

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2019.0626

陈静,罗明明,廖春来,等.中国岩溶湿地生态水文过程研究进展[J].地质科技情报,2019,38(6):221-230.

中国岩溶湿地生态水文过程研究进展

陈 静^{1,2a}, 罗明明^{1,2a}, 廖春来^{2a}, 马 瑞^{2a}, 周 宏^{2b}, 邹胜章³, 陈植华^{2a}

(1.自然资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2.中国地质大学(武汉) a.环境学院;
b.地质调查研究院, 武汉 430074; 3.中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘 要:岩溶湿地是广泛分布于岩溶地区的一种特殊的湿地类型。受特殊水文地质结构的控制,岩溶湿地生态系统的结构和功能与其他湿地类型有着显著差异。基于国内外湿地及岩溶湿地相关研究成果的基础上,阐述了我国西南岩溶湿地具有上下双层结构、封闭的储蓄水构造、快速的生态水文循环等特点,以及地表水—地下水转化、生态需水转化的规律和研究方法,分析了人类活动对岩溶湿地水量、水质以及生态系统演化的影响,并总结了岩溶湿地生态水文模型的研究现状及发展趋势。最后,针对目前岩溶湿地生态水文过程研究中存在的问题,提出在未来研究中应加强对岩溶湿地结构及生态水文循环过程的研究、查明人类活动对岩溶湿地产生的影响、构建生态水文耦合模型等建议。

关键词:岩溶湿地;生态系统;生态水文过程;水文模型

中图分类号:P642.25

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2019)06-0221-10

Review of Eco-hydrological Process in Karst Wetlands of China

Chen Jing^{1,2a}, Luo Mingming^{1,2a}, Liao Chunlai^{2a}, Ma Rui^{2a},
Zhou Hong^{2b}, Zou Shengzhang³, Chen Zhihua^{2a}

(1.Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources, Guilin Guangxi 541004, China;
2a.School of Environmental Studies; 2b.Institute of Geological Survey, China University of
Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China; 3.Institute of Karst Geology, Chinese Academy of
Geological Sciences, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Karst wetland is a special type of wetlands, widely distributed in karst areas. Controlled by the special hydrogeological structures, the structure and function of wetland ecosystems in karst areas are significantly different from those of other wetland types. Based on the summary of previous researches about wetlands and karst wetlands all around the world, this paper illustrates the characteristics of double-layer structure, closed water-storing structure, rapid eco-hydrological cycle in karst wetlands of Southwest China, and the law and research methods of surface water-groundwater conversion and ecological water conversion. Also, the paper analyses the influences of human activities on water quantity, water quality and ecosystem of karst wetland, and the developments of eco-hydrological models of karst wetland. Finally, in view of the existing problems in current researches of eco-hydrological process in karst wetlands, this paper suggests that the study on the structure of karst wetlands and the process of eco-hydrological cycle should be strengthened, the impact of human activities on karst wetland should be identified, and the eco-

收稿日期: 2019-02-02 编辑: 刘江霞

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0406105; 2017YFC0406104); 自然资源部岩溶动力学重点实验室开放基金(KDL201702); 国家自然科学基金项目(41807199); 湖北省自然科学基金项目(2018CFB170); 中国地质调查局项目(DD20160304; DD20190824); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUG170670)

作者简介: 陈 静(1998—), 女, 现正攻读水文地质学博士学位, 主要从事岩溶水文地质研究工作。E-mail: jchen@cug.edu.cn

通信作者: 罗明明(1989—), 男, 副教授, 主要从事水文地质环境地质方面的教学与科研工作。E-mail: luomingming@cug.edu.cn

hydrological coupling model should be constructed in the future study.

Key words: karst wetland; ecosystem; eco-hydrological process; hydrological model

湿地被称为“地球之肾”，是地球表层系统的重要组成部分，是自然界最具生产力、价值最高的生态系统之一，它与森林、草地、农田、海洋等生态系统共同维系着地球表层生物多样性和生态平衡。尽管湿地仅占全球陆地面积的 5%~8%^[1]，但却是不可替代的自然综合体，具有调节气候、涵养水源、抵御洪水、蓄洪防旱、净化环境、保护生物多样性和维持生态平衡等功能^[2]。在气候变化和人类活动的双重影响下，全球与流域尺度上水循环和水资源量时空分布发生了巨大变化，导致湿地面积大幅度萎缩、功能严重退化乃至丧失，影响并改变了流域水文过程及水量平衡，增加了旱涝灾害的频次和强度，已引起国际社会和专家学者的普遍关注和高度重视^[3]。

湿地系指天然或人工、长久或暂时性沼泽地、湿原、泥炭地或水域地带，带有或静止或流动、或为淡水、半咸水、咸水水体者，包括低潮时水深不超过 6 m 的海域^[4]。我国是世界上湿地分布面积广、湿地种类最齐全的地区之一^[5]。我国西南地区由于岩溶广泛发育，且受到特殊地质条件的控制，形成大量岩溶湿地^[6]。岩溶湿地(karst wetland)是指主要分布在岩溶地区(包括地表、地下)，或以岩溶水为主要补给水源，具有岩溶地区特有的富钙偏碱性水土特征和典型岩溶水土循环演化机制，以喜钙耐碱的湿地生物群落为主或与喜钙耐碱的生物群落相互依存为特征的内陆湿地，包括岩溶地区地表或地下的湖泊、沼泽、河流或其他地下岩溶水文系统^[7]。

我国西南岩溶区是世界上岩溶分布最广泛、类型最复杂的区域之一^[8-9]。西南地区的岩溶湿地分布较多，水文系统具有地表、地下双重空间结构，渗漏性强，降水入渗补给系数大，水文过程变化迅速，旱涝灾害频繁，决定了该地区的岩溶湿地生态系统的特殊性、复杂性和脆弱性，因而受到国内外学者的广泛关注^[10]。同时，随着人类活动的日益频繁，不少岩溶湿地正在退化，水面逐渐萎缩，水质状况堪忧。开展岩溶湿地生态水文过程的研究，对岩溶地区的水土资源保护与开发、生态修复以及丰富岩溶生态学理论等具有重要的意义。

1 我国西南岩溶湿地的特点

岩溶湿地是一类具有典型岩溶地区水文特征和重要环境影响的特殊内陆淡水湿地^[11]。岩溶区作为典型的生态脆弱区，其水文地质条件和水循环过程与非岩溶区相比存在显著差异^[12]。岩溶湿地与

其他湿地类型在成因、演化、空间形态(地表、地下)和水文特征(水文过程、物质能量转换)及生态功能上有着明显区别，岩溶湿地的主要特征有：规模小、数量相对偏少、稳定性差、相对隐蔽、植被特殊、水土循环机制特殊等。我国西南地区著名的岩溶湿地有贵州威宁草海、云南纳帕海、贵州红枫湖、贵州织金八步湖、湖北神农架大九湖等，以及黔西、黔西南的数量多而单个面积较小的湖泊与沼泽湿地，还有广西桂林附近湖泊型和沼泽型的会仙湿地等^[7]。

1.1 地表—地下双层水文地质结构

岩溶含水层与裂隙和孔隙含水层之间存在显著差异，主要表现在其较强的空间非均质性、较大的孔隙度以及较好的连通性^[13-15]。我国南方岩溶水系统常常是由洞穴、管道、裂隙、孔隙等多重介质构成，含水介质具有高度非均质性和各向异性，岩溶洼地和落水洞等地表岩溶形态十分发育，地表土壤层分布极不均一，发育地表河流、湖泊和岩溶地下河等多种岩溶湿地类型(图 1)。

在排水不畅的岩溶洼地内易形成季节性的湖泊或沼泽型岩溶湿地；而在地下则又会形成岩溶地下河湿地。岩溶地下河往往成为岩溶区地表河流的主要补给源，甚至是地表河流的发源地，形成地表河流型湿地，因此在岩溶区由于多层的水文地质结构而形成多层岩溶湿地景观。

1.2 相对封闭的储蓄水构造

岩溶湿地往往是由相对封闭的、储水条件良好的岩溶水系统构成。岩溶封闭储水地质体往往是由岩溶含水地质体与能有效富集并储存岩溶地下水的封闭界面所组成的相对封闭的三维岩溶水文地质结构体^[5]。常见的岩溶封闭储水构造有向斜储水、单斜储水、背斜储水、断裂储水等(图 2)。例如，广西桂林会仙岩溶湿地则是由多个复式向斜构成的汇水盆地(图 3)。

岩溶封闭储水构造的存在是岩溶储水的必要条件，是天然岩溶水库、岩溶地下水库的基础，在调节岩溶地下水资源、有效开发岩溶地下水资源和保护生态环境等方面有着十分重要的作用。

1.3 快速的生态水文循环过程

水是七大生态因子(土壤、水分、温度、光照、大气、火和生物)之一，水与生态系统相互影响，相互制约。水是湿地能量传递和物质循环的主要媒介^[16]，湿地水文过程在湿地的形成、发育、演替直至消亡的全过程中起着直接而关键的作用^[17]。湿地植物的生长离不开水，水资源的时空分布模式直接影响植

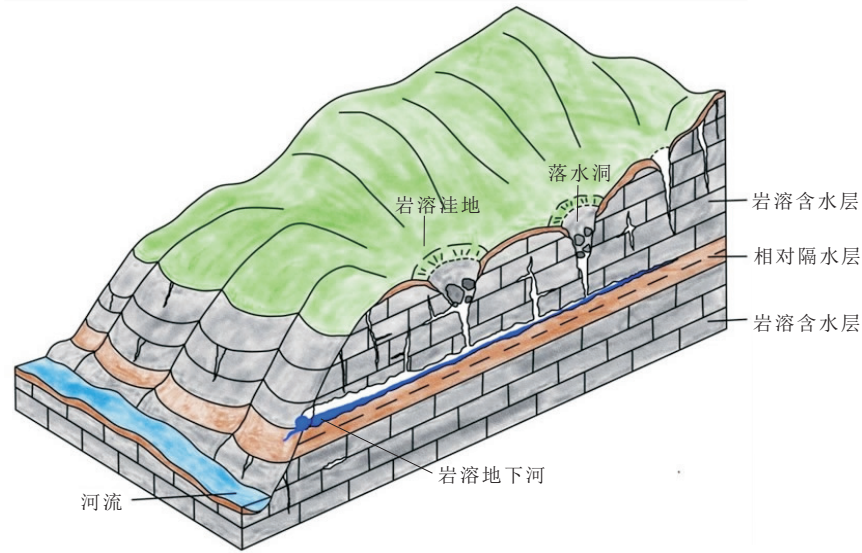


图1 典型南方岩溶水系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of typical karst water system in South China

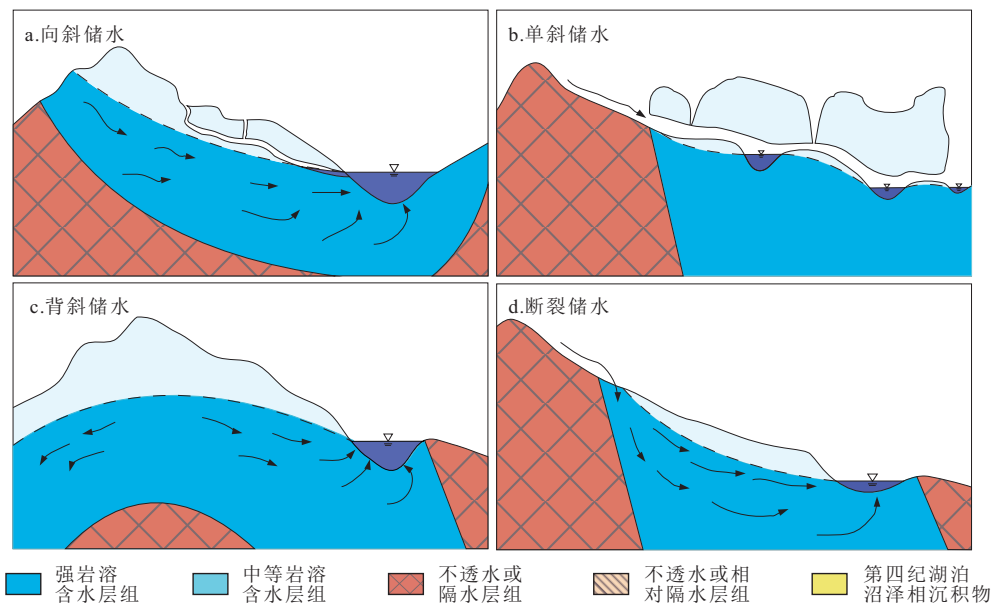
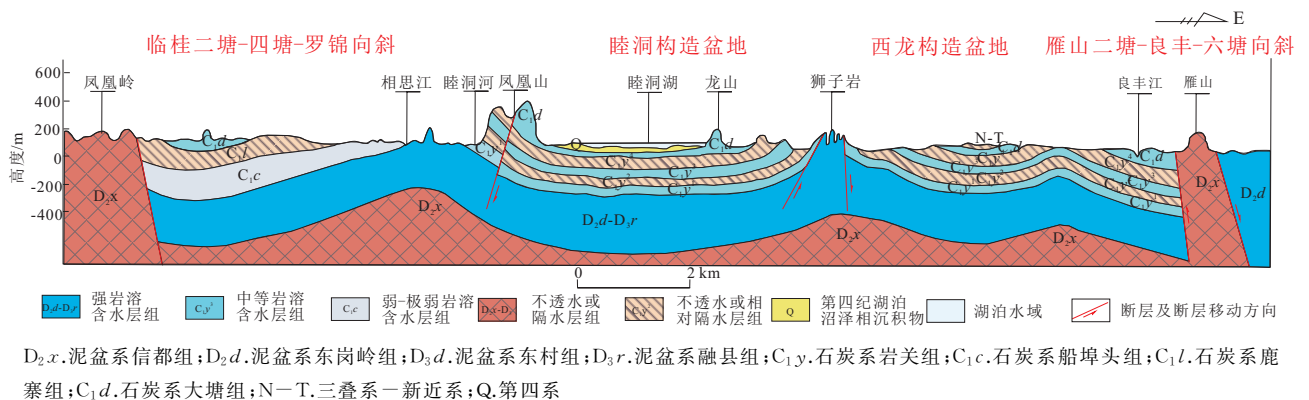


图2 几种常见的岩溶封闭储水地质体(据文献[9]修改)

Fig.2 Several common karst aquifer traps



D_{2x} . 泥盆系信都组; D_{2d} . 泥盆系东岗岭组; D_{3d} . 泥盆系东村组; D_{3r} . 泥盆系融县组; C_{1y} . 石炭系岩关组; C_{1c} . 石炭系船埠头组; C_{1l} . 石炭系鹿寨组; C_{1d} . 石炭系大塘组; $N-T$. 三叠系-新近系; Q . 第四系

图3 广西桂林会仙岩溶湿地水文地质剖面图(据文献[5]修改)

Fig.3 Hydrogeological section of Huixian karst wetland, Guilin, Guangxi

物群落的分布、组成和结构;另一方面,植物通过降雨截留、凋落物储水和植物用水等过程对地面一大气系统的水文通量产生强烈影响,进而影响着整个湿地水文循环^[18]。岩溶湿地具有典型岩溶地区的

水循环机制和水文特征^[11],其生态系统的水文循环过程如图4所示。岩溶湿地受岩溶水系统结构的控制,其水文过程具有多峰多谷、水位变幅不均、对降雨响应时间短的特点^[19]。

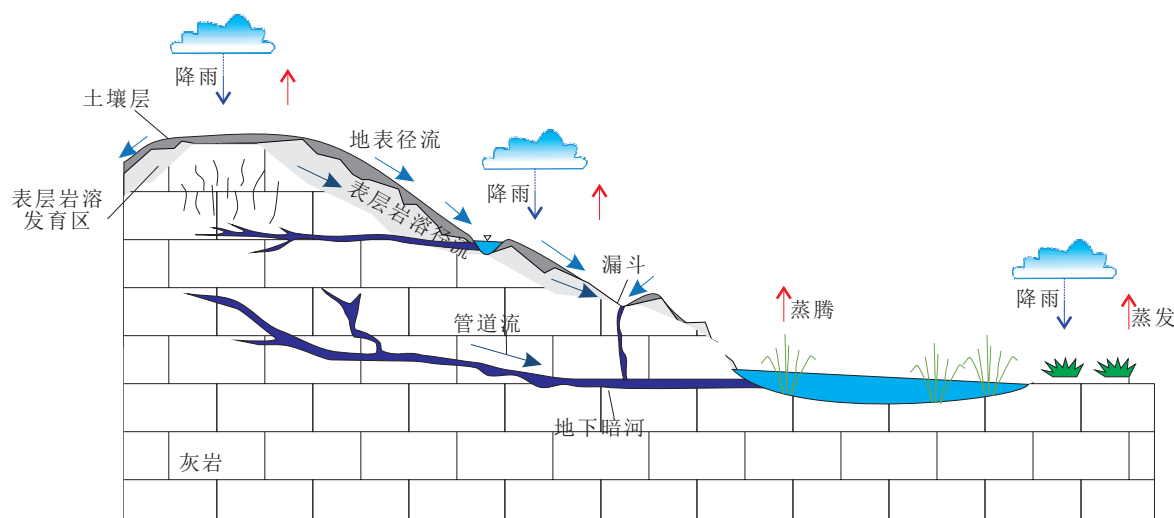


图4 岩溶湿地生态系统水文循环示意图

Fig.4 Schematic diagram of hydrologic cycle in karst wetland ecosystem

大气降水是岩溶湿地最主要的补给来源,降水落到地面后,部分被植物截留而蒸发,部分积聚于洼地而蒸发^[20];剩余的水量,部分滞留于土壤或表层岩溶带,支撑植物的生长,部分转化为地表径流和地下径流。植物蒸腾和土壤水蒸发决定了土壤向大气的水分通量,剩余的土壤水可以通过不同的水流路径形成地下径流^[21]。

湿地生态系统受到植被用水和地下径流相互作用的控制^[21]。湿地生态系统是典型的地下水依赖型生态系统^[22-23],地下水分布面积广,是湿地生态系统的主要供水水源^[24]。地下水通过补给及排泄,与外界交换物质与能量,保持生生不息的循环交替,支撑湿地水文系统和生态系统的运行^[20]。地下水的水位、流量、水质等都可能对湿地生态系统产生重要影响,其中地下水水位和流量是保证湿地生物在其主要生理阶段处于积水状态的关键所在;而当地下水产生污染时,可能导致由其补给的湿地生态系统因水质变化而影响植被生长,例如暴发藻华或敏感物种消亡。

在岩溶地区,受“土在楼上、水在楼下”的双层水文地质结构的影响,大气降水在地表快速向地下漏失,地下河也呈现快速的水文响应,易旱易涝,使得岩溶湿地的水位和流量动态变化极大;同时,岩溶水富钙偏碱,加之岩溶水的易损性高,地表的污染物极易通过落水洞快速污染地下水。岩溶水在水量和水质上的动态易变性,快速的水文过程也极易引起生

态过程的变化,导致岩溶湿地生态系统极为敏感而脆弱。

2 岩溶湿地的水量转化

2.1 地表水与地下水相互转化

岩溶地下水和地表水不是水文系统的孤立组成部分,而是关联十分紧密的水文连续体^[25-26]。充分认识地下水与地表水相互作用是管理和保护岩溶湿地的必要条件^[27]。在岩溶湿地特殊的地质环境中,其地下水与地表水的动态变化存在着直接联系^[6],落水洞、岩溶管道、洞穴等岩溶形态的存在使地下水对地表水变化的响应十分迅速^[28],管道流的存在是岩溶地下水最显著的特征。

岩溶湿地广泛存在于岩溶地下水的排泄点。由于岩溶水系统结构的特殊性,且土壤层的厚度较薄,地下水具有与地表水相似的水文特征,如多峰多谷特征明显、对降水事件的响应时间短等^[5]。对于中国南方岩溶区,地下水和地表水往往通过落水洞、地下河出口等频繁发生转换而难以区分。

例如,在广西桂林会仙岩溶湿地,其丰水期和枯水期分别表现出不同的地表水与地下水转化关系^[5]。在雨季,会仙岩溶湿地接受大气降水和周边南北两侧岩溶山区的地表水和地下水,盆地储水丰富,湖泊和沼泽广泛分布,湿地核心区睦洞湖的水域面积此时最大;在旱季,会仙岩溶湿地周边的下层岩

溶含水系统的地下水位低于上层储水盆地的地表水和地下水水位,上层盆地的水通过边缘的落水洞反向补给周边的地下水(图5)。

2.2 岩溶湿地的生态需水转化

生态需水研究是近年来国内外广泛关注的热点^[29],生态需水机理本质上是生态系统对不同水文情势的响应规律,主要集中在对水文情势指标与生态指标之间关系的定性或定量描述^[17]。广义湿地生态需水量是指维持湿地系统生态平衡和正常发展、保障湿地系统水文功能及相关环境功能正常发挥所需的水量。狭义湿地生态需水量是指在一定时空尺度下,湿地用于生态消耗和环境消耗而需要补

充的水量^[30]。从岩溶湿地生态水文过程的水均衡角度考虑,狭义上湿地生态需水量的刻画对研究岩溶湿地水文循环更具参考价值。目前,湿地生态需水量的研究主要聚焦于对水分—生态的耦合作用机理,在此基础上计算湿地生态需水量,强调水资源在整个湿地生态系统中的地位和作用^[17]。鉴于岩溶湿地生态需水量的空间和时间变化性,湿地生态配水也是动态变化的。为了制定具有时效性和可操作性的湿地恢复的最佳水资源调控方案,需要研究湿地空间范围在时间尺度上的分布规律和制约机制,从整体性的角度建立湿地补水过程的模型和湿地水环境系统调控模型^[31]。

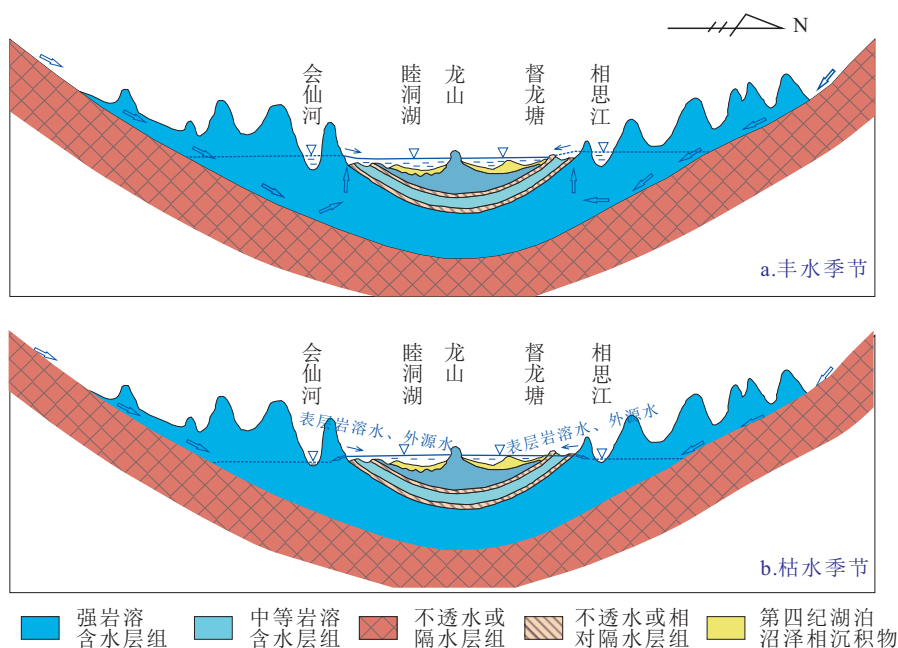


图5 广西桂林会仙岩溶湿地水量转换关系示意图(据文献[5]修改)

Fig.5 Sketch of water transfer in Huixian karst wetland, Guilin Guangxi

2.3 水量转化研究的方法

地表水与地下水相互作用受多重因素的影响^[32],地表水与地下水的相互转化过程可通过多方面指标来体现,如水质、水量和水温等^[33]。目前研究岩溶地表水和地下水相互作用最主要的途径是,通过地下水水力特征和水文地球化学组分对季节和降水事件的响应来刻画转化过程,以及利用同位素方法对水循环进行示踪等^[28,34]。借鉴一般湿地地表水与地下水交互作用的研究方法^[24],结合岩溶湿地的结构特征以及岩溶水文地质学的研究方法^[35],可用于岩溶湿地地表水与地下水交互作用的研究方法可归纳为以下5种:水文学方法、水力学方法、示踪法、生物指示法和模型模拟法(表1)。

水文学方法和水力学方法是量化地表水与地下水相互作用的传统方法,示踪试验法和模型模拟法

是目前较为有效的量化地下水—地表水相互作用的方法^[36]。其中,示踪试验法包括热量示踪、同位素示踪以及人工化合物示踪试验等。热量示踪法是一种成本低、易于操作、能连续监测的天然示踪方法^[37],能通过水温变化来揭示不同级次岩溶水流系统的补给过程与沿程的水量交换情况^[38]。同位素示踪法是目前在进行地表水与地下水相互作用研究时的主要应用方法,前人在多个湿地的地表水—地下水转化关系研究中得到了成功应用^[39-40]。示踪试验法也被广泛应用于揭示岩溶地表水与地下水的转换关系,其擅长于辨识岩溶水的补排关系和径流途径^[41-42],还可以用于计算地下水流和溶质运移的相关水文地质参数^[43-44]。在实际工作中,往往将各种方法联合运用,互相补充,从而加深对岩溶湿地地表水—地下水交互作用的认识。

表 1 岩溶湿地地表水与地下水转化研究方法

Table 1 Methods for study on surface water and groundwater interactions in karst wetlands

方 法	原 理	优 点	不 足
水文学方法	利用水均衡方程、泉流量曲线等确定地表水—地下水转换量	可操作性强,实际应用较为广泛	具有较大的不确定性,无法刻画内部转化过程
水力学方法	通过钻孔、抽水试验等测定水文地质参数,以求得地表水—地下水转换量	能提供水位关系、渗透率等水文特征的直观认识	具有较强的非均质性,岩溶区的代表性有限
示踪试验法	利用外源化合物或稳定的水理指标示踪地表水—地下水界面的迁移路径,指示二者之间的水力联系	能明确查明岩溶地下水流的连通性	人工示踪可能造成污染,对实验场地条件要求高
生物指示法	建立湿地水文过程与植物、动物和微生物之间的关系,通过生物响应指示水文情势变化	能够详细刻画湿地生态水文过程	难以构建岩溶湿地水文过程与生物之间的对应关系
模型模拟法	在确定湿地水文地质结构与水文模型各要素后,对地表水—地下水之间的交互作用进行反推计算	可定量刻画地表水与地下水间的交换量及动态变化	难以查明岩溶水系统的空间结构特征

湿地生态需水量的研究方法主要有水文学方法、生态学方法以及生态水文学方法^[31]。水文学方法主要从宏观上建立湿地水文模型,其成本低、所需资料较少,但可信度较低;生态学方法主要从微观上分项计算生态需水量,其精度高,但数据获取难度较大;生态水文学方法则是水文学方法和生态学方法的结合,其有较强的实际操作性,但水文过程与生态过程的耦合较难。

3 岩溶湿地系统的演化

3.1 湿地水量对人类活动的响应

湿地是地球上单位面积生态系统服务价值最高的生态系统类型,不仅在维系区域生态安全中扮演重要角色,而且具有巨大的水源涵养和气候调节等生态系统服务功能^[45]。湿地的大面积萎缩可能会带来如生物多样性锐减、旱涝灾害频发、洪水调控功能下降等一系列生态环境问题^[46-47];对于岩溶湿地,还有可能造成岩溶石漠化等生态系统的退化问题。

近年来,随着人类对湿地资源的开发利用活动增多,并且缺乏有效的管理和保护,湿地不断受到破坏,水位逐渐下降^[48],面积逐渐萎缩^[6],湿地生态系统受到严重破坏^[49]。人类活动对湿地面积的影响主要体现为两种方式^[50]:一是直接方式,包括围湖(沼泽)造田^[51]、围湖养殖或在沼泽中开挖鱼塘、养殖场等破坏性开发;另一种是间接破坏,主要包括开挖沟渠,疏干湿地地表水和过量利用湿地水资源,造成湿地水资源的枯竭、水域面积减少和沼泽萎缩。

目前,湿地面积监测主要应用 3S 技术,利用近期的卫星影像资料量测获得。遥感作为资源环境调查的先进技术手段,在岩溶湿地的调查和监测中发挥着重要作用^[52]。蔡德所等^[50]采用遥感反演分析

方法,对广西会仙岩溶湿地的形成演化进行了分析研究,发现近 40 a 来自然湿地面积从 42 km² 减小到目前约 15 km²,表明湿地生态结构逐步从自然湿地向人工湿地转化。

3.2 湿地水质对人类活动的响应

湿地与其他陆地生态系统相比,其显著的特征是生长有大量水生植被^[53],而岩溶地区地下水和地表水相对于其他地区含有大量 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻^[54],研究表明部分水生植物能直接利用水体 HCO₃⁻ 进行光合作用^[55]。湿地水质与水生植物的关系非常密切,两者之间相互依存,维持良好的稳定状态。水质下降会改变水生生物的生存环境,导致水生生物种群动态和群落结构与功能变化,影响湿地生态服务功能^[56]。

随着社会生产的发展,人类活动对湿地水质的影响日益增大。这种影响主要表现在两个方面:一是人类的生产和生活产生的废弃物通过水文循环使湿地水质产生污染^[16];二是人类通过生产活动改变了土壤性质^[51]和地下水的形成条件,从而使其化学成分发生相应的变化。农业面源污染是岩溶湿地水质污染的主导因素^[56]。大量氮磷、重金属元素及有机物的迁移富集导致了湿地水质恶化^[57],随之衍生的氮磷硫等元素的生物地球化学行为对水文地球化学演化产生不利影响^[58]。例如,贵州威宁草海周边土壤和河流均受到不同程度的污染^[59],广西会仙岩溶湿地水体富营养化现象严重,部分水域水质达到Ⅳ、Ⅴ类^[60]。

对湿地水质的保护与修复,应建立在厘清污染源的基础之上^[60]。通过对湿地水质特征及其变化规律的研究,可以反映周边人类活动对水体的影响^[61]。在岩溶湿地污染源的解析方面,同位素示踪技术被广泛利用。例如,硝态氮污染是岩溶湿地最

常见的污染之一,由于岩石风化过程中一般不产生 NO_3^- ^[62],水体中 NO_3^- 主要来自农业施肥、工业活动和天然水体的硝化作用,因而硝酸盐氮氧同位素技术在湿地硝酸盐污染的溯源及迁移转化研究中有重要应用。

3.3 岩溶湿地生态系统的演化

岩溶湿地生态系统是岩溶地区一种独特的生态系统,其生产力低,恢复能力差,敏感性强,易受外界干扰且遭受破坏后极难恢复,它的形成与演化不仅受到区域自然环境变化因素的制约,还受到人类活动的强烈影响^[63]。人类对岩溶湿地自然资源的过度垦殖造成了湿地的严重退化,强烈干扰到天然状态下的地表水—地下水循环^[64],致使其一系列生态功能减弱甚至完全丧失^[65]。

岩溶水系统对外界环境变化反馈敏感^[66],剧烈人类活动干扰使流域尺度上水循环和水资源量时空分布发生了深刻变化,影响并改变了流域水文过程及水量平衡,导致湿地面积大幅度萎缩、功能严重退化乃至丧失,导致岩溶生态环境问题日趋突出,如石漠化、工程性缺水、岩溶地下水污染等^[12]。如历史上贵州威宁草海曾进行过大规模人工排水,导致了明显的地方性生态失调^[67]。

经济增长导致生态用水和农业生产用水矛盾突出^[23]。对于岩溶湿地生态系统,经济发展对灌溉农业的高度依赖使得湿地水资源被掠夺性开发,引发区域水流模式改变,影响水资源分布格局和生态过程^[68],严重威胁岩溶湿地生态健康和系统稳定性^[69]。广西会仙岩溶湿地内除尚存一些水生植物外,生物多样性已基本不复存在^[46]。在岩溶湿地生态退化不可逆转的条件下,将稻田作为人工湿地加以保护,是维持湿地生态系统最佳的土地利用方式^[51,65]。

4 岩溶湿地生态水文模型

4.1 研究现状

水文模型是对自然界水文过程的数学描述,是研究水文循环和各种水文过程中无法替代的工具^[70]。现有的水文模型往往被归纳为集总式水文模型、分布式水文模型和半分布式水文模型3种类型。目前岩溶区的水文模型也分为集总式、分布式和半分布式3种类型,这3类模型各具优缺点^[8,71],分布式岩溶水文模型构建中最主要的难点在于刻画管道与裂隙的水力交换。由于岩溶系统特殊的含水层结构,一般很难获取含水系统内部的详细信息,孔隙水的工作方法在岩溶区受到很大的限制,在岩溶区建立分布式水文模型十分困难^[72]。岩溶含水系统中裂隙和管道随机分布,模型结构和水文地质参

数具有较强的不确定性,这均会引起模型模拟结果的不确定性^[73]。

水生生态学以湿地水文与生态过程以及二者之间相互关系的模拟为主要研究内容,狭义的生态水文学就以这种关系为其内涵所在^[74]。湿地生态水文模型是用于描述和模拟湿地生态—水文相互作用关系、过程机理及互馈机制的数学模型,是研究湿地生态水文过程的重要工具^[75]。目前来看,几乎所有的生态水文模型都是水文模型的次级模型或本身即为水文模型^[76],即将湿地模块耦合至水文模型^[48,77]。可用于湿地生态水文模拟研究的水文模型也可以分为集总式、分布式和半分布式3类^[3]。集总式水文模型只能从整体上模拟湿地的水循环和水量均衡,无法反映空间上的差异性,主要应用于湿地水量和水循环要素模拟和变化研究以及湿地与其他水系统的交互作用研究。分布式水文模型参数复杂,数据难以获取,主要应用于湿地水循环过程以及人类活动和环境变化对湿地水文过程的响应模拟研究。相对而言,半分布式水文模型将湿地作为独特的水文响应单元,重点考虑湿地水循环过程,模拟精度高,适用性更强。

4.2 发展趋势

尽管目前国内外湿地生态水文模拟研究已取得较丰富的成果,但不同模型在应用尺度、应用对象和参数特征等方面存在较大差异^[78],仍缺乏具普遍适用性的湿地生态水文模型,且基于水文模型和生态模型的耦合而建立湿地生态水文模型仍存在不足^[3],不能完全满足当前湿地生态水文学面临重大问题的现实需求。目前生态水文耦合的发展趋势为“双向耦合”,即考虑有关流域湿地生态格局和生态过程与水文过程双向交互作用和耦合机制^[79]。此外,还需综合考虑岩溶湿地系统下垫面变化和湿地特性等多要素的综合模拟和预测研究(图6)^[77]。分布式水文模型在岩溶湿地生态水文过程研究中是一种趋势,但鉴于岩溶湿地生态系统的复杂性,建立分布式水文模型十分困难。传统的数理统计法建立生态水文模型需要大量的数据^[80],这要求一方面必须加强地面数据的采集与管理,另一方面加强3S等技术手段的应用来解决数据不足的问题。对于分布式水文模型,仍需要通过与实际观测对比分析来验证模型,以及进行参数的敏感性分析,从而在最大程度上减小模型不确定性对模拟结果造成的影响^[81]。

目前湿地内的人类活动日益剧烈,流域自然地理环境发生变化,导致流域水文情势发生改变^[82]。在全球气候变化背景下,加之岩溶生态系统的脆弱性及敏感性,地表水与地下水交换迅速,岩溶水系统对人类活动的反馈极为敏感^[12]。目前定量描述水

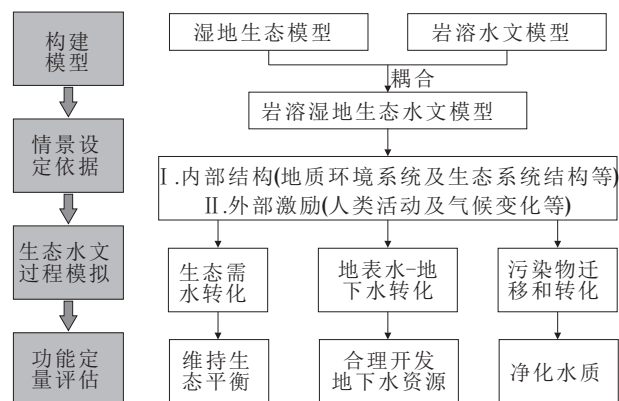


图6 岩溶湿地生态水文模拟研究思路(据文献[3]修改)

Fig.6 Research methodology of eco-hydrological model in karst wetlands

文模型参数时变的研究中,大多仅考虑气候变化对模型参数的影响,忽略了下垫面条件和流域人类活动的影响。因此,有必要考虑下垫面条件变化和流域人类活动的影响,建立时变参数模型,以改善岩溶湿地生态水文模型模拟能力^[83]。此外,由于不同植被种类的生态需水量以及其根系在不同地下水埋深情况下的吸水量有所不同^[23],建立岩溶湿地生态水文模型还应考虑地下水与植被之间的相互作用^[84-85],这对生态修复和水资源管理具有重要意义^[86]。

5 展望

我国是岩溶大国,岩溶分布区面积占国土总面积约1/3^[87],岩溶湿地分布广泛。目前关于一般湿地的生态水文特征、地球化学过程及模型构建的研究较多,而岩溶湿地的相关研究尚处于起步阶段。由于人口的增长和社会经济的发展,人类对水土资源的开发程度和生态水文过程的扰动程度日益增大。我国大部分岩溶湿地目前正面临着湿地面积持续减少,湿地生态功能严重退化和生物多样性丧失的问题,严重影响了岩溶湿地生态系统的健康。岩溶湿地是岩溶生态系统特殊而重要的组成部分,研究其形成与演化机制,对服务我国岩溶地区一些重大的岩溶生态与工程问题(如岩溶生态重建、岩溶区蓄水工程建设等)具有重要指导意义。

为进一步推进岩溶湿地生态水文研究,针对目前研究中存在的问题,提出以下几点建议:

(1)正确认识岩溶湿地地表水—地下水相互转化关系是建立岩溶湿地生态水文模型和进行岩溶湿地水文调度的前提;加强岩溶湿地结构与生态水文要素相互制约关系的研究有助于从机理上揭示岩溶

湿地特殊的生态水文过程。

(2)查明人类活动对岩溶湿地水文循环产生的影响,有助于恢复与重建岩溶湿地生态系统;厘清岩溶湿地的污染源,有利于岩溶湿地污染的防治和水质的恢复。

(3)构建岩溶湿地水文过程和生态过程的耦合模型,是刻画岩溶湿地生态水文过程的重要手段,开发考虑人类活动影响和流域下垫面条件变化的岩溶湿地生态水文模型则是发展趋势。

参考文献:

- [1] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review [J]. Wetlands, 2010, 30(1): 111-124.
- [2] Ghermandi A, van den Bergh J C J M, Brander L M, et al. Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis [J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): 137-139.
- [3] 吴燕锋, 章光新. 湿地生态水文模型研究综述 [J]. 生态学报, 2018, 38(7): 1-11.
- [4] 国家林业局. 湿地公约 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [5] 蔡德所, 马祖陆. 会仙岩溶湿地生态系统研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [6] Shen D F, Li S J. Environment change of Sihui Lake in the past 450 years, southern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(7): 2953-2962.
- [7] 马祖陆, 蔡德所, 蒋忠诚. 岩溶湿地分类系统研究 [J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2009, 27(2): 101-106.
- [8] 潘欢迎. 岩溶流域水文模型及应用研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2014.
- [9] 韩行瑞. 岩溶水文地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [10] 王月, 尹辉, 李晖, 等. 桂林会仙岩溶湿地生态环境保护与生态补偿研究 [J]. 湖北农业科学, 2015, 54(1): 66-69.
- [11] 陈颖, 邱凯瑞, 吴麒, 等. 桂林会仙岩溶湿地产甲烷菌的数量、群落组成和活性 [J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(6): 959-967.
- [12] 张军以, 王腊春, 苏维词, 等. 岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1125-1135.
- [13] 郭绪磊, 朱静静, 陈乾龙, 等. 新型地下水流速流向测量技术及其在岩溶区调查中的应用 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(1): 243-249.
- [14] Sun J, Tang C, Wu P, et al. Hydrogeochemical characteristics of streams with and without acid mine drainage impacts: A paired catchment study in karst geology, SW China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 504(22): 115-124.
- [15] Cao X X, Wu P, Zhou S, et al. Tracing the origin and geochemical processes of dissolved sulphate in a karst-dominated wetland catchment using stable isotope indicators [J]. Journal of Hydrology, 2018, S0022169418303251.
- [16] Cao X X, Wu P, Zhou S, et al. Seasonal variability of oxygen and hydrogen isotopes in a wetland system of the Yunnan-Guizhou Plateau, southwest China: A quantitative assessment of groundwater inflow fluxes [J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(1): 1-17.
- [17] 章光新, 武瑶, 吴燕锋, 等. 湿地生态水文学研究综述 [J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 737-749.
- [18] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial

- ecosystem ecology[M]. New York: Springer, 2002.
- [19] 郭纯青, 方荣杰, 代俊峰, 等. 岩溶地区地下水与环境的特殊性研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [20] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础: 第7版[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [21] Asbjornsen H, Goldsmith G R, Alvarado-Barrientos M S, et al. Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: A review[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(1/2): 3-22.
- [22] Bertrand G, Goldscheider N, Gobat J M, et al. Review: From multi-scale conceptualization to a classification system for inland groundwater-dependent ecosystems[J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(1): 5-25.
- [23] Orellana F, Verma P, Loheide S P, et al. Monitoring and modeling water-vegetation interactions in groundwater-dependent ecosystems[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(3): 1-24.
- [24] 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.
- [25] Winter T C. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems[J]. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7(1): 28-45.
- [26] Sophocleous M. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(2): 348.
- [27] Kelly B F J, Timms W A, Andersen M S, et al. Aquifer heterogeneity and response time: The challenge for groundwater management[J]. *Crop & Pasture Science*, 2013, 64(11/12): 1141-1154.
- [28] 郎赞超. 喀斯特地下水文系统物质循环的地球化学特征[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [29] 魏华. 植被生态需水理论及计算研究进展[J]. *现代农业科技*, 2018(2): 179-182.
- [30] 左其亭. 干旱半干旱地区植被生态用水计算[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 114-117.
- [31] 杨薇, 杨志峰, 孙涛. 湿地生态需水量与配水研究进展[J]. *湿地科学*, 2008, 6(4): 531-535.
- [32] Bereslviskii E N. Groundwater flow to a system of drainage canals[J]. *Water Resources*, 2006, 33(4): 417-420.
- [33] 殷禹宇, 胡友彪, 刘启蒙, 等. 地表水与地下水相互作用研究进展[J]. *绿色科技*, 2016, 2(4): 50-52.
- [34] 田禹. 鲁东地区热区氢氧同位素特征及地热水补给来源[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(6): 182-185.
- [35] Goldscheider N, Drew D. *Methods in karst hydrogeology*[M]. London: Taylor & Francis, 2007.
- [36] 马瑞, 董启明, 孙自永, 等. 地表水与地下水相互作用的温度示踪与模拟研究进展[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(2): 131-137.
- [37] Constantz J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges[J]. *Water Resources Research*, 2010, 44: W00D10, doi:10.1029/2008WR006996.
- [38] Luo M M, Chen Z H, Zhou H, et al. Hydrological response and thermal effect of karst springs linked to aquifer geometry and recharge processes[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(2): 629-639.
- [39] Aguilera H, Castaño S, Moreno L, et al. Model of hydrological behaviour of the anthropized semiarid wetland of Las Tablas de Daimiel National Park (Spain) based on surface water-groundwater interactions[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(3): 623-641.
- [40] 谷洪彪, 迟宝明, 王贺, 等. 柳江盆地地表水与地下水转化关系的氢氧稳定同位素和水化学证据[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(8): 789-799.
- [41] Lauber U, Ufrecht W, Goldscheider N. Spatially resolved information on karst conduit flow from in-cave dye tracing[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18: 435-445.
- [42] Luo M M, Chen Z H, Criss R E, et al. Dynamics and anthropogenic impacts of multiple karst flow systems in a mountainous area, South China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(8): 1993-2002.
- [43] Goldscheider N. A new quantitative interpretation of the long-tail and plateau-like breakthrough curves from tracer tests in the artesian karst aquifer of Stuttgart, Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(7): 1311-1317.
- [44] Luo M M, Chen Z H, Zhou H, et al. Identifying structure and function of karst aquifer system using multiple field methods in karst trough valley area, South China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 824.
- [45] Keddy P. *Wetland ecology: Principles and conservation*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [46] 吴应科, 莫源富, 邹胜章, 桂林会仙岩溶湿地的生态问题及其保护对策[J]. *中国岩溶*, 2006, 25(1): 85-88.
- [47] 魏强, 杨丽花, 刘永, 等. 三江平原湿地面积减少的驱动因素分析[J]. *湿地科学*, 2014, 12(6): 766-771.
- [48] Haghighi A T, Klove B. Design of environmental flow regimes to maintain lakes and wetlands in regions with high seasonal irrigation demand[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 100: 120-129.
- [49] Zhang M W, Jin H J, Cai D S, et al. The comparative study on the ecological sensitivity analysis in Huixian karst wetland, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2(1): 386-398.
- [50] 蔡德所, 马祖陆, 赵湘桂, 等. 桂林会仙岩溶湿地近40年演变的遥感监测[J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 27(2): 111-117.
- [51] Li Z Y, Jin Z J, Li Q. Changes in land use and their effects on soil properties in Huixian karst wetland system[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, 26(2): 699-707.
- [52] Ozesmi S L, Bauer M E. Satellite remote sensing of wetlands[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2002, 10(5): 381-402.
- [53] Arunachalam A, Balasubramanian D, Arunachalam K, et al. Wetland-based agroforestry systems: Balancing between carbon sink and source[M]. India: Springer, 2014.
- [54] Wu Q, Han G, Tao F, et al. Chemical composition of rainwater in a karstic agricultural area, Southwest China: The impact of urbanization[J]. *Atmospheric Research*, 2012, 111: 71-78.
- [55] 高丽楠. 水生植物光合作用影响因子研究进展[J]. *成都大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(1): 1-8.
- [56] 王艳萍, 李发文, 莫晨, 等. 桂林会仙湿地水质与湿地植物生长的关系[J]. *资源节约与环保*, 2018(2): 108-110.
- [57] 沈德福, 李世杰, 蔡德所, 等. 桂林岩溶湿地沉积物地球化学元素变化的环境影响因子分析[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(4): 517-526.
- [58] Lucassen E C H E T, Smolders A J P, Lamers L P M, et al. Water table fluctuations and groundwater supply are important in preventing phosphate-eutrophication in sulphate-rich fens;

- Consequences for wetland restoration[J]. Plant and Soil, 2005, 269(1/2):109-115.
- [59] 曹星星. 基于水化学与稳定同位素的岩溶湿地流域地球化学过程研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2016.
- [60] 陈瑞红, 莫德清, 李金城, 等. 会仙岩溶湿地水质监测及评价[J]. 山东化工, 2018, 47(6):156-160.
- [61] 周晨霓, 任德智, 任毅华, 等. 西藏江夏湿地水化学变化规律及灌溉效用评价[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6):311-315.
- [62] Jiang Y, Wu Y, Groves C, et al. Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in the Nandong karst underground river system in Yunan, China[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009, 109(1/4):49-61.
- [63] 李世杰, 蔡德所, 张宏亮, 等. 桂林会仙岩溶湿地环境变化沉积记录的初步研究[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2009, 27(2):94-100.
- [64] 朱金峰, 刘悦忆, 章树安, 等. 地表水与地下水相互作用研究进展[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8):3002-3010.
- [65] 张莹, 刘畅, 宋昂, 等. 基于典范对应分析的会仙岩溶湿地土壤理化性质与土壤酶活性关系研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1):11-18.
- [66] 刘伟江, 袁祥美, 张雅, 等. 贵阳市岩溶地下水水化学特征及演化过程分析[J]. 地质科技情报, 2018, 37(6):245-251.
- [67] 张华海, 李明晶, 姚松林. 草海研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2007.
- [68] Merritt D M, Bateman H L. Linking stream flow and groundwater to avian habitat in a desert riparian system[J]. Ecological Applications, 2012, 22(7):1973-1988.
- [69] Kimberly R, Elmore A J, Andrew J, et al. Estimating total horizontal aeolian flux within shrub-invaded groundwater-dependent meadows using empirical and mechanistic models[J]. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 2013, 118(2):1132-1146.
- [70] 王泽群. 分布式水文模型的回顾与展望[J]. 绿色科技, 2018, 4(18):154-155, 159.
- [71] Luo M M, Chen Z H, Criss R E, et al. Method for calibrating a theoretical model in karst springs: An example for a hydropower station in South China[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(25):4815-4825.
- [72] 罗明明, 周宏, 陈植华. 香溪河流域岩溶水循环规律[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [73] 常勇, 刘玲. 岩溶地区水文模型综述[J]. 工程勘察, 2015, 43(3):37-44.
- [74] 王根绪, 钱鞠, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3):314-322.
- [75] 焦阳, 雷慧闽, 杨大文, 等. 基于生态水文模型的无定河流域径流变化归因[J]. 水力发电学报, 2017, 36(7):34-44.
- [76] 魏冲. 基于分布式水文模型的景观变化下生态水文响应研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [77] Liu Y, Yang W, Wang X. Development of a SWAT extension module to simulate riparian wetland hydrologic processes at a watershed scale[J]. Hydrological Processes, 2010, 22(16):2901-2915.
- [78] 罗蔚. 变化环境下鄱阳湖典型湿地生态水文过程及其调控对策研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [79] 徐宗学, 赵捷. 生态水文模型开发和应用: 回顾与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3):346-354.
- [80] Peters J. Ecohydrology of wetlands: Monitoring and modelling interactions between groundwater, soil and vegetation[D]. Chent, Belgium: Chent University, 2008.
- [81] 卢德宝, 史正涛, 顾世祥, 等. 岩溶地区水文模型应用研究[J]. 节水灌溉, 2013(11):31-34.
- [82] Jiang C, Xiong L, Wang D, et al. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522:326-338.
- [83] 熊立华, 刘烁楠, 熊斌, 等. 考虑植被和人类活动影响的水文模型参数时变特征分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(5):625-635.
- [84] vanov V Y, Bras R L, Vivoni E R. Vegetation-hydrology dynamics in complex terrain of semiarid areas: 1. A mechanistic approach to modeling dynamic feedbacks[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3):173-175.
- [85] Thompson S E, Harman C J, Konings A G, et al. Comparative hydrology across AmeriFlux sites: The variable roles of climate, vegetation, and groundwater[J]. Water Resources Research, 2011, 47:W00J07, doi:10.1029/2010WR009797.
- [86] Wheaton J M, Gibbins C, Wainwright J, et al. Preface: Multi-scale feedbacks in ecogeomorphology[J]. Geomorphology, 2011, 126(3/4):265-268.
- [87] 王喆. 岩溶地下水系统演化的数值模拟[J]. 地质科技情报, 2013, 32(4):201-206.