

doi:10.3799/dqkx.2014.116

# 论内陆干旱区依赖地下水的植被生态 需水量研究关键科学问题

陈伟涛<sup>1</sup>, 孙自永<sup>2</sup>, 王焰新<sup>2,3\*</sup>, 马 瑞<sup>2</sup>

1. 中国地质大学计算机学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 地下水资源在内陆干旱区具有重要的植被生态功能, 依赖地下水的植被生态系统的需水量是目前流域水资源综合管理的重要组成部分。在分析地下水资源生态功能研究进展的同时, 系统阐述了内陆干旱区依赖地下水的植被生态需水量研究的几个关键科学问题: ①依赖地下水的植被生态系统的识别方法; ②地下水对植被生态系统作用机制的分析; ③地下水关键属性安全界限的确定; ④地下水系统结构分析; ⑤生态用水配置方案的确定; ⑥区域尺度地下水—天然植被系统关系的概念模型。并逐一提出了这些问题的解决方案, 能够为干旱区植被生态系统保护和恢复提供思路, 也能够为水资源开发利用与以植被生态系统保护为中心的干旱区生态文明建设提供地学支撑。

**关键词:** 生态需水量; 依赖地下水的植被系统; 内陆干旱区; 地下水; 遥感。

**中图分类号:** P641

**文章编号:** 1000-2383(2014)09-1340-09

**收稿日期:** 2014-02-01

## Major Scientific Issues on Water Demand Studying for Groundwater-Dependent Vegetation Ecosystems in Inland Arid Regions

Chen Weitao<sup>1</sup>, Sun Ziyong<sup>2</sup>, Wang Yanxin<sup>2,3</sup>, Ma Rui<sup>2</sup>

1. School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Groundwater in inland arid regions has important functions in vegetation ecology. The water demand of groundwater dependent vegetation ecosystems is an important part of the integrated management of watershed water resources. Advances in studies of ecological function of groundwater resources are reviewed in this paper, and the major key scientific issues in water demand studies of groundwater-dependent vegetation ecosystems in inland arid regions are proposed: ① identification method of groundwater-dependent vegetation ecosystems, ② mechanism of groundwater on vegetation ecosystem, ③ safety limits of the groundwater key attributes, ④ groundwater system structural analysis, ⑤ ecological water allocation plan, ⑥ conceptual model of the relationship on groundwater-natural vegetation system in regional scale. Potential approaches to solve the problems are discussed, which can provide not only ideas for vegetation protection and restoration of ecosystems in arid regions, but also scientific support for improving ecological civilization.

**Key words:** water demand of ecology; groundwater-dependent vegetation ecosystems; inland arid region; groundwater; remote sensing.

中国内陆干旱区(简称干旱区)包括新疆全境、甘肃河西走廊及内蒙古贺兰山以西的地区(施雅风, 1995), 约占全国陆地总面积的 30%, 但水资源总量

不及全国的 5%(程国栋和王根绪, 2006)。广泛分布的地下水能常年保持相对稳定, 是维系干旱区中生和旱生植被生态系统的主要水源, 具有极为重要的

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos. 41301026, 91125009)。

**作者简介:** 陈伟涛(1980—), 男, 讲师, 从事遥感信息挖掘及水资源应用研究。E-mail: wtchen@cug.edu.cn

\* 通讯作者: 王焰新, E-mail: yx.wang@cug.edu.cn

生态功能.然而最近 50 a 来,干旱区植被不断退化,不仅制约当地社会经济发展,而且影响整个中国北方地区生态安全,并对中国中、东部地区的环境构成威胁(徐恒力等, 2000;程国栋和王根绪, 2006).事实上,干旱区植被生态系统的退化与该区水资源尤其是地下水资源的不合理开发密切相关.目前,对干旱区地下水生态功能的研究还远远不足(Rodríguez-Iturbe, 2000; Loik *et al.*, 2004; Rodríguez-Iturbe and Porporato, 2004).

目前,世界上水文地质学研究已经将维护依赖地下水的植被生态系统(GDVEs)的生态需水量作为流域水资源综合管理的重要组成部分,是研究的重点和热点问题(Boulton, 2005, 2009; MacKay, 2006; Boulton *et al.*, 2010; Tomlinson and Boulton, 2010; Kløve *et al.*, 2011; Bertrand *et al.*, 2012).近 10 a 来,中国内陆干旱区水资源的生态功能也逐渐受到重视,在大多数水资源规划和管理方案中,也已为生态系统的用水预留配额(王芳等, 2002a, 2002b; 刘桂民和王根绪, 2004; 程国栋和赵传燕, 2006; 胡广录等, 2008; 刘金鹏等, 2010).但是,由于对两者之间的耦合关系,尤其是对植被生态系统的需水机制和规律认识不清,导致生态配水的有效性较低,在某些地区甚至造成了负效应.例如,在不同的包气带结构内,地下水属性(地下水位、矿化度等其他水文地球化学离子浓度)对植物生长的影响机制如何(陈伟涛, 2012)以及土壤水分如何限制植物根系分布并决定植物群落的组成结构

(Denmead and Shaw, 1962; Rodríguez-Iturbe and Porporato, 2004; Simmons *et al.*, 2008; 陈斌等, 2010).因此,越来越多的学者意识到,解决干旱区植被生态系统用水配置方案问题,必须从生态水文学、水文地质学、水文地球化学的空间信息科学出发,将地下水-植被生态系统作为一个整体框架,进行全面、系统、深入的学科交叉研究.为此,本文提出了我国内陆干旱区依赖地下水的植被生态系统配水方案可能的研究框架和研究方向(图 1),并就其关键科学问题进行了阐述,所提出的解决方案,能够为实现内陆干旱区以水资源开发利用与植被生态系统保护为中心的生态文明建设提供地学支撑.

## 1 依赖地下水的植被生态系统的识别

### 1.1 植物种群对地下水依赖程度的测定和描述

通常情况下,基于区域水文地质条件和植被生态系统结构分析,可定性确定出植被生态系统是否依赖地下水,主要方法是根据几种依赖地下水的生态系统特征,野外实地观测或者测量,进而掌握植被在长期干旱状态下是否是活跃的(Barron *et al.*, 2014).总体上,对于典型的干旱内陆河流域,除上游山区的植被不依赖于地下水外,中、下游地区几乎所有的植被生态系统(湿地、绿洲、河岸林、荒漠等)都是依赖地下水的.而中、下游地区恰是内陆河流域人类生产生活的集中区,对地下水的干扰强度很大.

为了满足水资源配置和管理的需求,还需进一



图 1 合理分配水资源以满足依赖地下水的植被生态需水量的关键步骤  
Fig. 1 Key steps for allocating water to meet the water demand for GDVEs

步识别植被生态系统对地下水的依赖形式,如植被是直接吸收地下水还是吸收地下水补给的地表水,或者是将地下水补给的地表水作为其栖息地(如湿地);并需要定量评价植被生态系统对地下水的依赖程度,即查清地下水在植被的水分需求中占有多大的比例.在定量评价分区之前,需要建立适用于中国内陆干旱区依赖地下水的植被生态系统(Groundwater dependent vegetation systems, GDVEs)分类体系.

在有长期地下水观测资料的情况下,可通过调查地下水变化与植物响应间的定量关系来确定植物种群对地下水的依赖程度(Cook *et al.*, 1998; Scott *et al.*, 1999; Shafroth *et al.*, 2002; Froend *et al.*, 2004).同位素技术能够为此提供更为直接的方法(Zencich *et al.*, 2002; O'Grady *et al.*, 2006),并且能够定量确定地下水对河流的补给量和补给时段(Cook *et al.*, 2003).但是,这些方法在无监测资料的情况下很难实现,无法提供地下水对植物作用机制的相关信息,也无法提供植物需水规律的相关信息.

## 1.2 区域尺度依赖地下水的植被生态系统的评价和分区

针对个体植物种群对地下水依赖程度的测定已经有很多的研究成果了,但目前区域尺度上依赖地下水的植被生态系统的评价和分区仍旧是一个极具挑战性的课题(Barron *et al.*, 2014).一些学者借助于空间信息技术,将植被作为地下水的指示器,测定或者描述其对地下水的依赖程度.在区域尺度上,利用定量遥感(Remote Sensing, RS)技术获取区域地表植被、土壤等参数信息,结合地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术开展 GDVEs 的评价和分区,目前已经成为常用的、重要的方法(Münch and Conrad, 2007; Barron *et al.*, 2014; Lü *et al.*, 2013).Elmore *et al.* (2003)通过在 California 地区的研究,证实了利用 Landsat TM 卫星遥感数据开展长时间序列的植被遥感调查,并结合实地测量数据确定可能的依赖地下水的植被范围是可行的.随后,他们又在同一地区采用 Landsat TM 卫星数据反演植被覆盖度,开展了自 1986—2001 年地下水潜水埋深下降是如何影响植被覆盖度的研究(Elmore *et al.*, 2006).Howard and Merrifield (2010)采用 GIS 技术,通过对地学空间数据集的深度分析,提出了一个对地下水依赖程度的指数,用于确定 California 地区下述 3 种依赖地下水

的生态系统类型:泉和渗流湿地和相关的植物群落基流指数.

当然,RS 和 GIS 技术应用于 GDVEs 分区评价的效果,也取决于研究者对 GDVEs 与地下水系统和下垫面性质之间关系的理解程度.此外,GDVEs 区域通常都有较高的蒸散发率(Evapotranspiration, ET),因此以 RS 数据为主反演蒸散发也能够为区域 GDVEs 评价提供重要的参量(Yang *et al.*, 2011; Orellana *et al.*, 2012),打破长期依赖经验数值的办法.

## 2 地下水对植被生态系统的作用机制分析

在识别出 GDVEs 并定量评价出其对地下水的依赖程度后,接着需要查清植被生态系统对地下水利用的时空变化规律和地下水的动态变化对植被生态过程的影响,并确定影响植被生态系统结构和功能的主要地下水属性(水位、流量和水质).

地下水对植被生态系统的作用机制研究,需要以长期的野外监测数据为基础,因此系统地建立地下水—植被生态监测系统意义重大.与常规地下水监测相比,一个完整的地下水—植被生态系统的监测应当包括 4 个监测子系统(周仰效, 2010):①大气监测系统;②土壤水监测系统;③地下水监测系统;④植被监测系统.协同使用这些观测系统获取长时间序列数据,重点研究地下水对植被关键生态过程的影响以及影响植物种群的地下水关键属性.

在干旱区,植被生态系统的结构稳定性和生态功能的正常发挥是靠一些关键生态过程来实现的(De Groot *et al.*, 2002; Murray *et al.*, 2006),分析地下水对这些关键生态过程的影响,确定对地下水的变化反应最为敏感的生态过程,是制订高效生态配水方案的重要依据.

## 3 地下水关键属性的安全界限确定

以植被生态系统对地下水依赖机制的研究为基础,确定为保证植被生态系统的健康状态,并维持其正常的生态过程和生态功能所需的地下水关键属性的安全界限及其时空分布规律.对于干旱区 GDVEs 而言,地下水位、地下水的水质、地下水的流速与流量(泉水维持的生态系统)、地下水排泄区的位置等

都有可能成为影响影响植物种群的关键属性. 其中, 地下水位和水质是决定因素. 对地下水位(或水头)而言, 要确定出所谓的生态水位或安全水位(Bakker and Berendse, 1999; Chen *et al.*, 2006; Xie *et al.*, 2011); 对地下水水质而言, 主要是确定出维护地下水作用的植被生态系统的含盐量阈值(McCarthy and Eller, 1994; 赵文智和刘鹤, 2006; Antonellini and Mollema, 2010; Tweed *et al.*, 2011; 张竟, 2012; 张俊等, 2013).

在大多数情况下, 地下水关键属性的安全范围很难确定. 定性推断法、统计学方法(Loomes, 2000; O'Grady *et al.*, 2006)及“地下水—土壤—植物—大气连续体”(Groundwater Soil Plant Atmosphere Continuum, GSPAC)和数值模型方法通常被用于确定地下水属性的安全界限. 事实上, 在中国内陆干旱区, 受制于地下水监测条件和野外实际工作条件的限制, 利用野外实地获取大量样本并利用统计学方法确定地下水属性的安全范围是极其困难的. 此外, 植物根系的发育深度是影响植被生态系统对地下水依赖的一个重要因素, 它决定着植被生态系统的生态水位或安全水位的高低. 通过野外植物根系调查可以获得离散的植物根系深度数据; 利用空间分辨率优于1 m级别的卫星遥感数据能够识别出干旱区稀疏植被种类(Wolter *et al.*, 2005; Mallinis *et al.*, 2008; Xie *et al.*, 2008; Verrelst *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2014); 在这2类数据的基础上, 可以通过统计关系建立区域尺度上不同植物物种或者群落的根系深度范围, 进而确定物种或者群落结构的生态水位. 因此, 需要进一步引入地球空间信息技术, 即深入研究在稀疏地下水数据的条件下, 如何充分挖掘高分辨率定量遥感技术获取地表参数的潜力, 并基于地统计学方法开展统计学研究, 提升地下水关键属性安全界限的研究水平.

## 4 地下水系统结构分析

地下水流动系统的生态学价值正日益被世界各国水资源保护组织所认知和重视(Bertrand *et al.*, 2012). 在植被生态系统配水方案研究中, 确定的是各个植被生态系统的地下水位、流量和水质的安全下限, 但这些地区的地下水属性并不是相互孤立的, 而是受整个地下水流场和化学场分布特点的控制, 并且某一地区地下水位、流量或水质的改变会影响到空间上的其它区域. 因此, 在植被生态系统的配水

方案研究过程中, 如果要使输送的水资源能分配到空间上的各个植被生态系统, 并使各个系统的地下水位达到生态水位, 必须查清地下水系统的结构, 将地下水作为一个系统进行统一管理. 另外, 地下水位、流量和水质等属性对地下水系统输入的响应通常具有一定的滞后和延迟, 其时间长短受地下水系统结构特点控制, 在进行水资源规划时, 若不考虑这种滞后和延迟效应, 则可能导致分配的生态用水与植被生长周期不吻合.

## 5 生态需水量配置方案的确定

基于地下水系统结构分析结果, 将地下水关键属性的安全界限作为约束条件, 制订生态用水分配和地下水资源管理方案, 并将其纳入到区域地下水—地表水联合调度和规划方案中, 以平衡GDVEs的生态需水和当地社会、经济需水. 需要指出的是, 在现有的生态需水研究中, 大多将确定生态系统需水量作为主要研究目标(王芳等, 2002a, 2002b; 王根绪和程国栋, 2002; 司建华等, 2013). 生态需水量的评价虽然方便于水资源的统一调度, 但它是一个高度集中式的参数, 是植被生态系统的年内总耗水量, 而植被生态系统是一个分布式系统. 当按生态需水量的评价结果向植被生态系统进行水资源配置时, 这些水资源要先转化成地下水才能被植物所利用. 它能否发挥预期的生态效果, 取决于地下水含水系统的结构和水资源的配置时间与植物生长周期是否吻合. 因此, 此类研究的主要不足是缺少地下水系统结构分析和植物生态需水规律的研究.

## 6 区域尺度干旱区地下水—天然植被系统关系的概念模型

区域尺度上地下水—天然植被系统之间也存在着较为复杂的微观关系, 如地下水系统的状态参量(潜水埋深、矿化度等)与天然植被系统状态参量(叶面积指数、植被指数、植被覆盖度等)之间的关系模型. 事实上, 受制于地下水流动系统及其对天然植被发育控制作用的复杂性, 这种关系模型在干旱区不是确定性的.

### 6.1 模型的研究单元

目前地下水—天然植被系统的关系模型主要是确定研究区的生态水位, 直接将研究区内植被参量

与地下水参量建立数学关系. 植被直接吸收利用的多是土壤水,在同样的潜水埋深下,不同的包气带结构可能有着不同的土壤水分分布格局,进而影响植被的生长发育. 所以,地下水—天然植被系统的关系模型研究,只有在相同的包气带结构下才具有可行性和实际的水文意义;此外,也可以采用更复杂的方法,即建立“饱和带—非饱和带水分运移模型”,但这种模型太复杂,需要的参数非常多,在干旱区缺少基础水文地质资料的情况下可操作性较差.

通常情况下,中国内陆干旱区由于地貌和沉积环境的控制包气带结构具有显著的分区特征. 因此,以包气带岩性结构作为地下水—天然植被系统关系的研究单元,可以建立更为合理、更具针对性的生态环境恢复和水资源管理方案.

## 6.2 区域概念模型

目前,地下水—天然植被系统的关系模型常用野外样点统计法(张俊等, 2013)(简称样点模式)和基于遥感技术的阈值区间统计模式(金晓媚等, 2007, 2008; 孙宪春等, 2008; 金晓媚, 2010; 席海洋等, 2013)(简称阈值模式). 样点模式指基于野外调查植被和地下水状态参量等离散数据,建立两者间确定的数学关系. 该方法由于离散数据的空间尺度与研究区的空间尺度不匹配,故建立的数学模型不够精确,有可能产生错误的结论. 阈值模式指利用遥感数据获取区域植被状态参数,并利用地下水样本点数据生成等值线图,统计等值线阈值区间内植被状态参数的平均值,进而确定两者间的数学关系模型. 尽管阈值模式数据空间尺度不匹配的问题被一定程度地缩小了,但是植被参数和地下水参数被人为“分割”(阈值)和平均化(平均值)了. 总体上,这两种模式均把地下水—天然植被系统关系的不确定性当作确定性问题来处理,导致将问题大大简化的同时,掩盖了许多不确定性的特征(如非线性、突变、混沌等),而这些特征正是地下水—植被系统研究的关键问题.

此外,研究两者间关系时不仅需要对其某个地下水状态参量进行单独分析,还应该分析地下水状态参量渐变与突变效应对植被状态参量变化的正向和逆向作用. 因此,本文提出“像元尺度模式”,即在包气带岩性结构单元内,借助于高分辨率(优于 5 m)遥感技术,定量反演植被指数、植被覆盖度、叶面积指数、植被高度等状态参量,并对地下水状态参量进行统计学插值处理,获取与植被参量相同的栅格数据,用植被和地下水参量之间的二维或多维空间特

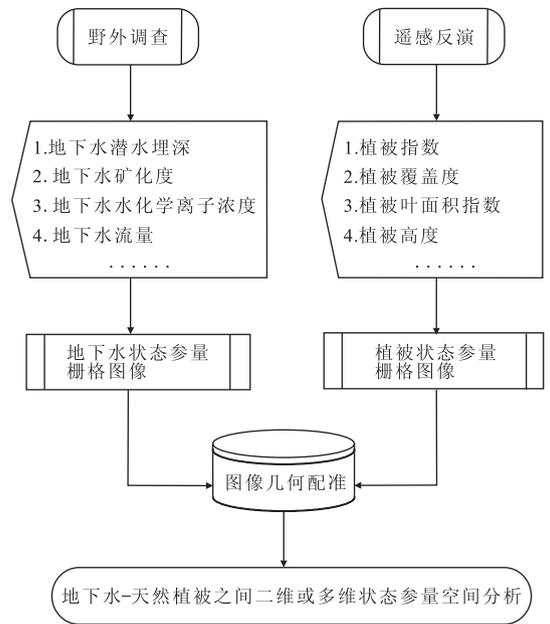


图 2 区域尺度地下水—天然植被系统关系的概念模型  
Fig. 2 The conceptual model of the relationship of groundwater-natural vegetation system in regional scale

征刻画其内在关系,在深入剖析、理解地下水—植被系统非线性、时变特性突出的复杂系统的基础上,通过反复分析,最后得出结论. 这种方法不但具有最为准确的数学含义,也具有非常鲜明的水文地质学意义. 图 2 是其概念模型.

## 7 结语与建议

天然植被的生长发育受制于“天—空—地”多重因素的影响,在内陆干旱区,地下水系统的影响尤其重要. 论文针对我国内陆干旱区依赖地下水的天然植被生态需水量研究,从生态水文学、水文地质学等角度提出了生态需水量研究的基本框架和研究方向,论述了 6 个关键科学问题及其相应的解决方案,提出了区域尺度上地下水—天然植被系统关系的概念模型.

尽管地下水潜水埋深、矿化度等参量和植被生长状态参量之间的依存关系不是确定性的数学函数关系,但是仍可以通过单相关与偏相关分析来研究两者间不完全确定的随机关系:如当植被特征参量的数值确定之后,地下水众多参量是如何响应的;当地下水 1 个或几个特征参量取一定的值时,与之相应的植被参量的值虽然不确定,但它仍然按某种规律在一定的范围内变化.

干旱区植被生态需水量研究,不仅需要微观上定点的精细研究,更需要中观或者宏观上的定性、半定量和定量研究. 针对目前我国内陆干旱区依赖地下水的天然植被生态需水量的研究现状,当务之急是开展4个方面的工作:①加快地下水监测网络建设,提供基础的数据支撑;②建立1个或者多个地下水—天然植被生态系统科技创新基地,深度研究各种地下水、植物仪器及监测系统的有效利用;③基于高分辨率定量遥感技术,采用“天空地一体化”的工作模式,开展区域尺度依赖地下水的天然植被生态系统分区与评价,定量确定天然植被对地下水的依赖程度;④利用地下水三维模型,模拟区域尺度上地下水动态变化对天然植被生长发育的影响.

## References

- Antonellini, M., Mollema, P. N., 2010. Impact of Groundwater Salinity on Vegetation Species Richness in the Coastal Pine Forests and Wetlands of Ravenna, Italy. *Ecological Engineering*, 36(9): 1201—1211. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.007
- Bakker, J. P., Berendse, F., 1999. Constraints in the Restoration of Ecological Diversity in Grassland and Heathland Communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(2): 63—68. doi: 10.1016/S0169-5347(98)01544-4
- Barron, O. V., Emelyanova, I., Van Niel, T. G., et al., 2014. Mapping Groundwater-Dependent Ecosystems Using Remote Sensing Measures of Vegetation and Moisture Dynamics. *Hydrological Processes*, 28(2): 372—385. doi: 10.1002/hyp.9609
- Bertrand, G., Goldscheider, N., Gobat, J. M., et al., 2012. Review: From Multi-Scale Conceptualization to a Classification System for Inland Groundwater-Dependent Ecosystems. *Hydrogeology Journal*, 20(1): 5—25. doi: 10.1007/s10040-011-0791-5
- Boulton, A. J., 2005. Chances and Challenges in the Conservation of Groundwaters and Their Dependent Ecosystems. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 15(4): 319—323. doi: 10.1002/aqc.712
- Boulton, A. J., 2009. Recent Progress in the Conservation of Groundwaters and Their Dependent Ecosystems. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 19(7): 731—735. doi: 10.1002/aqc.1073
- Boulton, A. J., Datry, T., Kasahara, T., et al., 2010. Ecology and Management of the Hyporheic Zone: Stream-Groundwater Interactions of Running Waters and Their Floodplains. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 29(1): 26—40. doi: 10.1899/08-017.1
- Chen, B., Liu, M. S., Uriankhai, T., et al., 2010. Distribution Patterns of Root Biomass and Soil Water Contents in Three Typical Arid Communities in Ningxia Hui Autonomous Region. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 34(1): 53—58 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W. T., 2012. Remote Sensing Based Determination of Groundwater-Dependent Ecosystems in Dunhuang Basin, Northwestern China. (Dissertation) China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Wang, Q., Li, W., et al., 2006. Rational Groundwater Table Indicated by the Eco-Physiological Parameters of the Vegetation: A Case Study of Ecological Restoration in the Lower Reaches of the Tarim River. *Chinese Science Bulletin*, 51(Suppl. 1): 8—15. doi: 10.1007/s11434-006-8202-3
- Cheng, G. D., Wang, G. X., 2006. Changing Trend of Drought and Drought Disaster in Northwest China and Countermeasures. *Earth Science Frontiers*, 13(1): 3—14 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, G. D., Zhao, C. Y., 2006. Study on Ecological Water Demand in Arid Area of Northwestern China. *Advances in Earth Science*, 21(11): 1101—1108 (in Chinese with English abstract).
- Cook, P. G., Favreau, G., Dighton, J. C., et al., 2003. Determining Natural Groundwater Influx to a Tropical River Using Radon, Chlorofluorocarbons and Ionic Environmental Tracers. *Journal of Hydrology*, 277(1—2): 74—88. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00087-8
- Cook, P. G., Hatton, T. J., Pidsley, D., et al., 1998. Water Balance of a Tropical Woodland Ecosystem, Northern Australia: A Combination of Micro-Meteorological, Soil Physical and Groundwater Chemical Approaches. *Journal of Hydrology*, 210(1—4): 161—177. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00181-4
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., Boumans, R. M. J., 2002. A Typology for the Classification, Description and Valuation of Ecosystem Functions, Goods and Services. *Ecological Economics*, 41(3): 393—408. doi: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7
- Denmead, O. T., Shaw, R. H., 1962. Availability of Soil Water to Plants as Affected by Soil Moisture Content and Meteorological Conditions. *Agronomy Journal*, 54(5): 385—390. doi: 10.2134/agronj1962.00021962005400050005x
- Elmore, A. J., Manning, S. J., Mustard J. F., et al., 2006. Decline in Alkali Meadow Vegetation Cover in California: The Effects of Groundwater Extraction and

- Drought. *Journal of Applied Ecology*, 43(4): 770—779. doi: 10. 1111/j. 1365—2664. 2006. 01197. x
- Elmore, A. J. , Mustard, J. F. , Manning, S. J. , 2003. Regional Patterns of Plant Community Response to Changes in Water: Owens Valley, California. *Ecological Applications*, 13(2): 443—460. doi: 10. 1890/1051—0761(2003)013[0443;RPOPCR]2. 0. CO;2
- Froend, R. , Loomes, R. , Horwitz, P. , et al. , 2004. Study of Ecological Water Requirements on the Gngangara and Jandakot Mounds under Section 46 of the Environmental Protection Act. Report Prepared for the Water and Rivers Commission.
- Han, N. , Du, H. Q. , Zhou, G. M. , et al. , 2014. Object-Based Classification Using SPOT-5 Imagery for Moso Bamboo Forest Mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 35(3): 1126—1142. doi: 10. 1080/014311161. 2013. 875634
- Howard, J. , Merrifield, M. , 2010. Mapping Groundwater Dependent Ecosystems in California. *PLoS One*, 5(6): 1—14. doi: 10. 1371/journal. pone. 00/1249
- Hu, G. L. , Zhao, W. Z. , Xie, G. X. , 2008. Advances on Theories of Ecological Water Requirements of Vegetation in Arid Area. *Advances in Earth Science*, 23(2): 193—200 (in Chinese with English abstract).
- Jin, X. M. , 2010. Quantitative Relationship between the Desert Vegetation and Groundwater Depth in Ejina Oasis, the Heihe River Basin. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 181—186 (in Chinese with English abstract).
- Jin, X. M. , Wan, L. , Xue, Z. Q. , et al. , 2008. Research on the Relationship between Vegetation Development and Groundwater in Yinchuan Basin Based on Remote Sensing. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 22(1): 129—132 (in Chinese with English abstract).
- Jin, X. M. , Wan, L. , Zhang, Y. K. , et al. , 2007. A Study of the Relationship between Vegetation Growth and Groundwater in the Yinchuan Plain. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 197—203 (in Chinese with English abstract).
- Kløve, B. , Allan, A. , Bertrand, G. , et al. , 2011. Groundwater Dependent Ecosystems. part II. ecosystem Services and Management in Europe under Risk of Climate Change and Land Use Intensification. *Environmental Science & Policy*, 14(7): 782—793. doi: 10. 1016/j. envsci. 2011. 04. 005
- Liu, G. M. , Wang, G. X. , 2004. Some Issues of Ecological Water Demand in the Arid Regions of China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(5): 650—656 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. P. , Fei, L. J. , Nan, Z. R. , et al. , 2010. Study on Ecological Water Requirement of the Arid Area Oasis Based on the Theory of Ecological Security. *Journal of Hydraulic Engineering*, 41(2): 226—232 (in Chinese with English abstract).
- Loik, M. E. , Breshears, D. D. , Lauenroth, W. K. , et al. , 2004. A Multi-Scale Perspective of Water Pulses in Dryland Ecosystems: Climatology and Ecohydrology of the Western USA. *Oecologia*, 141(2): 269—281.
- Loomes, R. C. , 2000. Identification of Wetland Plant Hydrotypes on the Swan Coastal Plain Western Australia (Dissertation). Edith Cowan University, Perth.
- Lü, J. , Wang, X. S. , Zhou, Y. , et al. , 2013. Groundwater-Dependent Distribution of Vegetation in Hailiutu River Catchment, a Semi-Arid Region in China. *Ecohydrology*, 6(2): 142—149. doi: 10. 1002/eco. 1254
- MacKay, H. , 2006. Protection and Management of Groundwater-Dependent Ecosystems: Emerging Challenges and Potential Approaches for Policy and Management. *Australian Journal of Botany*, 54(2): 231—237. doi: 10. 1071/BT05047
- Mallinis, G. , Koutsias, N. , Tsakiri-Strati, M. , et al. , 2008. Object-Based Classification Using Quickbird Imagery for Delineating Forest Vegetation Polygons in a Mediterranean Test Site. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(2): 237—250. doi: 10. 1016/j. isprsjprs. 2007. 08. 007
- McCarthy, T. S. , Ellery, W. N. , 1994. The Effect of Vegetation on Soil and Ground Water Chemistry and Hydrology of Islands in the Seasonal Swamps of the Okavango Fan, Botswana. *Journal of Hydrology*, 154(1—4): 169—193. doi: 10. 1016/0022—1694(94)90216—X
- Murray, B. R. , Hose, G. C. , Eamus, D. , et al. , 2006. Valuation of Groundwater-Dependent Ecosystems: A Functional Methodology Incorporating Ecosystem Services. *Australian Journal of Botany*, 54(2): 221—229. doi: org/10. 1071/BT05018
- Münch, Z. , Conrad, J. , 2007. Remote Sensing and GIS Based Determination of Groundwater Dependent Ecosystems in the Western Cape, South Africa. *Hydrogeology Journal*, 15(1): 19—28. doi: 10. 1007/s10040—006—0125—1
- O'Grady, A. P. , Eamus, D. , Cook, P. G. , et al. , 2006. Groundwater Use by Riparian Vegetation in the Wet-Dry Tropics of Northern Australia. *Australian Journal of Botany*, 54(2): 145—154. doi: 10. 1071/BT04164
- Orellana, F. , Verma, P. , Loheide, S. P. , et al. , 2012. Monito-

- ring and Modeling Water-Vegetation Interactions in Groundwater-Dependent Ecosystems. *Reviews of Geophysics*, 50(3):1—24. doi:10.1029/2011RG000383
- Rodríguez-Iturbe, I., 2000. Ecohydrology: A Hydrologic Perspective of Climate-Soil-Vegetation Dynamics. *Water Resources Research*, 36(1):3—9. doi:10.1029/1999WR900210
- Rodríguez-Iturbe, I., Porporato, A., 2004. *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Scott, M. L., Shafroth, P. B., Auble, G. T., 1999. Responses of Riparian Cottonwoods to Alluvial Water Table Declines. *Environmental Management*, 23(3):347—358. doi:10.1007/s002679900191
- Shafroth, P. B., Stromberg, J. C., Patten, D. T., 2002. Riparian Vegetation Response to Altered Disturbance and Stress Regimes. *Ecological Applications*, 12(1):107—123. doi:10.1890/1051-0761(2002)012[0107;RVR-TAD]2.0.CO;2
- Shi, Y. F., 1995. The Influence of Climate Change on the Northwest and North China Water Resources. Shandong Science & Technology Press, Jinan (in Chinese).
- Si, J. H., Feng, Q., Xi, H. Y., et al., 2013. Determination of Critical Period and Requirement of Ecological Water Demanded in the Ejina Oasis in Lower Reaches of the Heihe River. *Journal of Desert Research*, 33(2):560—567 (in Chinese with English abstract).
- Simmons, M. T., Archer, S. R., Teague, W. R., et al., 2008. Tree (*Prosopis glandulosa*) Effects on Grass Growth: An Experimental Assessment of above- and below-ground Interactions in a Temperate Savanna. *Journal of Arid Environments*, 72(4):314—325.
- Sun, X. C., Jin, X. M., Wan, L., 2008. Effect of Groundwater on Vegetation Growth in Yinchuan Plain. *Geoscience*, 22(2):321—324 (in Chinese with English abstract).
- Tomlinson, M., Boulton, A. J., 2010. Ecology and Management of Subsurface Groundwater Dependent Ecosystems in Australia—A Review. *Marine and Freshwater Research*, 61(8):936—949. doi:10.1071/MF09267
- Tweed, S., Leblanc, M., Cartwright, I., et al., 2011. Arid Zone Groundwater Recharge and Salinisation Processes: An Example from the Lake Eyre Basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 408(3—4):257—275. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.008
- Verrelst, J., Geerling, G. W., Sykora, K. V., et al., 2009. Mapping of Aggregated Floodplain Plant Communities Using Image Fusion of CASI and LiDAR Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(1):83—94. doi:10.1016/j.jag.2008.09.001
- Wang, F., Liang, R. J., Yang, X. L., et al., 2002a. A Study of Ecological Water Requirements in Northwest China I: Theoretical Analysis. *Journal of Natural Resources*, 17(1):1—8 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Wang, H., Chen, M. J., et al., 2002b. A Study of Ecological Water Requirements in Northwest China II: Application of Remote Sensing and GIS. *Journal of Natural Resources*, 17(2):129—137 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. X., Cheng, G. D., 2002. Water Demand of Ecosystem and Estimate Method in Arid Inland River Basins. *Journal of Desert Research*, 22(2):129—134 (in Chinese with English abstract).
- Wolter, P. T., Johnston, C. A., Niemi, G. J., 2005. Mapping Submergent Aquatic Vegetation in the US Great Lakes Using Quickbird Satellite Data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(23):5255—5274. doi:10.1080/01431160500219208
- Xi, H. Y., Feng, Q., Si, J. H., et al., 2013. Response of NDVI to Groundwater Level Change in the Lower Reaches of the Heihe River, China. *Journal of Desert Research*, 33(2):574—582 (in Chinese with English abstract).
- Xie, T., Liu, X., Sun, T., 2011. The Effects of Groundwater Table and Flood Irrigation Strategies on Soil Water and Salt Dynamics and Reed Water Use in the Yellow River Delta, China. *Ecological Modelling*, 222(2):241—252.
- Xie, Y. C., Sha, Z. Y., Yu, M., 2008. Remote Sensing Imagery in Vegetation Mapping: A Review. *Journal of Plant Ecology*, 1(1):9—23. doi:10.1093/jpe/rtn005
- Xu, H. L., Zhou, A. G., Xiao, G. Q., et al., 2000. Arid Trend and Eco-Environmental Effect of Water-Salt Imbalance in Northwest China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(5):499—504 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X., Smith, P. L., Yu, T., et al., 2011. Estimating Evapotranspiration from Terrestrial Groundwater-Dependent Ecosystems Using Landsat Images. *International Journal of Digital Earth*, 4(2):154—170. doi:10.1080/17538947.2010.491561
- Zencich, S. J., Froend, R. H., Turner, J. V., et al., 2002. Influence of Groundwater Depth on the Seasonal Sources of Water Accessed by Banksia Tree Species on a Shallow, Sandy Coastal Aquifer. *Oecologia*, 131(1):8—19. doi:10.1007/s00442-001-0855-7
- Zhang, J., 2012. Analysis on the Dependency of Salix Psam-

mophila on Groundwater; Experimental Study in the HaiLiutu River Catchment, Ordos Plateau, NW China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Zhang, J., Zhao, Z. H., Wang, D., et al., 2013. The Quantitative Relationship between Vegetations and Groundwater Depth in Shallow Groundwater Area of Ordos Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 27(4): 141—145 (in Chinese with English abstract).

Zhao, W. Z., Liu, H., 2006. Recent Advances in Desert Vegetation Response to Groundwater Table Changes. *Acta Ecologica Sinica*, 26(8): 2702—2708 (in Chinese with English abstract).

Zhou, Y. X., 2010. A Review of Research Methodologies of Groundwater Dependent Terrestrial Vegetations. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 21—30 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

陈斌, 刘茂松, 晨乐本格, 等, 2010. 宁夏干旱区 3 种典型植物群落根系和土壤水分的空间特征. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 34(1): 53—58.

陈伟涛, 2012. 敦煌盆地地下水生态环境效应的遥感研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.

程国栋, 王根绪, 2006. 中国西北地区的干旱与旱灾——变化趋势与对策. *地学前缘*, 13(1): 3—14.

程国栋, 赵传燕, 2006. 西北干旱区生态需水研究. *地球科学进展*, 21(11): 1101—1108.

胡广录, 赵文智, 谢国勋, 2008. 干旱区植被生态需水理论论研究进展. *地球科学进展*, 23(2): 193—200.

金晓媚, 2010. 黑河下游额济纳绿洲荒漠植被与地下水位埋深的定量关系. *地学前缘*, 17(6): 181—186.

金晓媚, 万力, 薛忠歧, 等, 2008. 基于遥感方法的银川盆地植被发育与地下水关系研究. *干旱区资源与环境*, 22(1):

129—132.

金晓媚, 万力, 张幼宽, 等, 2007. 银川平原植被生长与地下水关系研究. *地学前缘*, 14(3): 197—203.

刘桂民, 王根绪, 2004. 我国干旱区生态需水若干问题评述. *冰川冻土*, 26(5): 650—656.

刘金鹏, 费良军, 南忠仁, 等, 2010. 基于生态安全的干旱区绿洲生态需水研究. *水利学报*, 41(2): 226—232.

施雅风, 1995. 气候变化对西北华北水资源的影响. 济南: 山东科学技术出版社.

司建华, 冯起, 席海洋, 等, 2013. 黑河下游额济纳绿洲生态需水关键期及需水量. *中国沙漠*, 33(2): 560—567.

孙宪春, 金晓媚, 万力, 2008. 地下水对银川平原植被生长的影响. *现代地质*, 22(2): 321—324.

王芳, 梁瑞驹, 杨小柳, 等, 2002a. 中国西北地区生态需水研究(1)——干旱半干旱地区生态需水理论分析. *自然资源学报*, 17(1): 1—8.

王芳, 王浩, 陈敏建, 等, 2002b. 中国西北地区生态需水研究(2)——基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析. *自然资源学报*, 17(2): 129—137.

王根绪, 程国栋, 2002. 干旱内陆流域生态需水量及其估算. *中国沙漠*, 22(2): 129—134.

席海洋, 冯起, 司建华, 等, 2013. 黑河下游绿洲 NDVI 对地下水位变化的响应研究. *中国沙漠*, 33(2): 574—582.

徐恒力, 周爱国, 肖国强, 等, 2000. 西北地区干旱化趋势及水盐失衡的生态环境效应. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(5): 499—504.

张俊, 赵振宏, 王冬, 等, 2013. 鄂尔多斯高原地下水浅埋区植被与地下水埋深关系. *干旱区资源与环境*, 27(4): 141—145.

张竞, 2012. 植被对地下水依赖程度的实验研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.

赵文智, 刘鹤, 2006. 荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展. *生态学报*, 26(8): 2702—2708.

周仰效, 2010. 地下水—陆生植被系统研究评述. *地学前缘*, 17(6): 21—30.