

\* 专题评述 \*

# 基于生态响应的水文生态学模型研究进展 与趋势评价<sup>\*</sup>

官辉力<sup>1</sup> 周德民<sup>1,2,\*</sup> 张明祥<sup>3</sup>

1. 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048;

2. 吉林大学水资源与环境研究所, 长春 130026; 3. 国家林业局湿地资源监测中心, 北京 100714

**摘要** 人类活动与全球变暖引发了众多全球与区域性多元复杂生态环境问题, 局限于单纯的水文学或者生态学都难以有效解决这些问题, 水文生态学理论方法正是应对这些复杂挑战的背景下提出并发展起来的. 文中对水文生态学理论发展主要过程, 基本概念和理论内涵进行了简要评述, 同时, 简要评价了该理论支持下的基于生态响应的水文生态学模型国内外主要研究进展, 以及该领域理论方法综合性, 技术集成性和趋近现实性等主要趋势特征. 作者认为基于区域水文和生态两种过程、格局与机制的完整统一, 具有时空四维特征的水文生态模型将是未来该领域的研究发展方向.

**关键词** 水文生态学 模型 生态响应 信息技术

随着全球范围内淡水资源的日益紧缺以及对淡水生态系统的不断破坏, 传统的基于单一学科研究目标和方法的科学范式, 已经难以面对新的复杂全球环境变化挑战; 另一方面, 意识到学科高度专业化所产生的学科间壁垒, 以及广泛、长期存在于各学科间的“黑箱”, 传统的水文科学和生态科学在保留各自学科特色的同时, 正在出现彼此交叉的趋势. 水文生态学的出现反映了这种学科发展的趋势, Rodriguez-Iturbe<sup>[1]</sup>指出水文动态与生态演变的时空连接将会是未来最激动人心的前沿领域之一. Phillips<sup>[2]</sup>认为未来20—50年的水文地质学应拓展地下水文与生态系统的交互性研究, 指出水文生态学是一种有效的方法来连接水循环与生态系统响应. 水文学同生态学及其他相关科学的交叉研究, 把“水循环的生物学方面(BAHC)”作为应对未来

地球生态环境变化的核心研究方向之一, 是当前各国学者的基本共识. 目前水文生态学的学科框架和理论方法体系正处于形成发展阶段, 亟待开展水文生态学模型研究以完善这一新的学科理论方法.

水是区域生态环境中最敏感的因子, 区域生态环境的变化往往首先是从水系统的变化开始的. 在全球变暖大背景下, 区域的水文过程和生态效应受到的人类扰动尤为强烈, 引发的众多生态环境问题具有多元复杂性, 局限于单纯的水文学或者生态学都难以有效解决这些问题. 水文生态学强调水文过程与生态系统、社会系统的交互作用, 主张以生态系统属性的方法来管理水资源, 是社会与自然双重压力下水资源可持续发展的重要理论依据. 最新的联合国教科文组织第7水文计划(2008—2013)以“水的依赖性: 人类扰动与压力下的水系统”(water

2009-03-30 收稿, 2009-06-21 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: D011004)和国家“八六三”计划(批准号: 2006AA12Z111; 2007AA12Z176)资助项目

\*\* 通信作者, E-mail: deminzhou@yahoo.com

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

dependencies; systems under stress and societal responses)作为全球水文研究的未来行动指南<sup>[3]</sup>。模拟水文过程和自然生态系统在高度变化环境下的区域响应特征,包括预测一些物种和生态系统的退化途径,这种基于机制认识的定量研究不但具有重要科学理论方法意义,而且对于保护区域自然生态系统健康,兼顾自然与社会和谐发展,制定科学管理对策皆具有重大现实应用价值。

以模型为标志的定量分析方法得到强化是当前地学理论方法发展的一个明显特征,总的来说,国内外区域水文过程与生态响应科学研究领域发展主要具有三个方面明显特征:一是学科理论研究的综合性得到强化,跨学科的特征不仅包含了水文学与生态学交叉,而且同社会科学,环境科学等更多学科不断交叉,二是学科理论方法的技术集成特征日益明显,遥感和GIS技术等新的技术不断融入学科发展中,雷达测雨、示踪技术、原型观测、数据同化和多种模型构建技术日益发展,三是学科研究对象更加趋近现实世界与实际问题,研究目标更多地同现实客观世界和重大现实问题连接起来,学科理论的综合性,学科方法的技术集成特征为之提供了保证。

## 1 支持生态响应模型的水文生态学概念发展与理论基础

水文生态学的概念在1992年Dublin国际水与环境大会上被正式提出后,多位国内外学者对此概念提出了自己的定义<sup>[1,4-13]</sup>。尽管目前生态水文学(Eco-hydrology)或水文生态学(Hydro-ecology)已经大量出现在相关研究领域的文章里,但无论是生态水文学,还是水文生态学都还没有形成各自公认统一的概念定义,两个概念经常混用,目前多数定义都将生态模式和水文机制的关联作为该学科概念的内核。

首先提出生态水文学(Eco-hydrology)概念的Zalewski<sup>[6]</sup>,他认为生态水文学主要是对地表环境中水文学和生态学相互关系的研究,在他后来的文章中认为水文生态学是在流域的尺度上,研究水文和生物相互功能关系的科学,是实现水资源可持续管理的一种新方法,最有代表性的是Rodriguez<sup>[1]</sup>的定义,他认为水文生态学作为一门学科,是指在

生态模式和生态过程的基础上,寻求水文机制的一门科学。在这些过程中,土壤水是时空尺度内连接气候变化和植被动态的关键因子,植物是水文生态学的核心内容。Nuttle<sup>[7]</sup>认为水文生态学是生态学和水利学的亚学科,它所关心的是水文过程对生态系统配置、结构和动态的影响,以及生物过程对水循环要素的影响。这一定义聚焦于水文过程在生态系统中所起的作用上,这与Rodriguez所提到的在生态模式和生态过程上研究水文机制的概念相一致。

在国内,武强等<sup>[10]</sup>认为生态水文学作为一门新型边缘交叉学科,其主要研究对象就是由水圈、生物圈、岩石圈和大气圈共同组成的复合系统,其研究的主要问题就是因人类社会经济活动引起水圈条件改变而导致生物圈、岩石圈和大气圈所出现的所有异常现象,它并不简单地指因水圈条件改变而导致生物圈的环境所出现的问题,因此,武强的定义无论是从学科角度,还是研究范围都比较宽泛,是一个比较宽泛的生态水文学定义,王根绪等<sup>[9]</sup>认为生态水文学是研究水文学和生态学二方面都涉及的科学,“有关生态圈与水文学圈之间的相互关系以及由此产生的相关问题,就是生态水文学的内涵”,他的观点基本和Zalewski一致。

赵文智等<sup>[8]</sup>认为生态水文学与水文生态学概念是有区别的,并认为目前的生态水文学概念比水文生态学更宽,在研究内容上包含了水文生态学的范围,夏军等<sup>[11]</sup>认为,在概念上不必区分生态水文学或水文生态学侧重于哪一个学科,二者应理解为生态学和水文学交叉领域的内容,即水文过程对生态系统结构、分布、格局、生长状况的影响,同时研究生态系统(生态系统中植被类型、格局、配置等)变化对水文循环的影响,是一个相互影响的过程,在实际研究中,可根据问题的需要,来决定生态水文学研究的侧重点。

周德民等<sup>[12]</sup>认为从模型构建理论来说,清楚区分生态水文学与水文生态学是有必要的(图1),生态水文学立足于水文学,侧重过程研究,生态是作为影响水文过程的一个主要因子;水文生态学立足于生态学,侧重格局与机理研究,强调生态系统对水文格局、特征及其变化的响应模拟和分析,生态水文学立足于水文学,侧重过程研究,生态是作为

一个影响水文过程的要素；水文生态学立足于生态学，侧重机理研究，强调生态系统对水文格局、特征及其变化的响应模拟和分析，这两个概念既有密切联系，又有一定区别。未来的水文生态学应该是基于区域水文和生态两种过程、格局与机制的完整统一。

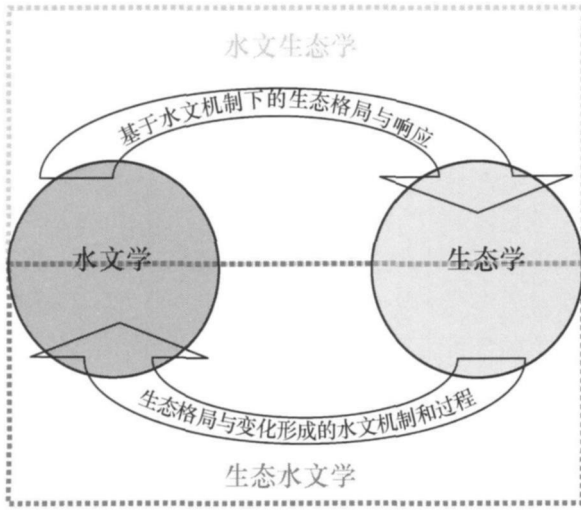


图 1 生态水文学与水文生态学学科间的区别与联系

## 2 基于生态响应的水文生态模型国内外研究进展

水文生态学是基于水文学和生态学的交叉领域而发展起来的。关注气候、植被和土壤要素间的平衡关系，研究土壤与植物间的水分迁移，以及气候与土壤湿度间相互关系等方面的早期研究都引发了人们对水文生态学最初的思考和认识<sup>[14-15]</sup>；Petts 等<sup>[16]</sup>，以及 Garcia 等<sup>[17]</sup> 在 20 世纪 50—60 年代通过研究河渠、河网、集水区的形成与演化开展了最初的水文生态研究。水文情势对于淡水和海岸生态系统具有明显影响，现在已经普遍接受，但是这一发现最初则是源于 60 年代取得的河水径流与鱼的数量密切相关的科学研究成果<sup>[18]</sup>。

由于湿地处于水陆交界带，其研究的开展较多地涉及水文与生态等耦合特征方面，因此，早期的水文生态学主要是从生态湿地系统研究范畴发展起来的，水文生态学的提出最早也是从水陆缓冲带研究领域开始的。水文特征控制湿地生态结构的研究可以追溯到 50 年前 Wickman<sup>[19]</sup> 对高位泥炭沼泽泡

和态的研究工作。因此，早期的水文生态学概念只用于湿地、沼泽、水陆过渡带等水生生态系统。大约从 20 世纪 80 年代初期以来，水文学家开始关注其他景观中水与生态过程的相互关系，研究范围不再局限于水生生态系统。目前，在世界的许多地区，淡水资源正在成为生态系统和经济发展的限制性因素，并且人类活动正在改变水循环的地表环境和过程，同时深刻改变水资源质量，由此造成的对淡水生态系统的各种负面影响正在明显呈扩大趋势。在这种背景下，水文生态学侧重研究河流及洪泛平原区等湿地环境的水文与生态关系，以及建立模拟这二个过程相互作用的模型<sup>[20-23]</sup>。

基于生态响应的水文生态模型研究作为水文生态科学研究的一个核心领域，近年来，国外学者在这一领域开展的重要研究工作包括<sup>[1, 24]</sup> 以土壤湿度波动与生态功能型响应为核心，从大气—土壤—植被结构关系出发讨论了构建水文生态模型的理论方法 (ASPAC)。Mulligan<sup>[25]</sup> 建立了水文生态耦合机理型式模型 (PATTERN model)，并应用于模拟地中海地区气候波动的植被响应，对于预测气候变化导致水文过程变化而引起的干旱区生态环境变化有重要应用价值。Venterink 等<sup>[26]</sup> 评价比较了 6 个主要是基于专家知识或与经验统计数学模型相结合的水文生态模型，分别是 NTM (nature technical model)，DEM NAT (dose effect model for terrestrial nature)，MOVE (multiple stress model for vegetation)，ICHORS (influence of chemical and hydrobiological factors on the response of species)，HYVEG (hydrology-vegetation model)，以及 ITORS (influence terrestrial site conditions on the response of species)，这些模型应用不同方法定量模拟植被生态系统各种响应特征。德国联邦水文研究所在 1997 年开发了 INFORM (The integrated floodplain response model) 模型，主要模拟水位变化及洪泛特征造成的自然生态系统潜在生态效应变化，包括人类活动对于河流产生的生态影响，其中的 MOVER (model for vegetation response) 模型<sup>[27]</sup> 针对水文特征变化引起各种生态系统响应而设计，不但包括植物，还提供了鱼类、昆虫等多种动物生境变化响应定量分析模型。

国内对基于生态响应的水文生态学模型研究工

作主要包括: 陈亚宁等<sup>[28]</sup> 分析了塔里木河下游断流河道地下水埋深对天然植被的组成、分布及长势的相关定量关系. 赵成义等<sup>[29]</sup> 建立了内陆河流域二维地下水运动模拟模型, 研究了内陆河流域植被变化与地下水运动. 莫兴国等<sup>[30]</sup> 创建了基于生物地球物理—化学过程, 融合遥感地理信息系统的生态/水文动力学模型(VIP模型). 夏军等<sup>[11]</sup> 对分布式水文生态模型建模理论进行了研究. 周德民和宫辉力<sup>[12]</sup> 探讨了湿地水文生态模型构建理论方法及学科特征, 并以洪河保护区为例构建了一个基于GIS和RS支持的集水区尺度湿地水文生态模型. 肖洪浪等<sup>[31]</sup> 基于我国黑河流域开展的比较系统的水文生态科学研究工作, 提出了基于流域生态—水文观测试验基础上的流域水—生态集成管理思想. 总体来说, 国内对区域生态响应的水文生态模型研究还比较缺乏, 目前处于理论和方法体系探索阶段<sup>[32]</sup>.

### 3 基于生态响应的水文生态模型研究发展趋势

#### (1) 水文过程模型与生态响应模型的连接将加强

在人类活动与全球气候变化对区域水文过程影响不断加剧的背景下, 定性的生态效应分析<sup>[33, 34]</sup>、定点的微观模拟<sup>[24]</sup> 方法难以满足区域尺度的定量生态效应模拟需要, 增加了水文循环过程变化隐含的长期的、负面的、不可恢复的生态环境恶化风险<sup>[35]</sup>. 尽管水文生态学以解决这种复杂环境机制下的水与生态交互影响机制为理论方法的发展目标, 但目前仍存在一些不足, 虽然模型的生态学方面日益受到重视, 例如SWIM, SWAT, MIKESHE等著名模型, 都包含或者增加了部分生态分析功能, 但现有的模型中生态系统参量通常十分有限, 多数模型是以植物生物量, 或植物叶面积指数(LAI)作为水文学与生态学联通的指示参量. 由于水文科学和生态科学尺度方面的差异, 特别是生态系统的科学本身机理机制的复杂性, 生态系统对水文过程变化等的响应关系还难以像水文过程那样清晰定量表达与数字模拟<sup>[36]</sup>. 因此, 当前水文生态学理论上发展的水文生态模型基本被分为两类, 即基于水文过程的生态水文模型和基于生态响应的水文生态模型. 这也同该领域一直存在“生态水文学”与

“水文生态学”的概念分歧有关. 随着水文生态学理论方法研究不断深入, 两类模型交叉的趋势会更加明显, 连接也会不断加强.

#### (2) 湿地水文生态响应模型受到重视

湿地生态系统是水控制的生态系统, 是水与生态最为关联的地带, 因此, 湿地多年来一直是水文生态学的主要研究对象之一. 湿地自然栖息地的植物群落组成结构、空间分布格局与演变过程和机制, 始终是水文生态学关注的核心问题<sup>[37]</sup>. 湿地植物群落结构和生物多样性与其栖息地的生物、物理和化学生境要素密切相关, 气候, 水文, 地貌, 及人类影响(包括水利工程, 农业活动和废水排放等)是构成栖息地生境的基本要素<sup>[38]</sup>. 基于水生境要素特征定量分析植物生态响应, 构建水文生态模型, 已逐步取代传统定性分析方法, 成为该领域理论方法的主流趋势. GIS成为重要的技术支持手段, 全球变暖、人类扰动和区域变化成为关注热点<sup>[39]</sup>. 然而, 湿地生境结构和植物种类特征与变化的定量描述涉及复杂的水陆过渡性特征, 建立水位、水分状况等生境要素与植物组成分布的清晰定量关系涉及复杂的机制<sup>[40]</sup>, 目前的研究水平还不能将所有的过程都由相对严密的数学方程来表述, 这是基于生态响应的水文生态模型与基于水文过程的生态水文模型一个基本的区别. 但是, 随着经验统计、模糊集等数学方法发展, 该领域的量化技术已取得一定突破. 例如, MOVER模型<sup>[27]</sup> 已在世界范围有许多成功应用, RIVPACS模型<sup>[41]</sup> 在英国和澳大利亚等国都相继准确预测了部分大型无脊椎动物种群区域结构和分布特征.

#### (3) 地学信息技术与水文生态模型的应用与集成日益明显

航天、航空和地面协同的多时空分辨率全球对地观测系统在水文、生态和环境研究中应用越来越广泛, 可获取的参量类型越来越多, 数据反演精度也越来越高<sup>[42]</sup>. 遥感技术可以提供从生态系统到生物群落(分辨率从1m到1km)有关群落结构和个体冠层的信息, 高分辨率遥感影像甚至能对植物个体种分类识别, 高光谱遥感不但能够对植物优势种群, 而且可以精确获取生态系统中各种复杂地物属性和生化参量, 满足各种模型输入参数的多类型与高精度需求<sup>[43]</sup>. 遥感技术还可提取多种水文要素参

量(蒸发量、降水量、土壤水分等),有助于定量表达区域水文过程及其时空变化规律.微波遥感可测量不同地貌和植被覆盖的土壤湿度条件.合成孔径雷达(SAR)在植被分类、生物量估算、水体识别、土壤湿度信息提取等方面也显示了良好的应用潜力.结合野外数据订正,野外定点实验及观测数据结合,遥感技术能够更准确有效获取不同时空尺度下的多种信息,为多种尺度生态-水文科学耦合研究提供了重要的参数条件<sup>[44]</sup>.

当前地学多元新技术集成服务于学科研究的特征日益明显.遥感数据与地理信息系统的空间分析手段结合是景观生态学理论形成和发展的重要技术基础<sup>[45]</sup>.现代的分布式水文模型是建立在DTM和GIS基础上的,RS和GPS(全球定位系统)集成可以帮助此类建模大量的参数率定工作<sup>[46]</sup>.GIS和DTM集成可解决水文生态过程中尺度和异质性的效应问题,为水文、地形、地貌等生态环境要素的定量表达和分析提供了新的机遇.遥感、同位素追踪、植被生理测量等先进技术的发展与集成,使得获取不同时空尺度的水文与生态多重交互界面的多元数据能力大为提高.地理信息系统以及计算机技术的发展又为复杂系统下的空间分析、数值模拟提供了强有力的技术支持.Janauer<sup>[47]</sup>认为GIS有助于生态学家和水文学家寻找共同的语言和答案,并且是解决尺度问题的有效工具.近年发展起来的数据同化技术和理论代表了新技术同地学交叉融合又一个更深的层次.陆面数据同化的研究主要是在陆面模型和水文模型基础上,采用不同的数据同化算法同化地表观测资料、卫星和雷达数据,优化地表和根区土壤水分、温度、地表能量通量等的估算<sup>[48]</sup>.

#### 4 小结

当前科技发展迅速一方面体现在科学理论和技术方法不断微观化和专业化,同时,学科的交叉和融合也在不断加强和深入,呈现出两种相反趋势并行同步发展的特征,水文生态学正是代表学科交叉和融合趋势的一个典型案例.具有时空四维特征,不断逼近社会生态环境现实,且具有更多物理机制的水文生态模型将是最终的发展方向.时空交互响应特征与作用机制的细节特征会得到更多刻画,对

生态和环境的管理会更有效,对重大生态环境问题的解决方案会更实用,对未来生态环境的发展预测会更准确.

计算机技术和地学信息技术迅速发展为真正意义的学科综合与交叉提供了客观基础.国际上水文和生态研究发展的新技术应用特征主要反映在两方面:一是利用新技术获取更多信息,这些技术包括空间数据的观测、数据质量的改进以及点面数据的转换,其中,地理信息系统(GIS)、遥感(RS)和环境要素监测是重要的技术手段;二是帮助加深理解科学机理,特别是水系统与生态系统和人类活动之间的复杂反馈机制,探索水文和生态过程的复杂性,建立可描述时空变异性、多变量、参数化的各种模型.

水文生态模型将区域地表水-地下水-土壤水和植被生态系统作为一个整体研究对象,在地学信息技术、实验观测和数值模拟技术在方法层面整合起来,开展区域水文和生态两大学科之间的学科理论交叉研究,特别是立足于气候变暖和人类扰动等复杂现实因素,将区域变化同区域水文过程与植物生态响应等复杂交互作用机制作为研究目标,科学预测区域水文过程和生态系统未来变化方向,将会促进水文生态学领域在理论、方法与技术方面的创新与深化,更好服务于区域社会经济可持续发展.

#### 参 考 文 献

- 1 Rodríguez-Iturbe I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 2000, 36: 3-9
- 2 Phillips FM. Hydrogeology: Time for a new beginning? *Ground Water*, 2002, 40(3): 217
- 3 UNESCO. Draft Strategic Plan for the 7<sup>th</sup> Phase of the IHP (2008-2013). The Document of the 35<sup>th</sup> Session of the IHP Bureau, IHP/IC-XVII/Inf. 9, Paris, 2006
- 4 Hatton TJ. Eagleson's optimality theory of an eco-hydrological equilibrium: Quo vadis? *Functional Ecology*, 1997, 11: 665-674
- 5 Baird AJ, Wilby RL. *Eco-hydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments*. London: Routledge, 2000
- 6 Zalewski M. Eco-hydrology: The scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*, 2000, 16: 1-8

- 7 Nuttle WK. Eco-hydrology's past and future in focus. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2002, 83: 2—5
- 8 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述. *科学通报*, 2001, 46(2): 1851—1857
- 9 王根绪, 钱 鞠, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 314—323
- 10 武 强, 董东林. 试论生态水文学主要问题及研究方法. *地球科学进展*, 2001, (2): 69—72
- 11 夏 军, 丰华丽, 谈 戈, 等. 生态水文学—概念、框架和体系. *灌溉排水学报*, 2003, 22(1): 4—10
- 12 周德民, 宫辉力, 胡金明, 等. 湿地水文生态学模型理论初探. *生态学杂志*, 2007b, 26(1): 108—114
- 13 Kennen JG, Kauffman LJ, Ayers MA, et al. Use of an integrated flow model to estimate ecologically relevant hydrologic characteristics at stream biomonitoring sites. *Ecological Modeling*, 2008, 211, 57—76
- 14 Honert TH van den. Water transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, 1948, 3: 146—153
- 15 Thornthwaite CW. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 1948, 38: 55—94
- 16 Potts GE, Bradley C. Hydrological and ecological interactions within river corridors. In: Wilby RL, *Contemporary Hydrology*, John Wiley and Sons, 1997, 241—271
- 17 Garcia NF, Merino J. Pattern and process in the dune system of the Donana National Park. In: van der Maarel, ed. *Southwestern Spain: Dry Coastal Ecosystems, General Aspects*, Elsevier, Amsterdam., 2000, 349—362
- 18 Skreslet S. The role of freshwater outflow in coastal marine ecosystems. *Proc. NATO Advanced Research Workshop*, Bodo, Norway, 1985
- 19 Wickman FE. The maximum height of raised bogs and a note on the motion of water in soligenous mires. *Geologiska Föreningens i Stockholm Föreläsningar*, 1951, 73: 413—422
- 20 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统模型研究进展. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 352—358
- 21 崔丽娟, 鲍达明, 等. 扎龙湿地生态需水分析及补水对策. *东北师大学报(自然科学版)*, 2006, 38(3): 128—132
- 22 Wheeler BD. Water and plants in freshwater wetlands. In: Baird AJ, Wilby RL, eds. *Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments*. London and New York: Routledge. *Eco-Hydrology*, 2000, 127—180
- 23 Acreman MC. *Hydro-Ecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology*. Wallingford, UK: IAHS Press, 2001
- 24 Rodriguez-Iturbe I, Porporato A. *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems—Soil Moisture and Plant Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- 25 Mulligan M. Modeling hydrology and vegetation change in a degraded semi-arid environment. PhD thesis. London: King's College University of London, 1996
- 26 Venterink OH, Wassen MJ. A comparison of six models predicting vegetation response to hydrological habitat change. *Ecological Modeling*, 1997, 101: 347—361
- 27 Bio AMF, Alkemade R, Barendregt A. Determining alternative models for vegetation response analysis: A non-parametric approach. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(1): 5—16
- 28 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. *地理学报*, 2003, 4: 542—549
- 29 赵成义, 王玉朝, 李保国. 内陆河流域植被变化与地下水运动的耦合关系. *水利学报*, 2003, 12: 59—65
- 30 莫兴国. 土壤—植被—大气系统水分能量传输模拟和验证. *气象学报*, 1998, 3: 68—77
- 31 肖洪浪, 程国栋, 李彩芝, 等. 黑河流域生态—水文观测试验与水—生态集成管理研究. *地球科学进展*, 2008, 7: 666—670
- 32 严登华, 王 浩, 王建华, 等. 国际水文计划发展与中国水资源研究体系构建. *地理学报*, 2004, 59(2): 249—259
- 33 Baird KJ, Stromberg JC, Maddock T. Linking riparian dynamics and groundwater: An ecohydrologic approach to modeling groundwater and riparian vegetation. *Environmental Management*, 2005, 36(4): 551—564
- 34 Chen X. Hydrologic connections of a stream-aquifer-vegetation zone in south-central Platte River valley. *Nebraska Journal of Hydrology*, 2007, 333: 554—568
- 35 李丽娟, 姜德娟, 李九一, 等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展. *自然资源学报*, 2007, 2: 211—224
- 36 Laio F, Porporato A, Fernandez-Illescas CP, et al. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress—IV. Discussion of real cases. *Advances in Water Resources*, 2001, 24: 745—762
- 37 Zhou DM, Gong HL, Luan ZQ, et al. Spatial patterns of water controlled wetland communities in the Sanjiang floodplain, Northeast China. *Community Ecology*, 2006, 7(2): 223—234
- 38 Naumburg E, Mata-Gonzalez R, Hunter RG, et al. Phreatophytic vegetation and groundwater fluctuations: A review of current research and application of ecosystem response modeling with an emphasis on great basin vegetation. *Environmental Management*, 2005, 35(6): 726—740
- 39 Zhou DM, Gong HL, Liu ZL. Integrated wetland ecologic assessment of environmental condition in water catchments: Linking hydro-ecological modelling and Geo-information techniques. *Ecological Modeling*, 2008, 214: 411—420
- 40 Boswell JS, Olyphant GA. Modeling the hydrologic response of groundwater dominated wetlands to transient boundary conditions: Implications for wetland restoration. *Journal of Hydrology*, 2007, 332: 467—476
- 41 Wright JF. Development and use of a system for predicting the macro-invertebrate fauna in flowing waters. *Australian Journal*

- of Ecology, 1995, 20: 181—197
- 42 Groeneveld DP, Baugh WM. Correcting satellite data to detect vegetation signal for eco-hydrologic analyses. *Journal of Hydrology*, 2007, 344: 135—145
- 43 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000
- 44 Hendricks F, Brunner P, Kgothlang L, et al. Inclusion of remote sensing information to improve groundwater flow modeling in the Chobe region. In: Biekens MFP, Gehrels JC, Kovar K, eds. *Calibration and Reliability in Groundwater Modeling: From Uncertainty to Decision Making*. Wallingford, UK: IAHS Publication, 2006, 304
- 45 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 等. 国际景观生态学研究新进展. *生态学报*, 2008, 2: 798—804
- 46 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型. 北京: 中国水利水电出版社, 2004
- 47 Janauer GA. Ecohydrology: Fusing concepts and scales. *Ecological Engineering*, 2000, 16: 9—16
- 48 Porporato A, Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology—a challenging multidisciplinary research perspective. *Hydrological Sciences—Journal-des Sciences Hydrologiques*, 2002, 47(5): 811—821