

洪泛湿地系统地表水与地下水转化研究进展综述

李云良,姚 静,谭志强,张 奇

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 流域地理学重点实验室,江苏 南京 210008)

摘 要:洪泛湿地地表水(SW)与地下水(GW)转化关系研究对综合管理湿地水资源具有重要的理论和实践意义。通过洪泛湿地 SW-GW 转化研究进展的综述,可深入了解国内外 SW-GW 转化研究的发展过程,有利于把握国际研究的主流趋势,系统掌握该方面研究的前沿手段。总结得出,洪泛湿地是我国诸多生态系统中特色突出的水文系统,其独特的水文变化及洪水脉冲的周期性扰动,使得 SW-GW 转化的动力学过程促进了洪泛湿地环境系统之间物质、能量和信息的传递与交换,驱动了湿地演变、物质元素循环和生物生长等生态功能的实现。分析认为,洪泛湿地的开放性和复杂性等特点决定了多学科交叉理论与方法成为 SW-GW 转化研究的流行手段和创新的基本思路。从学科发展趋势和应用需求的角度出发,应结合洪泛湿地多源数据信息与 SW-GW 耦合数值模型,深入揭示洪泛湿地 SW-GW 转化的动力学过程及对洪水脉冲变化的响应机制,这既是一个基础性工作,也是一个具有前瞻性的研究,将为湿地水资源、水环境等综合管理与调控提供科学依据,对诠释湿地生态效应内涵具有重要意义。

关键词:洪泛湿地;SW-GW 转化;洪水脉冲;数值模型;生态效应

中图分类号:P641.2

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)02-0014-08

1 洪泛湿地特点与意义

洪泛湿地是河湖洪水周期性作用下形成的与之毗邻的地带,约占全球湿地面积 15%^[1],是水陆自然景观重要组成部分和水陆相互作用交错带,同时也是生物多样性相对丰富的地域空间,对河湖与陆地之间水文水力和生态联系起着过渡和纽带作用^[2-3]。洪泛湿地在洪水季节除直接拦蓄降水外,可容纳滞留溢出河道或者湖泊的洪水,而在洪峰过后的枯水季节则补给河湖的生态用水,缩短河湖干枯的时间,实现对河湖径流量的调节^[4]。因此,洪泛湿地作为一种因洪水干扰而动态变化的特殊下垫面,是大气降水、地表径流和地下水之间转化的重要界面系统,也是地下水与地表水之间典型的水文过渡带^[5-6]。

洪水脉冲理论阐明了周期性洪水是洪泛湿地系统进程最主要的驱动力^[4,7],同时强调了河湖等地表水体与其洪泛湿地地下水之间水力联系的重要性^[8-9](见图1)。因洪泛湿地具有结构整体性、时空异质性、系统开放性、作用复杂性和生态脆弱性等多重特点^[10],使得

SW-GW 转化的动力学过程涉及影响因素众多,问题复杂多变。在河湖季节性水文情势或洪水过程影响下,SW-GW 动态转化不仅对洪泛湿地界面水分传输起着最为关键的调节作用,也直接参与了洪泛湿地一系列的物理、化学和生物过程^[11-12],由此造就了洪泛湿地土壤干湿交替的生境,促进了洪泛湿地新陈代谢及生物地球化学循环过程,也影响了动植物的群落组成和结构特征,对维系洪泛湿地系统的物质流、能量流起决定作用^[13-14]。SW-GW 转化是水资源统一管理、水污染防治和河湖生态环境保护等方面的核心问题,一直受到联合国环境规划署(UNEP)、美国地质调查局(USGS)和国际湿地大会(IWC)等组织的高度重视,成为水资源管理、水文地球化学和生态水文学等多个领域的研究热点和前沿问题^[15-16]。因此,SW-GW 转化的动力学过程带动了湿地环境系统之间物质、能量和信息的传递与交换,在洪水脉冲作用下驱动了湿地演变、物质元素循环和生物生长等生态功能的实现,成为影响洪泛湿地水文过程及其生态环境反馈的重要机制^[17-18]。

收稿日期:2017-10-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41771037);中科院青促会和中科院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划重点项目(NIGLAS2018GH06);中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFZD-SW-318-2)

作者简介:李云良(1983-),男,辽宁丹东人,博士,副研究员,主要从事大尺度湖泊-流域系统水文水动力过程数值模拟研究。E-mail: yunliangli@niglas.ac.cn

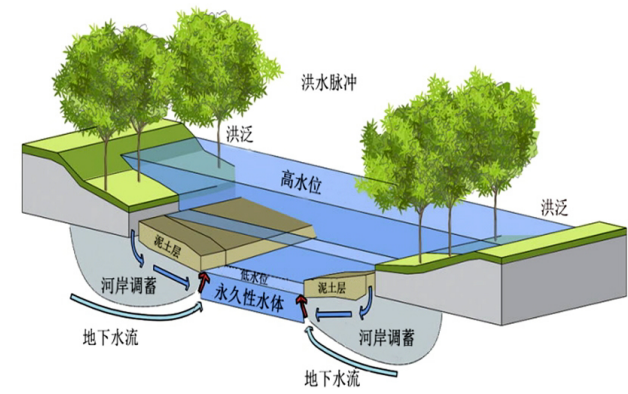


图1 洪水脉冲作用下洪泛湿地水情变化基本特征^[19]
Fig.1 The characteristics of water regime in floodplain wetland under the influence of flood pulse

2 SW-GW 转化作用的研究方法

SW-GW 之间的频繁转换是影响区域水资源形成及其结构特征的重要因素^[20-21]。自 Boussinesq 于 1877 年开展河流与地下水相互作用研究以来,SW-GW 转化关系研究便引起了广泛关注和高度重视,研究尺度主要包括盆地/流域尺度、接触带尺度和沉积物尺度,研究范围几乎涉及到与水循环相关的所有领域:河源径流、湖泊、湿地与河口等^[22]。国内外关于湿地系统 SW-GW 转化作用的研究方法主要有水文学方法、水化学法、同位素法、温度示踪法和数值模型法等(见表 1)。

表1 国内外湿地系统SW-GW转化关系研究方法
Table1 The methods of interaction between surface water and groundwater in various floodplain systems

方法与分类	主要原理	参考案例
水头测压计 (水文学)	在水平、垂直方向上布设测压计,直接通过水头值来辨析湿地地下水与地表水的流动规律	利用测压计测量美国 Wisconsin 溪流湿地系统 SW-GW 之间的动态转化关系 ^[23]
抽水试验 (水文学)	在小尺度湿地内,通过快速降低湿地或地下水位来观测邻近水体的水位响应变化,辨析两者之间的水力联系	依托原位抽水试验,辨析佛里达州季节性洪泛湿地系统 SW-GW 之间的转化关系 ^[24]
水位时变关系 (水文学)	测定湿地水位与地下水位的时间序列历史动态变化,基于统计关系判断两者可能存在的补排转化和水力联系	依据海水与地下水位的历史观测资料,探究澳大利亚滨海湿地地下水对潮汐波动的响应 ^[25]
渗透仪 (水文学)	将渗透仪埋置于含水层中,以单位时间内容器内下渗或向上补充的水体积变化来判断相应条件下的渗透率	采用渗透仪直接测定湿地系统 SW-GW 之间的渗漏或补给强度 ^[26]
水化学指示 (水化学)	不同来源、不同水体影响下,水样的水化学特征存在的差异性	利用温度、电导率、水化学组成判断法国海岸湿地系统 SW-GW 之间的水力联系 ^[27]
同位素示踪 (同位素)	是水化学特征指示的一种典型,不同转化模式影响下环境样品的同位素组成可指示其来源	利用氦、氧稳定同位素探明了澳大利亚湖泊湿地的地下水动力场与 SW-GW 转化模式 ^[28]
水温热量传递 (温度示踪)	监测湿地地下水与地表水联合系统温度场变化,以指示热量传递路径和转化形式	基于温度观测与热传导模型,估算了比利时湿地系统 SW-GW 之间的转化量 ^[29]
示踪剂试验 (人工示踪)	原位投放保守型化合物以监测该物质在湿地地下水与地表水关键界面的迁移路径,指示两者之间的水力联系	采用溴化钠作为示踪剂研究北美地区季节性洪泛湿地系统 SW-GW 之间的水力联系 ^[30]
模型模拟计算 (数值模型)	在确定湿地模型其它要素和参数的基础上,反演地下水与地表水耦合模型,定量分析两者转化机制与交换量	依托物理机制明确的数值模型,通过输入和边界条件模拟德国洪泛湿地系统 SW-GW 转化及动态水量平衡 ^[31]

水文学方法是研究湿地系统 SW-GW 转化作用的直接方法,该方法能够提供对水位关系、渗透率等水文特性的直观认识,但这种方法所采用的仪器设备安装与运行、测量精度、点位布设与水文要素的变异性之间可能出现时空尺度不一致的问题,因而所获取的数据信息难以真实反映野外复杂状况^[32]。此外,国内外研究通常根据水力梯度与流量间的关系推算河湖入渗量^[18],通过基流切割方法估算湿地地下水向河湖系统的排泄量^[33],但间接推算通常会带来较大的误差和不确定性,该方法虽然能够评估两者之间的转化量,但

只能提供对 SW-GW 转化过程的一般性认识^[34]。随着湿地 SW-GW 相互作用研究的精细化与定量化,示踪法和数值模型法成为目前国内较为流行的研究手段^[21, 35]。人工示踪法、水化学及环境同位素示踪法可用来揭示变化环境下湿地系统 SW-GW 之间的水力联系,估算两者的转化量^[36],但水化学和同位素示踪法只能得到半定量化结果,而人工示踪法还可能造成水体不同程度的污染,其操作过程也受场地条件限制^[37]。数值模型法可定量计算 SW-GW 之间的转化量,精细模拟两者之间的动态转化过程,有利于深入理解湿地水

文过程机理和预测未来水情变化^[38],但数值模型校正通常基于大量的水力学参数,其结果往往受到参数观测密度和相关性的影响^[39]。综上,大量研究方法和手段为湿地 SW-GW 转化关系研究提供了重要保障,但应充分结合野外实际条件,加强方法之间的优势互补,实现规律和现象的定性认识以及作用机制的定量分析。

总体而言,湿地 SW-GW 转化关系的研究方法可归纳为两大类。一种是直接方法,即采用水文学方法测定湿地系统水文要素变化,评估湿地 SW-GW 的水力联系;另一种是间接方法,主要利用热量特征、水化学分异、示踪剂指示等间接证据来推断湿地 SW-GW 转化过程。湿地 SW-GW 转化研究由于涉及地质学、水文地质学与水力学等多个学科,因此综合运用直接与间接方法已得到共识,既能降低复杂条件下的尺度效应风险,也是系统阐明湿地 SW-GW 转化作用机制的关键。因此,在研究的逻辑思路上,结合多学科交叉理论与方法,开展湿地 SW-GW 转化作用的定性指示与定量评估已成为国内外的流行手段和创新的基本思路。

3 SW-GW 转化的相关研究进展

SW-GW 之间的相互转化是自然界普遍存在的一种水文现象,它是水资源的基本属性之一。国内外研究表明,地下水与河湖之间的转化关系通常具有局地性和变异性,呈现出时空尺度上明显的补排差异^[40]。例如,Keery 等^[41]通过热力学示踪发现,英国 Tern 河流与地下水的补排关系具有显著的时空变异性,甚至在一些低流量的河段,河水与地下水之间的补排量变化也存在明显差异。聂振龙等^[42]基于水化学及氧同位素分析,探明了黑河与地下水之间的补排转化关系均存在地段差异。此外,湖水与地下水的季节性补排关系同样具有空间变异性,地下水在有些区域补给湖泊,而同时期有些地区则是湖泊补给周边地下水^[42]。地下水对湖泊的强烈蒸散耗水起到了支撑作用,而湖泊的存在反过来也会影响区域地下水循环模式^[43]。SW-GW 的转化方式、途径与转化量研究一直是国内外关注的重要科学问题^[44]。Ala-aho 等^[45]以芬兰北部湖泊、河流和湿地为综合体,基于耦合数值模型定量计算了 SW-GW 之间的转化量,并揭示了转化量的时间变异性及空间分布。Wang 等^[20]依托野外调查和同位素示踪技术,提出了黄河流域河水与地下水之间的八种转化方式,并通过室内物理模拟实验揭示了河水与地下水转化方式对转化量的影响机理。气候变化和人类活动、地质地貌条

件等也是影响地下水与地表水转化关系的重要因素。气候条件对流域 SW-GW 之间的转化关系有重要影响^[46],大气降水通常是水体转化的主要影响因素^[21],而人类活动会对 SW-GW 的相互作用以及转化量造成严重影响,能够导致其作用方式发生转变及增加水质恶化风险^[47]。实际上,国内外对 SW-GW 的补排转化方式、转化量及其影响因素等方面做了大量基础性、开拓性工作,取得了一些共性认识和普适性结论,但主要是基于一些典型流域和干旱-半干旱地区的研究结果,这些结论不能够完全适用于复杂下垫面条件的 SW-GW 转化作用研究。

湿地往往作为一种特殊的下垫面类型,是国内外公认的 SW-GW 频繁转化的复杂地域。尤其是洪泛湿地,受气候变化和人类活动等多因素的复合作用,常由于水力梯度动态变化导致 SW-GW 的作用模式发生改变,甚至补排关系完全颠倒,即 SW-GW 的转化关系和模式可在变化环境下相互转化^[17]。根据湿地 SW-GW 之间的补排关系以及饱和-非饱和流场特征,Jolly 等^[48]将 SW-GW 的转化关系归纳为四种模式(见图 2),即非饱和流-补给型湿地、饱和流-补给型湿地、饱和流-排泄型湿地以及饱和流-贯穿型湿地。如美国 North Dakota 湿地自然状态下属于贯穿型湿地,严峻的干旱情势导致湿地持续补给周边地下水,大规模集中降水后则转变为排泄型湿地^[49]。国内外在湿地 SW-GW 转化关系以及转化量等方面取得了不少研究成果,如 Whittecar 等^[50]以地下水涵养的美国弗吉尼亚湿地为研究区,基于水均衡模型估算了地下水对湿地系统的补给量,重点阐明了地下水位周期性波动对湿地系统的影响。Ludwig 和 Hession^[51]通过观测资料探明了美国东部某河流水情变化对 Chesapeake 洪泛湿地内地下水位的空间分布起主控作用,且湿地水量严重依赖于季节性地下水位波动。Rahman 等^[52]基于 SWATr 模型研究了印度/孟加拉国 Barak-Kushiyara 洪泛湿地 SW-GW 之间的水力联系,发现河流对地下水的补给对维持湿地水量平衡起主要作用。近些年来,不少学者通过对国外一些成功案例的归纳总结旨在强调 SW-GW 转化在我国湿地研究中的重要意义,但目前已有的湿地研究仍鲜有相关方面的实质性报道和进展。湿地 SW-GW 的转化研究涉及若干重要科学问题,但量化层面上的研究相对较少,缺乏对过程和机制的深入见解,导致无法系统诠释湿地生态效应的内涵与意义。

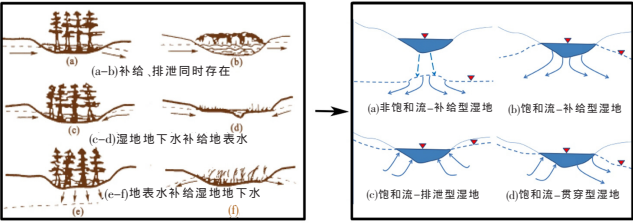


图2 湿地 SW-GW 补排关系与转化模式示意图^[48]
Fig.2 The diagram of recharge-discharge relationship and interaction between surface water and groundwater in wetlands

4 洪泛湿地 SW-GW 研究动态与发展

洪水脉冲最初是作为科学概念提出的,是国际上河流生态学研究中的重要理论成果之一。洪水脉冲属性主要包括洪水量级、洪泛范围、脉冲时间、淹水时间、脉冲形状等,不同的洪水进程对湿地生态系统各属性表现出其特有的作用^[53]。Käser 等^[54]通过 HydroGeo-Sphere 三维数值模拟发现,洪水量级和淹水时间影响了湿地 SW-GW 之间的转化关系,尤其对湿地地下水动力场造成了严重干扰。Guida 等^[55]研究表明,洪水脉冲控制了 Cuiaba River 洪泛湿地的地下水位,导致地下水整体上由河流向洪泛湿地运动,且维持了洪泛湿地的土壤湿度。可见,洪泛湿地的环境系统行为对洪水脉冲变化过程表现得非常明显,随着洪水脉冲作用的发展具有动态变化性(见图 3)。尽管洪水脉冲的驱动作用是普遍存在的,但不同区域的洪泛湿地,因洪水脉冲形式表现得复杂多变,在短期和长期时间尺度塑造了洪泛湿地 SW-GW 之间不同程度和性质的水力联系,亟需加大洪水脉冲作用的研究力度。

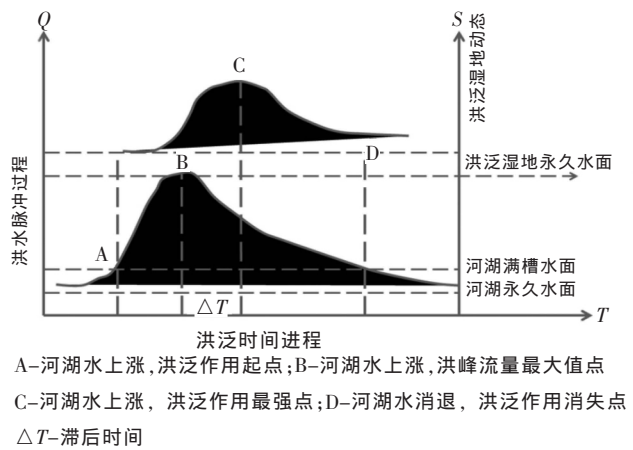


图3 洪泛湿地与洪水脉冲过程发展的水文联系^[10]
Fig.3 The hydrological relationship between floodplain wetland and associated development of flood pulse process

长期以来,国内外学者对洪水脉冲的相关研究更多关注的是洪水模拟预报、洪泛湿地生态干扰等方面,且主要侧重的是不同水体之间的地表水力连通性研究。例如,Bowen 等^[56]通过对洪水脉冲的流量调节来研究河流与洪泛湿地的水力连通性变化,但研究方法对于两区水流交换动态信息难以捕获。普遍认为,较高的洪水量级能够有效促进地表水体向周边湿地的侧向洪泛范围,随着洪水脉冲的增强,水流在洪泛湿地内的平均停留时间缩短,洪泛湿地能够容纳约 40% 的洪峰流量,河流与洪泛湿地之间的水力交换方向和量级具有较强的时空分异特性^[57]。此外,国外不少学者从人为干扰的角度来探析河湖水体与洪泛湿地系统之间的水力连通关系,为湿地生态系统的重建和多目标发展起到了积极作用^[55]。例如,洪泛湿地的地貌变化对河流与洪泛湿地之间的水力交互关系同样具有重要影响,美国 Mississippi River 地貌形态改变能够使洪水脉冲的量级降低至 58%,而建坝等人类活动则进一步减弱了两者之间的水力连通性^[58]。相反,增加洪峰水位以及堤坝移除能够明显增强河流与洪泛湿地系统之间的水力连通条件。事实上,河湖与洪泛湿地系统的洪水脉冲效应不仅仅体现在地表水力联系上,洪水脉冲影响下河湖水体与洪泛湿地地下水之间的动态转化更能从水循环意义上综合考虑地表、地下两方面的水交换与作用过程^[59],具有重要实际意义。

我国是一个河流、湖泊或者海洋广泛分布的国家,由此导致洪泛湿地也是我国重要的湿地类型之一,但围绕这些湿地系统 SW-GW 转化的洪水脉冲效应研究介绍不多,其科学内涵在于研究季节性洪水变化过程对洪泛系统 SW-GW 水文情势的影响,以及洪泛湿地系统生境对这种水文情势变化的适应机制。然而,目前国内实证性的研究工作尚未起步,未来研究工作仍有很大的发展空间。实际上,对于洪泛湿地而言,洪水脉冲本身就是一种外部干扰,尤其是叠加气候和人为干扰的影响,致使洪泛湿地 SW-GW 转化对洪水脉冲驱动响应的方式及程度仍是当前一个科学难点,该方向的深入探讨将对洪泛系统的生态保护和修复具有重要指导意义。

5 关于我国洪泛湿地 SW-GW 转化研究的思考

洪泛湿地是我国诸多生态系统中高度开放、特色突出的洪泛系统,除了在维护湿地生物多样性和生态系统完整性上起到十分重要的作用,也对季节性洪水

变化过程起到过渡和缓冲作用,同时缓解了高变幅水位波动所产生的负面影响。洪泛湿地是我国众多湿地类型中较为普遍的一种,例如分布在我国北方的向海-河流洪泛湿地^[60]、尕斯库勒湖-河流洪泛湿地^[61]、扶余-河流洪泛湿地^[62]、滨海洪泛湿地^[63]以及长江中下游的鄱阳湖-湖泊洪泛湿地等^[64]。与全球其它国家的洪泛湿地相似,湖水位、地下水位和土壤水分等关键水文要素的变化主要取决于洪水脉冲影响下湿地 SW-GW 的频繁转化以及动态的湿地水量平衡^[65]。然而近些年来,来自气候变化和诸多人类活动的严重影响,洪泛湿地受干扰类型和受干扰频率均在不同程度的增加,无疑改变了地表水体与洪泛湿地之间的相互作用,或加大了自然节律下洪泛湿地系统的干扰程度。此外,强人类活动(比如,水库和大坝建设)或将“不可挽回”地改变地表水体季节性洪水的天然“脉搏”,干扰洪水脉冲的变化形式与程度。因地表水体与洪泛湿地相互依存,天然洪泛湿地系统也朝着不确定性和复杂化方向发展,水资源、水质及生态环境等正面临着严峻的变化态势。

鉴于上述分析,从系统角度出发,深入揭示洪泛湿地系统 SW-GW 转化的动力学过程及对洪水脉冲变化的响应机制,这既是一个基础性研究工作,可为后续湿地生态以及生物地球化学等相关研究奠定基础,也是一个具有前瞻性的课题,将为湿地水资源、水环境等综合管理与调控提供科学依据。在气候变化和人类活动干扰的背景下,洪泛湿地 SW-GW 转化关系在不同时间尺度条件下也处在不断地动态调整之中,作者认为应从水资源整体的观念出发,强化洪泛湿地 SW-GW 转化研究在整个水循环研究中的重要地位。

6 基于洪泛湿地特点的 SW-GW 数值模型思考

在变化环境下,具有高度敏感性的洪泛湿地开放系统不断改变其几何形态、形态结构与景观格局,很大程度上影响了数值模型的合理选择与构建^[32]。在边界位置空间变异和边界信息时间动态同时发生的条件下,求解域和边界条件甚至是控制方程的多重不确定性使得洪泛湿地 SW-GW 模拟成为挑战。分布式水文模型能够将洪泛湿地 SW-GW 系统进行网格剖分,各单元之间可通过数学方程控制连接,体现了洪泛系统下垫面的空间异质性,但大多数的分布式水文模型仍以流域为主要模拟对象(例如 SWAT、新安江模型),其主要优势在于重现不同尺度流域上的降雨-径流过程,但往往对地下水运动的刻画较为薄弱,或者不同程

度上弱化了地下水对地表水系统的影响作用。然而在目前已有的地下水流数值模型中(例如 MODFLOW),虽然其物理机制较为明确,但通常将复杂湿地系统作为节点或第一类边界加以考虑,SW-GW 之间的转化关系描述过于概化,也难以反映 SW-GW 转化作用中的非饱和土壤水分运移等关键过程。虽然一些经典的非饱和流模型(例如 HYDRUS)能够充分考虑土壤水和地下水的运动状况,但这些模型通常在遭遇地表淹水情况下,会导致系统计算结果出现严重失真。不难得知,水动力模型具备强大的地表水体模拟能力(例如 MIKE21、EFDC),能够捕捉诸如湿地等地表水体的水位、流速的时空动态变化信息,但基本所有的水动力模型均不考虑地下水流运动。其次,水动力模型精细的时间步长(通常为秒)也很难与地下水流模型(通常为天)进行真正意义上的实时耦合。近些年来,随着计算机技术以及地理信息系统的快速发展,国内外出现了一些考虑地表水与地下水过程的综合模拟模型系统(例如 MIKE SHE、HydroGeoSphere),其基本涵盖了水文循环的各个组分并充分考虑了不同过程之间的耦合,能够通过离散节点的信息传递以实现 SW-GW 之间的转化研究。这些模型的使用率通常不够理想,除了模型构建过程需要大量的基础数据支撑以外,模型的验证工作也是难点之一。

实际上,对于洪泛湿地而言,上述这些数值模型的最大挑战在于能否刻画洪泛湿地地表上边界的洪泛过程。也就是说,洪泛湿地的周期性或季节性干湿交替(动边界处理)是大多数数值模型难以表征的一个重要水文过程。考虑到洪泛湿地是由河湖洪水周期性作用下形成的特殊下垫面,这种周期性作用与潮汐变化过程具有很好的相似性,仅是作用的时间尺度上存在差异。因此,笔者认为在开展洪泛湿地 SW-GW 转化关系的数值模拟研究中,应抓住洪泛湿地的水力驱动特点,可选用一些典型的海岸带地下水流模型(例如 FEFLOW、MARUN)来解决洪泛湿地 SW-GW 转化的动力学机制研究,以此确定 SW-GW 之间的补排转化关系与补给通量,精确刻画洪泛系统的水动力场特征。

7 结语与展望

洪泛湿地 SW-GW 转化过程研究已成为湿地生态水文学等领域关注的焦点,本文系统论述了国内外相关研究进展与动态,从水文学角度而言,认为其主要

研究内容与关键科学问题应包括如下几个方面:(1)洪泛湿地系统水循环要素的变化规律与地下水动力场特征,重点解析地下水动力场对洪水脉冲变化过程的动态响应;(2)洪泛湿地系统 SW-GW 转化模式与相互作用的动力学过程,以机制揭示为目标导向,加强界面迁移转化的动力学过程等科学问题研究;(3)洪水脉冲变化对洪泛湿地系统 SW-GW 转化的影响机制,以洪水脉冲变化为主线,重点解决不同时间尺度上洪水脉冲属性对 SW-GW 转化的影响方式与程度。在此基础上,结合未来气候变化与人类活动影响,评估洪泛湿地水资源的再分配与演化特征,识别 SW-GW 转化作用的响应,提出维系湿地生态系统健康的保护对策。

参考文献:

- [1] 翟金良, 邓伟, 何岩. 洪泛区湿地生态环境功能及管理对策 [J]. 水科学进展, 2003, 14 (2): 203-208.(ZHAI Jinliang, DENG Wei, HE Yan. Flood -plain wetland ecoenvironmental functions and its management countermeasures [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(2): 203-208.(in Chinese))
- [2] Bayley P B. Understanding large river floodplain ecosystems [J]. BioScience, 1995, 45: 153-158.
- [3] Burt T P, Matchett L S, Goulding K W T, et al. Denitrification in riparian buffer zones: the role of floodplain hydrology [J]. Hydrological Processes, 1999, 13: 1451-1463.
- [4] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The flood pulse concept in river floodplain systems [J]. Canadian Special Publication Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, 106: 110-127.
- [5] Brunnep P, Cook P G, Simmons C T. Hydrogeologic controls on disconnection between surface water and groundwater [J]. Water Resources Research, 2009, 45: W01422.
- [6] Wilcox B P, Dean D D, Jacob J S, et al. Evidence of surface connectivity for Texas Gulf coast depressional wetlands [J]. Wetlands, 2011, 31: 451-458.
- [7] Junk W J. Structure and function of the large central Amazonian River floodplain: synthesis and discussion [J]. Springer Berlin Heidelberg, 1997, 126: 455-472.
- [8] Tockner M F, Ward J V. An extension of the flood pulse concept [J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 2861-2883.
- [9] 卢晓宁, 邓伟, 张树清. 洪水脉冲理论及其应用 [J]. 生态学杂志, 2007, 26: 269-277.(LU Xiaoning, DENG Wei, ZHANG Shuqing. Flood pulse concept and its application in river floodplain system [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26: 269-277.(in Chinese))
- [10] 翟金良, 何岩, 邓伟, 等. 河流-洪泛区环境系统特征的初步研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 26(3): 34-40.(ZHAI Jinliang, HE Yan, DENG Wei, et al. Preliminary study on main characteristics of river-floodplain environmental system [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(3): 34-40.(in Chinese))
- [11] Naiman R J, Decamps H, Pollock M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity [J]. Ecological Applications, 1993, 3: 209-212.
- [12] Wood S H, Ziegler A D, Bundarnsin T. Floodplain deposits, channel changes and riverbank stratigraphy of the Mekong River area at the 14th-Century city of Chiang Saen, Northern Thailand [J]. Geomorphology, 2008, 101(3): 510-523.
- [13] Lewis W M, Hamilton S K, Lasi M A, et al. Ecological determinism on the Orinoco floodplain [J]. BioScience, 2000, 50(6): 681-692.
- [14] Lallias-Tacon S, Llébault F, Plégay H. Use of airborne LiDAR and historical aerial photos for characterising the history of braided river floodplain morphology and vegetation responses [J]. Catena, 2017, 149: 742-759.
- [15] Edwardson K J., Bowden W B, Dahm C, et al. The hydraulic characteristics and geochemistry of hyporheic and parafluvial zones in Arctic tundra streams, north slope, Alaska [J]. Advances in Water Resources, 2003, 26: 907-923.
- [16] Rucker K, Schrautzer J. Nutrient retention function of a stream wetland complex -A high-frequency monitoring approach [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(5): 612-622.
- [17] Sophocleous M. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science [J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10: 52-67.
- [18] Marchetti Z Y, Scarabotti P A. Macrophyte assemblages in relation to environmental, temporal and spatial variations in lakes of a subtropical floodplain-river system, Argentina [J]. Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2016, 225: 82-91.
- [19] Burnett W C, Warraykorn G, Supcharoen R, et al. Groundwater discharge and phosphorus dynamics in a flood-pulse system: Tonle Sap Lake, Cambodia [J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 79-91.
- [20] Wang W, Li J, Feng X, et al. Evolution of stream-aquifer hydrologic connectedness during pumping-experiment [J]. Journal of Hydrology, 2011, 402: 401-414.
- [21] Martinez R A. Using Chloride as an Environmental Tracer to Assess Groundwater Recharge in Fractured Rock, Central San Diego County [D]. Dissertations and Theses-Gradworks, 2015.
- [22] 王秀艳. 白洋淀湿地系统地表水和地下水相互关系的研究 [D]. 河北农业大学, 2011. (WANG Xiuyan. Study on Relationship between Surface Water and Groundwater of Baiyangdian Wetland System [D]. Agricultural University of Hebei, 2011.(in Chinese))
- [23] Hunt R J, Strand M, Walker J F. Measuring groundwater-surface water interaction and its effect on wetland stream benthic productivity, Trout lake watershed, Northern Wisconsin, USA [J]. Journal of Hydrology, 2006, 320(3): 370-384.
- [24] Wise W R, Annabll M D, Walcer J A E, et al. A wetland-aquifer interaction test [J]. Journal of Hydrology, 2000, 227(1), 257-272.
- [25] Bye J A T, Narayan K A. Groundwater response to the tide in wetlands: observations from the Gillman Marshes, South Australia [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2009, 84(2): 219-226.

- [26] Emerypeck J J S. Characterization of preferential ground-water seepage from a chlorinated hydrocarbon-contaminated aquifer to west branch canal creek, Aberdeen proving ground, Maryland, 2002-04[R]. USGS, 2007.
- [27] Ladouche B, Weng P. Hydrochemical assessment of the Rochefort marsh: role of surface and groundwater in the hydrological functioning of the wetland[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 314(1-4): 22-42.
- [28] Turner J V, Townley L R. Determination of groundwater flow-through regimes of shallow lakes and wetlands from numerical analysis of stable isotope and chloride tracer distribution patterns[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 320(3-4): 451-483.
- [29] Anibas C, Fleckenstein J H, VOLZE N, et al. Transient or steady-state using vertical temperature profiles to quantify groundwater-surface water exchange [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(15): 2165-2177.
- [30] Parsons D F, Hayashi M, Garth V D K. Infiltration and solute transport under a seasonal wetland: bromide tracer experiments in Saskatoon, Canada[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(11): 2011-2027.
- [31] Krause S, Bronstebt A, Zehe E. Groundwater - surface water interactions in a north German lowland floodplain-implications for the river discharge dynamics and riparian water balance [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 347(3-4): 404-417.
- [32] 范伟, 章光新, 李然然. 湿地地表水-地下水交互作用的研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27 (4): 413-423. (FAN Wei, ZHANG Guangxin, LI Ranran. Review of groundwater-surface water interactions in wetland [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27 (4): 413-423. (in Chinese))
- [33] Rutledge A T. Methods of using stream flow records for estimating total and effective recharge in the Aaoalachian Valley and Ridge, Piedmont, and Blue Ridge physiographic Provinces [J]. *Water Resources*, 1992, 17: 59-73.
- [34] Christensen S, Rasmussen K R, Moller K. Prediction of regional ground water flow to streams[J]. *Ground Water*, 1998, 3(2): 351-360.
- [35] Hu L, Xu Z, Huang W. Development of a river-groundwater interaction model and its application to a catchment in northwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 483-500.
- [36] Otz M H, Otz H K, Otz I, et al. Surface water/groundwater interaction in the Piora Aquifer, Switzerland: evidence from dye tracing tests[J]. *Hydrogeology Journal*, 2003, 11: 228-239.
- [37] Constantz J, Cox M H, SU G W. Comparison of heat and bromide as ground water[J]. *Water*, 2003, 41(5): 647-656.
- [38] Rassam D W. A conceptual framework for incorporating surface-groundwater interactions into a river operation-planning model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(12): 1554-1567.
- [39] Parkin G, Birkinshaw S J, Younger P L, et al. A numerical modeling and neural network approach to estimate the impact of groundwater abstractions on river flows [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 339: 15-28.
- [40] Zheng Q, Ma T, Wang Y, et al. Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater in Xincai River Basin, Northern China [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, 17: 368-371.
- [41] Keery J, Binley A, Crook N, et al. Temporal and spatial variability of groundwater-surface water fluxes: development and application of an analytical method using temperature time series [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 336: 1-16.
- [42] 聂振龙, 陈宗宇, 程旭学, 等. 黑河干流浅层地下水与地表水相互转化的水化学特征[J]. *吉林大学学报*, 2005, 35(1): 48-53. (NIE Zhenlong, CHEN Zongyu, CHENG Xuxue, et al. The chemical information of the interaction of unconfined groundwater and surface water along the Heihe River, Northwestern China [J]. *Journal of Jilin University*, 2005, 35(1): 48-53. (in Chinese))
- [43] Weitz J, Demlie M. Conceptual modelling of groundwater - surface water interactions in the Lake Sibayi Catchment, Eastern South Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2013, 99: 613-624.
- [44] Bouwer H, Iii M T. Making sense of the interactions between groundwater and streamflow: lessons for water masters and adjudicators[J]. *River*, 1997, 6:19-31.
- [45] Ala-Aho P, Rossi P M, Klöve B. Estimation of temporal and spatial variations in groundwater recharge in unconfined sand aquifers using Scots pine inventories [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2015, 19(7): 1961-1976.
- [46] Brunke M, Gonser T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 1-33.
- [47] Murgulet D, Murgulet V, Spalt N, et al. Impact of hydrological alterations on river-groundwater exchange and water quality in a semi-arid area: Nueces river, Texas [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 595-607.
- [48] Jolly I D, Mcewan K L, Holland K L. A review of groundwater - surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology [J]. *Ecohydrology*, 2010, 1(1): 43-58.
- [49] Rosenberry D O, Winter T C. Dynamics of water-table fluctuations in an upland between two prairie-pothole wetlands in North Dakota[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 191(1-4): 266-289.
- [50] Whittecar G R, Dobbs K M, Stone S A, et al. Use of the effective monthly recharge model to assess long-term water-level fluctuations in and around groundwater-dominated wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 462-472.
- [51] Ludwig A L, Hession W C. Groundwater influence on water budget of a small constructed floodplain wetland in the ridge and valley of Virginia, USA[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, 4: 699-712.
- [52] Rahman M M, Thompson J R, Flower R J. An enhanced swat wetland module to quantify hydraulic interactions between riparian depressional wetlands, rivers and aquifers [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 84: 263-289.
- [53] Junk W J, Wantzen K M. The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications-an update [A]. *Proceedings of the*

- Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries [C]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and the Mekong River Commission (MRC), 2004.
- [54] Käser D, Brunner P, Renard P, et al. Effects of a flood pulse on exchange flows along a sinuous stream [J]. European Geophysical Union, 2012.
- [55] Guida R J, Swanson T L, Remo J W F, et al. Strategic floodplain reconnection for the lower Tisza River, Hungary: opportunities for flood-height reduction and floodplain-wetland reconnection [J]. Journal of Hydrology, 2015, 521: 274–285.
- [56] Bowen Z H, Bovee K D, Waddle T J. Effects of flow regulation on shallow-water habitat dynamics and floodplain connectivity [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2003, 132(4): 809–823.
- [57] 陈孝兵, 陈力, 赵坚. 美国迈卡伦湿地河流主槽-洪泛区水力连通特征 [J]. 水力发电学报, 2015, 34 (6): 100–106.(CHEN Xiaobing, CHEN Li, ZHAO Jian. Hydrological connectivity between main river channel and floodplain at McCarran Ranch wetland, USA[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 (6): 100–106. (in Chinese))
- [58] Edwards B L, Keim R F, Johnson E L, et al. Geomorphic adjustment to hydrologic modifications along a meandering river: implications for surface flooding on a floodplain [J]. Geomorphology, 2016, 269: 149–159.
- [59] Kennedy J, Rodríguez-Burgueño, Ramírez-Hernández J. Groundwater response to the 2014 pulse flow in the Colorado River Delta[J]. Ecological Engineering, 2016, 106: 715–724.
- [60] 翟金良, 何岩, 邓伟. 向海洪泛湿地土壤对氮和磷的滤过截留作用及影响因素分析[J]. 土壤, 2003, 35(4): 314–319.(ZHAI Jinliang, HE Yan, DENG Wei. N and P interception functions of flooding wetland soil in Xianghai and their influencing factors [J]. Soils, 2003, 35(4): 314–319. (in Chinese))
- [61] 黄蓉, 王辉, 马维伟, 等. 东海洪泛湿地退化过程中土壤理化性质的变化特征 [J]. 水土保持学报, 2014, 28 (5): 221–227.(HUANG Rong, WANG Hui, MA Weiwei, et al. Soil physicochemical properties characteristics during degradation process of the flooding wetland in Gahai [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 221–227. (in Chinese))
- [62] 周建伟, 郎玉良. 湿地景观资源开发及其对环境的影响评析——以扶余洪泛湿地自然保护区为例 [J]. 内蒙古林业调查设计, 2014, 37(5): 19–21.(ZHOU Jianwei, LANG Yuliang. Comment on wetland development and its impact on the environment landscape resources—floodplain wetlands in Fuyu Nature Reserve [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2014, 37(5):19–21. (in Chinese))
- [63] 李建国, 濮励杰, 徐彩瑶, 等. 1977–2014年江苏中部滨海湿地演化与围垦空间演变趋势[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 17–28.(LI Jianguo, PU Lijie, XU Caiyao, et al. The changes and dynamics of coastal wetlands and reclamation areas in central Jiangsu from 1977 to 2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1):17–28. (in Chinese))
- [64] LI Y L, YAO J, ZHAO G, et al. Evidences of hydraulic relationships between groundwater and lake water across the large floodplain wetland of Poyang Lake, China [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2017, 18(2):ws2017150.
- [65] Wassen M J, Okruszko T, Kardel I, et al. Eco-Hydrological Functioning of the Biebrza Wetlands: Lessons for the Conservation and Restoration of Deteriorated Wetlands [M]. Wetlands: Functioning, Biodiversity Conservation, and Restoration, 2006,191: 285–310.

Advances in Surface Water–Groundwater Interactions in Floodplain Wetlands

LI Yunliang, YAO Jing, TAN Zhiqiang, ZHANG Qi

(Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The research on the interactions between surface water (SW) and groundwater (GW) has important significance in theory and practice for comprehensively managing water resources in floodplain wetlands. This paper conducted the review of SW–GW interactions in floodplain wetlands, which provides useful information for understanding the development, trend and methods of SW–GW interactions. Generally, floodplain wetland is a distinctive hydrological system in various ecological systems. The dynamic processes of SW–GW interactions enhance the transfer and exchange for mass, energy and information in floodplain wetlands, which are strongly influenced by the specific hydrological variations and periodic flood pulses in their adjacent surface waterbodies. In addition, the SW–GW interactions have important effects on the eco-hydrology, including the wetland evolution, material cycling and biological growth. The interdisciplinary theories and methods determined by the openness and complexity in floodplain wetlands are becoming the popular strategy to explore the SW–GW interactions. The SW–GW fitted numerical models combined with multisource data can be used to reveal the interactions between floodplain GW and adjacent SW and other associated scientific questions. The outcomes in this study will contribute to the water resources and ecological effects in floodplain wetlands.

Key words: floodplain wetland; SW–GW interaction; flood pulse; numerical simulation; ecological effect