

文章编号 1001-8166(2008)02-0193-08

# 干旱区植被生态需水理论研究进展\*

胡广录<sup>1,2</sup>, 赵文智<sup>1\*</sup>, 谢国勋<sup>3</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 甘肃 兰州 730000 2. 甘肃省水利水电学校, 甘肃 兰州 730000 ;  
3. 宁夏盐池县环境保护与林业局, 宁夏 盐池 751500)

**摘要** :综述了植被生态需水的概念及其内涵,评价了植被生态需水的主要研究理论——生态适宜性理论、系统阈值理论、水文循环水量平衡理论、农业气象学理论,评析了各种理论在实践应用中的优缺点。指出在未来的植被生态需水研究中应加强生态体系健康标准建立、定量评价指标体系的数值模拟模型构建,研究中还必须注重植被生态需水的时空特性,充分利用“3S”技术手段和先进的科学试验设备,全方位、多角度获取不同研究区域的基础信息,为建立植被生态需水理论提供可靠的数据支撑。

**关键词** :植被生态需水 ;生态适宜性理论 ;系统阈值理论 ;水文循环水量平衡理论  
**中图分类号** :X171.1 ;S154.4 **文献标识码** :A

## 1 引言

植被是组成生态系统生物部分中最基本的成分,是自然环境最直观的反映<sup>[1]</sup>。水是一种特殊的资源,它既是国民经济的命脉,又是维持地球生态系统平衡的重要因素<sup>[2]</sup>。要维持良好的生态环境,必须保护和建设好植物群落,而其正常生长和更新必然会消耗一定的水量。但随着世界人口的膨胀、工农业和生活用水的增加,用水部门之间对水资源的竞争不断升级,严重地挤占了生态环境用水,使植物群落生长发育、演替更新过程所必需消耗的水量受到限制,造成了包括植被衰退在内的各种生态退化和环境恶化现象,这种现象已引起了各国政府的高度重视。1992年6月,世界环境与发展大会强调植被在维护生态环境稳定方面具有不可替代的作用。因此人类社会可持续发展的前提是必须优先满足植被生态系统需水要求。近年来植被的生态需水问题

已成为国内外人们关注的热点,许多专家学者从不同的方向和层面对植被生态需水的理论机制开展广泛研究,取得了重要进展。本文在阅读大量相关文献的基础上,综述了干旱区植被生态需水理论的研究成果,并展望了未来的研究趋势。

## 2 植被生态需水的概念、内涵

生态需水最早源于美国20世纪40年代为了维持河道内鱼类生存而开展的河道基流(Base flow)研究,之后发展到河岸带(Riverine)生态需水研究,直到现在开展的流域尺度、区域尺度上生态需水研究<sup>[3]</sup>。Gleick 1995年最先提出了基本生态需水量的概念,即提供一定质量和数量的水维持生态环境,以求最大程度地恢复天然生态系统的过程,并保护物种多样性和生态完整性。国内生态需水的研究最早是从20世纪90年代开始,主要是针对北方干旱半干旱缺水地区展开的。很多学者围绕生态需水量

\* 收稿日期 2007-10-15 ;修回日期 2007-12-24.

\* 基金项目 :中国科学院知识创新工程方向性项目“黑河流域水循环与水资源管理研究”(编号 KZCX2-XB2-04-01)资助.

作者简介 :胡广录(1966-),男,甘肃靖远人,高级讲师,在读博士,主要从事生态水文、水土保持方面的研究和教学工作.

E-mail: hg10814@163.com

\* 通讯作者 :赵文智(1966-),男,陕西定边人,研究员,博士生导师,主要从事干旱区生态水文研究. E-mail: zhaowzhi@lzb.ac.cn

的概念和估算开展了大量研究工作,取得了不少科研成果,并且出现了许多生态需水量的概念,但概括起来主要有侧重水文学、侧重环境学和侧重生态学特别是植物生态学等三方面的概念<sup>[4~6]</sup>。植被是生态系统不可缺少的部分,在维持生态平衡中起着非常重要的作用。特别在人口增加,水资源日益短缺的干旱区,有限的水资源很难维持河流的基流,因此干旱区的生态需水主要是指维持天然绿洲和人工绿洲防护体系稳定生长的耗水量,这种生态需水的概念侧重生态学方面<sup>[7]</sup>,所以这种生态需水应该是植被生态需水。植被生态需水是生态需水研究的重要内容之一,也成为植被生态恢复和重建研究领域的热点问题。关于植被生态需水,许多专家学者由于研究的出发点和对象不同,提出的概念及其内涵理解也有所不同。黄奕龙等<sup>[8]</sup>将植被生态需水定义为在特定的尺度和环境标准下,维持植被正常生长(或维持植被生态系统健康)所需要的水量。王芳等<sup>[9]</sup>分析了我国西北地区的生态环境特点,认为植被生态需水是指为维持生态系统的稳定、天然生态保护与人工生态建设所消耗的水量。闵庆文等<sup>[10]</sup>认为植被生态需水是指在其它因素不受限制的条件下,维持植被正常生长(或维持植被生态系统健康)所需要的水量,并指出气候条件、土壤含水量以及林木种类是影响植被蒸散耗水的3个最重要的因子。张远等<sup>[11]</sup>认为林地生态需水量是林地生态系统为维持自身生长、发挥生态功能所需要消耗和占用的水资源量,包括林地蒸散量和土壤含水量两种形式。何永涛等<sup>[12]</sup>认为植被生态需水就是指为了保证植被能够正常生长、发育,或植被生态系统健康维持并确保其生态服务功能得到正常发挥而必须消耗的一部分水量。

不同的研究目的也使对植被生态需水量的分类方法不同。赵文智<sup>[13]</sup>提出干旱区植被生态需水量可划分为临界生态需水量、最适生态需水量和饱和生态需水量。并指出植被需水量的计算应从土壤水分状况、植物生长模型、植物蒸腾等三方面综合考虑,而且还应考虑个体、群体和生态系统间尺度转换的问题。夏军等<sup>[14]</sup>认为干旱区植被生态环境需水量不仅包括维持林地、草场,还应包括维持农田生态系统良性发展对水需求的最小水资源量。梁瑞驹<sup>[15]</sup>将植被生态需水分为植被的可控生态需水和植被的不可控生态需水。提出了充分利用土地利用图及水资源方面的近期成果和经典的植物生态理论来定量估算生态需水的方法,并对西北地区的植被

生态需水量进行了定量估算。

从以上学者的观点,可以看出对于植被生态需水迄今为止还没有一个明确统一的定义,因而使得使用者在概念的内涵和外延理解上尚有一些差异,导致了目前的文献报道中针对同一地区的植被生态需水计算存在差别,有的差别达1~2个数量级。本文认为植被生态需水应该是指保证生态系统中的植被能够正常生长、发育,维护生态环境不再进一步恶化并逐渐改善、健康运行所需要的地表水和地下水资源总量。对于干旱区而言,植被对水分具有很强的依赖性,有水是绿洲,无水便是荒漠。可以根据研究区域的生态类型、植被特点,将研究对象限定在依靠山区形成的径流和由径流转化的地下水而生存的绿洲生态系统,并划分为天然绿洲植被生态需水和人工绿洲植被生态需水。

### 3 植被生态需水的基本理论

#### 3.1 生态适宜性理论

生态适宜性理论指出<sup>[16]</sup>:任一生物种的个数随某个环境因子的变化而变化,生物种的个数达到最大值时对应的环境因子值称为该物种的最适值,物种在其最适环境中生长最好,生殖最快;随着环境因子偏离最适值,该类物种虽然可以生长,但其生殖已经受到胁迫;当环境因子继续偏离最适值,达到该物种能够存活的上下极限环境时,该物种就不再生长,个数减少,直到消失。

干旱区天然植被的分布是自然条件变化规律的最直接、最准确的反应<sup>[17]</sup>。在长期的进化与自然选择过程中,生长在干旱区的植物形成了独特的适应大气干旱与土壤干旱的机制,适应了依靠地下水毛细管上升补充水源的状态。如果仅依赖地下水毛细管上升来补充水分,远远不足以维持其自身生长需水<sup>[18]</sup>。因此有学者研究干旱植物的生物学特征后认为,干旱区植物特殊的吸收水分方式以及部分植物具有水力提升功能和逆水力提升功能,是适应干旱区水文过程、维持干旱区生态系统稳定的关键机制<sup>[13]</sup>。另外,为了适应荒漠环境,也具有许多生理结构上的变化<sup>[19]</sup>。

尽管植物为了适应干旱区环境,形成了各具特色的生态生理机制,但影响干旱区植物生长发育的因素很多,研究表明主要因素是水分和土壤盐分<sup>[20]</sup>。干旱区降水稀少,不足以维持其生态系统特别是非地带性天然植被组成的系统的正常运转,维持天然植被生态系统的水分主要是地下水。土壤盐

分对植物生长的影响也与地下水位高低有关。当地下水位过高时,溶于地下水中的盐分受蒸发的影响就会在土壤表层聚集,导致盐渍化,不利于植物的生长。当地下水位过低时,地下水不能通过毛细管上升到植物可以吸收利用的程度,导致土壤干化、植被衰败、发生土地荒漠化。张丽等<sup>[21]</sup>在对黑河流域下游天然植被生态需水的机理研究后认为:干旱区植被盖度、出现频率与地下水埋深存在一定的关系。在植被适宜地下水埋深附近,植被生长发育良好,出现频率和相应的植被盖度高;植被长势受水分亏缺或土壤盐渍化的影响,生长发育相对较差,出现频率和相应的盖度低。并依据生态适宜性理论,建立了植物生长与地下水位关系的对数正态分布模型,应用此模型计算了额济纳旗不同植被群落、不同盖度、不同地下水埋深的植物蒸腾和潜水蒸发,从而求出该区的植被生态需水量,计算成果与其他成果比较误差较小。王芳<sup>[9]</sup>利用植物种和环境间关系最具代表性的高斯模型,研究了新疆塔里木河干流区几种植物出现频率峰值时所对应的地下水埋深。以胡杨林植被为例,夏军<sup>[14]</sup>分析了西北干旱区流域生态环境质量与水的需求关系后认为:当地下水埋深大到6 m以上,由于没有水的供养,胡杨林群落生存能力接近于零;当地下水埋深大到9~10 m后,胡杨林群落已经死亡。因此,保持地下水埋深不大于6 m所对应的水资源量,可以视为胡杨林群落生存的最小生态需求水量。

由此可见,地下水埋深是干旱区天然植被生长的主要环境因子。许多学者<sup>[10, 12, 18, 20, 22~24]</sup>便利用干旱区植物生存、生长所必需的合理地下水埋深,计算植被在地下水位某一埋深时的潜水蒸发量,进而间接推算植被的生态需水。干旱区非地带性天然植被生长需要的地下水埋藏深度就是生态水位。间接计算法中植被生态水位的确定比较困难,目前已采用遥感数据分析流域地下水与植被生长、植物种群演替、植被覆盖度的关系,确定其适宜的生态水位,但这些研究还不成熟,仅仅为半定量描述方法,尚需要进一步加强研究。

### 3.2 系统阈值理论

系统是由相互作用和相互依赖的若干要素结合而成的、具有特定功能的有机整体。要素之间的相互作用存在着合理的区间或阈值。阈值(threshold)又称临界值,可以理解为一些累积过程的上限或者事物发生质变的界限或转折点<sup>[25]</sup>;系统稳定的阈值规定了系统稳定的安全范围。

许新宜等<sup>[26]</sup>认为生态系统由于长期受外界干预,特别是受人类经济活动的过度干预,其环境条件的变化在积累到一定程度时,也会发生系统组成、系统结构和系统功能的突变。因而称导致生态系统突变的条件为系统突变的临界条件,而称临近突变的生态系统处于生态临界。同时生物生态学理论指出,生态系统本身具有一定的自我调节和自我缓冲性,处于“生态临界”的生态系统都具有一定的“生态阈值”,即只有扰动超越了其上限或下限,生态系统才能自控而产生恶变或崩溃。也就是生态平衡概念中所指出的:“当外来干扰超越生态系统自我调节能力,而不能恢复到原初状态时谓之生态失调,或生态平衡的破坏”<sup>[27]</sup>。

对于一个流域的生态系统整体而言,其生态需水量应存在一个最小的临界值,当用水量低于此标准时,会导致流域生态系统整体被破坏或退化;同时,也应存在一个用水的最优值使流域整体生态健康状况达到最佳水平<sup>[28~30]</sup>。可见,生态系统健康与生态需水量有着密切的联系。值得注意的是,流域整体健康状况的好坏与各生态系统之间不是完全对应的,可能下游地区生态系统已被完全破坏,而中上游的生态系统健康状况却保持良好,流域整体的健康状况要在对流域内各生态子系统健康状况进行综合评价的基础上给出。有学者<sup>[31, 32]</sup>也认为对于任何一个生态系统,其生态环境需水量都存在一个上下限。如果可供利用的水资源过少即低于下限,那么将不能满足生物群体基本生长或存活的需求,生态系统将退化甚至消亡;如果可供利用的水资源过多即高于上限,也必将危及生态系统的健康;只有可供利用的水资源满足并达到最佳生态需水量时,生态系统的生产潜力将得以最大限度的发挥。

系统阈值理论强调的是:只要其中一项因子的量(或质)不足或过多,超过了某种生物的耐性限度,该物种便不能生存,甚至灭绝。植被是构成生态系统的主要因子之一,有耐受性特点,植被生态需水具有耐性限度。当然不同的植被生态系统对水量水质的耐性限度是不同的,相应的生态需水的阈值也会不同。但对于某一确定的植被生态系统,生态需水阈值是基本确定的。丰华丽等<sup>[33]</sup>认为估算植被生态需水时也需要考虑阈值原则,并指出植被生态需水量并不是一个恒定的值,而应该存在一个阈值区间 $[W_{min}, W_{opti}, W_{max}]$ ,其中 $W_{min}$ 、 $W_{opti}$ 、 $W_{max}$ 分别对应着植被的最小生态需水量、最适生态需水量和最大生态需水量。王根绪<sup>[34]</sup>则认为植被生态需水量

存在不同考虑角度的生态需水量分类,即存在植被生态系统现状、恢复、保护与建设等不同条件下的生态需水量,而且,就同一条件下的生态适宜需水量也应该是一个区间,而不是固定常量。

我国北方干旱半干旱地区,水资源短缺,植被退化,生态环境恶劣,对植被生态需水的研究显得尤其重要。所以从恢复和重建生态环境的目的出发,有学者<sup>[12]</sup>认为恢复和重建植被生态系统也需要考虑不同生态环境保护目标下的植被生态系统需水量及其需水阈值,即能满足植被生态系统基本生长需求的最小生态需水量,以及使其生长达到不同目标的适宜生态需水量。

总之,植被生态需水量应该是在特定时空条件下,在阈值区间的动态变化值。而最小生态需水量是指为了保证特定发展阶段的植被生态系统结构稳定,保护生物多样性以及确保生态系统功能正常发挥所必需的一定质量的最小水量。但目前缺乏必要的植被耐性监测手段,植被健康的指示指标不完善和健全,不能更好地确定某植被生态系统的阈值区间,未来需要进一步加强这方面的研究。

### 3.3 水文循环、水量平衡理论

流域上降水、蒸发、入渗和河川径流等是具有可更新变化的过程,称之为自然界的水文循环。水文循环深刻地影响着全球生态系统结构和演变,包括自然界中一系列的物理、化学、生物过程,以及人类社会的生存、发展和生产活动等<sup>[35]</sup>。同时人类活动也在极大地改变着水文循环过程及生物圈水资源的分配,使地球淡水生物圈处于极度危险状态。研究表明人类活动引起陆地下垫面的变化,使原来地表的产汇流、蒸发数量及过程也发生变化,从而也影响了整个水文系统的循环和平衡。但对于一定时期、一定环境条件下的生态系统,系统的水文循环过程仍然遵循水量平衡的原理。根据生态系统的水分循环过程,通常可得出生态系统的水量平衡关系为<sup>[31]</sup>:

$$P + R_{in} + G_{int} + S_{int} + V_{int} = E + R_{out} + G_{end} + S_{end} + V_{end} \quad (1)$$

或

$$P = E + R + G + S + V \quad (2)$$

式中: $P$ 为降水量; $E$ 为蒸散发量; $R_{in}$ 、 $R_{out}$ 分别为入境水量和出境水量; $G_{int}$ 、 $G_{end}$ 分别为初始和结束时的地下水量; $S_{int}$ 、 $S_{end}$ 分别为初始和结束时的土壤水含量; $V_{int}$ 、 $V_{end}$ 分别为生物体内时段前后的水量; $R$ 、 $G$ 、 $S$ 和 $V$ 则分别为出入境水量之差、地下水

变量、土壤水变量以及生物体内的水分变量。

必须指出,对于不同地理环境的生态系统,其水量平衡的关系总体上遵循式(1)和式(2)的规律,但具体表现形式则有所不同。如在无人干扰的情况下,流域水文循环主要包括降水、冠层截留、径流、下渗、蒸发等几个环节。在“四水”(大气水、地表水、土壤水和地下水)的基础上,可以建立陆地植被生态系统的水量平衡关系,其平衡关系如下<sup>[36]</sup>:

$$ET = W_t + P - R - W_{t+1} \quad (3)$$

式中: $W_{t+1}$ 为 $t$ 时段末期土壤含水量; $W_t$ 为 $t$ 时段初期土壤含水量; $P$ 为该时段降水量; $R$ 为该时段内径流量(地表径流和地下径流); $ET$ 为该时段蒸发量(包括植被蒸腾和土壤蒸发等),即为植被的生态需水量。

有学者<sup>[15, 37, 38]</sup>研究干旱内陆河流域水资源的分配利用后认为:内陆河流域总降水量中大约有50%消耗在山区以维持山区植被的生长,15%~30%的降水用于维持平原区地带性荒漠植被生长,20%~35%形成径流用于维持绿洲生态和经济发展。但对于闭合的内陆河流域而言,同样水资源是保持平衡的,故可利用水量平衡原理进行流域植被生态需水量的具体计算。

水量平衡法是早期生态需水量计算最常用的手段,比较适合中小闭合流域生态环境需水的计算。它是通过分析水资源的输入、输出和储存量之间的关系,间接地求取生态系统的需水量,其原理成熟、方法简单。也是区域较大尺度上,当生态系统本身的观测数据缺乏或不足时常采用的方法之一。目前该法在我国塔里木河、黑河、泾河、辽河、海河等流域都有具体实际的应用案例。水量平衡法计算的是天然生态系统实际获得的水资源量,是以生态系统的用水来替代需水,不是从生态系统结构和功能对水分需求的角度来计算生态需水,因此也有不合理的一面。但现阶段对土壤—植被—大气连续体(SPAC)与地下水结合(GSPAC)的研究不断深入,正成为植被生态需水研究新的突破口<sup>[34]</sup>。在GSPAC中,环境条件的不同,植被类型以及个体发育阶段的差异,制约着水分循环与转化的效率,所以用GSPAC模型对植被生态需水的水平和程度进行研究,具有更实际的意义。

### 3.4 农业气象学原理

作为研究农业生产与气象条件相互关系及其规律的科学,农业气象学的主要任务就是研究农业生产过程中的耗水规律及其影响因素与调控措施。农

业生产过程的耗水包括3部分:一是同化需水,二是蒸腾耗水,三是蒸发与渗漏耗水。其中前两项为植物生理过程所必需的水分,称为生理需水,最后一项为非植物生理过程所必需,但却是植物生长的环境条件所需要,称为生态需水<sup>[39]</sup>。但在实际情况下,考虑到第一项所占比例很小(仅占0.15%~0.20%)以及许多地方渗漏量较小,多以植物的蒸腾耗水与土壤蒸发耗水作为该植被生态系统的需水量。即农田生态需水量为农田植物群体蒸腾量和土壤蒸发量之和,数值上等于农田的实际蒸散量<sup>[40]</sup>。根据上述理论,任一生态系统的植物在其生长发育的过程中要消耗大量的水分来维持其生存和繁衍,而植被的生态需水量主要是植物的蒸腾作用所消耗,同时土壤蒸发也消耗大量的水分。因此,依赖农业气象学中关于植被蒸散的理论,本文认为林地的生态需水量就可以通过直接计算植被的蒸散发耗水量来确定。

林地实际蒸散量受大气环境、植物生态特性与生长状况以及土壤水分条件的综合影响,一般可以下式进行计算<sup>[10,32]</sup>:

$$ET = ET_0 K_s K_c \quad (4)$$

式中:ET为林地植物实际蒸散量(mm/d); $ET_0$ 为林地植物潜在蒸散量(mm/d); $K_s$ 为土壤影响因素; $K_c$ 为植物系数,随植物种类、生长发育阶段而异,生育初期和末期较小,中期较大,接近或大于1.0,一般通过试验取得。

潜在蒸散量 $ET_0$ ,只与当地的气候条件有关。可以通过气象资料,利用改进后的彭曼(Penman)公式计算。Penman公式是能量(热量)平衡方程和空气动力学方法相结合的半经验蒸散计算公式,虽不能准确估算1d和1h的潜在蒸散,但能比较准确估算较长时间(月或年)的蒸散数值<sup>[41]</sup>。

$K_s$ 与土壤质地和土壤含水量有关:土壤含水量低于土壤临界含水量( $s_c$ ),即土壤水分供应不充足时,植物的气孔开始关闭,水分的蒸腾速度开始降低,此时,土壤水分含量就成为林木实际蒸散量的主要限制因素。而根据土壤水分有效性的划分,林木暂时凋萎含水量( $s_s$ )和生长阻滞含水量( $s_r$ )基本能保证林木生存和正常生长时的土壤含水量下限<sup>[42]</sup>。因此,可以将这两种情况下的林地耗水量,分别作为最小生态需水定额和适宜生态需水定额。

利用植被蒸散理论间接计算植被生态需水量的方法比较成熟,计算成果相对精确,应用范围主要为基础条件较好、观测设备较完善的天然和人工植被

生态系统。对于荒漠地区的非地带性天然植被生态系统缺乏长期气象观测资料,鲜见充分的研究成果报道。未来应在这一地区开展大量观测工作,积累长序列资料,为准确计算植被生态需水量提供数据支撑。

## 4 展 望

目前植被生态需水的概念及其研究的理论体系尚不完善和统一,这就使植被生态需水研究面临许多新的问题和挑战,要求人们对生态环境质量的评价和水资源管理的问题重新认识,并达成共识。即人类对淡水资源的评价和开发利用规划,必须将陆地生态系统和环境质量维持的需水量纳入到人类社会水资源利用的整体中,需要建立基于这种考虑的全新的植被生态需水理论体系。也就是说维护植被生态系统的良性循环必须重视对水资源的合理开发与保护,充分考虑生态环境需水和水资源的永续利用。基于此本文提出以下几点加强植被生态需水理论研究的建议。

(1) 加强生态环境质量评价、水资源保护利用、生态体系健康标准的研究。建立适合不同类型生态系统的,可行、易操作的生态环境质量评判标准和评价方法,需要依靠大量的野外调查、生态实验和观测来提供可靠数据支持。目前这方面的研究相对薄弱,急需加强生态数据库建设,补充研究必须的基础数据,才能确立生态环境质量评价的具体内容,规范评价的标准体系和方法。植被生态需水、生物多样性、生境多样性和生态系统健康状况关系十分密切,如果在生态系统健康状况(疾病临界点)与植物适应不同生境的最小、最大生态需水量之间建立起临界对应关系,即确定植被系统最小—疾病临界点和最大—疾病临界点之间的范围,就可以确定植被对水分需求的耐性区间,进而可以合理地配置水资源,服务生态环境建设。对生态系统健康状况的评价当前定性描述的多,定量评价指标的标准和计算还有一定的难度,这应是未来加强研究的主要方向之一。

(2) 注重植被生态需水时空特性的研究。目前生态环境需水研究大都是针对一定空间范围而言的,没有具体到某一时间段,这就是同一区域往往由于专家学者的研究目的、研究对象、研究方法不同,所选用的本底资料背景不同,计算得到的生态需水量缺乏可比性的原因之所在。所以未来研究植被生态需水问题必须考虑时空特性,考虑植被的生长季节、生长特性以及分布区域的下垫面要素,只有这样

才能客观真实地评价某一植被生态系统在特定时空条件下的需水要求。

(3) 注重区域生态需水量基础数据库的建设。“3S”技术能够提供及时的、动态的、不同分辨率的遥感影像数据,对提取区域的水资源变化、植被NDVI指数、地表覆盖度、土壤类型、土地利用现状等基础信息非常有利,先进的科学试验设备可使数据获取的手段和数据的精度进一步提高和完善。未来研究中应当充分利用现代“3S”技术和先进的科学试验设备,全方位、多角度提取研究区域长序列的基本信息,以保证构建植被生态需水理论的科学性、合理性。

(4) 加强数值模拟模型的研究。根据不同研究区域,不同生态运行机制,结合人口、经济的发展规模,构建用于植被生态需水量计算的数值模拟模型。既可以确定不同气候条件、不同社会经济状况、不同水资源供给组合情境下的植被生态需水量,还可以模拟不同尺度下的需水量变化,这对创新植被生态需水理论具有重要意义。

#### 参考文献(References):

- [1] Zheng Dongyan, Xia Jun, Huang Youbo, et al. Discussion on research of ecological water demand [J]. *International Journal Hydroelectric Energy* 2002, 20(3): 3-6. [郑冬燕, 夏军, 黄友波, 等. 生态需水量估算问题的初步探讨[J]. 水电能源科学, 2002, 20(3): 3-6.]
- [2] Tang Jie, She Xiaoyun, Lin Nianfeng, et al. Advances in researches on the theories and methods of eco-environmental water demand [J]. *Scientia Geographica Sinica* 2005, 25(3): 367-373. [汤洁, 佘孝云, 林年丰, 等. 生态环境需水的理论和方法研究进展[J]. 地理科学 2005, 25(3): 367-373.]
- [3] Yan Denghua, He Yan, Wang Hao, et al. Review of effect of the ecohydrological process on water environment [J]. *Advances in Water Science* 2005, 16(5): 747-752. [严登华, 何岩, 王浩, 等. 生态水文过程对水环境影响研究述评[J]. 水科学进展 2005, 16(5): 747-752.]
- [4] Tang Qicheng. The development in oases and rational use of water resource [J]. *Journal of Land Resource and Environment* 1995, 9(3): 107-111. [汤奇成. 绿洲的发展与水资源的合理利用[J]. 干旱区资源与环境 1995, 9(3): 107-111.]
- [5] Jia Baoquan, Xu Yingqin. The conception of the eco-environmental water demand and its classification in arid land—Taking Xinjiang as an example [J]. *Arid Land Geography* 1998, 21(2): 8-12. [贾宝全, 许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类[J]. 干旱区地理 1998, 21(2): 8-10.]
- [6] Liu Changming, Chen Yongqin, Li Lijuan, et al. 21 Century New Problem, Technology, Method of Hydrological Science in China [M]. Beijing: Science Press 2001. [刘昌明, 陈永勤, 李丽娟, 等. 21 世纪中国水文科学研究的新问题新技术和新方法[M]. 北京: 科学出版社 2001.]
- [7] Zhao Wenzhi, Chang Xueli, He Zhibin, et al. Study on ecological water requirement of desert oasis vegetation in Ejina area [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 36(6): 559-566. [赵文智, 常学礼, 何志斌, 等. 额济纳荒漠绿洲植被生态需水量研究[J]. 中国科学 D 辑 2006, 36(6): 559-566.]
- [8] Huang Yilong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. Assessment on vegetation ecological water consumption in gully catchments of loess plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 2005, 19(2): 152-155. [黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域植被生态用水评价[J]. 水土保持学报 2005, 19(2): 152-155.]
- [9] Wang Fang, Liang Ruiju, Yang Xiaoliu, et al. A study of ecological water requirements in Northwest China Part I: Theoretical analysis [J]. *Journal of Natural Resources* 2002, 17(1): 1-8. [王芳, 梁瑞驹, 杨小柳, 等. 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[J]. 自然资源学报 2002, 17(1): 1-8.]
- [10] Min Qingwen, He Yongtao, Li Wenhua, et al. Estimation of forests' ecological water requirement based on agro meteorology: Taking Jinghe watershed as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2004, 24(10): 2131-2135. [闵庆文, 何永涛, 李文华, 等. 基于农业气象学原理的林地生态需水量估算[J]. 生态学报 2004, 24(10): 2131-2135.]
- [11] Zhang Yuan, Yang Zhifeng. Minimum ecological water requirement of forestland in Huang-huai-hai Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 2002, 16(2): 72-75. [张远, 杨志峰. 黄淮海地区林地最小生态需水量研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 72-75.]
- [12] He Yongtao, Min Qingwen, Li Wenhua, et al. Progress and perspectives on ecological water requirement of vegetation [J]. *Resources Science*, 2005, 27(4): 8-12. [何永涛, 闵庆文, 李文华. 植被生态需水研究进展及展望[J]. 资源科学 2005, 27(4): 8-12.]
- [13] Zhao Wenzhi, Cheng Guodong. Review of some problems of the ecohydrological process in arid area [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(22): 1851-1857. [赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1851-1857.]
- [14] Xia Jun, Zheng Dongyan, Liu Qinge, et al. Study on evaluation of eco-water demand in northwest china [J]. *Hydrology*, 2002, 22(5): 12-17. [夏军, 郑冬燕, 刘青娥, 等. 西北地区生态环境需水估算的几个问题探讨[J]. 水文 2002, 22(5): 12-17.]
- [15] Liang Ruiju, Wang Fang, et al. Ecological water demand in northwest China [C]. China Water Resources Institute 2000 Learning annual Meeting Study Corpus 2001, 71-76. [梁瑞驹, 王芳, 等. 中国西北地区的生态需水[C]. 中国水利学会 2000 年学术年会论文集 2001, 71-76.]
- [16] Mackenzie A, Ball A S, Virdee S R. Instant Notes in Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2002, 11-17.
- [17] Cheng Guodong, Zhao Chuanyan. Study on ecological water demand in arid area of Northwestern China [J]. *Advances in Earth*

- Science 2006 21(11) :101-108.[程国栋,赵传燕.西北干旱区生态需水研究[J].地球科学进展,2006,21(11):101-108.]
- [18] Zuo Qiting. Study on vegetation ecological use for water resources in arid and semiarid region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(3):114-117.[左其亭.干旱半干旱地区植被生态用水计算[J].水土保持学报,2002,16(3):114-117.]
- [19] Cheng Huanhuan, Rao Biyu. Review of eco-environmental water demand [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(3):43-46.[成换换,饶碧玉.生态环境需水量研究综述[J].水资源保护,2006,22(3):43-46.]
- [20] Zhang Li, Dong Zengchuan, Zhao Bin. Method for estimating ecological water requirement of natural vegetation in arid area [J]. Advances in Water Science 2003, 14(6):745-748.[张丽,董增川,赵斌.干旱区天然植被生态需水量计算方法[J].水科学进展,2003,14(6):745-748.]
- [21] Zhang Li, Dong Zengchuan. A study on ecology water requirement and its prediction of natural vegetation in the Lower Heihe River Basin [J]. Water Resources Planning and Design 2005, 2:44-48.[张丽,董增川.黑河流域下游天然植被生态需水及其预测研究[J].水利规划与设计,2005,2:44-48.]
- [22] Bao W eifeng, Huang Jiesheng, Yu Fuliang. Research on calculation methods of ecological water requirement for region [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2005, 19(5):139-142.[鲍卫锋,黄介生,于福亮.区域生态需水量计算方法研究[J].水土保持学报,2005,19(5):139-142.]
- [23] Si Jianhua, Gong Jiadong, Zhang Bo. The primary estimation of water demand for the eco-environment in arid regions [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment 2004, 18(1):49-53.[司建华,龚家栋,张勃.干旱地区生态需水量的初步估算——以张掖地区为例[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):49-53.]
- [24] Wang Genxu, Cheng Guodong. Water demand of ecosystem and estimate method in arid inland river basin [J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(2):129-134.[王根绪,程国栋.干旱内陆流域生态需水量及其估算——以黑河流域为例[J].中国沙漠,2002,22(2):129-134.]
- [25] Chen Shaofeng, Niu W enyuan, Yang Duogui. The multiple-dimensional threshold sin sustainable development [J]. China Population, Resources and Environment, 2001, 11(1):25-29.[陈劭锋,牛文元,杨多贵.可持续发展的多维临界[J].中国人口·资源与环境,2001,11(1):25-29.]
- [26] Xu Xinyi, Yang Zhifeng. On ecological water demand [J]. Water Resources Planning and Design 2003, (1):21-26.[许新宜,杨志峰.试论生态环境需水量[J].水利规划与设计,2003,(1):21-26.]
- [27] Chen Y X. Environmentology [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- [28] Su Xiaoling, Kang Shaozhong. Concept of ecological water requirement and its estimation method [J]. Advances in Water Science 2003, 14(6):740-744.[粟晓玲,康绍忠.生态需水的概念及其计算方法[J].水科学进展,2003,14(6):740-744.]
- [29] Yang Zhifeng, Cui Baoshan, Liu Jingling. On estimate method of eco-environmental water demand and example [J]. Science in China (Series D) 2004, 34(11):072-082.[杨志峰,崔宝山,刘静玲.生态环境需水量评估方法与例证[J].中国科学:D辑,2004,34(11):072-082.]
- [30] Feng Huali, Xia Jun, Che Zhansheng. Advances on ecological and environmental water requirement research [J]. Progress in Geography 2003, 22(6):591-598.[丰华丽,夏军,车占生.生态环境需水研究现状和展望[J].地理科学进展,2003,22(6):591-598.]
- [31] Zheng Hongxing, Liu Changming, Feng Huali. On concepts of ecological water demand [J]. Advances in Water Science 2004, 15(5):626-633.[郑红星,刘昌明,丰华丽.生态需水的理论内涵探讨[J].水科学进展,2004,15(5):626-633.]
- [32] Wei Guo, He Junshi, Wu Liqiang. Research on the calculating method eco-environmental water demand [J]. Journal of Anhui Agriculture Science 2006, 34(17):386-388.[魏国,何俊仕,武立强.生态环境需水计算方法研究[J].安徽农业科学,2006,34(17):386-388.]
- [33] Feng Huali, Zheng Hongxing, Cao Yang. On theories and methodologies of ecological water demand estimation [J]. Journal of Nanjing Xiaozhuang College 2005, 21(5):50-55.[丰华丽,郑红星,曹阳.生态需水计算的理论基础和方法探析[J].南京晓庄学院学报,2005,21(5):50-55.]
- [34] Wang Genxu, Liu Guimin, Chang Juan. Review on some issues of ecohydrology research at the watershed scale [J]. Acta Ecologica Sinica 2005, 25(4):892-903.[王根绪,刘桂民,常娟.流域尺度生态水文研究评述[J].生态学报,2005,25(4):892-903.]
- [35] Liu Changming. The Strategic Research on Water Resources Scheme Eco-environment Construct and Sustainable Development in Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2004:125-140.[刘昌明主编.西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[M].北京:科学出版社,2004:125-140.]
- [36] Liu Lei, Xia Jun, Feng Huali. Preliminary discussion on the ecological water demand of terre system [J]. Chinese Rural Water Conservancy and Hydro-Electricity 2005, (2):32-34.[刘蕾,夏军,丰华丽.陆地系统生态需水量计算方法初探[J].中国农村水利水电,2005,(2):32-34.]
- [37] Wang Fang, Wang Hao, Chen Minjian, et al. A study of ecological water requirements in Northwest China Part II: Application of remote sensing and GIS [J]. Journal of Natural Resources 2002, 17(2):129-137.[王芳,王浩,陈敏建,等.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[J].自然资源学报,2002,17(2):129-137.]
- [38] Dai Fenggang, Cai Huanjie, Zhang Xin, et al. Analysis of ecological water demands in arid inland river basins in Northwest China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(3):148-153.[代锋刚,蔡焕杰,张鑫,等.西北干旱内陆河流域生态需水量理论初探[J].干旱地区农业研究,2004,22

- (3) 148-153.]
- [39] Feng Xiuzao, Tao Bingyan, et al. A Principle of Agro-meteorology [M]. Beijing: Meteorology Press, 1991. [冯秀藻, 陶炳炎等编. 农业气象学原理[M]. 北京: 气象出版社, 1991.]
- [40] Han Xiangling. Agro Climatology [M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1999. [韩湘玲主编. 农业气候学[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1999.]
- [41] Zhang Jinsong, Meng Ping, Yin Changjun. Review on methods of estimating evapotranspiration of plants [J]. World Forestry Research, 2001, 14(2): 23-27. [张劲松, 孟平, 尹昌君. 植物蒸散耗水量计算方法综述[J]. 世界林业研究, 2001, 14(2): 23-27.]
- [42] Yang Wenzhi, Shao Mingan. A Study of Soil Moisture in Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2000: 67-85. [杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 67-85.]

## Advances on Theories of Ecological Water Requirements of Vegetation in Arid Area

HU Guanglu<sup>1,2</sup>, ZHAO Wenzhi<sup>1</sup>, XIE Guoxun<sup>3</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Linze Inland River Basin Research Station CERN, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Provincial Province Water Conservancy and Hydropower School, Lanzhou 730000, China; 3. Environmental Protection and Forestry of Yanchi County of Ningxia, Yanchi 751500, China)

**Abstract:** Based on a synthesis of the literatures on Ecological water requirement of vegetation (EW RV), the conceptions and meanings of EW RV were systematically reviewed in this paper. The Ecological appropriate theory, the system threshold theory, the water cycle-balance theory and the agro-meteorology theory were introduced in detail at the beginning of the paper, and then their corresponding advantages and disadvantages in the practical application were also examined. It was also pointed out that researches about healthy standards of ecological system; multidisciplinary research; numerical simulation model of EW RV in quantitative evaluated index system should be intensified in the future. At the same time, future research will be focused on spatial-temporal characteristic of EW RV. In order to provide a great deal of reliable data for the theory research of EW RV, the basic databases of different regions must be obtained at various orientations and angles by using "3S" technology and advanced equipment.

**Key words:** Ecological water requirement; Vegetation; The ecological appropriate theory; The system threshold theory; The water cycle-balance theory.