

气候变化和人类活动的水文水资源效应研究进展

刘 闻, 曹明明, 邱海军

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘 要: 水文过程的变化及其影响机制具有复杂性。一方面, 气候变化和人类活动影响水文水资源; 另一方面, 水文水资源又会对这种影响做出响应, 这种双向性和不确定性使得这一领域的研究比较复杂且发展较为缓慢。当前国内该方面研究仍处于探索阶段。系统总结了当前国内外气候变化和人类活动的水文水资源效应研究在理论、观点、方法与实践等方面取得的最新进展, 指出了该领域研究的薄弱环节, 并展望了未来主要的研究方向。国内外关于气候变化或者人类活动单一影响因素对水文水资源影响的研究较多, 将二者结合并量化区分的研究并不多见。加强量化研究, 明确各因素的影响比重, 对深化该领域的研究有深远意义。

关键词: 水文水资源; 气候变化; 土地利用/覆被变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0215-05

中图分类号: Q149

Progress of Hydrology and Water Resources Effects Caused by Climate Change and Human Activities

LIU Wen, CAO Ming-ming, QIU Hai-jun

(School of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: Change of hydrological processes and its influence mechanisms are complex. On one hand, climate change and human activities affect hydrology and water resources; and on the other hand, hydrology and water resources show responses to the impact. The duality and uncertainty make the research on the issue more complex and developed very slowly. Domestic research in this field is still at an early stage. This paper summarizes the latest research progress of hydrology and water resources effects caused by climate change and human activities at home and abroad, points out the weak links of the research in this field, and looks forward to the main research direction in future. It is found that the existing researches were mainly focused on a single factor of climate change or human activities impacting hydrology and water resources. However, there were few researches combining these two factors and making a quantitative distinction. In future, quantitative research should be enhanced and the importance of each factor should be separately identified, which are of importance to strength the research in the field.

Keywords: hydrology and water resource; climate change; land use and land cover change(LUCC)

随着人类社会的发展, 人类赖以生存的环境遭到前所未有的干扰与破坏, 使得自然环境要素与整体演变过程发生了变化。根据 IPCC4^[1] 的报告, 在过去的 100 a 内(1906—2005 年), 全球平均气温升高了 0.74 °C。气温升高将导致一系列的负面影响, 直接或间接地影响流域水循环与水资源量, 具体表现为许多区域的水资源减少、水旱灾害频发, 水环境恶化等严重的水危机问题。人类活动也深刻影响着水文水

资源系统, 具体方式包括土地利用/覆被方式, 水资源利用结构的改变以及堤坝与水库的修筑, 然而, 日益加剧的人类活动又是经济社会发展不可避免的, 如何协调与平衡这种关系, 又成为当今社会发展的难点。总之, 全球变化背景下, 许多区域受到气候变化长期影响与人类活动累积影响, 逐步成为生态脆弱区和敏感区, 水文水资源问题成为地理工作者关注的热点之一。

收稿日期: 2011-08-17

修回日期: 2011-12-08

资助项目: 榆林市人民政府项目“榆林市国家可持续发展实验区建设规划”(2009-2011); 西北大学研究生创新项目(10YJC01)

作者简介: 刘闻(1985—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 从事土地利用、人类活动与气候变化的水文水资源效应研究。E-mail: liuwen0122@163.com。

通信作者: 曹明明(1960—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 教授, 博士生导师, 从事自然地理研究。E-mail: chengshi@nwu.edu.cn。

1 气候变化和人类活动的水文水资源效应

气候变化对水文水资源的影响逐渐成为全球环境变化研究的重要组成部分^[2]。气候变化涉及到温度、降水、蒸发量、风速等要素的变化。在水文水资源变化对全球气候变化响应研究中,多集中在区域性降水、气温、蒸散发、径流要素在过去年份的时空变化分析及气候变化的情景模拟。

1.1 气候变化的水文水资源效应研究的起源与发展

国外关于气候变化对水文水资源影响的研究起步于 20 世纪 70 年代后期^[3],在世界气象组织(WMO)、联合国环境规划署(UNEP)、国际水文科学协会(IAHS)等国际组织的推动下,国际社会逐渐认识到该研究的重要性。进入 21 世纪,气候变化成为 IAHS—PUB, FLOODDEFENCE 2002 等各种国际会议的主要议题,对气候变化的研究不仅实现了水文、气象、生物、物理等多学科的交叉研究,而且更注重气候、陆面、人类活动等各方面的相互影响及反馈作用^[4]。

国内关于气候变化的水文水资源效应研究起步于 20 世纪 80 年代,国家“八五”、“九五”、“十五”科技攻关项目以及“十一五”期间的“973”计划中都有了此方面的研究课题,并且出现了一批优秀成果。“八五”期间,关于气候变化的水文水资源效应的研究大多集中于气候变化对水文水资源影响评价及不确定分析上,如郭生练等^[5]以蓝塘和花园 2 流域为例,应用 Monte Carlo 和非参数方法研究区域水文评价模型参数和径流的不确定性估计。“九五”期间,许多学者对气候变化的水文水资源效应进行了探索性研究。如邓慧平等^[6]对沱江流域水量平衡进行了模拟计算,采用假定的气候情景进行了水文要素对气候变化的敏感性分析,最后根据 NCAR CCM 输出结果生成的未来气候情景,分析了流域水文要素年内变化过程对气候变化的响应。江涛等^[7]则指出由于没有一种可普遍接受的通用模型来评价气候变化对区域水文水资源的影响,在今后一段时间仍需依赖气候变化情景与水文模型相结合的方法。这一时期国内应用比较广泛的模型大多是一些概念性模型、统计回归模型以及水量平衡模型,另外,还有我国学者发明的新安江模型。相对而言,水量平衡模型的应用较多^[8]。“十五”期间,流域水文模型在引进与改良上有了一定的发展,从传统的经验模型到集总式模型,再发展到后来的分布式水文模型,能更加精确反映出流域的空间变异性,其中 SWAT 模型是在 90 年代后期至今,发

展迅速、影响比较大的分布式水文模型^[9]。朱利等^[10]利用具有较强物理机制的 SWAT 模型进行了汉江上游地区的径流模拟,王国庆等^[11]利用月水文模型,根据黄河的产流特点和水平衡原理,模拟天然水资源的变化,分析了黄河上中游主要产流区水资源对气候变化的响应及变化趋势,并结合假定气候方案,分析了黄河上中游径流对气候变化的敏感性^[12]。“十一五”期间,国家重点基础研究发展计划(973 计划)“气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策”项目启动,开展气候变化背景下陆地水循环响应机理、气候变化对我国区域水资源安全与适应对策研究^[13]。这一时期关于水文水资源效应的研究已经较为深入,不仅涉及到气候的水文水资源效应,而且也综合考虑了人类活动的水文水资源效应,并开始将两种影响因子区分开来,尝试定量区分^[14-15]。

1.2 人类活动的水文水资源效应

人类活动对陆地水系统的影响是水文地理学研究的主要内容。人类活动对水文水资源的影响一般是通过土地利用/覆被变化和水资源利用方式等方面体现的。

土地利用/覆被变化的重要环境效应之一是以水文效应出现的^[16]。首先,土壤类型的不同会有不同的蓄水、保水、下渗、蒸发情况,进而会影响到流域的产流与汇流过程。其次,不同的地貌格局,形成不同的汇流网络,会影响流域截留、填洼、下渗等过程,影响流量。最后,土地利用/覆被变化还会形成不同的地下水位状况和水质质量^[17-18]。土地利用变化在多个层次上影响着降雨、蒸发、径流、污染以及土壤侵蚀等方面,导致了流域水资源的重新分配,并由此影响水文循环全过程,而人类活动和气候变化则放大了土地利用变化的生态水文效应^[19]。张勃等^[20]通过对处于干旱区的黑河地下水水文效应的研究,认为土地利用方式变化,改变了地下水循环路径和水质。在定量评估土地利用/覆被变化的水文水资源效应方面,谢平等^[21]提出考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型,将流域划分为 6 种不同土地利用及覆被变化类型,分别考虑蒸发和下渗的差异,计算地表径流量和地下径流量,最终得到流域的水文过程。关于人类活动的水文水资源效应的定量研究,是在人类活动影响下,对水资源系统的某些特征值进行量化、对模型的参数进行率定,给出水文要素变异大小的量化指标^[22]。国内外学者大多采用建立实验流域的方法,分析中小尺度上人类活动的水文水资源效应,因为存在尺度转化的问题,所以试验流域法难以应用到大尺

度范围研究,量化大尺度范围人类活动的水文水资源效应存在困难。

1.3 不同尺度上的气候变化和人类活动的水文水资源效应研究

气候变化和人类活动对下垫面环境的改变,不同研究尺度有不同结论。例如,马金珠等^[23]认为温度变化引起水文条件及河流水系变迁,这是导致地下水变化并由此造成绿洲演化的主导因素。然而,百年尺度的气温波动不足以引起水资源状况明显的变化,人类活动是近几十年导致区域地下水及生态环境变化的主要因素,在塔里木盆地南缘,通过天然河道人工渠系化、平原水库建设和枢纽工程上移等人类活动,促进了地表水资源的时空再分配,进而引起地下水空间补给变化。所以,在较长的时间尺度上,气候变化对水文水资源的影响更加明显^[24-25],短时间尺度上,土地利用/覆被变化是水文水资源产生变化的主要驱动要素之一^[2,26]。目前,对气候变化与人类活动的水文水资源效应研究多集中于中小尺度流域的径流变化上,例如,陈军锋等^[27]选择长江上游的一个中等流域,分析 60—90 年代以来的气候波动以及土地覆被变化对径流的影响。

2 水文水资源效应的研究方法进展

水文水资源效应是气候条件与流域下垫面综合作用的产物,其不仅受人类活动强度影响显著,而且对气候变幅响应敏感。现状的实测径流变化中,同时包含了气候变化和人类活动的影响,如何科学定量地界定二者对河川径流的影响,不仅是环境变化影响研究领域中的科学问题,也是目前水文科技工作者面临的难题^[28]。

2.1 气候变化的水文水资源效应研究方法

气候变化通过降水、气温等气象要素来影响水文水资源效应,通常是对该流域应用水文模型,通过参数率定,设定不同的气候情景,来研究地表径流、地下径流的响应变化。气候变化对水文水资源影响的研究通常包括以下步骤:气候变化情景的生成,与水文模型接口和水文模拟。

气候变化情景的生成包括 2 种:(1) 根据特定区域气候变化的趋势或可能,进行人为经验假设;(2) 运用 7 个大气环流模型,即 GFDL, GISS, LLNI, OSU, KMOL, UKMOH 模型模拟出不同的气候情景^[29-33]。

与水文模型接口技术方面,研制了用随机天气模型将 GCMs 大网格点的输出分解到流域尺度上^[34]。国内采用较多的是随机模型法,天气模式识别法和特征矢量聚类等方法^[35]。

气候变化的水文水资源效应研究方法应用较多的是水文模型法,对水文模型主要考虑以下几点:模型内在精度;模型率定和参数变化,资料的拥有量及可靠性,模型的通用性和操作性以及与 GCMs 的兼容性^[7]。

2.2 人类活动的水文水资源效应研究方法

在人类活动的水文水资源效应研究方法中,通常会采用对比分析法和水文模型法。

对比分析法包括实验流域法和特征变量的时间序列分析法。实验流域法就是确定实验流域,选取条件相同或者近似的未经土地利用/覆被变化影响的理想流域作为参照标准,与进行试验的目标流域进行同期水文要素的对比,二者之差即被认作是土地利用/覆被变化对目标流域的水文水资源效应。时间序列分析法是选择目标流域,将能够长时间反映土地利用/覆被变化的水文水资源效应的特征参数提取出来,作为主导因子,再依据此因子的变化趋势来判断土地利用/覆被变化的水文水资源效应。从时间尺度上看,土地利用/覆被变化的水文水资源效应最终表现在流域水量平衡的蒸发分量上^[36],而径流系数又可以表达蒸发分量的大小,所以可以选择径流系数为特征参数。

以上 2 种方法都存在一些问题,对比流域法剔除了气候这一影响因素,可以很好地表示由下垫面变化所引起的水文水资源效应,但是却存在实验数据累积不足、耗力耗时的的问题,而且一般无法保障流域下垫面始终不发生变化,其实际操作不太具有可重复性;时间序列法的应用较为复杂,由于气候变化的不确定性,在使用该方法时需要气候变化的趋势性和波动性进行分析。

水文模型法是随着计算机技术的发展而发展起来的,采用模型模拟手段来定量评估、预测土地覆被变化对水循环各个环节的影响,在近年来备受关注^[37]。水文模型的发展经历了经验统计模型、集总式水文模型和分布式水文模型。经验统计模型是建立在统计关系的基础之上的,缺乏物理法则,在土地利用/覆被变化的水文水资源效应研究中较少应用^[38]。集总式水文模型将目标流域视作完整的研究单元,以降雨和蒸发的平均值作为输入数据,模拟流域出口断面的径流过程,不能处理不同土地利用类型和水文过程的区域差异以及流域参数的变化性^[38]。典型的集总式水文模型有 HEC-1 模型, Sacramento 模型, SCS 模型, Stanford 模型和新安江模型等。分布式水文模型基于物理基础,能较好地反映出流域的空间变异性^[38],如王军德等^[39]以西北干旱区杂木河

流域为研究区,应用分布式水文模型(SWAT)对流域的径流进行模拟,探讨了流域尺度和微地形尺度 7 种不同植被组合模式下的水文响应特征。具有代表性的分布式水文模型有:VSVS 模型, TOPMODEL 模型, IHDM 模型, SHE 模型, SWAT 模型和 DHSVM 模型。

2.3 定量区分气候变化和人类活动的水文水资源效应

气候变化和人类活动都会影响到水文水资源环境,如何定量区分两者的贡献率,许多学者对此进行了探索。例如陈军锋等^[27]选择了长江上游的一个中等流域,分析了 1960—2000 年共 40 a 的气候波动以及土地覆被变化情况,利用集总式和分布式水文模型模拟该流域气候波动和土地覆被变化对其水文的影响,得出由于气候波动造成的径流变化占 3/5,由于土地覆被变化所造成的径流变化占 1/5。王国庆等^[28]以黄河中游三川河为例,对天然径流过程进行模拟,采用流域水文模型定量分析了气候变化和人类活动对河川径流的影响。

采用流域水文模拟分析环境变化对流域径流的影响,首先,应根据实测水文过程的变化特性和流域人类活动状况,将实测水文序列划分为 2 个阶段:第 1 个阶段为天然阶段,常作为基准时期,该时期的实测径流量也相应地作为基准值;第 2 个阶段为人类活动影响阶段。在应用水文模型时,对资料有着精准的要求,首先是要获取长时间序列的实测水文值。将时间序列划分为 2 个阶段:天然阶段和人类活动影响阶段,因为天然阶段的实测径流值要作为基准值,所以又称作基准时期。其次,是要对水文资料进行率定,具体方法是输入天然阶段的水文气象资料,模型及参数即可以反映出人类活动显著影响之前,土地利用状况及用水结构对流域产流量的影响。最后,保持模型参数不变,将人类活动显著影响期间的水文气象资料输入模型,则输出的径流量可以反映出最初土地利用状况和用水结构状况下的产流过程^[40]。

3 气候变化和人类活动的水文水资源效应研究的不足与展望

综上所述,国内外学者对气候变化和人类活动的水文水资源效应已经做了大量的研究工作,包括理论上的总结和方法上的创新与探索,这为我们进一步研究气候变化和人类活动的水文水资源效应提供了良好的平台,但是,当前并未形成独立的理论体系,尚存在一些薄弱的环节:

(1) 气候变化和人类活动的水文水资源效应的定量化研究存在一些不足。不论是气候变化还是人

类活动对水文水资源的影响,都是一个漫长的过程,尤其是气候变化。长时间尺度的气候资料较难获取,只能进行短期气候的预测分析,这会造成分析结果出现误差。如何将短期资料推演到长时间序列的应用?气候变化和人类活动作为独立或整体因素,对水文系统的影响程度如何划分?不同尺度研究得出的结论为何不同甚至截然相反?这些问题都需要深入探讨。

(2) 关于流域地表水与地下水相互转化的研究较少。气候变化与修建水库等人类活动对地表水与地下水的影响,地表水和地下水的量和质的变化,上游水系统变化对下游水系统的影响,以及大尺度的全球气候变化对小尺度的区域水循环、水利用的影响,都是当前研究领域的薄弱环节。加强这方面研究将有利于科学管理流域水资源,对修建拦蓄水库、科学调配水资源、进行流域生态修复都具有重要作用。

(3) 目前国外具有较为完备的土壤分类与土地类型数据库,分布式水文模型的应用较为方便,但是国外土壤分类系统与我国的不一致,需要建立转换体系,并应逐步建立符合我国土壤分类体系的数据库,加强分布式水文模型的应用。

(4) 气候变化的水文水资源效应和人类活动的水文水资源效应的机理是什么?只有通过研究其内在机理,明确了各因素的不确定性,才能揭示长期气候变化过程对水文系统产生的影响的内在规律。

4 结论

(1) 学科间交叉融合。全球变化问题尤其是气候变化,不仅是当前国际社会的热点,也是学术界关注的焦点问题。气候变化与水文循环结合将是地理学、水文学、物理学界需要共同研究的课题。需要解答在全球变化背景下,水循环的规律是什么,水在各个圈层的转化规律与相互联系是怎样的,气候的演变对水资源的影响是怎样的,水系统又会出现怎样的响应。在定性分析的基础上,又要定量的分析出气候变化对水系统的影响程度。

(2) 注重气候变化与人类活动的水文水资源效应的机理研究。目前区分气候变化与人类活动的水文水资源效应的贡献分值大多是通过水文模型来研究,而目前水文模型的尺度转化问题并未得到较好的解决,只有在充分认识气候变化与人类活动的水文水资源效应机理的基础上,才能更好地对模型进行改进,加强这方面研究。

(3) 加强“全球—陆地—区域—流域尺度水文循环”基础研究。水文水资源效应涉及到全球的水系统,研究视角的不同就会造成研究结果的差异性,加

强不同尺度下的基础研究,会对不同尺度研究成果的衔接大有裨益。

(4) 土地利用/覆被变化影响下的水文水资源效应研究将成为研究热点。LUCC是当前地理学工作者研究的重要课题,土地利用/覆被变化的水文水资源效应也是研究的重中之重。由于人类的生产活动的复杂性不断加剧,对自然界的地形、土壤、地质、植被、湖泊和流域形态等下垫面因素的改变,使这方面的研究内容更加复杂,这将会是今后的研究重点。

[参 考 文 献]

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [R]. Geneva, Switzerland, IPCC, 2007:30.
- [2] 夏军,谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学,2002,24(3):25-33.
- [3] 水利部应对气候变化研究中心. 气候变化对水文水资源影响研究综述气候变化影响评估[J]. 中国水利,2008(2):47-51.
- [4] 张利平,陈小凤,赵志鹏,等. 气候变化对水文水资源影响的研究进展[J]. 地理科学进展,2008,27(3):60-67.
- [5] 郭生练,李兰,曾光明,等. 气候变化对水文水资源影响评价的不确定分析[J]. 水文,1995(6):1-6.
- [6] 邓慧平,唐来华. 沱江流域水文对全球气候变化的响应[J]. 地理学报,1998,53(1):42-48.
- [7] 江涛,陈永勤,陈俊合,等. 未来气候变化对我国水文水资源影响的研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2000,38(S2):151-157.
- [8] 邓慧萍,吴正方,唐来华,等. 气候变化对水文和水资源影响研究综述[J]. 地理科学,1996,51(S):161-170.
- [9] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part 1: model development[J]. Journal of the American Water Resources Association,1998,34(1):73-89.
- [10] 朱利,张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. 资源科学,2005,27(2):16-22.
- [11] 王国庆,王云璋,史忠海,等. 黄河流域水资源未来变化趋势分析[J]. 地理科学,2001,21(5):396-400.
- [12] 王国庆,王云璋,康玲玲. 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析[J]. 应用气象学报,2002,13(1):117-121.
- [13] 夏军,占车生,刘晓洁,等. 气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策项目启动[J]. 地理科学,2010,65(3):378-379.
- [14] 王国庆,金君良,王金星,等. 辽河流域径流对气候变化的响应特征研究[J]. 地球科学进展,2011,26(4):433-440.
- [15] 李斌,李丽娟,覃取楚,等. 基于 Budyko 假设评估洮儿河流域中上游气候变化的径流影响[J]. 资源科学,2011,33(1):70-76.
- [16] 张蕾娜,李秀彬. 用水文特征参数变化表征人类活动的水文效应初探:以云州水库流域为例[J]. 资源科学,2004,26(2):62-67.
- [17] 朱勇. 考虑土地利用/覆被变化的流域水文模型及应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2006.
- [18] 栾兆擎,邓伟. 三江平原人类活动的水文效应[J]. 水土保持通报,2003,23(5):11-14.
- [19] Winter T C. The concept of hydrologic landscapes[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001,37(2):335-349.
- [20] 张勃,丁文晖,孟宝. 干旱区土地利用的地下水水文效应分析:以黑河中游地区为例[J]. 干旱区地理,2005,28(6):764-769.
- [21] 谢平,朱勇,陈广才,等. 考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型及应用[J]. 山地学报,2007,25(3):257-264.
- [22] 陈晓宏,涂新军,谢平,等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. 地球科学进展,2010,25(8):800-811.
- [23] 马金珠,李吉均,高前兆. 气候变化与人类活动干扰下塔里木盆地南缘地下水的变化及其生态环境效应[J]. 干旱区地理,2002,25(1):16-23.
- [24] 曾小凡,苏布达,姜彤. 21世纪前半叶长江流域气候趋势的一种预估[J]. 气候变化研究进展,2007,3(5):293-298.
- [25] 苏布达,姜彤. 长江流域降水极值时间序列的分布特征[J]. 湖泊科学,2008,20(1):123-128.
- [26] Crokea B F W, Merrittc W S, Jakemana A J. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments[J]. Journal of Hydrology, 2004,291(1):115-131.
- [27] 陈军锋,李秀彬,张明. 模型模拟梭磨河流域气候变化和土地覆被变化对流域水文的影响[J]. 中国科学 D 辑,2004,34(7):668-674.
- [28] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利,2008(2):55-58.
- [29] 刘春荣,田玉英. 用改进的非线性水量平衡模型研究气候变化对径流的影响[J]. 水科学进展,1991,2(2):120-126.
- [30] 傅国斌,刘昌明. 全球变化对区域水资源影响的计算分析[J]. 地理学报,1991,46(3):277-288.
- [31] 侯宇光,詹淑贤. 气候变化对长江上游地区水资源的影响[J]. 水资源研究,1995,16(4):5-13.
- [32] 英爱文,姜广武. 运河流域水资源对气候变化的响应[J]. 水科学进展,1996,7(S):67-72.
- [33] 何新林,郭生练. 气候变化对新班玛纳斯河流域水文水资源的影响[J]. 水科学进展,1998,9(1):77-83.
- [34] 陈英,刘新仁. 淮河流域降水蒸发随机模型研究[J]. 淮海大学学报,1996,24(3):43-48.

稳定均匀的固化土,使固化土的强度大大降低,弹性模量减少。实际应用中,由于含水率过低,固化土样不饱和,固化剂有效成分利用率低,影响固化土的强度和弹性模量,所以取最优含水率利于控制^[10-11]。

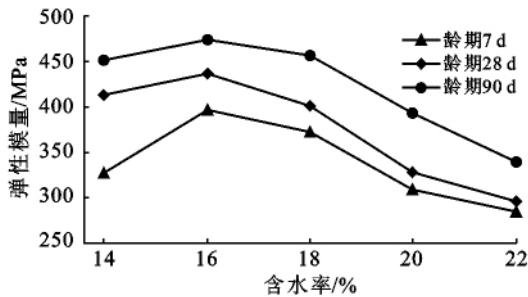


图 4 含水率与固化土弹性模量关系曲线趋势

3 结论

(1) 试验获得 MBER 固化土单轴受压应力—应变过程曲线,揭示了固化土破坏过程,为进一步对固化土理论分析提供依据,并且分析得出固化土的弹性形变阶段大致处于峰值应力的 0.6 倍左右,取正应力达到 60%峰值应力时的固化土的应力与应变比值作为固化土的弹性模量。试验得出 MBER 固化土的弹性模量在 300~1 000 MPa。

(2) 在剂量相同的情况下,固化土弹性模量随着龄期的增长而增大。在前期,随着土壤固化剂剂量的增加,固化土弹性模量的增长速率呈现先增后减的现象,但是差异不大,固化土的弹性模量在后期有较大的增长;在龄期相同的情况下,固化土弹性模量随着剂量的增加而增大。

(3) 在含水率较低时,固化土的弹性模量随着含水率的增加而增大,当含水率达到一定水平时固化土的弹性模量随着含水率的增加而减小。实际应用中取最优含水率利于控制。

[参 考 文 献]

- [1] 吴普特,高建恩.黄土高原水土保持新论:基于降雨地表径流调控利用的水土保持学[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [2] 於春强,郑尔康.高性能土壤固化剂及在地基处理中的应用[C]//中国土木工程学会第9届土力学及岩土工程学会会议论文集.北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 柯结伟,庞有师,陈志勇.土壤固化剂技术与工程应用现状[J].华东公路,2007(5):48-51.
- [4] 刘铁宏,王义新.土壤固化剂在防汛抢险中的应用现状分析[J].吉林水利,2009(3):46-49.
- [5] 宋南京,陈新中,赵洪义.土壤固化剂的研究进展和应用[J].中国建材科技,2009(1):55-61.
- [6] 高建恩,孙胜利,吴普特.一种新型土壤固化剂[P].中国:CN200410073273.5;2005-06-29.
- [7] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等.固化土集流面无侧限抗压强度影响因素研究[J].农业工程学报,2006(9):11-15.
- [8] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等.密度和含水率对固化土无侧限抗压强度的影响[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [9] 中华人民共和国交通部.中华人民共和国行业标准(TJ057-94).公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].北京:人民交通出版社,1994.
- [10] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等.水泥基土壤固化剂固化土的物理化学作用[J].岩土力学,2010(12):3741-3745.
- [11] 储诚富.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[D].南京:东南大学,2005.
- [12] 李秀彬.土地覆被变化的水文水资源效应研究:社会需求与科学问题[C]//中国地理学会自然地理专业委员会.土地覆被变化及其环境效应.北京:星球地图出版社,2002:1-6.
- [13] 水利部水利信息中心.“八五”国家科技攻关计划(85-913-03-03)“气候变化对中国水文水资源影响及适应对策研究”技术报告[R].北京:水利部水利信息中心,1996.
- [14] 余兴修,杨桂山,王瑶.土地利用/覆被变化的环境效应研究进展与动向[J].地球科学,2004(4):191-197.
- [15] 万荣荣,杨桂山.流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应[J].湖泊科学,2004,16(3):259-264.
- [16] 王军德,李元红,李赞堂,等.基于SWAT模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究:以石羊河上游杂木河流域为例[J].生态学报,2010,30(21):5875-5885.
- [17] 张建云,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版社,2007.

(上接第 219 页)