为主。乌梁素海水循环以引水—排水的横向运动特征为主。乌海涂水循环以地下水补给—蒸发的横向运动特征为主。海子水循环以垂向与横向综合运动特征为主。耕地水循环特征为灌溉水入渗—植物蒸散发的垂向运动。人工林、草地、未利用地与居工地的水循环特征为降雨—入渗—潜水蒸发的垂向运动。引水渠道、排水渠道水循环特征为引水—排水的横向运动。

2) 河套地区引水灌溉平均每年致使黄河径流量减少

约 42.00 亿 m^3 。其中耕地耗黄水量 30.02 亿 m^3 , 占总耗黄水量的 71.48%, 其次为引排水渠道, 耗黄水量 3.09 亿 m^3 , 乌梁素海耗黄水量 2.89 亿 m^3 。

3) 河套地区水分运动过程: 黄河水经过引水渠道进入田间, 土壤水入渗到地下水层, 剩余的水量进入排水渠道, 引排水过程的渗漏量补给地下水, 再通过地下水运动补给海子、乌海涂, 另一部分水量经过人工林、耕地、草地、未利用地与居工地的潜水蒸发消耗。排水渠道排水到乌梁素海, 经过水面蒸发经乌毛计退水闸排水入黄。因引黄水量的减少, 河套地区地下水埋深呈逐年下降趋势, 地下水逐年亏损, 地下水循环过程为“负水平衡”垂向运动特征。

【参 考 文 献】

- [1] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47 (10): 1219-1226.
Wang Hao, Jia Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (10): 1219-1226. (in Chinese with English abstract)
- [2] Taylor R G, Scanlon B, Döll P, et al. Ground water and climate change[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(4): 322-329.
- [3] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [4] Wang Y, Jia B, Xie Z. Impacts of hydraulic redistribution on eco-hydrological cycles: A case study over the Amazon Basin[J]. Science in China (Series D), 2018, 61(9): 1330-1340.
- [5] Xie Z, Di Z, Luo Z, et al. A quasithree-dimensional variably saturated groundwater flow model for climate modeling[J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(1): 27-46.
- [6] 王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1168-1175.
Wang Hao, You Jinjun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1168-1175. (in Chinese with English abstract)
- [7] Gleeson T, Moosdorf N, Hartmann J, et al. A glimpse beneath Earth's surface: Global Hydrogeology MaPS (GLHYMPS) of permeability and porosity[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(11): 3891-3898.
- [8] Wang Y, Ding Y, Ye B, et al. Causes of water resources change in the Yellow River and Yangtze River Basins[J]. Science in China(Series D), 2013, 43(7): 1207-1219.
- [9] Tang Q, Oki T, Kanae S, et al. A spatial analysis of hydro-climatic and vegetation condition trends in the Yellow River Basin[J]. Hydrological Processes: An International Journal, 2008, 22(3): 451-458.
- [10] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] Zhang Q, Xu C, Jiang T. et al. Possible influence of ENSO on annual maximum stream flow of the Yangtze River, China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2): 265-274.
- [12] 谢正辉, 陈思, 秦佩华, 等. 人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响研究: 进展与挑战[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 801-813.
Xie Zhenghui, Chen Si, Qin Peihua, et al. Research on

- climate feedback of human water use and its impact on terrestrial water cycles: Advances and challenges[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(8): 801-813. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈宜瑜. 全球变化与社会可持续发展[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 1-3.
Chen Yiyu. Global change and sustainable social development[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(1): 1-3. (in Chinese with English abstract)
- [14] Vorosmarty C, Lettenmaier D, Leveque C, et al. Humans transforming the global water system[J]. *EOS*, 2004, 85(48): 1-4.
- [15] 刘正茂, 夏广亮, 吕宪国, 等. 近 50 年来三江平原水循环过程对人类活动和气候变化的响应[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(1): 68-74.
Liu Zhengmao, Xia Guangliang, Lv Xianguo, et al. Response of water cycle processes in Sanjiang Plain to human activities and climate change in recent 50 Years[J]. *South-To-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(1): 68-74. (in Chinese with English abstract)
- [16] 袁艺, 史培军, 刘颖慧, 等. 土地利用变化对城市洪涝灾害的影响[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 6-13.
Yuan Yi, Shi Peijun, Liu Yinghui, et al. Impact of land use change on urban flood disaster[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 6-13. (in Chinese with English abstract)
- [17] Zou J, Xie Z, Yu Y, et al. Climatic responses to anthropogenic groundwater exploitation: A case study of the Haihe River Basin, Northern China[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(7/8): 2125-2145.
- [18] Bronstert A, Daniel N, Gerd B. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modeling capabilities[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(2): 509-529.
- [19] 王波, 王夏晖, 张笑千. “山水林田湖草生命共同体”的内涵、特征与实践路径: 以承德市为例[J]. *环境保护*, 2018, 46(7): 60-63.
Wang Bo, Wang Xiahui, Zhang Xiaoqian. Connotations, characteristics and practice paths about the idea of taking our mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands as a life community based on Chengde city in Hebei province[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46(7): 60-63. (in Chinese with English abstract)
- [20] 成金华, 尤喆. “山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(2): 1-6.
Cheng Jinhua, You Zhe. Scientific connotation and practical paths about the principle of “taking mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands as a life community”[J]. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2019, 29(2): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李达净, 张时煌, 刘兵, 等. “山水林田湖草一人”生命共同体的内涵、问题与创新[J]. *中国农业资源与区域*, 2018, 39(11): 1-5, 93.
Li Dajing, Zhang Shihuang, Liu Bing, et al. The connotation, problems and innovation of life community of mountains, rivers, forests, farmland, lakes, grasses and human[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(11): 1-5, 93. (in Chinese with English abstract)
- [22] 吴浓娣, 吴强, 刘定. 系统治理: 坚持山水林田湖草是一个生命共同体[J]. *水利发展研究*, 2018 (9): 25-32.
Wu Nongdi, Wu Qiang, Liu Ding. System management: Insist that the landscape, forest, land, lake and grass is a community of life[J]. *Water Resources Development Research*, 2018 (9): 25-32. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李红举, 宇振荣, 梁军, 等. 统一山水林田湖草生态保护修复标准体系研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8771-8779.
Li Hongju, Yu Zhenrong, Liang Jun, et al. Study on the unified standard system of ecological protection and rehabilitation of mountain-river-forest-farmland-lake-grass[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8771-8779. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王振波, 李嘉欣, 郭义强, 等. 青藏高原山水林田湖草生态保护修复模式: 以拉萨河流域为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8966-8974.
Wang Zhenbo, Li Jiaxin, Guo Yiqiang, et al. Ecological protection and restoration model of multi-ecological elements in Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Lhasa River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8966-8974. (in Chinese with English abstract)
- [25] 田野, 冯启源, 唐明方, 等. 基于生态系统评价的山水林田湖草生态保护与修复体系构建研究: 以乌梁素海流域为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8826-8836.
Tian Ye, Feng Qiyuan, Tang Mingfang, et al. Ecological protection and restoration of forest, wetland, grassland and cropland based on the perspective of ecosystem assessment: A case study in Wuliangsu Hai Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8826-8836. (in Chinese with English abstract)
- [26] 宋伟, 韩贇, 刘琳. 山水林田湖草生态问题系统诊断与保护修复综合分区研究: 以陕西省为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8975-8989.
Song Wei, Han Ze, Liu Lin. Systematic diagnosis of ecological problems and comprehensive zoning of ecological conservation and restoration for an integrated ecosystem of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in Shanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8975-8989. (in Chinese with English abstract)
- [27] 邵雅琪, 王春丽, 肖玲, 等. 妫水河流域山水林田湖草空间格局与生态过程分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 7893-7903.
Shao Yaqi, Wang Chunli, Xiao Ling, et al. The spatial pattern of mountain-water-forest-cropland-lake-grass system and its ecological process in the Guishui River Basin[J]. *Acta Ecologica sinica*, 2019, 39(21): 7893-7903. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张银辉, 罗毅. 基于分布式水文学模型的内蒙古河套灌区水循环特征研究[J]. *资源科学*, 2009, 31(5): 53-61.
Zhang Yinhui, Luo Yi. Water cycle modeling in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia based on the Distributed DEHYDROS Model[J]. *Resources Science*, 2009, 31(5): 53-61. (in Chinese with English abstract)
- [29] 赵勇. 广义水资源合理配置研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2006.
Zhao Yong. Research on Rational Allocation of Generalized Water Resources[D]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [30] 毕彦杰. 变化环境下流域/区域水循环特征与规律研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
Bi Yanjie. Research on Basin/Region Hydrologic Cycle Feature and Laws in the Condition of Changing Environment[D]. Beijing:

- China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017.(in Chinese with English abstract)
- [31] 刘文琨. 水资源开发利用条件下流域水循环模型的研发及应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2014.
- Liu Wenkun. Research on Basin/Region Hydrologic Cycle Feature and Laws in the Condition of Changing Environment[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017.(in Chinese with English abstract)
- [32] 翟家齐. 流域水-氮-碳循环系统理论及其应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.
- Zhai Jiaqi. Study on the Theory and Application of Water-Nitrogen-Carbon Cycle System in the River Basin[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [33] 李刚. 内蒙古河套灌区节水对乌梁素海的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- Li Gang. Research on the Influence of Water Saving Irrigation on Wuliangsuhai Lake of Hetao Irrigation Area in Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [34] 郝芳华, 欧阳威, 岳勇, 等. 内蒙古农业灌区水循环特征及对土壤水运移影响的分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 825-831.
- Hao Fanghua, Ouyang Wei, Yue Yong, et al. Analysis of water cycle characteristics and soil water movement in the agricultural irrigation area in Inner Mongolia[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(5): 825-831. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子系统间不同类型水分运移转化[J/OL]. 水科学进展, 2020[2020-03-18]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20200521.1839.002.html>
- Wang Guoshuai, Shi Haibin, Li Xianye. Study on migration of different types water during farmland-waste land-lake system in Hetao Irrigation District[J]. Advances in Water Science, 2020[2020-03-18]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20200521.1839.002.html>. (in Chinese with English abstract)

Simulation of hydrological cycle for mountain-water-forest-cropland-lake-grass system in Hetao region, Inner Mongolia of China by WACM4.0 model

Bi Yanjie^{1,2}, Zhao Jing^{1*}, Zhang Wenge³, Zhao Yong²

(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Hetao region is an important production base of commodity grain and oil crops in China. The large-scale water transferred from outside the river in a long term has resulted in the most headraces and drainage system, covering many cultivated lands in this region. However, human activities have posed a great change on the original hydrological cycle and the natural environment. Some spatio-temporal features, and the process of water conversion and movement are extremely complicated, due to the variation of hydrological cycle elements. In this study, a Water Allocation and Cycle Model (WACM4.0) was constructed suitable for the regions with strong human activities based on the "natural-artificial" composite water cycle theory. The WACM4.0 model was applied to simulate the evolution law and characteristic of hydrological cycle of each mountain-water-forest-cropland-lake-grass system in Hetao region. The main findings are as follows: In the hydrological cycle process, 1) the Wuliangsuhai was mainly characterized by lateral movement of water diversion and drainage, 2) the Wuhai mudflat was the vertical movement of groundwater recharge-evaporation, 3) Haizi region was dominated by vertical and horizontal comprehensive movement characteristics, 4) the cultivated land was the vertical movement characteristics of irrigation water infiltration-evapotranspiration, 5) the planted forest, grassland, unutilized land, and construction sites were the vertical movement characteristics of rainfall-infiltration-phreatic water evaporation, 6) the drainage and channels were drainage water-lateral movement characteristics of drainage water, and 7) the overall system of mountain-water-forest-cropland-lake-grass was the vertical water cycle of irrigation (precipitation)-infiltration-evaporation. The amount of groundwater in Hetao region has been losing year by year, indicating the characteristic of "negative water balance" vertical movement in the circulation process. Specifically, the water from the Yellow River entered the cropland through water diversion channels, leading to the formation of soil water from irrigation water, and then infiltrated the groundwater aquifer, while the remaining water went into the drainage channels, indicating the amount of leakage in this process can be used to replenish groundwater. Two part of groundwater can be divided, one was used to replenish Haizi and Wuhai mudflat, and another part of water consumed away via phreatic water evaporation of artificial cultivated land, grassland, unutilized land, and construction site. The water in drainage channels entered Wuliangsuhai, with the loss water through surface evaporation, while the remained water discharged into the Yellow River through the Wumaoji escape gate. The average annual runoff of the Yellow River can be consumed away by approximately 4.2 billion m³ due to diversion irrigation in the Hetao region. The amount of the Yellow River water consumed by each system was as follows: the water consumption of cultivated land was 3.02 billion m³, the grassland was 114 million m³, the unutilized land was 65 million m³, Haizi region was 116 million m³, the Wuliangsuhai was 289 million m³, the Wuhai mudflat was 83 million m³, the planted forest was 91 million m³, the construction site was 0.09 million m³, the headrace channel was 309 million m³, and the drainage channel was 125 million m³. The research findings can provide a basic support for irrigation management, utilization of water resources, and ecological protection of mountain-water-forest-cropland-lake-grass system.

Keyword: hydrological cycle; water balance; WACM model; mountain-water-forest-cropland-lake-grass; Hetao region