

岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望

张军以^{1,2},王腊春¹,苏维词^{3,4},曾春芬¹

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院,南京 210093; 2. 贵州师范学院 地理与旅游学院,贵阳 550018;

3. 重庆师范大学 地理科学学院,重庆 400047; 4. 贵州科学院 山地资源研究所,贵阳 550001)

摘要: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,岩溶水动力系统对人类活动及其造成的生态环境变化反馈敏感。岩溶地区人类活动导致的植被退化、石漠化等环境问题已对岩溶地区的水文水循环过程造成了严重影响,水资源问题已成为岩溶地区发展的重要限制因素。本文在对岩溶生态系统及水文环境特性分析的基础上,从土地利用变化的水文效应,人类活动对降水—径流的影响、岩溶水资源的开发利用、岩溶地下水污染及水文模型在岩溶地区的应用等方面,概述了岩溶地区人类活动水文效应的相关研究现状与不足,总结了未来岩溶地区人类活动水文效应的5个研究趋势,并探讨了研究中的重点及难点问题。

关键词:岩溶地区;人类活动;水文效应;岩溶水资源;展望

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.08.013

中图分类号:P339

文献标识码:A

1 引言

水循环是联系地球系统中地圈—生物圈—大气圈的纽带,将地球表层、大气及地下作为整体进行关联研究是陆地水文循环研究的发展趋势(Oket al, 2006)。人类活动作为环境变化的主要驱动力之一,其造成的水文效应问题已成为国内外学者关注的焦点(Liverman et al, 2008; Paola, 2011),并被政府间气候变化专门委员会(IPCC)、国际水文科学协会(IAHS)、国际水文计划(IHP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)等国际组织及计划所重视。陆地水循环是人类社会经济的基础,正确认识人类活动对陆地水循环及水资源演变过程的影响及其耦合关系,可为实现水资源的可持续利用提供有效保障。

岩溶系统及其岩溶作用是地球表层系统和全球碳—水—钙循环过程的重要组成部分,岩溶水循环与岩溶碳汇研究已成为应对全球环境变化框架下的重要研究内容。岩溶地区作为典型的生态脆弱区,水文地质环境和水文水循环过程与非岩溶地

区相比存在显著差异。岩溶水动力系统对外界环境变化反馈敏感,剧烈人类活动干扰已不同程度地改变了岩溶地区的水文水循环过程,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。而且,人类活动对岩溶含水体产生的消极影响往往是不可逆的(León et al, 2009),因此正确认识岩溶地区脆弱生态背景下人类活动的水文效应,探讨人类活动对岩溶水文水循环过程及水资源演变的驱动机理,岩溶水循环的响应变化,对岩溶地区水资源开发利用、生态修复、防灾减灾和保障社会经济可持续发展具有重要的理论及现实意义。本文在对国内外岩溶地区人类活动水文效应研究相关成果总结梳理的基础上,提出了未来岩溶地区人类活动水文效应研究的主要方向、存在的难点,旨在为今后研究发展提供借鉴和参考。

2 岩溶生态系统及水文环境特性

岩溶生态系统生产力低,恢复能力差,敏感性高,易受外界干扰且受破坏后极难恢复。岩溶地

收稿日期:2013-08;修订日期:2014-02。

基金项目:国家自然科学基金项目(41371045,41261038);国家科技支撑计划项目(2014BAB03B001);贵州省重大科技专项项目(黔科合重大专项字[2012]6015)。

作者简介:张军以(1985-),男,山东沂南人,博士研究生,主要研究方向为水文水资源、生态环境与区域可持续发展,

E-mail: hellojunyi@yeah.net。

通讯作者:王腊春(1963-),男,江苏金坛人,教授,主要从事水文水资源方面的研究,E-mail: wang6312@263.net.cn。

区由于成土母质的特殊性,成土速率极低,1 cm厚土壤成土时间是其他类型母岩成土时间的10倍,达2000~3000年以上(彭晚霞等,2008),因此从人类活动的时间尺度看,岩溶土壤具有不可再生性。另外岩溶土壤稳定性差,易受侵蚀而发生地表地下双重流失,造成土壤贫瘠化,甚至石漠化。岩溶土壤的贫瘠、富钙、偏碱特性决定了植被的嗜钙性和低生物量。中国茂兰的岩溶顶级森林群落总生物量为168.62 t/hm²,与亚热带半干旱地区旱生林(170 t/hm²)和寒温带湿润区北部泰加林(150 t/hm²)的生物量相近(杨汉奎等,1991),生态系统的低生产力导致了系统恢复能力差,敏感性强,易受外界干扰而退化。此外,强烈的岩溶作用造成生境破碎,裂/溶隙、落水/溶洞等地表地下岩溶地貌发育强烈,形成了典型的地表地下二元三维储水结构,地表水渗漏严重,加剧了岩溶生态系统的脆弱敏感性。

岩溶含水体地表地下共存的二元三维空间储水结构中一般存在4个水动力带:包气带、季节变动带、完全饱和带和深部滞留带。前两者波动性强,多成重力梯度流,受外界影响显著;后两者相对稳定,多呈压力梯度流,受外界影响较小。岩溶含水体具有发达的裂隙及管网,呈现出高度的不均一性,地表水与地下水交换迅速,水动力系统对外界环境变化反馈敏感。岩溶生态系统的脆弱敏感性及其水文环境的特殊性,造成了岩溶系统对外界环境响应的应激性和敏感性,能直接有力的反映人类活动的干扰效应。

3 人类活动的水文效应研究现状

3.1 土地利用的水文效应

短时间内人类活动导致的土地利用变化是陆地水文变化的主要驱动因素之一(李昌峰等,2002)。土地利用主要通过改变地表覆被影响区域环境,地表覆被影响流域的蒸散发、截留、下渗等特性,改变了流域产汇流过程。岩溶生态系统的开放性和脆弱性又放大了人类活动的水文效应。不同土地利用方式通过改变下垫面水文特性、土壤理化性质进而影响到降水的产汇流过程(张治伟等,2010),增加了水文序列趋势和跳跃等暂态成分(桑燕芳等,2013),相比自然状态提高了同等降水强度下的产流量(Jiménez et al, 2006),增加了土壤流失的风险。同时,土地利用对土壤的扰动会加剧土壤的垂直流失(张信宝等,2007),即使在植被覆被良好的情况下,土壤层依旧存在严重缺失(图1)。土壤土粒通过发达的裂隙沿垂直方向流失是一种自然过程还是源自人为干扰,或二者综合作用的结果,还有待于进一步探讨。土地利用还会导致岩溶地下水水质下降,并随土地利用强度增加而恶化,且分布格局与土地利用格局具有高度相关性(贾亚男等,2003)。此外,岩溶地区集约化农业耕作、炸石填土增加土地面积、落水洞排污及微型稻田水位控制设施建设等人类活动,已经对岩溶地区尤其是经济发达地区的岩溶地区水文地球化学性质产生了重大影响(贾亚男等,2004),地下水的水文化学特征已出现不同程度异化。但目前岩溶地区土地利用



图1 中国普定岩溶森林植被覆被下的土壤丢失现象

Fig.1 Soil loss under forest vegetation cover of the Karst region in Puding, China

的水文效应研究多集中于分析其对单一水循环要素的影响,如产汇流过程的研究,对土地利用导致的水文水循环改变的反馈效应及其时空变化等关注不够。

3.2 不同尺度上人类活动对岩溶降水—径流的影响

岩溶地区人类活动水文效应研究应结合地貌、生态、水文等多种因素进行综合研究。20世纪70年代,国外关于岩溶地区岩溶作用与气候变化对岩溶生态系统的重要性、岩溶含水脆弱性、地表水及地下水特性的研究(Legrand, 1973),取得了较大进展。研究表明,区域尺度上,气候变化背景下人类活动对岩溶降水—径流量变化的影响并不一致。岩溶系统高度异质性的影响甚至高于降水时空分布变化的影响(Labat et al, 2000a, 2000b)。在假设人类活动不变,CO₂倍增的气候情景下,大气环流模型(GCM)的模拟结果显示,岩溶含水层将受到破坏性影响并导致水资源短缺(Loaiciga et al, 2000)。而不同流域径流对气候因子变化的敏感性不同,其径流响应存在显著甚至性质相反的差异(孟德娟等, 2013),这就导致了岩溶降水径流量变化影响归因分析的不确定性。在短时间尺度上,人类活动主要通过改变下垫面和产汇流特性作用于流域水循环过程(王浩等, 2003),其影响一般表现为径流量的变化。在非岩溶经济发达区域,人类活动如建坝、灌溉和跨流域调水等已成为河流径流量变化的主要驱动力(Milliman et al, 2008; 张淑兰等, 2010)。一些研究成果也表明,人类活动对岩溶地区岩溶泉流量的影响已超过气候变化的影响(Hao, Wang, Wang et al, 2009; Hao, Wang, Zhu et al, 2009),但此类研究成果还较少且分散,结果缺乏普遍性,主要集中于小尺度方面的研究。这是因为在小尺度上,人类活动能在短时间内迅速改变下垫面的性质,如植被覆被。由于植被覆盖率与降水入渗系数之间存在显著正相关性(覃小群等, 2005),加上岩溶含水具有高度发达的管网系统导致其储水能力较低(White, 1977),进一步加剧了岩溶表层水循环系统对外界变化响应的敏感性,因此,人类活动在小尺度(中小流域)范围内对径流的影响程度已超过气候变化是可信的。

但是,在流域大尺度上还存在不确定性。如对中国西南岩溶地区诸河1956-2005年的径流变化研

究表明,虽然人类活动的影响作用增强,但气候变化仍占主导作用(张建云等, 2007)。小尺度上人类活动导致的水文要素改变在通过岩溶水循环系统复杂的转化传递过程中的相互作用后,是否会在大流域尺度上产生累加效应,是否会使其在大流域尺度上产生相应的响应行为,都存在不确定性,这也导致了大流域尺度水文问题归因确定上的复杂性。

此外,表层岩溶水—植物—土壤系统的动态平衡主导了岩溶系统碳的转化、转移及植物群落的正向演替(沈利娜等, 2010)。其中土壤CO₂和降雨是表层岩溶系统水化学变化的主要驱动力(Yang et al, 2012)。表层岩溶作用过程对环境变化高度敏感,小尺度上剧烈的人类活动通过对植被及土壤的影响作用,直接导致表层岩溶系统水文化学性质的变化,而岩溶水中CO₂含量是否稳定直接关系到岩溶系统在全球碳循环中的碳汇。因此,今后需要重视小尺度上剧烈人类活动对岩溶系统碳汇的影响研究。

3.3 岩溶水利工程建设及水资源开发利用的水文效应

在亚热带季风气候岩溶区,降水相对丰富,但地表渗漏率高,地表水难以储存,水利工程建设成为解决地表水资源不足的重要途径。由于岩溶地区特殊的水文环境特性,使得工程的防渗漏问题难度加大,水利工程建设较非岩溶区难度更大,成本更高。岩溶地区水利工程在提高水资源利用率,改善库区小气候方面取得了一定成效,同时也产生了一些负效应:①地下水静水压升高导致次生溶蚀效应,加速岩溶裂隙和层理面的溶蚀速率,形成新的渗漏(Bonacci et al, 2009);库区地下水位变化导致区域岩溶侵蚀基准面改变,可出现坝基渗漏、重力塌陷等工程地质问题。②水库水位周期性消涨易引起库岸出现塌岸、滑坡等地质灾害。③水利工程建设对流域水文生态系统的水文情势、支撑条件、系统结构及功能造成被动适应性调整。除了以上工程性技术层面的问题外,水利工程导致的流域水文生态系统被动性调整的适应性作用机制尚不明确。同时,水利工程措施的生态环境、水循环效应(如水利工程措施)导致的自然水循环过程演变的生态效应问题,尚缺乏定量化的研究成果。

岩溶地区特殊水文地质环境条件还导致工程性缺水问题突出,而水资源的开发利用就成为解决

水资源短缺问题的有效措施。目前,岩溶地区水资源开发利用的定性研究成果较多,如岩溶水资源利用条件、利用模式、三水(雨水、地表、地下水)转化及利用等。水资源开发利用导致的生态水文效应问题也开展了一些研究工作。相关研究表明,土地利用、水利工程措施及地下水开发等导致岩溶地下水水动力条件、水土作用、水质水量和生物化学作用发生改变(卢耀如等, 2006)。例如,人类不合理的补给及截补措施会严重影响水资源的利用(Loaiciga et al, 2000);森林砍伐、开荒种地导致地下水资源减少;地下水资源减少导致湿地、湖泊萎缩、功能衰退,进而使得湿地生物多样性下降,并造成岩溶地下洞穴生物多样性减少。

总体来看,岩溶地区水利工程及水资源开发利用研究多重视技术层面,缺乏基础性理论研究。此外,由于缺乏长时间高分辨率监测资料,水利工程措施和水资源开发利用与复杂岩溶水流场的耦合关系,及其对岩溶作用速率、稳定性、流域生态系统结构与功能影响问题等方面的研究,难度较大,成果较少。

3.4 人类活动对岩溶地下水污染及污染物的迁移运输影响

除土地利用造成岩溶地下水污染之外,城市生活、工业及农业生产是岩溶水污染的主要污染源(León et al, 2009)。对中国西南岩溶地区的调查结果显示,在岩溶地下水利用率仅有8%~15%的情况下(卢耀如等, 2006),地下水已污染严重并呈现出污染源多样化、污染由点向面发展、有机污染与无机污染并存的特点。此外,岩溶地区污染物的分布迁移扩散与非岩溶地区相比存在差异。在污染物分布方面,多集中在岩溶体三维空腔系统结构中。高时间分辨率监测结果显示,磷元素主要以土壤磷的形式进行转移并可深达基岩含水层(Mellander et al, 2013)。污染物的稀释主要依靠岩溶裂隙系统的扩散效应,生物降解作用微弱(Einsiedl et al, 2010)。在污染物的迁移扩散途径方面,污染物通过落水洞直接进入到岩溶地下水系统(Morasch, 2013),多环芳烃、重金属离子的迁移主要通过强降水形成的悬浮颗粒进入地下水系统(Vesper et al, 2003; Schwarz et al, 2011)。污染物的迁移扩散模拟研究中,利用分布式水文模型SWMM、SWAT(Campbell et al, 2002; Baffaut et al, 2009)对岩溶管

道型水文系统污染物迁移的模拟取得了较好的效果,而针对其他类型复杂岩溶水流场尚未研究出较好的模拟模型。

岩溶地下水污染的恢复与治理不仅与污染排放量有关,还与岩溶地下水系统的水文参数密切相关(Magal et al, 2013)。岩溶地区降水补给作为输入项,岩溶泉、地下河排泄作为输出项,岩溶含水体系起到了传输的功能,排泄区水质的检测能有效地确定岩溶地下水的受污染程度及种类。但污染源的确定,污染物的迁移扩散过程、速率等往往很难精确地定量测定,这也是导致岩溶地区地下水污染后治理难度大、成本高的原因。现有研究主要利用示踪法,结合探井监测确定岩溶管道传输参数,进而确定污染物的迁移速率及路径,而岩溶含水介质的高度异质性导致地下水更新速率存在很大的不确定性。因此,不同地区污染治理及恢复技术应有所不同。

3.5 水文模型在岩溶地区的应用

已有研究从岩溶水形成机制出发建立了多种岩溶水文模型。White(1969)和Shuster(1971)分别提出了岩溶水双重介质模型,指出在相同地质环境中岩溶含水层系统的产流机制存在很大差异,认为可通过岩溶水的化学行为进行区分。其后,Atkinson(1977, 1985)提出了三重介质模型,指出岩溶含水层中存在孔隙、裂隙、层面等扩散流介质、溶蚀裂隙介质和管道流介质,同时在流态上存在达西流、紊流和介于两者之间的混合流。美国著名示踪专家Quinlan进一步提出了四重介质模型,认为碳酸盐岩的粒间孔隙在地下水的渗流中亦发挥了一定的作用(锥征等, 2005)。中国学者针对降雨—径流形成过程,在概化基础上建立了一系列实用有效的水文模型,将地下径流概化为快速裂隙流和慢速裂隙流,指出利用时滞系数模拟快速流和慢速流较导水系数更具科学性(郭纯青等, 1985)。此外,利用简单的数学物理方程对汇流过程加以描述和计算的概念性水文模型、随机岩溶水模型、地貌瞬态单位线模型等在岩溶水文研究中也取得了较好的应用效果。但由于岩溶地区特殊的储水结构及降水产流过程的复杂性和水文资料获得困难等原因,对水文过程的研究多数偏重于定性描述。

随着计算机、GIS及遥感技术的发展及融合,使得基于计算机及3S技术的分布式水文模型得到不

断发展,如地表水模型 HEC-HMS、HSPF、SWAT、TOPMODEL、管道流模型等,其中 SWMM、SWAT 模型应用较多(Peterson et al, 2006)。分布式水文模型在土地利用/土地覆盖变化(LUCC)的水文效应、资料缺乏地区水文预报、生态水文学、水资源管理等研究领域发挥了重要作用。同时,高分辨率、大范围分布式水文模型的模拟性能进一步提高(刘军志等, 2013)。但分布式水文模型也存在时空分辨率和模型产汇流机制及其参数的不确定性问题。岩溶地区水文环境敏感,也增加了模型应用的不确定性。同时,人工智能技术的日益完善使人工神经网络(ANN)等技术不断应用于岩溶流域水文模拟(Kurtulus et al, 2007),人工神经网络计算精度高并可简化,但模型需要的样本量较大且样本缺乏物理意义,网络算法、训练公式主要是根据经验和表现选择,受主观因素影响较大。

总体上,岩溶地区水文模型主要有两大类:一是对已有水文模型针对岩溶地区的特性进行适当改进,如集总式水文模型和分布式水文模型。二是利用区域长时间序列观测资料,结合灰色理论、多元回归分析、分形方法及人工神经网络、遗传算法等现代数学方法建立起来的数理统计模型。但是,由于岩溶含水介质孔隙度、渗透率、导水系数等在空间分布上具有高度异质性,其准确数据难以获得,加之现有模型无法完全反映岩溶多层含水介质中岩溶水的形成过程、各要素的影响作用及强度,不能有效融合社会经济活动对岩溶水环境变化的反馈响应,使得模型的应用受到一定限制。因此,建立融合社会经济系统—水文系统—生态系统的复合模型成为未来发展的重要方向之一。

4 人类活动的水文效应研究展望

气候变化加剧了全球水循环过程的改变和降水的年际变率,表现为区域性水循环突变与全球性水循环变化并存,同时水循环变化受区域环境要素与人类活动强度差异的综合影响。在气候变化背景下,岩溶地区社会经济发展和大规模水利工程建设等人类活动对岩溶水循环系统的影响不断加剧;但现有研究对岩溶地区特殊水文环境条件下,人类活动对岩溶生态系统、岩溶水循环系统、岩溶碳汇等方面的影响及其反馈机制认识还不够。在此形

势下,未来岩溶地区人类活动的水文效应研究,应重视以下几方面:

4.1 气候变化、人类活动与岩溶水环境的耦合机理

全球气候模式(GCM)是研究分析未来气候变化的重要工具,但其空间分辨率较低,难以直接应用于中小尺度的气候影响评价(刘昌明等, 2012);区域气候模式(RCM)对极端气候事件的模拟效果较好,但模拟的气候要素变化年际变率偏大。这使得气候变化背景下明确人类活动与岩溶水循环的响应耦合机理研究更加困难。现有研究结果显示,在假设人类活动强度不变、CO₂倍增的情景下,岩溶含水层将受到严重的负面影响,造成水资源短缺(Loaiciga et al, 2000)。因此,明确人类活动与岩溶水循环响应耦合机制的关键是如何消除气候变化对岩溶水循环的作用。在气候变化定量化研究方面,如何准确区分气候变化和人类活动的贡献率这一关键问题上,目前的研究虽在一定程度上分解了气候变化和人类活动对水文影响的贡献,但有效提高其准确度还有待更进一步的研究(董磊华等, 2012)。有研究显示,不同模型(如 ARIMAX、PGSM 模型等)的模拟结果存在较大差异,但总的来说,都表明人类活动的影响作用在逐渐增强(Hao et al, 2012; Hao et al, 2013)。单个模型或方法的模拟结果往往存在较大不确定性,应重视综合使用多个模型及方法进行相互补充,以实现模拟精度的要求。同时,岩溶地区土壤—植物群落空间格局的稳定与表层岩溶水循环的稳定相互依存,了解表层水循环在土壤—植被空间异质性耦合关系中的作用,有助于加强对人类活动的管理。综上所述,在气候变化和人类活动剧烈干扰下,岩溶水循环系统的动力、结构、参数均发生变化,岩溶水循环系统已演变成“自然—人工”的二元水循环驱动机制,人为因素在一定范围内已成为决定性因素。未来岩溶水循环耦合模型研究,应建立融合“气候变化—水资源—社会经济活动—生态系统”的复合框架模型,重视人口、经济社会发展水平、水资源利用方式与管理水平等社会因素的综合影响。

4.2 人类活动对岩溶水文循环与地质碳循环耦合稳定的影响

为应对全球气候变化和回答“大气泄漏汇”问题(Schindler et al, 1999),岩溶地质碳循环研究得到了发展。岩溶地质碳汇作为重要的陆地碳汇,其稳

定性尚存在争议。利用碳同位素模型对贵州草海地质碳汇的研究结果表明,岩溶地质碳汇具有相对稳定性(张强等, 2012)。另外岩溶植被在保持及促进岩溶地质碳汇方面具有重要作用,岩溶地质碳汇对植被变化反应敏感,植被的正向演替对岩溶地质碳汇有显著的促进作用。在广西弄拉的研究结果显示,原始林地土下岩溶作用碳汇量是灌丛的9倍,同时地表植被的增汇与地下岩溶作用的增汇过程亦同步进行(Zhang, 2011)。岩溶地质碳汇是碳—水—钙循环的系统过程,系统运行的关键是岩溶水循环及水中 CO_2 含量的稳定。Adamczyk(2009)的研究结果表明,水中碳酸的离解系数为 3.45 ± 0.15 ,明显低于通常假设的6.35,表明水中 CO_2 的稳定性高于原有认识。岩溶水中的 CO_2 主要来源于土壤 CO_2 ,而人类活动造成的植被覆被变化、石漠化、水土流失等环境问题直接影响到土壤 CO_2 含量,从而作用于岩溶碳汇。人类活动通过干扰岩溶水循环过程及水中 CO_2 含量,影响岩溶地质碳循环的稳定性和速率。因此,人类活动尤其是农业生产活动对岩溶稳定性和速率影响问题的定量化评估,可为下一步估算岩溶净碳汇奠定坚实基础。此外,中国西南岩溶区实施的大规模综合生态恢复治理对增强岩溶地质碳汇的作用也有待于深入研究。

4.3 岩溶水资源开发利用、脆弱性评价及对洞穴生物多样性的影响

全球气候变化持续影响着生态系统动力学作用,其中对人类已造成某些潜在影响,如对饮用水质量的影响(Mikkelsen et al, 2013)。目前水资源开发和脆弱性评价研究都是在假定气候相对稳定的前提下,以水资源现状及未来水资源需求量为条件,未能将气候变化及人类活动影响纳入到水资源脆弱性评价和规划管理制定中(夏军等, 2012)。这在一定程度上降低了水资源脆弱性评价和规划管理的实际效用。未来岩溶水资源脆弱性评价和规划管理,应综合考虑环境变化、人类活动影响和岩溶水循环系统变化等对岩溶水资源的综合影响问题。同时岩溶水资源的开发利用研究注重工程措施而忽视管理政策。非岩溶地区已有研究表明,提高水资源管理、利用效率和节约用水的边际效益大于工程措施(王忠静等, 2013),因此科学合理的水资源利用管理政策是岩溶水资源持续利用的关键。在岩溶水资源开发利用技术方面,由于岩溶地区特

殊的储水、水文环境特性,传统物探方法难以实现大范围的应用,应发展以遥感技术为基础的地下水勘探技术。国外对地下水遥感勘探已取得了一系列研究成果(Krishnamurthy et al, 1996; Shahid et al, 2000),但需要地表植被、土壤水分、水系、地质构造及区域物探资料等多种辅助资料,工作量大。为解决以上问题,可利用岩溶地区大范围干旱的时间窗口(如中国西南地区2009-2010年的大旱期),基于植被根系与岩溶地下水之间的关联性,利用遥感技术测定并分析同期植被指数(NDVI)的变化,根据植被类型及变化程度的差异,结合高精度DEM数据及土壤分布数据,实现岩溶地下水埋深、孔隙水含量的估算,为进一步勘探工作提供基础。

4.4 短时限人类主导的环境变化对流域水文水循环的影响

人类活动已成为影响水循环系统演化的主导力量之一,社会水循环问题的系统研究就成为实现水资源可持续利用,保障社会经济可持续发展的基础。人类主导的环境变化指:人类主导的,在较短时间内完成的,并造成生态环境部分或大部分组成要素发生明显改变的各类活动的总和,如大面积退耕还林/草等生态修复建设、大型水利工程建设等。与非岩溶地区相比,岩溶地区人类主导的环境变化的水文水循环变化效应更加复杂、环境效应更加突出。目前针对岩溶地区人类主导的环境变化的水文效应问题研究较少,偏重单一要素的研究,如生态修复建设的水文效应研究过多侧重LUCC的水文效应(Mahe et al, 2006; Rodriguez et al, 2010)。

大型水利工程建设不断向高坝大库发展,对河流水文情势、径流时空分配格局、水生态环境支撑条件、水流—栖息地—生物群落系统的动态平衡,乃至整个流域水文生态系统的完整性及功能产生了深远影响。加之气候变化背景下岩溶地区极端天气频发,促生了大量小水电工程。而对中国怒江流域小水电工程生态环境效应的研究则表明,小型水电工程的生态环境效应甚至远高于大型水利工程(Kibler et al, 2013)。此外,气候变化造成的干旱和社会经济发展对水资源的需求,导致岩溶地下水的过度开采和水污染问题日益凸显,已对岩溶地下生态系统、洞穴生物栖息地和生物多样性造成破坏。目前尚有150余种洞穴物种未被科学所认知,

并且大部分物种分布在有限的少数洞穴中(Sills, 2013)。因此,建立融合“社会经济系统—生态系统—水文系统”的广义复合水循环模型,加强人类主导的环境变化的流域水文效应研究,并进行风险评估,可为岩溶生态系统良性演变和生物多样性保护提供有效的支持,是实现岩溶地区水资源有效管理的基础,也是未来发展的重要方向。

5 人类活动的水文效应研究难点

人类活动在短时间内造成的岩溶生态环境改变,其速率及强度远超过一般自然演替,对岩溶水文循环的影响不断增大,对水资源安全造成了严重威胁。目前,岩溶地区人类活动的水文效应问题研究,在基础性机理研究、定量化分析、水循环变异驱动因素识别、尺度效应差异等方面仍显薄弱。未来需要重视人类活动对岩溶水循环的驱动机制、“水资源—社会经济—生态系统”广义复合模型研究,并在诊断识别气候变化及人类活动水文效应方面加强基础性理论研究,为气候变化背景下准确地把握认识岩溶地区人类活动影响下的水资源演化机制,合理配置水资源,制定水资源管理政策提供理论支持,以实现岩溶地区水资源、社会经济和生态系统的协调可持续发展。结合已有研究,认为岩溶地区人类活动的水文效应研究应注重解决以下两个问题:

(1) 复合水文模型的发展及其不确定性量化研究。人类社会经济活动已成为影响岩溶水循环演化的主要因素,现有水文模型中对人类活动尤其是社会水循环部分的反映不足。建立融合社会经济发展和社会水循环过程,基于“气候变化—水资源—社会经济—生态耦合”框架的复合水文模型,揭示各主要影响因素的综合作用机制,是气候变化背景下解决水资源可持续利用与社会经济可持续发展的基础性问题。另外,在大气环流模型(GCMs、RCM)与陆面流域水文模型结合的陆气耦合模型研究中,关于模型耦合是否会对模型的可靠性产生不确定性影响,在未来研究中要进一步明确,并提出有效的方法提高耦合模型的可靠性。

(2) 人类对环境变化的响应及水循环变化的反馈机制研究。人类活动水文效应研究偏重于对水文水资源作用研究,忽视了人类对气候变化及水文

水资源变化所采取的响应策略研究。由于影响程度、自身文化、经济发展水平差异,导致不同区域在应对策略的选择上存在差异。在印度尼西亚,农村与城市区间的意识与采取适应性行动关系存在很大差异(Bohensky et al, 2012),城市居民意识率低而适应性行为发生率高,农村地区居民则相反。同时水循环变化通过改变人类可用水量 and 难易程度对人类活动进行反馈,影响现有人类活动方式。因此,加强岩溶地区人类活动对气候、水资源变化的反馈响应策略研究,是开展及实现有序人类活动管理的重要基础。

参考文献(References)

- 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 2012. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展. 水科学进展, 23(2): 278-285. [Dong L H, Xiong L H, Yu K X, et al. 2012. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology. *Advances in Water Science*, 23(2): 278-285.]
- 郭纯青,时坚,裴建国. 1985. 岩溶地下水系统中快速流与慢速流的模拟. 中国岩溶, (4): 315-323. [Guo C Q, Shi J, Pei J G. 1985. Simulation of rapid flow and slow flow in karst groundwater system. *Carsologica Sinica*, (4): 315-323.]
- 贾亚男,刁承泰,袁道先. 2004. 土地利用对埋藏型岩溶区岩溶水质的影响:以涪陵丛林岩溶槽谷区为例. 自然资源学报, 19(4): 455-461. [Jia Y N, Diao C T, Yuan D X. 2004. The influence of land use on Karst water quality of buried karst region: a case of conglin karst ridge-trough at Fuling Town. *Journal of natural Resources*, 19(4): 455-461.]
- 贾亚男,袁道先. 2003. 土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响. 地理学报, 58(6): 831-838. [Jia Y N, Yuan D X. 2003. The impact of land use change on karst water in Shuicheng Basin of Guizhou Province. *Acta Geographica Sinica*, 58(6): 831-838.]
- 李昌峰,高俊峰,曹慧. 2002. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势. 土壤, (4): 191-205. [Li C F, Gao J F, Cao H. 2002. Current situation and tendency of research on impacts of land use changes on water resource. *Soils*, (4): 191-205.]
- 刘昌明,刘文彬,傅国斌,等. 2012. 气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨. 水科学进展, 23(3): 427-437. [Liu C M, Liu W B, Fu G B, et al. 2012. A discussion of some aspects of statistical downscaling in climate im-

- pacts assessment. *Advances in Water Science*, 23(3): 427-437.]
- 刘军志, 朱阿兴, 秦承志, 等. 2013. 分布式水文模型的并行计算研究进展. *地理科学进展*, 32(4): 538-547. [Liu J Z, Zhu A X, Qin C Z, et al. 2013. Review on parallel computing of distributed hydrological models. *Progress in Geography*, 32(4): 538-547.]
- 卢耀如, 张凤娥, 刘长礼, 等. 2006. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性. *地球学报*, 27(5): 393-402. [Lu Y R, Zhang F E, Liu C L, et al. 2006. Karst water resources in typical areas of China and their eco-hydrological characteristics. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(5): 393-402.]
- 雒征, 胡彩虹, 郝永红. 2005. 岩溶泉水的研究现状与进展. *水资源与水工程学报*, 16(1): 56-59. [Luo Z, Hu C H, Hao Y H. 2005. Review and prospect of the karst spring. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 16(1): 56-59.]
- 孟德娟, 莫兴国. 2013. 气候变化对不同气候区流域年径流影响的识别. *地理科学进展*, 32(4): 587-594. [Meng D J, Mo X G. 2013. Identification of impact of climate change on annual runoff in typical basins of different climate zones. *Progress in Geography*, 32(4): 587-594.]
- 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 等. 2008. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. *生态学报*, 28(2): 811-820. [Peng W X, Wang K L, Song T Q, et al. 2008. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 28(2): 811-820.]
- 覃小群, 蒋忠诚. 2005. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向. *中国岩溶*, 24(3): 250-254. [Qin X Q, Jiang Z C. 2005. A review on recent advances and perspective in epikarst water study. *Carsologica Sinica*, 24(3): 250-254.]
- 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 2013. 水文时间序列分析方法研究进展. *地理科学进展*, 32(1): 20-30. [Sang Y F, Wang Z G, Liu C M. 2013. Research progress on the time series analysis methods in hydrology. *Progress in Geography*, 32(1): 20-30.]
- 沈利娜, 邓新辉, 蒋忠诚, 等. 2010. 表层岩溶带生态系统的水文地球化学效应: 以弄拉兰电堂泉域为例. *地球与环境*, 38(2): 189-197. [Shen L N, Deng X H, Jiang Z C, et al. 2010. Hydrogeochemical effects of epikarst zone ecosystem: a case study of the Landiantang Spring catchment in Nongla. *Earth and Environment*, 38(2): 189-197.]
- 王浩, 雷晓辉, 秦大庸, 等. 2003. 基于人类活动的流域产流模型构建. *资源科学*, 25(6): 14-18. [Wang H, Lei X H, Qin D Y, et al. 2003. Basin runoff yielding model construction based on human activities. *Resources Science*, 25(6): 14-18.]
- 王忠静, 马真臻, 廖四辉, 等. 2013. 洪水资源利用经济适度性研究: 以海河流域为例. *水力发电学报*, 32(1): 11-18. [Wang Z J, Ma Z Z, Liao S H, et al. 2013. Study on economic moderate criteria of floodwater utilization: a case study of Hai River Basin. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 32(1): 11-18.]
- 夏军, 邱冰, 潘兴瑶, 等. 2012. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用. *地球科学进展*, 27(4): 443-451. [Xia J, Qiu B, Pan X Y, et al. 2012. Assessment of water resources vulnerability under climate change and human activities. *Advances in Earth Sciences*, 27(4): 443-451.]
- 杨汉奎, 程仕泽. 1991. 贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究. *生态学报*, 11(4): 308-314. [Yang H K, Cheng S Z. 1991. Study on biomass of the Karst forest community in MaoLan, Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 11(4): 308-314.]
- 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 2007. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究. *水科学进展*, 18(2): 230-234. [Zhang J Y, Zhang S L, Wang J X, et al. 2007. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 18(2): 230-234.]
- 张强. 2012. 岩溶地质碳汇的稳定性: 以贵州草海地质碳汇为例. *地球学报*, 33(6): 947-952. [Zhang Q. 2012. The stability of carbon sink effect related to carbonate rock dissolution: a case study of the Caohai Lake geological carbon sink. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 947-952.]
- 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 2010. 定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响. *水土保持学报*, 24(4): 53-58. [Zhang S L, Wang Y H, Yu P T, et al. 2010. Study for separating the impact of precipitation variation and human activities on runoff change of the upper reaches of Jing River. *Journal of Soil and water Conservation*, 24(4): 53-58.]
- 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 2007. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. *地球与环境*, 35(3): 202-206. [Zhang X B, Wang S J, He X B, et al. 2007. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes. *Earth and Environment*, 35(3): 202-206.]
- 张治伟, 朱章雄, 王燕, 等. 2010. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素. *农业工程学报*, 26(6): 71-76. [Zhang Z W, Zhu Z X, Wang Y, et al. 2010. Soil infiltration capacity and its influencing factors of different

- land use types in karst slope. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(6): 71-76.]
- Adamczyk K, Prémont-Schwarz M, Pines D, et al. 2009. Real-time observation of carbonic acid formation in aqueous solution. *Science*, 326(5960): 1690-1694.
- Atkinson T C. 1977. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *Journal of Hydrology*, 35(1): 93-110.
- Atkioson T C. 1985. Present and future directions in karst hydrogeology. *Annales de la Societe Geologique de Belgique*, 108: 293-296.
- Baffaut C, Benson V W. 2009. Modeling flow and pollutant transport in a karst watershed with SWAT. *Transactions of the ASABE*, 52(2): 469-479.
- Bohensky E L, Smajgl A, Brewer T. 2012. Patterns in household-level engagement with climate change in Indonesia. *Nature Climate Change*, 3(4): 348-351.
- Bonacci O, Gottstein S, Roje-Bonacci T. 2009. Negative impacts of grouting on the underground karst environment. *Ecohydrology*, 2(4): 492-502.
- Campbell C W, Sullivan S M. 2002. Simulating time-varying cave flow and water levels using the storm water management model. *Engineering Geology*, 65(2): 133-139.
- Einsiedl F, Radke M, Maloszewski P. 2010. Occurrence and transport of pharmaceuticals in a karst groundwater system affected by domestic wastewater treatment plants. *Journal of Contaminant Hydrology*, 117(1): 26-36.
- Hao Y, Cao B, Chen X, et al. 2013. A piecewise grey system model for study the effects of anthropogenic activities on karst hydrological processes. *Water Resources Management*, 27(5): 1207-1220.
- Hao Y, Wang W, Wang G, et al. 2009. Effects of climate change and human activities on the Karstic Springs in Northern China: a case study of the Liulin Springs. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 139-144.
- Hao Y, Wang Y, Zhu Y, et al. 2009. Response of karst springs to climate change and anthropogenic activities: the Niangziguan Springs, China. *Progress in Physical Geography*, 33(5): 634-649.
- Hao Y, Wu J, Sun Q, et al. 2012. Simulating effect of anthropogenic activities and climate variation on Liulin Springs discharge depletion by using the ARIMAX model. *Hydrological Processes*, 27(18): 2605-2613.
- Jiménez C C, Tejedor M, Morillas G, et al. 2006. Infiltration rate in andisols: effect of changes in vegetation cover (Tenerife Spain). *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(3): 153-158.
- Kibler, K M, Tullos D D. 2013. Cumulative biophysical impact of small and large hydropower development in Nu River, China. *Water Resources Research*, 49(6): 3104-3118.
- Krishnamurthy J, Wenkatesa Kumar N, Jayaraman V, et al. 1996. An approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and geographical information system. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10): 1867-1884.
- Kurtulus B, Razack M. 2007. Evaluation of the ability of an artificial neural network model to simulate the input-output responses of a large karstic aquifer: the La Rochefoucauld aquifer (Charente, France). *Hydrogeology Journal*, 15(2): 241-254.
- Labat D, Ababoua R, Manginb A. 2000a. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*, 238(3-4): 149-178.
- Labat D, Ababoua R, Manginb A. 2000b. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analyses. *Journal of Hydrology*, 238(3-4): 123-148.
- Legrand H E. 1973. Hydrological and ecological problems of karst regions. *Science*, 179(4076): 859-864.
- León L M, Parise M. 2009. Managing environmental problems in Cuban karstic aquifers. *Environmental Geology*, 58(2): 275-283.
- Liverman D M, Cuesta R M R. 2008. Human interactions with the Earth system: people and pixels revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(9): 1458-1471.
- Loaiciga H A, Maidmentb D R, Valdes J B. 2000. Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA. *Journal of Hydrology*, 227: 173-194.
- Magal E, Arbel Y, Caspi S, et al. 2013. Determination of pollution and recovery time of karst springs, an example from a carbonate aquifer in Israel. *Journal of Contaminant Hydrology*, 145: 26-36.
- Mahe G. 2006. The impacts of land-use/land-cover change and climate variability on the hydrology of the Sahel. *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts*, 308: 679-684.
- Mellander P E, Jordan P, Melland A R, et al. 2013. Quantification of phosphorus transport from a karstic agricultural watershed to emerging spring water. *Environmental Science & Technology*, 47(12): 6111-6119.
- Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. 2008. Climat-

- ic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951- 2000. *Global and Planetary Change*, 62(3): 187-194.
- Morasch B. 2013. Occurrence and dynamics of micropollutants in a karst aquifer. *Environmental Pollution*, 173: 133-137.
- Mikkelsen K M, Dickenson E R V, Maxwell R M, et al. 2013. Water- quality impacts from climate- induced forest die-off. *Nature Climate Change*, 3(3): 218-222.
- Oki T, Kanae S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790): 1068-1072.
- Paola C. 2011. In modelling simplicity isn't simple. *Nature*, 469: 38-39.
- Peterson E W, Wicks C M. 2006. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the Storm Water Management Model (SWMM). *Journal of Hydrology*, 329(1): 294-305.
- Rodriguez D A, Tomasella J, Linhares C. 2010. Is the forest conversion to pasture affecting the hydrological response of Amazonian catchments: signals in the Ji-Parana Basin. *Hydrological Processes*, 24(10): 1254-1269.
- Schindler D W. 1999. Carbon cycling: the mysterious missing sink. *Nature*, 398: 105-107.
- Schwarz K, Gocht T, Grathwohl P. 2011. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in highly vulnerable karst systems. *Environmental Pollution*, 159(1): 133-139.
- Shahid S, Nnth S K, Roy J. 2000. Groundwater potential modeling in a soft rock area using a GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9): 1919-1924.
- Shuster E T, White W B. 1971. Seasonal fluctuations in the chemistry of lime- stone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 14(2): 93-128.
- Sills J. 2013. Drought and China's cave species. *Science*, 340 (6130): 272-272.
- Vesper D J, White W B. 2003. Metal transport to karst springs during storm flow: an example from Fort Campbell, Kentucky/Tennessee, USA. *Journal of Hydrology*, 276(1): 20-36.
- White W B. 1969. Conceptual models for carbonate aquifers. *Groundwater*, 7(3): 15-21.
- White E L. 1977. Sustained flow in small Appalachian watersheds underlain by carbonate rocks. *Journal of Hydrology*, 32(1): 71-86.
- Yang R, Liu Z, Zeng C, et al. 2012. Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO₂ and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China. *Journal of Hydrology*, 468 (5): 468-469.
- Zhang C. 2011. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect. *Chinese Science Bulletin*, 56(35): 3759-3765.

Status and prospect of the hydrological effects of human activities in the Karst area

ZHANG Junyi^{1,2}, WANG Lachun¹, SU Weici^{3,4}, ZENG Chunfen¹

(1. School of Geographic & Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Geography and Tourism Department, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China;

3. Geography and Tourism Department, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

4. Institute of Mountain Resource, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China)

Abstract: Under the background of global climate change and due to the vulnerability and sensitivity of Karst ecosystems and rapid exchange of surface water and groundwater, Karst hydrodynamic systems respond promptly to human activities and environmental change. Human activity has already become the main driving force of environmental change in Karst areas. Environmental degradation caused by the use of Karst water resources and human activities directly or indirectly influences the Karst water system. For example, biodiversity of caves have declined due to groundwater pollution. Vegetation degeneration, soil erosion, stone desertification, and other environmental problems caused by human activities have had a serious impact on the hydrological processes

in the Karst region. Thus water problem has become an important limiting factor to the development of the Karst region. Based on the research of Karst ecological system and hydro-environmental characteristics, this paper focuses on summarizing works on the following water-related issues in Karst areas: hydrological effects of land use change; impacts of vegetation change caused by human activities on precipitation and runoff; hydrological effects of Karst water conservancy projects and water resource use; groundwater pollution and transmission and transformation of the main pollutants. On this basis, the paper summarizes the coupling mechanism between human activities and Karst water environment in the face of global climate change, the impact of human activities on the hydrological cycle and geological carbon cycle, as well as Karst water resource use, vulnerability assessment, and cave biodiversity, including the impact of environmental change on water cycle in Karst areas owing to short-term development, the effects of water conservancy projects, especially large-scale projects (such as cascade development) on hydrology and ecology. In recent years, concerns of global environmental change, especially global climate change promote the rapid development of the global carbon cycle research. Further study of the global carbon cycle and carbon accumulation process is dependent on a better understanding of the social-ecological-hydrological-Karst system. This system restricts material recycling and energy conversion of the carbon, water, and calcium cycles in the Karst area. Current research of such system focuses on the impact of human activities on Karst system structure and function, which ignores the variation of human adaptation in response to global climate change. Because of the fragile natural environment in Karst regions, the impact of global climate change is more significant than other areas of the same latitude, which results in more significant adaptive changes in the socioeconomic systems. The study of adaptive changes in socioeconomic systems in Karst areas and ecological processes and their environmental and hydrological effects, therefore, will further the analysis of environmental impacts of human activities from the systematic and global perspective, which has important theoretical and practical significance for further understanding of the role of human activity in global environmental change. The research of complex hydrological models and uncertainty quantification, and the study of human response to environmental changes and water cycle feedback mechanisms are the focus of future research.

Key words: Karst area; human activity; hydrological effect; Karst water resource; prospect