



变化环境下流域水资源演变 及其归因研究

丁相毅 贾仰文 刘家宏 仇亚琴 牛存稳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

变化环境下流域水资源演变 及其归因研究

丁相毅 贾仰文 刘家宏 仇亚琴 牛存稳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书在分析以全球变暖为特征的气候变化和区域高强度人类活动等因素对流域水资源演变的影响机理基础上,首次将基于指纹的归因方法应用到流域尺度水资源演变研究中,提出了变化环境下流域水资源演变的归因方法。全书分为7章,即概述、变化环境下流域水资源演变的归因方法、海河流域水文气象要素演变分析、海河流域水资源演变的影响因素分析、海河流域水循环要素演变的归因分析、变化环境下海河流域水资源演变趋势分析,以及总结与展望。

本书可供水文、水资源、气象、气候、生态环境等专业方面的科技工作者及有关高等院校相关专业本科生、研究生与教师阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下流域水资源演变及其归因研究 / 丁相毅等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-5170-6123-6

I. ①变… II. ①丁… III. ①流域—水资源—研究
IV. ①TV211.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第305407号

书 名	变化环境下流域水资源演变及其归因研究
作 者	BIANHUA HUANJING XIA LIUYU SHUIZIWUAN YANBIAN JI QI GUIYIN YANJIU 丁相毅 贾仰文 刘家宏 仇亚琴 牛存稳 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京图语包装设计有限公司
印 刷	北京虎彩文化传播有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 11.25印张 214千字
版 次	2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

序

水是生态系统的控制性要素，与气温、光照并列为三大非生物环境因子。流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。在现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。因此，揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现其演变规律，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题之一。

近年来以全球变暖为主要特征的气候变化对水循环系统的影响日益凸显，加剧了水循环系统的复杂性，致使对变化环境下的水循环系统进行模拟和预测的难度也在不断加大。尽管国内外学者针对二元水循环模拟开展了大量工作，为高强度人类活动地区的水循环模拟提供了强有力的工具，但由于在气候变化对水循环影响机理等方面认识的不足和相关技术的不成熟，现有模型和方法尚不能科学辨识水循环演变过程中气候变化、取用水和下垫面改变等人类活动因素以及自然因素的作用，给未来气候变化条件下的水资源预测和水资源综合管理增加了难度和不确定性。

2008 年美国加利福尼亚大学 Barnett 等人在《Science》上发表了题为“美国西部人类活动导致的水文变化 (Human-induced changes in the hydrology of the Western United States)”的学术论文，指出“美国西部

1950—1999 年间径流量、冬季气温、积雪量等变化的 60% 是受人类活动影响”。可见，气候变化对水循环过程的影响日益加剧，在某些流域其贡献已经超过了自然因素以及取用水和下垫面改变等人类活动因素。该研究是有关水循环演变的归因研究的首次探索，但只考虑了气候变化一个因素的影响，无法定量区分取用水、下垫面改变等其他人类活动因素对水循环演变的贡献。国内有关该问题的研究也没有一套系统的方法。

该书以国家重点基础研究发展计划（973）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”第四课题“海河流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测”（2006CB403404）、国家自然科学基金“基于指纹的流域水循环演变的检测与归因研究”（51109223）等项目为依托，针对变化环境下水资源演变规律识别、定量区分气候变化和人类活动对流域水资源演变的影响两大国际难点问题，在分析以全球变暖为特征的气候变化和区域高强度人类活动等元素对流域水资源演变的影响机理基础上，首次将基于指纹的归因方法应用到流域尺度水资源演变研究中，提出了变化环境下流域水资源演变的归因方法。在明确流域水文气象要素时空演变趋势的基础上，将该归因方法应用到对气候变化非常敏感、人类活动强烈、水问题突出、具有重要战略地位的海河流域，定量区分了气候系统的自然变异、温室气体排放导致的气候变化和人类活动等元素对流域水资源演变的贡献。考虑到未来气候、人工取用水、下垫面等环境条件的变化，对流域未来水资源情势进行了预估。

该书理论基础扎实、逻辑结构清晰、内容丰富、深入浅出，可作为流域水循环演变研究的参考，特向各位从事变化环境下流域水循环演变研究的科研人员推荐。衷心希望通过该书的介绍和推广，能够增进水文

水资源研究工作者对流域水循环演变规律的认知,提高我国应对变化环境的流域水资源综合管理能力。

流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士 (签字)



2017 年 10 月 10 日

前 言

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。随着人口的不断增长和经济社会的高速发展，人类对流域水循环系统的影响不断增强：温室气体及气溶胶的排放改变了水循环的动力条件、下垫面的变化改变了水循环要素的参数特性、人工取用耗排水改变了水循环的结构，再加上土地利用的变化、大规模水利工程建设以及工业与城市的飞速发展，流域水循环已经从原来的“自然”模式占主导逐渐转变为“自然-社会”（或“自然-人工”）二元耦合模式。在高强度人类活动的缺水地区，地表径流、地下径流和河川径流等自然水循环通量的日益减少，而取水量、用水量、耗水量及排污量等社会水循环通量的不断增大已影响了流域水循环系统原有的生态和环境服务功能，引发了一系列的资源、环境与生态问题。如何定量区分气候变化、取用水和下垫面改变等人类活动因素及自然因素在水循环演变中的贡献，为水资源综合管理和气候变化应对提供实践指导，已成为现代水文水资源学研究的关键科学问题之一。

变化环境下流域水资源演变的归因方法不仅可以丰富“自然-人工”二元水循环理论体系，定量描述和区分气候变化和人类活动对流域水资源演变的影响，具有重要的理论创新价值，而且通过将该归因方法应用于典型流域，结合变化环境下流域水资源预估结果，能够为流域水资源综合管理和经济社会可持续发展提供重要的战略支撑和决策支持，具有重要的实践应用意义。

近年来,国内外学者围绕水资源演变的归因分析开展了大量的研究,总结来看,国内尚无统一和成熟的方法,目前的分项调查法和水文模型法主要以统计、还原和修正等作为基本手段,已经不能满足现代二元驱动力作用下流域水资源演变中的人类活动效应研究;国际上虽有成熟的归因方法,但目前的相关研究主要集中于气候变化方面,水资源演变的归因研究则基本属于空白,只有 Barnett 等人在美国西部流域做了一些探索工作,但只是针对与温度变化有关的变量如积雪水当量、径流量达到全年径流总量一半的时间等,并没有涉及径流量、水资源量变化的归因工作;并且该研究只考虑气候变化一个因素的影响,而没有考虑下垫面变化、人工取用水等人类活动因素的影响,无法定量区分出人类活动和气候变化对水资源演变的贡献。

在国家重点基础研究发展计划(973)项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”第四课题“海河流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测”(2006CB403404)、国家自然科学基金“基于指纹的流域水循环演变的检测与归因研究”(51109223)的资助下,我们开展了流域水循环演变及其归因分析的研究探索,本书是对已取得的阶段研究成果的总结。需要说明的是,该书部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播,为将变化环境下流域水资源演变及其归因研究成果进行全面、系统和集中展示,特将相关内容汇集成本书,实现研究成果的共享,也期望能够得到来自各方的指正与交流。

本书共分7章。第1章由丁相毅撰写;第2章由丁相毅、贾仰文撰写;第3章由丁相毅、牛存稳撰写;第4章由刘家宏、仇亚琴撰写;第5章由丁相毅撰写;第6章由丁相毅、仇亚琴、贾仰文撰写;第7章由

贾仰文、丁相毅撰写。全书由丁相毅统稿。

本书在编写过程中得到了中国工程院王浩院士、中国水利水电科学研究院水资源研究所各位领导的大力支持。中国水利水电科学研究院水资源研究所城市水文与水务工程研究室杨志勇、邵薇薇、翁白莎、于赢东、晏点逸等专家，以及水资源所郝春沅博士、刘佳嘉博士、杜军凯博士、中国海洋大学彭辉博士等对书稿提出了宝贵的意见，中国水利水电出版社编辑为本书的校对和出版付出了辛苦劳动，在此一并感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者不吝批评赐教。

作者

2017年10月于北京

目 录

序 前言

第 1 章	概 述	- 1 -
1.1	研究背景和意义	- 1 -
1.1.1	研究背景	- 1 -
1.1.2	研究意义	- 4 -
1.2	国内外研究动态	- 5 -
1.2.1	气候变化对水资源的影响	- 5 -
1.2.2	人类活动对水资源的影响	- 6 -
1.2.3	水资源演变的归因研究	- 9 -
1.2.4	水循环要素变化的检测与归因	- 11 -
1.2.5	存在的主要问题	- 12 -
1.3	研究内容和思路	- 13 -
1.3.1	研究内容	- 13 -
1.3.2	研究思路	- 14 -
第 2 章	变化环境下流域水资源演变的归因方法	- 16 -
2.1	全球气候模式	- 16 -
2.1.1	大气环流模式	- 17 -
2.1.2	海气耦合模式	- 21 -
2.1.3	陆面过程模式	- 23 -
2.1.4	区域气候模式	- 24 -
2.2	分布式水文模型	- 25 -
2.2.1	模型结构	- 26 -
2.2.2	自然水循环过程模拟	- 27 -
2.2.3	能量循环过程模拟	- 41 -
2.2.4	社会水循环过程模拟	- 43 -
2.2.5	WEPL 模型的构建和模拟步骤	- 45 -
2.3	统计降尺度模型	- 49 -

2.3.1	降尺度方法分类	- 49 -
2.3.2	统计降尺度模型 SDSM	- 50 -
2.4	天气发生器	- 51 -
2.4.1	概述	- 51 -
2.4.2	降水的模拟	- 53 -
2.5	基于指纹的流域水循环要素演变的归因方法	- 55 -
2.5.1	指纹的概念及内涵	- 55 -
2.5.2	信号强度	- 58 -
2.5.3	基于指纹的流域水循环要素演变的归因方法	- 58 -
第 3 章	海河流域水文气象要素演变分析	- 60 -
3.1	海河流域概况	- 60 -
3.1.1	自然地理概况	- 60 -
3.1.2	社会经济概况	- 63 -
3.1.3	水文气象概况	- 65 -
3.2	分析方法	- 67 -
3.2.1	变化趋势分析	- 67 -
3.2.2	空间变异型态分析	- 69 -
3.2.3	周期性分析	- 69 -
3.3	水文气象要素演变	- 70 -
3.3.1	降水量	- 70 -
3.3.2	平均温度	- 74 -
3.3.3	地表水资源量	- 78 -
3.3.4	其他水循环要素	- 81 -
3.4	水汽输送变化分析	- 83 -
3.4.1	基础资料	- 83 -
3.4.2	海河流域夏季水汽收支特征	- 84 -
3.5	海河流域降水和温度的周期性分析	- 87 -
3.5.1	基础资料	- 87 -
3.5.2	周期性分析结果	- 88 -
第 4 章	海河流域水资源演变的影响因素分析	- 90 -
4.1	流域水循环驱动因子分析	- 90 -
4.1.1	气候因子	- 90 -
4.1.2	下垫面条件	- 91 -

4.1.3	人工取用水	- 92 -
4.2	海河流域分布式水文模型构建	- 92 -
4.2.1	计算单元划分	- 92 -
4.2.2	模型率定和验证	- 94 -
4.2.3	模型参数不确定性分析	- 101 -
4.3	海河流域水资源演变规律	- 104 -
4.3.1	水资源历史演变	- 104 -
4.3.2	气候变化对水资源的影响	- 106 -
4.3.3	人工取用水对流域水资源演变的影响	- 107 -
4.3.4	下垫面变化对流域水资源演变的影响	- 108 -
4.4	海河流域水资源演变成果合理性分析	- 109 -
第 5 章	海河流域水循环要素演变的归因分析	- 111 -
5.1	归因情景设置	- 111 -
5.1.1	降水和温度演变的归因情景	- 111 -
5.1.2	地表水资源量演变的归因情景	- 113 -
5.2	全球气候模型	- 116 -
5.3	统计降尺度模型 SDSM 的应用	- 117 -
5.3.1	数据来源	- 117 -
5.3.2	SDSM 模型率定和验证	- 117 -
5.4	降水和温度演变的归因分析	- 120 -
5.4.1	降水演变的归因分析	- 120 -
5.4.2	温度演变的归因分析	- 122 -
5.5	地表水资源量演变的归因分析	- 124 -
第 6 章	变化环境下海河流域水资源演变趋势分析	- 127 -
6.1	未来气候情景	- 127 -
6.1.1	气候情景现状	- 127 -
6.1.2	本研究选用的未来气候情景	- 129 -
6.2	未来下垫面情景	- 138 -
6.3	未来取用水情景	- 140 -
6.4	水资源演变趋势预估	- 143 -
6.5	水资源可持续利用的保障措施	- 149 -
第 7 章	总结与展望	- 152 -
7.1	总 结	- 152 -

7.2 研究展望..... - 154 -

7.2.1 变化环境下流域水资源演变归因方法的继续深化和完善 - 154 -

7.2.2 变化环境下流域水资源演变归因方法在海河流域的进一步应用..... - 156 -

7.2.3 拓展气候变化对流域水资源影响的研究领域 - 156 -

7.2.4 海河流域水资源预测的完善 - 156 -

参考文献 - 158 -

第 1 章 概 述

在全球气候变暖和区域高强度人类活动对流域水循环影响日益加剧的背景下，本章论述了进行变化环境下流域水资源演变及其归因研究的重要意义，基于国内外有关气候变化对水资源的影响、人类活动对水资源的影响、水资源演变的归因等方面研究的动态分析，指出了目前研究存在的主要问题，介绍了本书的主要研究内容和研究思路。

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

水是生态系统的控制性要素，与气温、光照并列为三大非生物环境因子。作为一种可再生性资源，水资源的数量是非常有限的，在很大程度上依赖于水循环系统。流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。然而，随着人口的不断增长和经济社会的高速发展，人类活动对流域水循环系统的影响不断增强：温室气体及气溶胶的排放改变了水循环的动力条件、下垫面的变化改变了水循环要素的参数特性、人工取用耗排水改变了水循环的结构，再加上土地利用的变化、大规模水利工程的建设以及工业与城市的飞速发展，流域水循环已经从原来的“自然”模式占主导逐渐转变为“自然-社会”（或“自然-人工”）二元耦合模式（王浩等，2004），特别是在平原和城市等高强度人类活动地区更为突出。在高强度人类活动的缺水地区，地表径流、地下径流和河川径流等自然水循环通量的日益减少，而取水量、用水量、耗水量及排污量等社会水循环通量的不断增大，已影响了流域水循环系统原有的生态和环境服务功能，引发了一系列的资源、环境与生态问题（贾仰文等，2010）。

观测资料表明，地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化，我国的气候变化趋势与全球的总趋势基本一致。近百年的全球气候变暖不只表现在气温升高，也表现在气温变率加大、极端天气气候事件趋多、趋强。《2016 年中国气候公报》显示，受超强厄尔尼诺影响，我国气候异常，极端天气气候事件多，暴雨洪涝和台风灾害重，气象灾害造成的经济损失大，气候年景差。2016 年，全

国平均气温较常年偏高 0.81°C ，为历史第三高；四季气温均偏高，其中，夏季气温为历史最高。全国平均年降水量 730.0mm ，较常年偏多 16% ，为历史最多，四季降水量分别偏多 53% 、 22% 、 6% 、 37% 。2016 年，我国暴雨较多，南北洪涝并发，全国 26 个省（自治区、直辖市）出现不同程度的城市内涝。一系列极端气候灾害造成了巨大的经济损失，气候变暖也加剧了全球水循环的转化过程，驱动降水、蒸发、径流等水文要素的变化，改变流域或区域水量平衡，影响水资源的时空分布。

水资源系统在受到以全球变暖为特征的气候变化影响的同时，也受到了取用水和下垫面变化等人类活动因素的强烈干预。20 世纪 50 年代以来，全球工业发展迅速，人口急剧增长，人类对水资源的需求也在以惊人的速度增加。在 20 世纪的 100 年中，世界人口增加了 2 倍，而人类用水却增加了 5 倍。据全国水资源综合规划统计，1949 年，全国总供水量仅为 1000亿 m^3 左右；2016 年，全国总供水量达 6040亿 m^3 ，增加了 5 倍多。另外，由于全球人口增长和城市化建设，1970—1995 年年间，全球耕地面积增加了 0.26亿 hm^2 ，草地面积增加了 2.2亿 hm^2 ，森林面积减少了 4.6亿 hm^2 。据《中国可持续发展遥感监测报告（2016）》（顾行发等，2017），遥感监测 20 多年期间，我国耕地面积变化最显著，其动态变化面积高于所有其他土地类型；耕地面积先增后减，呈现明显的阶段性特征，2000 年面积最大。2010 年全国耕地 21.36亿亩 ，依然多于 20 世纪 80 年代。在草地、林地、未利用土地、耕地、水域和城乡工矿居民用地等 6 类土地中，城乡工矿居民用地变化幅度最大，2010 年扩大为 20 世纪 80 年代末的 1.32 倍，其中城镇用地扩大了 1.76 倍，农村居民点扩大了 1.10 倍。

随着全球气候的持续变暖和经济社会的不断发展，人类的用水需求也会越来越大，水资源对气候条件和人类活动等环境变化的脆弱性加大，区域水资源量能否支撑当地经济社会的可持续发展、未来水资源如何演变等已经成为公众普遍关心的问题。因此，变化环境下的水资源演变及相关科学问题不仅是一个综合的环境问题，而且是一个复杂的经济问题和社会问题，已经成为了全球科学界和各国政府强烈关注的一个热点问题。影响水资源演变的因素有许多，除了气候系统中降水、温度等要素的自然变异外，还有温室气体排放导致的气候变暖、包括人工取用水及下垫面变化在内的区域高强度人类活动，以及其他一些未知和不确定因素。如何定量评估这些因素对水资源演变的影响、区分各个因素对水资源演变影响的轻重主次，换言之，如何在导致水资源变化的诸因素中区分自然和人类活动对水资源演变的影响、定量阐述导致水资源演变的自然和人为因素的作用，为水

资源综合管理和气候变化应对提供实践指导,已成为现代水文水资源学研究的关键科学问题之一。

近年来以全球变暖为主要特征的气候变化对水循环系统的影响日益凸显,加剧了水循环系统的复杂性,致使对变化环境下的水循环系统进行模拟和预测的难度也在不断加大。尽管国内外学者针对二元水循环模拟开展了大量工作,其中最具代表性的是王浩等(2006)基于二元水循环理念研发的二元水循环系统模拟模型,为高强度人类活动地区的水循环模拟提供了强有力的工具,但由于在气候变化对水循环影响机理等方面认识的不足和相关技术的不成熟,现有模型和方法尚不能科学辨识水循环演变过程中气候变化、取用水和下垫面改变等人类活动因素以及自然因素的作用,给未来气候变化条件下的水资源预测和水资源综合管理增加了难度和不确定性。2008年美国加利福尼亚大学Barnett等在《Science》上发表了题为“美国西部人类活动导致的水文变化(Human-induced changes in the hydrology of the Western United States)”的学术论文,指出“美国西部1950—1999年年间径流量、冬季气温、积雪量等变化的60%是受人类活动影响”。可见,气候变化对水循环过程的影响日益加剧,在某些流域其贡献已经超过了自然因素以及取用水和下垫面改变等人类活动因素。该研究是有关水循环演变的归因研究的首次探索,但只考虑了气候变化一个因素的影响,无法定量区分取用水、下垫面改变等其他人类活动因素对水资源演变的贡献。国内有关该问题的研究也没有一套系统的方法。随着近年来气候学的不断发展,气候模式的模拟性能和精度也在不断提高,人们对气候变化的水文水资源效应的认识也在逐渐深入,开展辨识气候变化和人类活动等因素在水资源演变过程中贡献研究的时机已经成熟。

作为中国的政治、文化中心,近几十年来,海河流域的气候和环境条件发生了巨大变化,气候变暖、下垫面变化、人工取用耗排水等区域高强度人类活动对水循环造成了强烈影响。1980年以来,海河流域地表来水减少了41%,水资源总量减少了25%;和20世纪50年代相比,湿地萎缩了80%,年深层地下水开采量超过了60亿 m^3 ;而流域内水资源开发利用率已经达到了123%。水资源短缺不仅影响了海河流域的经济社会发展,还导致了严重的生态环境问题,给流域可持续发展带来了巨大挑战。那么,造成海河流域水资源量衰减的原因是什么?是气候系统的自然变异,还是以全球变暖为特征的气候变化?或者是包括下垫面变化、人工取用水在内的区域高强度人类活动?如何定量区分不同因素在海河流域水资源演变中的贡献?同时,海河流域对环境变化非常敏感,在未来气候以及区域人类活动等环境变化条件下,流域水资源将如何演变也是一个迫切需要回答的问题。

1.1.2 研究意义

基于上述背景,在国家重点基础研究发展计划(973)项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”中设立了第四课题“海河流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测”(2006CB403404)。本书基于课题四的部分研究成果,从理论方法和实例应用两个方面对变化环境下流域水资源演变及其归因研究的相关内容进行了总结和提炼。

在理论方法方面,针对如何定量评估气候系统的自然变异、温室气体排放导致的气候变暖、人类活动及其他一些未知和不确定性因素对流域水资源演变的影响以及变化环境下流域水资源演变规律识别两大国际难点问题,在国内外相关研究工作的基础上,将目前广泛应用于气象和气候学中变量归因分析的“基于指纹的归因方法”应用到流域尺度水资源演变研究中,系统总结提出变化环境下流域水资源演变的归因方法,为定量区分气候系统的自然变异、温室气体排放导致的气候变暖以及包括下垫面变化和人工取用水在内的人类活动等因素对流域水资源演变的贡献提供一种新的思路;综合考虑未来气候、区域高强度人类活动以及相关调控措施等环境条件的变化,通过设定不同的情景,对流域未来水资源演变趋势进行预估。

在实例应用方面,选取对气候变化非常敏感、人类活动强烈、水问题突出、具有重要战略地位的海河流域为典型流域,在明确海河流域水文气象要素时空演变特征的基础上,应用变化环境下流域水资源演变的归因方法对海河流域近40年(1961—2000年)的水资源变化进行归因分析,定量区分气候系统的自然变异、温室气体排放导致的气候变暖以及包括人工取用水和下垫面变化在内的区域高强度人类活动等因素对流域水资源演变的贡献。考虑到未来气候、人工取用水和下垫面等环境条件的变化,以及经济结构调整、跨流域调水、地下水开采回补控制等水资源调控措施,对海河流域不同情景下未来30年(2021—2050年)水资源的演变趋势进行预估和分析,以期为流域水资源综合管理和经济社会可持续发展提供决策参考。

本研究提出的变化环境下流域水资源演变的归因方法,不仅可以拓展变化环境下流域水循环演变驱动因素识别的理论和研究方法,丰富“自然-人工”二元水循环的理论体系,为科学识别流域水循环演变的驱动因素和定量区分不同影响因素在流域水循环演变过程中的贡献提供一种新的思路,具有重要的学术意义,而且还可以通过该方法在研究区域的应用,结合相关研究成果,为未来气候变化条