

灌溉水文学及其研究进展

代俊峰, 崔远来

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 由于灌区下垫面性质的空间变异性和人类活动对水分循环的影响, 灌区呈现出与自然流域不同的水文特征。在不同尺度水文特征的研究中, 人们注意到灌溉排水与水文学的联系, 并提出了灌溉水文学的概念。近年来, 灌溉对灌区水文的影响及节水灌溉的尺度效应等研究, 逐渐丰富了灌溉水文学的研究内容, 灌溉水文学研究的重要性日渐突出。本文在分析灌区水文现象、水分循环及灌溉对灌区水分循环影响的基础上, 阐述了不同学者对灌溉水文学概念的理解, 在总结国内外灌溉水文学及相关领域研究进展的基础上, 提出了灌溉水文的研究重点及其发展趋势。并提出, 灌区水文观测和灌区信息的准确获取是灌溉水文学的研究基础, 针对灌区特点而开发的数值模拟和灌区分布式水文模型是主要研究手段, 尺度效应和尺度转换是研究的难点。

关键词: 灌溉水文学; 水分循环; 人类活动; 尺度

中图分类号: S271; G853.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2008)02-0294-07

灌溉是维持粮食产量最有效和不可缺少的途径, 同时灌溉又消耗了大量的可利用淡水资源。随着水资源日益短缺, 建立节约型、可持续发展的灌溉农业刻不容缓。基于此, 人们改变了传统的灌溉方式, 开展非充分灌溉和节水灌溉的研究。由于节水的尺度效应及灌区水分循环的复杂性, 田间尺度的研究成果不能简单地应用在灌区。灌区地形、土壤的空间异质性, 降雨、蒸散、径流的时空差异性, 还有人类活动的影响等因素, 使灌区水文表现出比田间水分循环更为复杂, 又与自然流域不同的特点。在灌区水分循环、灌区水文尺度效应及节水尺度效应的研究中, 随着相关学科的相互渗透, 灌溉水文学^[1]作为一门新兴的交叉学科正逐渐受到人们的重视。本文基于国内外的相关研究成果, 探讨灌溉水文学的研究对象、研究内容、研究进展和发展前景。

1 灌溉水文学

1.1 灌区中的水文循环

灌区中的水文循环, 除包括自然流域中的降水、蒸发、渗流和径流外, 还受灌溉、排水、蓄水等人为活动的影响。灌区水分循环的复杂性, 体现在人类活动和水管理对灌区水文的影响^[2]。灌区内的人类活动主要包括水利措施、农业措施等。水利措施中的蓄水工程改变了灌区内径流的时空分配, 灌排渠系输水改变了灌区自然的水文过程, 而地下水的开采改变了地下水与地表水体的水平衡关系。灌区内的田埂, 塘堰等蓄水设施, 在流域面上进行地表径流的拦蓄调节, 增加土壤水和地下径流。农业措施改变水分循环途径中的下垫面状况, 从而影响地表水、土壤水和地下水的分配状况。水管理中的灌溉排水对灌区水分循环的影响更复杂, 灌溉使同一区域获得不等深的来水, 灌溉水源和灌溉方式的多样化、灌区回归水及其在不同尺度上的重复利用等进一步使灌区水文循环复杂化。

收稿日期: 2006-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50579059); 教育部博士点基金资助项目 (20050486002)

作者简介: 代俊峰(1980-), 男, 河南襄城人, 博士研究生, 主要从事节水与水资源最优规划与管理研究。

E-mail: whudjf@163.com

1.2 灌溉水文学的提出

(1) 相关的概念 水文学是研究地球上各种水体的形成、运动变化规律及其地理分布的科学。农业水文学是研究农业生态系统中农业措施、农业工程方面各种水文现象的产生发展规律及其内在联系的一门学科^[3]。由希尧等认为灌区水文是农业水文的一个重要内容,主要研究灌区内部的大气水、地表水、土壤水、生态水等的利用、消耗循环过程等水文现象^[4]。章曙明等认为灌区水文是指进入灌区的各类水体运动、变化、分布的规律^[5],灌区水文学的研究对象并不仅仅局限于农业,它涵括了区域内各业及人类生活与灌区内各类水体的内在联系。

(2) 灌溉水文学的定义 灌溉水文学被水文学所关注,首先是在NRC重点分析“从土壤水的微观尺度到水文气候学的不同尺度上的水循环”的报告^[1]中得以体现的。Wallender等认为灌溉水文学是研究灌溉生态系统中与水有关的一门科学,研究对象的空间尺度从微观尺度变化到几百平方公里,时间尺度从秒跨越到几个世纪^[6]。在后来的研究中,Wallender又提出,灌溉水文学是研究灌溉农业生态系统中物质的运输、转化、累积等特点,以及因社会、环境和资源保护等原因而引起的水资源短缺条件下(包括供水量减少和水质恶化)农产品产量可持续性的学科。许迪认为灌溉水文学是研究灌溉农业生态系统的一门科学,强调不同尺度上的水循环分析及其尺度转换过程^[7]。

本文认为,灌溉水文学是灌区水文学和农业水文学的主要组成部分,是研究灌区的水文过程,重点研究灌溉对灌区不同尺度的水分循环、水量转化的影响,及其对灌区生产力影响的一门学科。灌溉水文学包括地表径流、非饱和带水流、植物冠层截留、蒸发蒸腾、地下水流、河流、渠道流等多个水文过程,各个过程之间既相互联系又相互影响。

1.3 灌溉水文学的研究内容

灌区水文的影响因素可以划分为自然和人类活动两大因素。由自然因素引起的水文循环变化,重点考虑气候变化和下垫面变化对水文循环的影响。而灌溉水文学主要研究人类活动对灌区水文的影响,特别是灌溉水量、灌溉时间、灌溉方式等对灌区不同尺度上水分循环及其转化的影响。灌溉水文学的研究内容主要包括:

灌溉农田的水分循环及其转化规律,灌溉(时间、水量、方式等)对水分循环的影响; 灌区尺度水文要素的计算和数值模拟; 灌区水分循环过程和水量转化规律,以及不同灌溉方式对灌区水分循环和生态环境的影响; 灌区内主要因灌溉而引起的尺度效应及尺度转换问题。

2 灌溉水文学的研究进展

2.1 田间尺度的水分循环及水量平衡

针对灌溉农业系统中的小区和农田尺度的水分循环及其转化规律,国内外的学者做了大量的试验和研究,在试验观测的基础上,进行了蒸发蒸腾^[8]、垂直渗漏^[9,10]、水平渗漏^[11]、根系吸水^[12]、排水^[13,14]等水分循环各要素的数值模拟。并开发了不同的水文模型,如冬小麦的水动力学模型^[15],水稻田间水量平衡模型^[16]和芥菜田间土壤水平衡模型^[17]等。张新等以水量平衡原理为基础,运用系统动力学方法,建立了稻田田间尺度水平衡转化过程的模拟模型^[18]。李亚龙等应用水稻生长模拟模型ORYZA2000分析了淹灌、间歇灌溉、雨养等3种稻田水分管理模式田间水量平衡和水分生产率^[19]。灌溉条件下田间水分循环研究比较深入,并取得丰富的成果,为更大空间尺度上的灌区水文研究提供了基础。

2.2 灌区尺度水文要素的计算和数值模拟

(1) 产流 在灌区,由于缺乏实测径流资料,早期灌区天然径流计算中,常借鉴自然流域产流的计算方法,使得计算结果的精度不高。针对这种情况,刘圣保和丁平利用灌区下垫面分类明显的特点,用加权平均法解决下垫面对流域蒸发蒸腾的影响,建立器测值与流域蒸发蒸腾要素之间的定量关系,计算了灌区的流域产流^[20]。灌溉对灌区产流的影响也逐渐受到重视。张世侃等从河套灌区的实际出发,分析了灌水产流与常规降

水产流的不同,提出符合灌区特点的灌溉产流计算方法^[21]。王欣等运用 LL - 分布式水文模型和 ArcGIS 软件,研究了受人类活动影响较大的宁蒙灌区内灌溉对径流的影响,指出灌溉对径流的影响有很强的时空变异性^[22]。

(2) 蒸发蒸腾 时空变异的灌区蒸发蒸腾是水量平衡的主要项,是灌区水文过程和水资源管理的重要因素。由于将传统的田间观测 ET 的方法用于区域水量平衡分析的局限性^[23],和把点上的测量转换到面上的困难性,促使人们应用 RS 和 GIS 技术来获得区域尺度上的 ET。利用遥感影像对研究区域作物进行分类,确定每一类作物的作物系数,然后利用地面监测“点”上计算的潜在蒸发蒸腾量进行插值,再用传统方法计算作物实际蒸发蒸腾量^[24]。对参考作物蒸发蒸腾量计算模型的参数进行地形校正后,利用 GIS 的空间分析功能,建立基于 DEM 的区域参考作物蒸发蒸腾量的分布式模型^[25]。并开发了应用遥感影像对大区域范围进行蒸发蒸腾量估算的模型,如 SEBAL 模型^[26]。也有水文模型结合遥感数据进行区域蒸发蒸腾量研究,如 SVAT、NDVI - DST 模型等。

(3) 渗漏 灌溉水的渗漏主要包括渠道线状渗漏和田块面状渗漏。国内外开展了相当多的研究工作,总结出多种实测渠道渗漏损失的方法和各种计算渠道渗漏损失的经验公式。而针对灌区尺度上田块的面状渗漏则研究的不多。Kang 等根据稻田的渗漏特点,改进了 SWAT 模型中稻田渗漏计算的蓄满产流机制,采用日平均入渗强度来模拟灌区尺度稻田渗漏^[27]。

(4) 地下水 灌区地下水的补给来源包括灌溉渗漏、降水入渗、及上游的侧向径流补给,其中降水和灌溉水的渗漏补给是主要来源。地下水的排泄途径包括潜水蒸发、人工开采和侧向径流排泄。王旭升等建立了内蒙古河套灌区人工自然复合型的 GSPAC 系统模型,计算了现状和节水改造后灌区 GSPAC 水循环界面通量,并预测了地下水埋深变化的幅度^[28]。刘贯群等对内蒙李井灌区水文地质概化后,建立该区地下水的数值模拟模型,预报了现状、规划和下游排水 3 种情景下地下水的变化趋势^[29]。王贵玲等采用 FELLOW 软件和有限差分方法研究了农业节水措施的实施对地下水的影响,表明农业节水缓解地下水位下降效果明显^[30]。

2.3 灌区水分循环过程和水量转化规律

采用传统的基于试验资料的数值分析方法进行灌区水文过程的分析,具有一定的局限性,也难以揭示不同灌溉方式对灌区水分循环及其转化过程的影响。借助于水平衡模型、水动力学模型和流域水文模型,可以更深入地了解灌区水文循环的演变规律和过程,为灌区水分循环中与灌溉有关的问题的解决提供一个更加有效的手段。

陈喜和陈洵洪利用 MODFLOW 和非饱和带水平衡模型,模拟半干旱半湿润沙丘地区的地下水位,分析了含水层补排水量,河流与地下水补排关系,以及区域水平衡过程^[31]。Lohani 等应用 SHE 模型研究了印度中部 Barna 灌区 3 个尺度(小区、田块、灌区)上的水分循环过程^[2]。在灌区水分循环的研究中,许多学者根据灌区特点也建立了不同的模型。例如,重点考虑农业生产区域内开发利用地表水与地下水所产生影响的流域模型^[32]。根据宁夏引黄灌区作物生育过程需水、耗水机理和灌区的水循环规律,建立的基于灌溉动态需水量计算的灌区水均衡模型^[33]。考虑水在不同介质和不同形态之间的交换或转化,并重点考虑人类活动如引水灌溉、地下水的开采等对水平衡影响的概念性干旱区平原绿洲耗散型水文模型^[34]。针对河套灌区的特点,建立的以水动力学机制为基础的大型灌区陆地水循环模式的参数化方案^[35]。

随着灌区水分循环研究的不断深入,不同灌溉方式和水管理措施对灌区水文过程和环境质量的影响逐渐引起人们的关注。齐学斌等对灌区水资源系统进行概化后,建立区域水量平衡方程,计算了节水条件下区域水资源量与需水量之间的关系^[36]。Venn 等基于观测数据,应用质量平衡分析方法研究了灌溉方式从淹灌改变为喷灌后,流域水分循环过程的变化。研究表明,灌溉方式的改变影响流域基流随时间的变化规律,而地表水质受灌溉方式的影响比较小,喷灌方式下的地下水溶解性总固体有所降低^[37]。Gosain 等应用 SWAT 模型,研究了印度 Pslleru 流域因灌溉而引起的地下水回归量的时空变异特点,并预测了流域在没有人干预(水库管理、灌溉)条件下的产流量,评价了灌溉等人类活动对区域水量平衡的影响^[38]。

2.4 灌溉水文学中的尺度效应与尺度转换

尺度是指空间范围的大小和时间历时的长短。尽管尺度的划分不是唯一的，但人们试图给出尺度划分确切的长度和面积定义。许迪^[7]认为，灌溉水文学研究的空间尺度变化是从微观尺度($10^{-5} \sim 10^{-2}$ m) ~ 中观尺度($10^{-2} \sim 1$ m) ~ 宏观尺度($1 \sim 10^4$ m) ~ 全球尺度($10^4 \sim 10^8$ m)，时间尺度变化则从秒 ~ 时 ~ 天 ~ 年 ~ 百年 ~ 千年，Wallender等^[6]对灌溉水文学时空尺度的划分与此类似。夏军^[39]介绍了 Dooge 提出的水文尺度3个量级、9个子类的划分方法，3个量级分别是微观 ~ 中观 ~ 宏观，所包含空间尺度的9个子类分别是水分子(10^{-8} m) ~ 连续介质点(10^{-5} m) ~ 代表性单元(10^{-2} m) ~ 水文模块(10^2 m) ~ 子流域(10^3 m) ~ 小流域(10^4 m) ~ 大流域(10^5 m) ~ 大陆(10^6 m) ~ 全球(10^7 m)。节水灌溉的空间尺度^[40]可分为小尺度(田间尺度)、中等尺度及大尺度(灌区、流域或流域内的子流域)。不同的学者提出的尺度划分大致相同，但也有差别，应予以注意。相比而言，水文尺度的三个量级、9个子类的划分方法，具有更强的可比性和操作性。尺度效应可理解为由于时空尺度的变化所引起的不同效果。由于地面和地下过程中存在的空间异质性，以及不同尺度层面上系统响应的非线性，灌区不同尺度信息特征之间的转换不能通过简单的叠加和分解来实现，需要进行相关过程的尺度转换^[41,42]。

灌溉水文学中的尺度效应和尺度转换，应该包括两个方面：一方面，由于学科的相互渗透，水文学、地质学和土壤学等学科中的尺度问题也存在于灌溉水文学的研究中；另一方面，灌溉水文学所具备的特有的尺度效应。在灌溉水文学中，存在着因灌溉而引起的尺度问题。例如，在灌溉期间和灌溉之间发生的田间土壤收缩变形与龟裂，明渠水流和畦水流运动受到微观尺度的 Navier-Stokes 方程支配等。而最为突出的就是节水灌溉的尺度效应问题。灌区节水尺度效应产生的原因主要是回归水及其重复利用^[40,43]，以及灌区水分运动在不同时空尺度上的差异性^[44]。

值得注意的是，不同学者从不同的角度发现了尺度效应的问题，而有效的尺度转换方法，仍有待于进一步的研究。

3 灌溉水文学今后研究的重点及展望

3.1 灌区水文要素的监测及灌区信息的准确获取

灌区水文要素的监测和灌区信息的获取为灌溉水文学的研究提供必要的实测数据，便于认识灌区内的水循环路径及平衡关系，分析灌溉水文效应。通过典型灌区的试验区和集水区试验研究，监测不同尺度的水文过程，可以定量分析水分循环特点，研究在不同灌溉条件下的水分转化关系，识别不同尺度水循环过程的主导因素。

然而，目前对灌区监测较多的是灌溉水量，而对排水、灌区产流、地表水、地下水及灌区盐分的监测较少，灌区内不同尺度的水分循环则监测的更少。即使有监测资料地区，也存在水文过程不一致，或监测资料时空连续性较差等问题。值得注意的是，目前灌区传统的灌溉水量监测方式，难以获得灌区内不同子流域的灌水和排水量，因而难以定量地研究灌溉对灌区不同尺度上水文过程的影响，也给灌区内水分生产率的空间变异性研究带来了困难。而且传统的灌区信息(灌溉面积、作物模式等)获取方式，也难以满足灌溉水文学研究的要求。例如，在大多数国家，有关灌溉面积的数字在统计和实际之间存在很大差异。

造成灌区水文监测和信息获取落后局面的原因是多方面的。一方面是因为灌区的复杂性，使得水文要素的观测比较困难；另一方面是灌区水管理的随机性。因此，灌区水文监测和水管理应借鉴河流的流域管理及水土保持的小流域管理等方法，并借助于 GIS 和 RS 等技术。

3.2 灌区水分循环研究及模型模拟

在灌区尺度上，由于地形、地貌、水文气象、农业耕作等因素的时空变化，使得水管理复杂化。灌区水分循环及灌溉水文学的研究，需要在灌区观测资料的基础上，借助于数值模拟和模型研究。针对不同研究目的而开发的自然流域分布式水文模型和灌区概念性水文模型，在灌区的应用已有较多研究，但也存在一些问题：

(1) 针对自然流域而开发的水文模型用于灌区时存在较大的困难。灌区的水分循环较自然流域复杂得多, 涉及地表水、土壤水和地下水相互转换的陆面水文循环过程和水库、塘堰、河流湖泊、灌排系统等水体的水分循环以及陆面、水体之间的水分循环关系。而且灌区的陆面和水体水分循环受人为的影响比较大, 自然流域水文模型和灌区概念性模型对这些因素的考虑较为粗略。

(2) 计算单元的合理划分。分布式水文模型一般是基于 DEM, 根据一定的算法确定地表水流路径、河流网络、流域的边界和子流域划分。需要探讨的问题是, 基于 DEM 而划分确定的地表水流路径、河流网络、子流域划分, 能否反映受人为影响强烈的灌区情况, 能否反映灌区的灌溉渠系、排水沟网对灌区水文的影响和调节作用。

(3) 尽管当前的水文模型, 特别是分布式模型的水分循环中, 都考虑了灌溉措施, 但灌溉对水分循环的影响不是模型的重点。目前的流域水文模型还难以模拟不同的灌溉模式对灌区水文的影响, 而且对作物产量的预测功能也比较弱。

因此针对灌区的水文特征, 考虑人类活动尤其是灌溉对灌区水分循环的影响, 建立灌区分布式水文模型显得非常重要。灌区分布式水文模型要在分析降水~产汇流为核心任务的基础上, 应重点考虑灌区的灌溉~蒸发蒸腾机制, 重点考虑不同的灌溉排水技术及灌水模式对灌区水文的影响, 重点考虑灌区水分生产率的空间变异性。

3.3 尺度效应及尺度转换

在灌溉水文学尺度效应及尺度转换的研究中, 部分研究内容可以借鉴其它学科的研究方法和研究成果, 但有些则需在参考其它学科的基础上, 找到适合于灌溉水文学的研究方法。灌溉水文学的尺度效应主要研究灌区不同尺度水分循环的影响因素(尤其是灌溉), 以及这些因素在不同时空尺度上的重要性, 重点研究灌区作物产量及水分生产率的空间变异性, 重点研究节水灌溉的尺度效应及灌区节水潜力评估。

灌区水文特征、灌溉对水分循环的影响、灌区分布式水分模型等研究, 是灌溉水文学尺度效应研究的基础。从田间到灌区的不同尺度上, 开展同步的灌溉、径流等水文过程的观测试验研究, 为尺度问题的研究提供基础资料, 揭示尺度效应现象及其变化规律。模型模拟为进一步分析尺度效应产生的机理及其规律提供手段。相关水文过程的尺度转换则需要借助于尺度转换的数学表达, 如统计自相似性、分形几何、地质统计学、小波分析和空间变异函数理论等。

4 结 论

在总结分析不同学者对灌溉水文学概念理解的基础上, 从灌区水分循环的特点及灌溉对灌区水分循环的影响入手, 总结了灌溉水文学及相关方面的研究, 探讨了灌溉水文学的研究重点及其发展方向。并指出, 应在加强灌区水文监测和灌溉水文学机理研究的基础上, 促进水文学、气象学、土壤学、灌溉排水等相关学科的交叉研究, 结合 GIS 和 RS 技术, 建立适合灌区水文特点的数值模拟方法和水文模型, 建立灌溉水文学完整的研究体系。灌溉排水与水文学的结合, 灌溉水文学的提出, 拓宽了灌区水管理的视野, 为灌区的供水、灌溉功能向水资源的高效利用转化提供了契机, 为实现灌区生态系统可持续发展和构建现代化节水型生态灌区提供了新的思路。

参考文献:

- [1] National Research Council (NRC). Opportunities in the Hydrologic Sciences[M]. Washington D C: National Academy Press, 1990.
- [2] Lohani V K, Refsgaard J C, Chausen T, *et al.* Application of the SHE for irrigation command area studies in India [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(1): 34 - 49.
- [3] 施成熙, 粟宗嵩. 农业水文学[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- [4] 由希尧, 陈 潮, 刘超英. 灌区水文及其灌区的水文监测[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2): 130 - 133.

- [5] 章曙明,王志杰,肖重华.干旱区灌区水文及其监测体系浅议[J].水利规划与设计,2005,4:18-20.
- [6] Wallender W W, Gismer M E. Irrigation hydrology: crossing scales [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 128(4): 203 - 211.
- [7] 许迪.灌溉水文学尺度转换问题研究综述[J].水利学报,2006,37(2):141-149.
- [8] 彭世彰,索丽生.节水灌溉条件下作物系数和土壤水分修正系数试验研究[J].水利学报,2004(1):17-21.
- [9] 崔远来,李远华,李新建,等.非充分灌溉条件下稻田优化灌溉制度的研究[J].水利学报,1995(10):29-34.
- [10] Agrawal M K, Panda S N, Panigrahi B. Modeling water balance parameters for rainfed rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130: 129 - 139.
- [11] Wu Ray-Shyan, Su Wen-Ray, Chien Chuan-Ban, et al. A Simulation Model for Investigating the Effects of Rice Paddy Fields on the Runoff System[J]. Mathematical and Computer Modeling, 2001, 33: 649 - 658.
- [12] Molz F J, Irwin Remson. Models of water transport in the soil-plant system: a review [J]. Water Resources Res, 1991, 17 (5): 1245 - 1260.
- [13] Khalil Ahmad, Philip W G, Ramesh Kanwar. Evaluation of the tile flow component of the SWAT model under different management systems [R]. Working Paper 02-WP 303, June 2002, www. card. iastate. edu, 2002.
- [14] 王少丽,王兴奎,Prasher S O, et al. 应用 DRAINMOD 农田排水模型对地下水位和排水量的模拟[J]. 农业工程学报,2006,22(2):54-59.
- [15] Kang S Z, Zhang F C, Zhang J H. A simulation model of water dynamics in winter wheat field and its application in a semiarid region[J]. Agricultural Water Management, 2001, 49: 115 - 129.
- [16] Odhiambo L O, Murty V N N. Modeling water balance components in relation to field layout in lowland paddy fields. I. Model development [J]. Agricultural Water Management, 1996, 30: 185 - 199.
- [17] Panigrahi B, Panda S N. Field test of a soil water balance simulation model[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58: 223 - 240.
- [18] 张新,崔远来,董斌.回归水模拟的系统动力学模型[J].灌溉排水学报,2005,24(1):57-62.
- [19] 李亚龙,崔远来,李远华.基于 ORYZA2000 的稻田水量平衡及地下水埋深对水稻灌溉的影响[J].灌溉排水学报,2006,25(1):45-48.
- [20] 刘圣保,丁平.蒸发资料在灌区流域产流计算中的应用研究[J].灌溉排水,1998,17(1):30-32.
- [21] 张世侃,范晓元,樊忠成.内蒙古河套灌区排水干沟流量计算方法探索[J].内蒙古水利,1998,2:24-26.
- [22] 王欣,李兰,王万,等.宁夏灌区水资源模拟研究[J].人民黄河,2005,27(6):52-53.
- [23] 孙敏章,刘作新,吴炳方,等.卫星遥感监测 ET 方法及其在水管理方面的应用[J].水科学进展,2005,16(3):468-474.
- [24] Ray S S, Dadhwal V K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS[J]. Agricultural water management, 2001, 49:239-249.
- [25] 牛振国,李保国,张凤荣,等.参考作物蒸散量的分布式模型[J].水科学进展,2002,13(3):303-307.
- [26] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212 - 213, 198 - 212.
- [27] Kang M S, Park S W, Lee J J, et al. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields[J]. Agricultural Water Management, 2006, 79: 72 - 92.
- [28] 王旭升,岳卫峰,杨金忠.内蒙古河套灌区 GSPAC 水分通量分析[J].灌溉排水学报,2004,23(2):30-33.
- [29] 刘贵群,王淑英,郑西来,等.内蒙李井灌区地下水数值模拟及土壤盐渍化分析[J].中国海洋大学学报,2004,34(6):1013-1017.
- [30] 王贵玲,蔺文静,陈浩.农业节水缓解地下水位下降效应的模拟[J].水利学报,2005,36(3):286-290.
- [31] 陈喜,陈淘洪.美国 Sand Hills 地区地下水数值模拟及水量平衡分析[J].水科学进展,2004,15(1):94-99.
- [32] Lee D J, Howitt R E. Modelling regional agricultural production and salinity control alternatives for water quality policy analysis[J]. Am J Agric Econom, 1996, 78(1):41-53.
- [33] 秦大庸,于福亮,裴源生,等.宁夏引黄灌区耗水量及水均衡模拟[J].资源科学,2003,25(6):19-24.
- [34] 胡和平,汤秋鸿,雷志栋,等.干旱区平原绿洲散耗型水文模型——模型结构[J].水科学进展,2004,15(2):140-145.
- [35] 王旭升,杨金忠.大型灌区陆地水循环模式的参数化方案: LWCMP5-ID[J].地学前沿特刊,2005,12:139-145.

- [36] 齐学斌, 王景雷, 樊向阳, 等. 山西晋中井渠结合灌溉水资源综合平衡分析与模拟[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(5): 20 - 24.
- [37] Venn B J, Johnson D W, Fochop, J O. Hydrologic impacts due to changes in conveyance and conversion from flood to sprinkler irrigation practices[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(3): 192 - 200.
- [38] Gosain A K, Sandhya Rao, Srinivasan R, *et al.* Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model [J]. Hydrological Processes, 2005, 19: 673 - 682.
- [39] 夏 军. 水文尺度问题[J]. 水利学报, 1993, 5: 32 - 37.
- [40] 董 斌, 崔远来, 李远华. 水稻灌区节水灌溉的尺度效应[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 833 - 839.
- [41] Wagenet R J. Scale issues in agro-ecological research chains[J]. Nutrient Cycl Agroecosyst, 1998, 50: 23 - 24.
- [42] Harvey L D D. Upscaling in global change research[J]. Clim Change, 2000, 44(3): 225 - 263.
- [43] 崔远来, 董 斌, 李远华. 水分生产率指标随空间尺度变化规律[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 45 - 51.
- [44] Schulze R. Transcending scales of space and time in impact studies of climate and climate change on agrohydrological responses[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2000, 82: 185 - 212.

Progress in study of the irrigation hydrology^{*}

DAI Jun-feng, CUI Yuan-lai

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : Due to the spatial variability of underlying surface information and under the influence of human activity, hydrological characteristics of irrigation area are different from those of the natural basin. The concept of irrigation hydrology is pointed out in the research on hydrological cycle at different scales in irrigation area and interaction of irrigation-drainage and hydrology. Currently, the study on the effects of water use on irrigation area hydrology and the scale effect of water saving has complemented the content of irrigation hydrology, and the irrigation hydrology research is becoming a hot spot in the world. Based on the analysis of hydrological cycle and the influence of irrigation practice on the irrigation system, several considerations of irrigation hydrology concept are introduced. On the basis of the current situation of the study in irrigation hydrology and the relevant field, the research emphasis and the development trend of irrigation hydrology in the future are given. The paper indicates that hydrological monitoring and information acquisition in irrigation system are the research base of irrigation hydrology, the numerical simulation method and the irrigation system distributed hydrological model for at the irrigation area are the main means of the research, and the scale effect and scaling are the difficult points of the research.

Key words : irrigation hydrology; hydrological cycle, human activity; scale

^{*} The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50579059) and Chinese Ministry of Education Project (No. 20050486002).