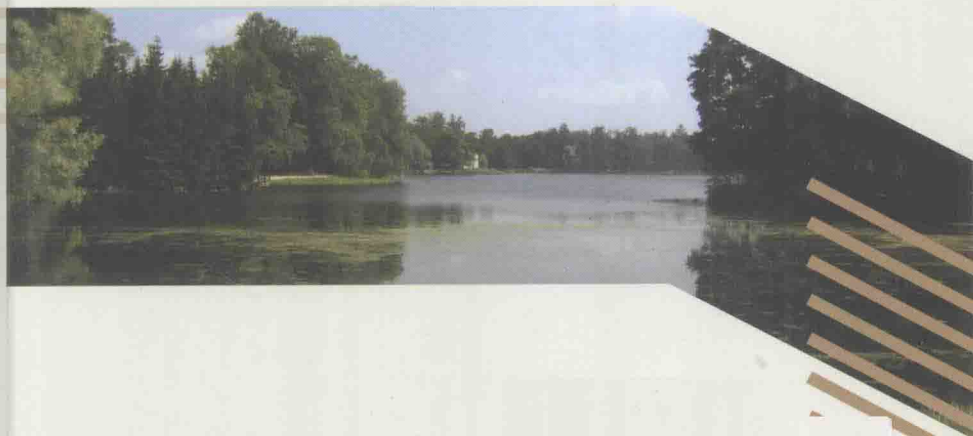



生态水文学研究系列专著

生态水文学前沿

余新晓 等/编著



 科学出版社

生态水文学研究系列专著

生态水文学前沿

余新晓等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书立足于生态水文学最新理论研究和学科前沿,分别介绍了区域环境变化的水文生态响应、湿地生态系统水文生态过程、河流生态系统水文生态过程、森林植被对流域径流的影响等 10 个方面的内容,系统地阐述了当今生态水文学的新方法、新技术,为今后生态水文学的学科发展起到推动作用。

本书可供生态水文学、林学、环境科学、地理科学等专业的研究、管理人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

生态水文学前沿/余新晓等编著. —北京:科学出版社,2015.3
(生态水文学研究系列专著)
ISBN 978-7-03-043548-4

I. ①生… II. ①余… III. ①生态学-水文学-研究 IV. ①P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 041495 号

责任编辑:朱 丽 杨新政 / 责任校对:张小霞
责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:18

字数:400 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《生态水文学前沿》编委会

主要执笔人（按姓氏汉语拼音排序）：

- 崔丽娟 研究员(中国林业科学研究院湿地研究所)
贾国栋 讲师(北京林业大学)
李巧玲 讲师(河海大学)
李致家 教授(河海大学)
宋献方 研究员(中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室)
徐宗学 教授(北京师范大学)
杨传国 副教授(河海大学)
杨胜天 教授(北京师范大学)
余新晓 教授(北京林业大学)
余钟波 教授(河海大学)
张珂 研究员(美国俄克拉何马大学)
左德鹏 讲师(北京师范大学)

参与编写人（按姓氏汉语拼音排序）：

- 邓文平 (北京林业大学)
贾剑波 (北京林业大学)
李瀚之 (北京林业大学)
孙佳美 (北京林业大学)
涂志华 (北京林业大学)

王 鹏 (中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室)

王贺年 (北京林业大学)

赵 捷 (北京师范大学)

赵 阳 (中国水利水电科学研究院)

赵芳芳 (北京师范大学)

丛 书 序

水是生命之源、生产之要、生态之基。随着人口增长和社会经济的迅速发展,人类对水资源的需求越来越大,水资源危机成为困扰世界的三大危机之一,水资源短缺以及由此引发的水生态安全问题严重威胁着社会经济的可持续发展,成为任何一个国家在政策、经济和技术上所面临的复杂问题和社会经济发展的主要制约因素。随着水资源问题的日益严重,研究者们越来越意识到水文过程对生态系统功能的重要影响,因此在 20 世纪 80 年代,国外学者提出了生态水文学的概念。生态水文学是一门逐步发展起来的新兴学科,是现代水文科学与生态科学交叉发展中的一个亮点,它研究的目的是解释生态过程与水文循环之间的联系,明确水文交互作用如何影响物质的循环和能量交换,其观点对于理解生态系统的水文过程具有十分重要的意义,已经成为当代生态学、地理科学、环境科学和资源科学等相关研究的主题内容。

《生态水文学研究系列专著》是余新晓教授及其科研团队多年研究成果的总结,是在国家林业局林业公益性行业科研专项项目、“十二五”国家科技支撑计划项目和国家自然科学基金项目等支撑下完成的。该系列著作研究成果依托国家林业局首都圈森林生态系统定位观测研究站(CFERN)这一主要研究平台,编写内容充实、观点新颖鲜明,解决了当前生态水文学研究中的一些重要科学问题,填补了目前该领域研究中的一些空白。余新晓教授始终坚持生态水文领域的研究,以一丝不苟的工作态度和坚持不懈的科研精神,在这一领域不断前进,取得了显著成果,此系列著作可略见一斑。

该系列专著基于我国水资源短缺的背景,从不同的尺度深入探讨了森林生态系统的水文过程与功能、结构与水文生态功能及土壤-森林植被-大气连续体水分传输与循环等问题,以华北土石山区典型流域为研究对象,对人类活动与气候变化的流域生态水文响应进行分析和模拟,并对水源涵养林体系构建技术进行了研究与示范。该系列著作的内容均为生态水文领域的热点问题,引领了该学科的发展方向,其不仅在理论框架、知识集成方面做了很多开创性的工作,而且吸收了国内外先进的研究方法,在推动生态水文学的关键技术研究方面进行了有益的探索,为我国的生态环境建设提供了重要的理论指导和技术支持。

书是我们的良师益友。该系列著作的出版不仅为生态学、环境学、地理学、资源科学等学科的科研和教学工作者提供有益的参考,而且是我国水土保持、林业等生态环境建设工作者可参考的系列好书。望此系列著作可以为相关科研人员提供帮助,通过大家的工作实践,令祖国的青山绿水重现。是以为序。

中国工程院院士 王浩

2013 年 6 月

前 言

20 世纪 90 年代以后,生态环境与水关系的研究更加强调水文过程与生态学过程的耦合机制及其尺度效应,更加关注水分循环质量及水循环的生态学机制研究。因此,生态水文学作为一门边缘学科逐渐兴起,它的发展推动了传统水文学从水文机制和水文特征研究向生态水文学的新兴交叉学科发展。应该说,研究生态系统水分过程是实现流域或区域水文过程研究的基础和关键,有着重要的研究价值。

本书立足于国际生态水文学科前沿,组织国内外长期从事生态水文学科研、教学和生产管理的第一线科技工作者对最新研究成果整理总结,系统地阐述了当今生态水文学最新的理论、方法和技术。全书共有 10 个前沿专题,包括:区域环境变化的水文生态响应;湿地生态系统水文生态过程;河流生态系统水文生态过程;森林植被对流域径流的影响;生态水文模型参数敏感性和不确定性分析;降雨径流水文模型;流域生态水文过程模拟原理与方法;生态水文学稳定同位素技术应用原理与方法;森林生态系统土壤碳-氮-水耦合循环过程;森林生态系统水-碳耦合过程与机制等热点话题。

生态水文学有许多重要理论和实践问题的研究尚在探索之中,随着研究的不断深入,必将对生态水文学学科理论体系的发展和应用起到积极推动作用。作者殷切期望本书的出版能引起有关人士对该研究领域的更大关注和支持,并希望能对从事生态水文及相关学科的专家学者有所裨益,共同将本学科内重要的科学领域推向新的发展阶段。

本书的研究资料的积累过程实际上就是作者从事生态水文科研和研究教学的过程,在此期间,先后得到王浩院士、李文华院士、蒋有绪院士、尹伟伦院士和崔鹏院士等诸位先生的指导,在此一并表示衷心的感谢!

鉴于生态水文学研究的复杂性及作者的知识 and 能力有限,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝赐教。

余新晓

2014 年 12 月于北京

目 录

丛书序

前言

第 1 章 区域环境变化的水文生态响应	1
1.1 引言	1
1.2 环境变化的水文生态响应	2
1.2.1 气候变化与植被变化的生态水文响应	2
1.2.2 气候变化与人类活动的生态水文响应	32
1.2.3 结语与讨论	51
参考文献	52
第 2 章 湿地生态系统水文生态过程	53
2.1 引言.....	53
2.2 湿地水文生态过程的关键科学问题.....	54
2.2.1 湿地生态系统水文特征	55
2.2.2 湿地水文生态作用及反馈机制	59
2.2.3 环境变化对湿地水文的影响	64
2.3 结语与展望.....	66
参考文献	67
第 3 章 河流生态系统水文生态过程	71
3.1 引言.....	71
3.2 河流物理、化学、水文过程.....	73
3.2.1 水流的侵蚀、运输和再分配过程	73
3.2.2 陆地水的化学特征及溶液运输	74
3.2.3 河流基质对水生生物的影响	75
3.2.4 物理环境对水生生物的影响	77
3.3 河流生态过程.....	78
3.3.1 河流有机体及生态系统	78
3.3.2 河流的生产量	79
3.3.3 河流能量传输	80
3.3.4 养分动态及循环	81
3.4 重要河流生态学理论及研究前沿.....	84
3.4.1 养分螺旋.....	84
3.4.2 河流连续统概念	85
3.4.3 河流廊道.....	86

3.4.4 生态水力学	87
参考文献	88
第4章 森林植被对流域径流的影响	90
4.1 引言	90
4.2 相关研究的争议性结果	91
4.2.1 国内外研究进展	91
4.2.2 争议性结果	92
4.3 流域植被对流域径流的影响	95
4.3.1 相关理论原理	95
4.3.2 森林植被对流域蒸散发的影响	96
4.3.3 森林植被对流域径流的影响	98
4.4 模型讨论	99
4.4.1 相关模型	99
4.4.2 Zhang 模型简介	101
4.5 讨论	102
参考文献	103
第5章 生态水文模型参数敏感性和不确定性分析	106
5.1 引言	106
5.1.1 研究背景与意义	106
5.1.2 生态水文模型发展与应用前景	106
5.1.3 生态水文模型不确定性来源	107
5.1.4 生态水文模型不确定性分析的必要性	108
5.2 参数敏感性分析方法	109
5.2.1 敏感性分析方法分类	109
5.2.2 常用的敏感性分析方法	110
5.3 参数不确定性分析方法	112
5.4 参数优化分析方法	113
5.4.1 水文模型参数优化的主要特点	113
5.4.2 水文模型常用的优化方法	114
5.5 潮白河流域生态水文过程模拟	115
5.5.1 SWAT 数据库的建立	115
5.5.2 基于 DEM 的水文参数的提取	119
5.5.3 参数灵敏度分析	120
5.5.4 参数率定及校核验证	124
5.6 结论与展望	128
5.6.1 主要结论	128
5.6.2 研究展望	129
参考文献	130

第 6 章 降雨径流水文模型	132
6.1 引言	132
6.2 降雨径流模型构建	133
6.2.1 流域蒸散发计算	133
6.2.2 流域产流模型	134
6.2.3 流域汇流模型	135
6.3 新安江模型及其进展	137
6.3.1 引言	137
6.3.2 模型的结构、原理及模型中的差分误差处理	137
6.3.3 模型的参数和率定	141
6.3.4 模型应用实例	143
6.3.5 应用经验	147
6.3.6 新安江模型的其他形式	150
6.4 分布式水文模型及其进展	151
6.4.1 HMS 模型的发展	151
6.4.2 地表水模块	152
6.4.3 土壤水模块	154
6.4.4 地下水模块	154
6.4.5 河流-地下水相互作用模块	155
6.4.6 次洪模拟实例	155
6.5 新安江模型与 HMS 模型的应用	156
6.5.1 新安江模型在淮河流域洪水预报中的应用	156
6.5.2 HMS 模型在淮河流域水循环模拟中的应用	159
参考文献	161
第 7 章 流域生态水文过程模拟原理与方法	163
7.1 引言	163
7.2 遥感-三水源新安江产汇流模型	163
7.2.1 模型原理	163
7.2.2 产流计算	165
7.2.3 汇流计算	168
7.3 RS-DTVGM 产汇流模型	170
7.3.1 DTVGM 原理	170
7.3.2 DTVGM 模型遥感驱动	172
7.3.3 RS-DTVGM 模型结构	173
7.3.4 蒸散发计算	174
7.3.5 产流计算	176
7.3.6 汇流计算	178
7.3.7 模型参数获取	180

7.4	大尺度非点源污染模型	181
7.4.1	模型原理	181
7.4.2	模型优点及局限性分析	184
7.4.3	大尺度非点源污染模型修正	185
7.4.4	溶解态农村居民点、畜禽养殖计算	187
7.4.5	植被生长养分吸收计算	187
7.4.6	氮迁移计算	188
7.4.7	磷迁移计算	190
7.5	岸边带非点源污染控制模型	192
7.5.1	模型原理	193
7.5.2	岸边带对氮的控制效应	194
7.5.3	岸边带对磷的控制效应	195
7.6	土壤酸化空间信息模型	195
7.6.1	模型原理	196
7.6.2	模型实施	197
7.7	林植被营养元素循环空间信息模型	198
7.7.1	模型原理	200
7.7.2	模型实施	202
7.8	植被生态需水与农田耗水模型	203
7.8.1	植被生态需水与农田耗水计算原理	203
7.8.2	植被生态需水与农田耗水模型结构	205
7.9	森林生态效应评价模型	205
7.9.1	水土保持效益	206
7.9.2	森林保肥效益	207
7.9.3	森林固碳效益	207
7.9.4	森林涵养水源效益	208
第8章	生态水文学稳定同位素技术应用原理与方法	210
8.1	引言	210
8.1.1	同位素含义	210
8.1.2	同位素组成的表示方法	212
8.1.3	同位素分馏	213
8.1.4	同位素测量	213
8.2	^2H 和 ^{18}O 同位素在水循环过程中的应用	214
8.2.1	大气降水中的 ^2H 和 ^{18}O	214
8.2.2	^2H 和 ^{18}O 在流域水循环中的应用	217
8.2.3	^2H 和 ^{18}O 在土壤-植物-大气系统水循环过程中的应用	220
8.3	^{13}C 和 ^{15}N 同位素在淡水生态系统有机物质示踪中的应用	223
8.3.1	淡水生态系统有机质 ^{13}C 和 ^{15}N 同位素的来源	224

8.3.2	^{13}C 和 ^{15}N 同位素在水生生物食物链和营养结构中的应用	226
8.4	^{15}N 和 ^{18}O 在淡水生态系统氮循环示踪的应用	228
8.4.1	淡水生态系统中氮素潜在来源的同位素特征	229
8.4.2	氮循环转化中的同位素分馏	229
8.4.3	^{15}N 和 ^{18}O 在水体硝态氮污染源示踪中的应用	231
8.5	总结与展望	232
	参考文献	234
第9章	森林生态系统土壤碳-氮-水耦合循环过程	236
9.1	引言	236
9.1.1	森林生态系统土壤碳-氮-水耦合循环理论基础	237
9.2	森林生态系统土壤碳-氮-水耦合循环生物机制及其关键过程	241
9.2.1	森林生态系统碳-氮-水耦合循环的关键生物物理和生物化学过程	241
9.2.2	森林生态系统碳-氮-水耦合循环生物控制机制研究进展	243
9.3	森林生态系统土壤碳氮水循环耦合模型研究	247
9.3.1	模型介绍	247
9.3.2	模型构建与评价	249
9.4	结论与展望	249
	参考文献	250
第10章	森林生态系统水-碳耦合过程与机制	252
10.1	引言	252
10.2	森林生态系统水-碳耦合循环研究的理论和实践意义	254
10.2.1	土壤-植物-大气连续体水-碳耦合循环机制	254
10.2.2	典型森林生态系统水-碳耦合循环	254
10.2.3	研究区域尺度生态系统的碳-水循环耦合关系	255
10.2.4	全球尺度生态系统的碳-水耦合循环研究	255
10.3	森林生态系统水-碳耦合循环过程与模拟	256
10.3.1	森林生态系统水-碳耦合循环的基本过程	256
10.3.2	陆地生态系统碳-水耦合基本机制	257
10.3.3	森林生态系统水-碳耦合的模拟研究	259
10.4	森林生态系统水-碳耦合循环研究的技术途径和方法	269
	参考文献	269

第 1 章 区域环境变化的水文生态响应

1.1 引言

生态水文学(Ecohydrology)为水文学科的一个分支,属于地理科学范畴。它是集地表水文学、土壤水文学、水文地质学、植物生理学、生态学等诸多学科于一体的交叉学科。Ingram 在 1987 年提出“生态水文学”这一概念。由于各国学者研究领域和关注焦点的不同,“生态水文学”自诞生以来一直未被赋予统一、公认的定义。以下按时间顺序,给出部分学者对生态水文学的定义。

(1) 生态水文学是研究所有生命及无生命组成的交互关系中的水文过程、现象及特性的科学。

(2) Hatton 认为生态水文学是指在一系列环境条件下来探讨生态水文过程,它考虑了干旱地区、湿地、森林、河流和湖泊的生态水文过程。

(3) Post 等则认为它是研究水文、气象及生态过程之间的关系,包括不同时间下水文过程如何影响到生态过程及生态系统以及地貌又如何回馈或影响到水文过程两个核心问题。

(4) Baird 等则认为它是研究植物与水的相互作用以及与植物生长相关的水文过程。

(5) Rodriguez-Iturbe[Water Resources, 2000, 36(1)]则定义生态水文学为研究不同生态形式及过程中的水文机制的科学。Rodriguez-Iturbe 认为它是在气候-土壤-植被动态过程中研究水文机制,以便预测生物对全球变化的响应。

(6) 1997 年俄罗斯彼德堡国立水文气象学院出版教材《水资源(陆地水)利用和保护的生态观》中提出“生态水文学(水利生态学)”、“水利生态系统”等概念,提出新的学科方向要研究具体“水对象”(河、湖、水库等)群体态势的定性定量的评价,研究不同层次和尺度的水体生态系统。

(7) Nuttle 认为它是关于水文过程对生态系统分布结构功能影响以及生物过程对水循环要素影响的交叉学科。

20 世纪 90 年代中期的生态水文学研究主要以湿地为研究对象,20 世纪 90 年代中期以后开展的生态水文研究主要分为以下几个方面:①对生态水文尺度效应的进一步探索;②水文过程的生态环境效应;③生态格局的水文效应;④生态水文过程模拟等。

“变化环境下的水循环研究”是全球水系统计划(GWSP)的核心科学问题。在国际水文学研究领域中,前沿科学问题突出表现在重视变化环境下的水循环规律研究。水文循环是使地球各圈层之间的相互关系变得十分密切的标志之一,它既受气候系统的制约,又对气候系统进行反馈。同时,水文循环也受人类活动的干预和直接影响。传统的水文学研究往往只考虑水量的自然变化,现代水文循环研究需要综合考虑全球变化以及人类活动等方面的影响。

气候条件深刻影响着水文循环的各个过程,自然强迫下的气候变化引起降水的时空分布变化;太阳辐射以及气温、湿度、风速的变化,直接影响蒸散发、径流和土壤水的变化。气候变化导致水文循环发生变化,水文循环的变化又进一步影响水资源管理等诸多方面。因此,近年来国际社会对未来可能发生的气候变化及其对水文循环的影响给予了高度关注,也使气候变化对水文循环和水资源的影响成为水科学研究的热点前沿问题。水循环的各个要素、环节及过程均不同程度地受到人类活动的影响。河川径流是气温、降水、蒸发等气候因素与人类活动影响综合作用的结果。人类活动一方面使全球气候发生变化从而导致水文循环过程的变化;另一方面,各种人类活动或改变流域的下垫面条件,使产汇流机制发生了变化,或改变天然径流和蒸发的时空分配,影响了地下水补给,从而改变了流域天然水循环过程。虽然人类活动往往是局部性的,但是其影响强度很大,经常会导致区域的水资源发生重大的变化。如何定量分析和评价人类活动对水文循环的影响范围和程度已成为水文学研究的热点问题之一。

本章将从植被变化、气候变化、人类活动等几个典型角度,分析和总结变化环境下的生态水文响应问题。

1.2 环境变化的水文生态响应

1.2.1 气候变化与植被变化的生态水文响应

研究植被变化的生态水文响应,一般以试验流域研究为基础,通过研究试验流域植被变化与径流量变化的关系得到客观影响因素较少、流域环境接近理想状态下径流对植被变化的响应,由此探讨一般流域植被变化或各种人类活动对径流的影响。试验流域研究中,一般选择一个或多个代表性较好的流域应用站点观测流量和其他水文气象要素研究流域的水文过程。试验流域研究已经成为监测长期水文气象的基线数据、评价不同土地利用和管理措施水文响应、提供水文或生态模型率定验证所需数据的主要方法。主要包括四类试验:对比流域试验、单一流域试验、平行流域试验和多数并列流域试验。考虑植被变化的径流响应时,气候变异对径流的影响也是不可忽视的一个方面,气候变异在水文响应因素中起了很重要的作用^[1]。近年来,许多研究提出了不同方法区分植被变化和气候变异对径流的影响。一般方法是首先估算一种响应,如植被变化的水文响应,剩余的即为另一种响应,如气候变异的水文响应。但是这样能否使估算的植被变化和气候变异的水文响应相吻合尚待验证。

(1) 对比流域植被变化对流量变异的影响。首先对流域年径流序列的趋势性、突变特性及流量频率过程进行分析,应用非参数 Mann-Kendall 检验方法和 Pettitt 方法,确定植被变化后流量的响应时间,提供一种具有参考价值标准期划定方法,同时借助流量历时曲线(FDC)分析植被变化前后的流量频率变化,为研究植被变化的径流响应提供了一种新思路。

(2) 对比流域植被变化与气候变化的生态水文响应及定量划分。基于对比流域方法针对小尺度对比试验流域进行植被变化对水文响应的估算,同时选用单流域方法估算植被变化对水文过程的影响,比较分析各种方法的估算结果,以寻求对比流域方法不可用时的替代方法或旁证方法。对比流域方法的成功应用取决于植被变化前期(即标准期)准确而长期的流量数据。借助植被变化前期作为标准期的水文响应估算,探讨径流量变化前期(即年径流

序列的变点出现时间之前的时期)作为标准期的适用性,以寻找灵活适用的标准期划定方式,拓宽对比流域方法的适用性。试图单独量化植被变化的水文响应与气候变异的水文响应,以验证试验流域植被变化和气候变异是影响流域径流变化主要影响因素的假定,进一步寻求更合理的方法以区分不同因素(人类活动如植被变化、气候变异等)的水文响应。

(3) 不同空间尺度流域植被变化和气候变异的生态水文响应。分析一系列不同面积的流域($1\sim 10\,000\text{ km}^2$)在不同比例植被变化($11\%\sim 100\%$)下的水文响应,从流域空间尺度上解释植被变化的水文响应及其机理。借助对比试验流域研究的结论,选取合适的方法估算不同面积流域植被变化的水文响应。鉴于不同空间尺度尤其是大尺度流域的复杂性,采用模型模拟的方式进行研究,以更准确地模拟标准期的径流量,提高处理期水文响应估算的可信度。

1.2.1.1 对比试验流域概况

本小节选择了澳大利亚、新西兰和南非的7个对比试验流域,分别是澳大利亚的Wights/Salmon、Lemon/Ernies、Dons/Ernies、Red Hill/Kileys Run、Stewarts Creek 5/4(即Stewarts Ck5/Ck4),新西兰的Glendhu 2/1(即GH2/GH1),南非的Cathedral Peak III/IV(即CP III/CP IV)。这些流域具有明确的植被变化历史,并具有较长的流量和降雨量数据,具体位置如图1-1所示,表1-1给出了对这些流域的简单描述。

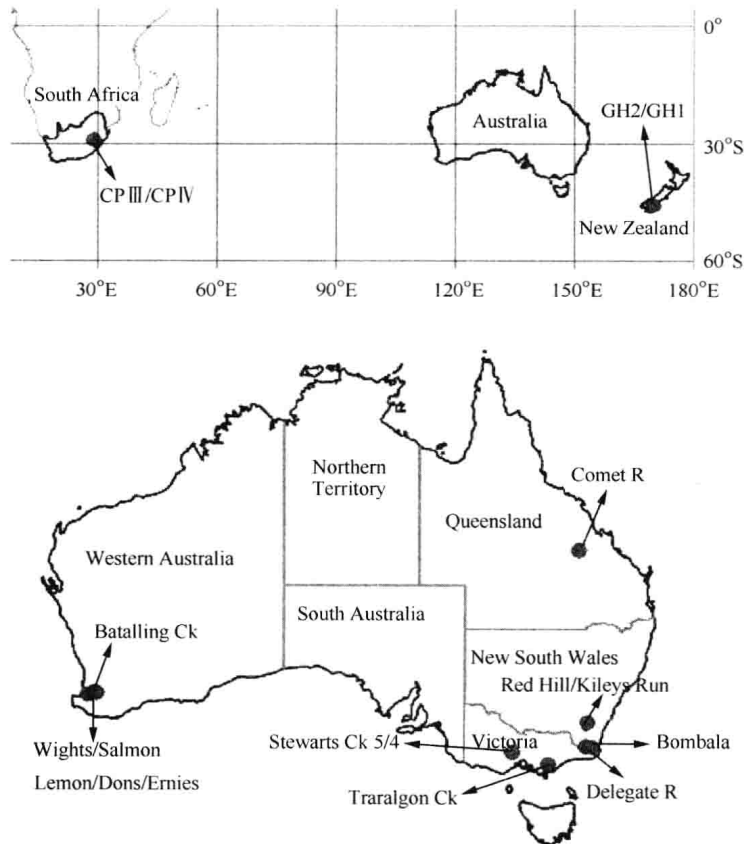


图 1-1 所用试验流域位置示意图

Wights/Salmon 表示一对对比流域,斜线前为处理流域、斜线后为控制流域,其他类似,没有斜线的表示单一试验流域

表 1-1 所用对比试验流域概况

流域	纬度/(°)	经度/(°)	面积/km ²	降雨量/mm	径流深/mm	PET ^d /mm	处理措施	数据序列
Lemon	33. 296S	116. 410E	3. 44	702. 6	55. 5	1436. 4	1976年/1977年, 53%伐林	1974~1997
Dons	34. 291S	115. 248E	3. 5	678. 5	19. 6	1299. 6	1977年, 38%伐林	1974~1997
Ernies	33. 296S	116. 410E	2. 7	707. 4	8. 6		Lemon 和 Dons 的控制流域	1974~1997
Wights	33. 421S	115. 989E	0. 94	961. 1	406. 4	1470. 8	1976年/1977年, 100%伐林	1974~1997
Salmon	33. 421S	115. 989E	0. 82	1112. 1	133. 0		Wights 的控制流域	1974~1997
CPⅢ	29. 000S	29. 250E	1. 42	1519. 2 ^a	610. 6	1298. 4	1958年, 83%造林	1952~1980 ^b
CPⅣ	29. 000S	29. 250E	0. 99	1519. 2 ^a	744. 0		CPⅢ的控制流域	1952~1980 ^b
GH2	45. 713S	169. 75E	3. 1	1282. 4	697. 3	615. 5	1982年, 67%造林	1980~2000
GH1	45. 713S	169. 75E	2. 18	1279. 4	832. 3		GH2 的控制流域	1980~2000
Red Hill	35. 322S	149. 137E	1. 95	836. 7 ^c	108. 6	1340. 0	1988年/1989年, 78%造林	1990~2005
Kileys Run	35. 322S	149. 137E	1. 35	836. 7 ^c	166. 5		Red Hill 的控制流域	1990~2005
Stewarts Ck5	37. 367S	144. 200E	0. 18	1156	311. 2	1052. 3	1969年/1970年, 100% 植被类型转换	1960~1995
Stewarts Ck4	37. 367S	144. 200E	0. 25	1156	224. 0		Stewarts Ck 5 的控制流域	1960~1995

注: 表中经纬度信息为所在流域气象或水文站的信息。

a. Cathedral Peak Ⅲ&Ⅳ流域的降雨量数据来自 Cathedral Peak Ⅱ流域;

b. Cathedral Peak 流域的数据序列采用水文年序列;

c. Red Hill/Kileys Run 流域 2000~2005 年的数据为 Silo 数据;

d. PET 数据由 Priestly-Taylor 公式计算得到, 表中仅列出了处理流域的 PET 数据

1.2.1.2 对比试验流域径流量变化特征分析

植被变化水文响应的研究热点之一是植被变化后流域径流量达到新平衡所需的时间。这反映了流域植被变化和水文地质条件的自然特性。理解水文响应时间有助于估算植被变化对径流量的影响。因此,客观地估算植被变化的径流响应时间非常重要。

在实际植被变化数据不足时,径流序列的统计变点可以帮助确定径流响应时间。变点定义为特定置信区间内序列均值的不连续点。径流响应时间可以看作植被变化时间和径流序列变点发生时间的间隔时间。变点可以看作不同种类趋势的集合。为更好地理解径流量变化特性,有必要联合分析径流序列的趋势性和变点特性。趋势检验是假设检验问题的一种特例。趋势可以是平滑式或跳跃式、单调变化或阶段式变化等。过去几十年,世界范围内发展了大量参数和非参数的趋势及变点检验方法。非参数 Mann-Kendall 统计检验作为一种检验水文变量或其他相关变量序列的趋势的有效方法,得到了广泛应用。非参数 Pettitt 检验已被广泛用于径流序列的变点检验中,它被认为是检测变点的有效方法。

流量历时曲线(FDC)是描述流域径流量变化的有效工具,表示给定流域某一时段(日、月或年)流量发生频次与流量之间的关系。Vogel 和 Fennessey, Smakhtin 研究证实了 FDC 在表征、比较并预测不同时间尺度流量机制中的优势和特点^[1]。评价植被变化对流量历时曲线的影响非常重要,已经引起了研究者的广泛关注^[2]。

清楚掌握流域的径流变化特征是研究植被变化生态水文响应的基础。本节针对选定对比流域,研究植被变化前后的径流变化特征,为估算植被变化和气候变异的生态水文响应提供依据。具体目标如下:① 确定对比流域年径流深序列是否存在统计意义上的单调趋势和变点;② 如果存在变点,研究分析流量历时曲线的变化并评价植被变化对径流量变化的影响。

1) 研究方法

(1) 非参数趋势检验方法

本研究借助 Salmi 等介绍的 MAKESENS 工具检测水文序列的趋势性。MAKESENS 既提供了检测单调上升或下降趋势的非参数 Mann-Kendall 统计检验,又提供了估算线性趋势倾斜度的非参数 Sen's 方法。Mann-Kendall 统计检验适用于检测序列是否存在单调趋势。Sen's 方法应用线性模型估算残差不随时间变化时趋势的倾斜度。

A. 非参数 Mann-Kendall 统计检验方法。

传统参数检验是标准趋势检验简单的样本与时间回归相关。基于秩的非参数 Mann-Kendall 统计检验方法其变量可以不具有正态分布特征,因此常用来检测如水质、径流、气温、降水等水文气象序列资料的明显趋势变化。Mann-Kendall 检验适用于数据序列服从以下模型时:

$$x_i = f(t_i) + \epsilon_i \quad (1-1)$$

式中, $f(t)$ 为连续单调上升或下降函数,残差 ϵ_i 假定源于均值为零的同一分布。因此,假