

干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述

胡广录, 赵文智*

(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, 兰州 730000)

摘要: 植被是生态系统的重要组成部分, 在维持生态系统的平衡和稳定中起着重要的作用。对植被生态需水研究已成为水资源优化配置和生态环境建设研究中的热点问题。在综合分析有关研究文献的基础上, 介绍了植被生态需水的概念。对于干旱半干旱区植被生态需水量常用的几种计算方法——面积定额法、潜水蒸发法、植物蒸散发量法、水量平衡法、生物量法、基于遥感技术的算法进行了详细综述, 并对这些方法在实际应用中的优缺点予以评析。最后指出在“3S”技术应用、数值模型建立、尺度转换等方面加强研究, 应是未来植被生态需水量计算方法完善创新的方向。

关键词: 植被; 生态需水; 计算方法; 干旱半干旱区

文章编号: 1000-0933(2008)12-6282-10 **中图分类号:** Q148 **文献标识码:** A

Reviews on calculating methods of vegetation ecological water requirement in arid and semiarid regions

HU Guang-Lu, ZHAO Wen-Zhi*

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, CERN, Lanzhou 730000, China
Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6282 ~ 6291.

Abstract: Vegetation is an important component of terrestrial ecosystems and plays a key role in maintaining ecosystem stability. The study of the ecological water requirements in vegetation has become a hot issue in research of water resources allocation and ecol-environmental construction. On the basis of the comprehensive analysis of previous research results, this study introduced the concept of ecological water requirements of vegetation and also reviewed the advantages and disadvantages of several methods for estimating ecological water requirements of vegetation in arid and semi-arid regions, including the quota-area method, the phreatic evaporation method, the plant evapotranspiration method, the water balance method, the biomass method and the method based on remote sensing technology. The results of this study emphasized that it is necessary to pay much attention to the research of the application of “3S”, numerical modeling and scale transformation in the calculation of ecological water requirements of vegetation in the future.

Key Words: vegetation; ecological water requirement; calculation methods; arid and semiarid regions

干旱半干旱缺水地区水资源天然不足, 加之人类活动范围的不断扩大和对水资源的不合理开发利用, 导

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX2-XB2-04-01)资助; 西部之光资助项目(07285210010)

收稿日期: 2008-06-03; **修订日期:** 2008-09-28

作者简介: 胡广录(1966~), 男, 甘肃靖远人, 博士生, 主要从事生态水文研究. E-mail: hgl0814@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zhaowzh@lzb.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Western China Action Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2X-B2-04-01); Project of Chinese Academy of Sciences to young scientist in Western China (No. 07285210010)

Received date: 2008-06-03; **Accepted date:** 2008-09-28

Biography: HU Guang-Lu, Ph. D. candidate, mainly engaged in eco-hydrology in arid region. E-mail: hgl0814@163.com

致林草植被退化,河流断流,尾间湖泊消失,土地沙化,沙尘暴强度和频次增加,水土流失加剧,生态环境日趋恶化。严重的生态危机威胁着这一地区人类的生存和生活,已引起各国政府及相关部门的高度重视。因此,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。近年来,许多专家学者从不同的方向和层面对生态环境中植被需水的理论机制和计算方法开展了广泛研究,取得了重要进展。但植被生态需水涉及到生态学、环境科学、水文学、气象学、人文地理学等学科,许多基本理论和计算方法的研究还不够深入、完善,目前基本停留在定性分析和宏观定量分析阶段,计算结果还难以在水资源优化配置和生态环境建设的具体实践中得到应用。本文在阅读大量相关研究文献的基础上,对植被生态需水的计算方法进行了较为系统的总结和评析,指出了目前研究中存在的一些问题,并展望了未来研究的发展方向。

1 植被生态需水的概念

Gleick PH 于 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^[1]。国内生态需水的研究最早是从 20 世纪 90 年代开始,主要是针对西北干旱缺水地区展开的。很多学者围绕生态需水量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 3 方面的概念^[2~4]。赵文智^[5]认为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,干旱区的生态需水主要是指维护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,应该是植被生态需水。并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^[6]。

关于植被生态需水,由于研究者的出发点和研究对象不同,提出的概念及其内涵理解也有所不同^[7~12]。研究表明植被生态需水受大气降水、地表水和地下水及其水质的影响很大,同时还与区域内的生态类型、植被特点、人为活动等有关。从现有的文献资料可以看出对于植被生态需水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量计算存在差别,有的差别达 1~2 个数量级^[5]。因此,统一认识,建立植被生态需水的概念体系,对规范植被生态需水量计算方法具有重要的现实意义。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^[13]。

2 植被生态需水量的计算方法

对于干旱半干旱地区的植被生态需水量计算,专家学者们根据植被类型及所处区域气象、土壤、水文地质、生态等条件的不同,提出了不同的计算方法。每种方法都有优缺点及其适用范围,使用过程中可视具体情况灵活选用。

2.1 面积定额法

以某一地区某一类型植被的面积乘以其生态需水定额计算得到该类型植被的生态需水量,某地区各类型植被生态需水量之和即为该地区植被生态需水总量^[14]。计算公式为:

$$W = \sum W_i = \sum A_i r_i \tag{1}$$

式中, W 为植被生态需水总量(m^3); W_i 为植被类型 i 的生态需水量(m^3); A_i 为植被类型 i 的面积(m^2); r_i 为植被类型 i 的生态需水定额(m^3/m^2)。

该方法适用于基础条件较好的地区与植被类型,如防风固沙林,人工绿洲以及农田系统等人工植被的生态需水量计算。用该方法计算植被生态需水量的关键是要确定不同类型植被的生态需水定额,即确定单位时间内、单位面积上某一植被类型所需要消耗的水量。实际计算时针对某一地区、某一土地类型和植被类型,以其主要植物类型为代表,以其主要树种的生态需水定额为代表,来估算整个系统的生态需水量^[15]。事实上,

由于影响植被耗水的因子非常多,各种自然条件下植被生态需水定额是很难测定的。目前大多数学者对于不同植被生态需水定额的确定主要采用以下两种方法^[8,12,16~22]：

①根据实际测定的不同类型植物的蒸散量以及水分供给量,并结合不同地区的植被系数来确定不同植物类型的生态需水定额。目前大多数研究者都是根据植被的成林密度、蒸渗仪和 TDP 测定的单株最大需水量(蒸散量),来确定不同植被单位面积的最大生态需水定额。

但影响植物耗水的因素很多,特别气温、风速、土壤湿度不但影响植物的当日腾发速率,而且其长期累积效果将影响植物生长发育状况,进而影响以后的腾发速率。这些因素在时间上波动性也较大,实测的数据很难体现自然界中植被生态需水的空间差异。因此,确定不同植被类型的生态需水定额,就需要针对每一气候区域、每一土地类型、每一林草类型,考虑时空差异,分别计算其各自的生态需水定额。但由于目前研究的局限性,这种方法在实际操作中很难得到实现。

②理论计算法,即结合影响因子计算植被的生态需水定额,一般可用下式计算：

$$r_i = K_s K_c PE_0 \tag{2}$$

式中, PE_0 为气候条件决定的潜在蒸散量,通常由 Penman 公式计算; K_c 为植物系数,是植物最大实测需水量与最大可能蒸散量的比值,其值的大小与植物种类、林龄、和生长季节的环境状况等有关,常通过试验取得; K_s 为土壤水分修正系数,与土壤质地及土壤含水量有关。如果 $S_w \leq S \leq S_c$, 则：

$$K_s = \ln[(S - S_w) / (S_c - S_w) \times 100 + 1] / \ln 101 \tag{3}$$

式中, S 为土壤实际含水量; S_w 为土壤凋萎含水量; S_c 为土壤临界含水量。

土壤水分状况与林木生长关系密切,根据对土壤水分有效性的划分,有学者^[23]认为林木暂时凋萎含水量(S_s)和生长阻滞含水量(S_r)分别是能保证林木基本生存和正常生长时的土壤含水量下限,可以将相应的林地耗水量分别作为林地的最小生态需水定额和适宜生态需水定额。何永涛等^[24]结合黄土高原地区不同土壤类型的水分参数,以及林地最小生态需水定额和适宜生态需水定额的定义,将 $S = S_r$ 和 $S = S_s$ 代入式(3),得到不同土壤类型相应的水分修正系数 K_s 值。有学者^[25]对延安市燕沟流域刺槐林生态需水量研究时,把对应的土壤水分含量为干土重 8.34% 的值,作为保证刺槐林基本生存的暂时凋萎含水量 S_s ;把对应的土壤水分含量为干土重 14.4 % 的值,作为保证刺槐林正常生长的生长阻滞含水量 S_r 。并取 S_w 为干土重的 3.56%,取 S_c 为田间持水量的 75%,代入式(3)计算得到相应的土壤修正系数,进而利用式(2)得出刺槐林地的最小生态需水定额和适宜生态需水定额。再根据式(1)计算得到黄土丘陵区燕沟流域刺槐幼年林生长季(5~10 月份)的最小生态需水量为 420.3 mm,适宜生态需水量为 506.7mm;刺槐青年林的最小生态需水量为 602.4 mm,适宜生态需水量为 730.4 mm。实际上,土壤水分修正系数与含水量的关系要复杂得多,植物根系深度等因素对其也有影响,在土壤水分修正系数的确定中应予以考虑。

理论计算法考虑了植被生态系统的主要水分支出项——蒸散及其影响因子,同时也考虑了植物种类的差异,这就使不同区域不同植被的生态需水定额差别通过气候因子、土壤类型的变化得到了体现^[8]。目前这一方法已经在林地系统的生态需水研究上得到了较好的应用。但干旱半干旱地区由于林木植被系数的实测资料很少,使得理论计算法在这一区域的应用一定程度上受到限制。据现有的文献可知,中国科学院新疆地理研究所在阿克苏水平衡站作过这方面的研究工作,研究结果表明当潜水埋深从 1m 增大到 4m 时,植被系数由 1.98 减小到 1.0。

2.2 潜水蒸发法

干旱区植被生存主要依赖地下水在毛细管力作用下向植被根系层的输水。在该地区植被的实际蒸散是由潜水向上形成土壤水供给的,而影响植物生长的土壤水分状况取决于潜水蒸发量的大小,从较大的空间尺度而言,当土壤处于稳定蒸发时,不仅地表的蒸发强度保持稳定,土壤含水量也不随时间而变化,即潜水蒸发强度、土壤水分通量和土壤蒸散强度三者相等^[26]。因此可以根据对潜水蒸发量的计算来间接计算植被生态需水量。即用某一植被类型在某一地下水位的面积乘以该地下水位的潜水蒸发量与植被系数,得到该面积下

该植被生态需水量,各种植被生态需水量之和,即为该地区植被生态需水总量。计算公式为:

$$W = \sum W_i = \sum A_i W_{gi} K_c \tag{4}$$

$$W_{gi} = \alpha (1 - h_i/h_{\max})^b E_{601} \tag{5}$$

式中, W 为植被生态需水总量(m^3); W_i 为植被类型 i 的生态需水量(m^3); A_i 为植被类型 i 的面积(m^2); W_{gi} 为植被类型 i 所处某一地下水位埋深时的潜水蒸发量(m^3); K_c 为植被系数,是有植被地段的潜水蒸发量与无植被地段的潜水蒸发量之比值,常由试验确定; α 、 b 为经验系数; h_i 为地下水位的埋深(mm); h_{\max} 为潜水蒸发极限埋深(mm); E_{601} 为 601 型蒸发皿水面蒸发量(m^3)。

基于以上植被蒸腾与潜水位之间的关系,考虑到干旱平原区天然与大部分人工植被的生存与繁衍主要依赖于消耗地下水,因而大多数学者^[27~30]选用最具代表性的潜水蒸发模型——阿维里扬诺夫公式计算植被生态需水量。根据对民勤县植物生长和地下水位关系的研究,当地下水位下降到 5 m 以下时盐生草甸植被类型中大部分植被死亡,乔灌木开始生长不良,因此,有学者^[27]把潜水平埋深 5 m 作为合理生态水位下限。当大气蒸发能力较大时,可根据清华大学雷志栋等^[31]提出的潜水蒸发公式,估算天然植被生态需水量;也有学者^[32]利用沈立昌经验公式确定了黑河下游林地和草地潜水蒸发强度,并计算了林地和草地维持合理生态地下水位 2~4m 时的生态需水量分别为 $0.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $8.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

潜水蒸发法适合于干旱区植被生存主要依赖于地下水的情况^[8,12,15,17,20,21,33],对于某些基础工作较差且模型参数获取困难的半干旱地区,也可考虑采用此法估算维护天然植被正常生长的生态需水量。虽然该方法由于研究区域、目的、对象的不同,参数取值也不同,计算结果会差别很大,但在实施流域水资源规划、水资源调配及管理、生态环境保护时仍可用该法计算的结果做参考。

2.3 基于植物蒸散发量的植被生态需水量算法

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,而植物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。植被的生态需水量可以直接通过计算植被的蒸散发耗水量来确定,而一般植物的基础生理需水量只是很小的一部分^[34],在计算过程中一般忽略不计。对于植物蒸散发量的计算通常采用的方法是改进后的 Penman 公式法和 Hargreaves 算法。

2.3.1 改进后的彭曼 (Penman) 公式法

该法是指通过计算植物潜在蒸发量来推算植物实际需水量,并以植物的实际需水量作为植被生态需水量^[16,17,35,36]。潜在蒸发量的计算目前常用的是改进后的彭曼公式 (Penman),即:

$$ET_0 = C [WR_n + (1 - W) f(u) (E_a - E_d)] \tag{6}$$

式中, ET_0 为潜在蒸发量(mm/d); W 为与温度有关的权重系数; C 为补偿白天与夜晚天气条件所起作用的修正系数; R_n 为按等效蒸发量计算得到的净辐射量(mm/d); $f(u)$ 是与风速 u 有关的函数; $E_a - E_d$ 为在平均气温中,空气的饱和水汽压 E_a 与实际平均水汽压 E_d 之差值(mb)。

植物实际需水量的计算公式为:

$$ET = ET_0 K_c f(s) \tag{7}$$

式中, ET 为植物实际需水量(mm/d); 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; $f(s)$ 为土壤影响因素,在非充分灌溉条件下或水分不足时, $f(s)$ 主要反映土壤水分状况对植物蒸腾量的影响^[12,18]。

$$\begin{aligned} \text{当 } \theta \geq \theta_{c1} \text{ 时 } \quad f(s) &= 1 \\ \theta_{c2} \leq \theta < \theta_{c1} \text{ 时 } \quad f(s) &= \ln(1 + \theta) / \ln 101 \\ \theta < \theta_{c2} \text{ 时 } \quad f(s) &= \alpha \exp(\theta - \theta_{c2}) / \theta_{c2} \end{aligned} \tag{8}$$

式中, α 为经验系数,一般为 0.8~0.95; θ 为实际平均土壤含水率; θ_{c1} 为土壤水分适宜含水率; θ_{c2} 为土壤水分胁迫临界含水率,为与植物永久凋萎系数相对应的土壤含水率。从目前的研究来看,在某一区域不同水平的土壤含水率实测数据缺乏,限制了这种方法的实际应用。为了不使民勤绿洲将变成第二个罗布泊,有关

专家对这一地区的植被生态需水展开了研究,相关的研究表明,石羊河下游民勤绿洲主要防风固沙植被在正常生长条件下,各树种的土壤影响系数利用式(8)计算后分别为:新疆杨 0.62、沙枣 0.62、梭梭 0.76、白刺 0.74、怪柳 0.53。这对于分析该地区人工和天然植被的需水量和水生态环境,为今后合理分配水资源提供参考依据。

一般用改进后的彭曼公式法计算的是在充分供水、供肥、无病虫害理想条件下植物获得的需水量,即植被的最大需水量,并不是维持植物正常生长、不发生凋萎的实际生态需水量。但是该方法主要利用能量平衡原理,理论上比较成熟完整,实际上具有很好的操作性,可以采用该方法计算的结果乘一折减系数得到非理想条件下的植被生态需水量。彭曼公式法参数较多(如每日的气温、日照、风速、湿度、太阳辐射等),而我国干旱半干旱区目前能提供详尽资料的气象站点相对不足,这给一些条件较差地区计算植被生态需水量带来一些困难,同时计算得到的结果也有相当的不确定性。

2.3.2 根据 Hargreaves 算法计算陆地植被蒸发量

彭曼公式中 ET_0 的计算只与气象因素有关,它反映了不同地区、不同时期大气蒸发能力对植物需水量的影响^[37]。然而当其中一些气象要素缺测时,此公式就不能用来计算蒸发能力。因此可根据现有的资料情况,采用 FAO 推荐的 Hargreaves 算法来计算植被的蒸散能力 ET_0 ^[38]。用此法计算时需要的气象要素有气温(包括最高和最低气温)、湿度、太阳辐射等。Hargreaves 的计算公式如下:

$$ET_0 = C_0 (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times (T_{mean} + 17.8) \times R_a$$
 (9)

式中, ET_0 为蒸散能力 (mm/d); T_{max} 、 T_{min} 为日最高和最低气温 (°C); R_a 为天文辐射日总量 (MJ/(m²·d)); C_0 是转换系数当 R_a 以 mm/d 为单位, $C_0 = 2.3 \times 10^{-3}$, 而当 R_a 以 MJ/(m²·d) 为单位时, $C_0 = 9.39 \times 10^{-4}$; $(T_{max} - T_{min})$ 可以近似地表征地表可用辐射能的大小,同时又是水汽压差大小的指标,晴天时 ($T_{max} - T_{min}$) 较大,而阴天则相对较小; T_{mean} 为日平均气温 (°C)。

计算出 ET_0 后,可利用傅抱璞公式计算陆面植被蒸发量,公式如下:

$$ET = ET_0 \{ 1 + P / ET_0 - [1 + (P / ET_0)^m]^{1/m} \}$$
 (10)

式中, ET 为陆面植被蒸发量 (mm); m 为表征下垫面透水性、植被状况和地形等特征的参数,一般取 $m = 2$; P 为降水量 (mm)。

计算出陆地植被蒸发量后,利用下式计算陆地植被生态需水量:

$$W = 1000 \cdot ET \cdot A$$
 (11)

式中, W 为陆地植被生态需水量 (m³); A 是陆地植被单元面积 (km²)。

利用 Hargreaves 算法,有学者^[32] 计算出黑河中游林地和草地年单位面积蒸发量分别是 412.4mm 和 167.5mm,进而估算出林地和草地的生态需水量分别是 4.08×10^8 m³ 和 0.4×10^8 m³。此方法虽然考虑了下垫面透水性、植被状况以及地形等特征,然而对于水文循环中水分的转化过程却没有考虑到。尤其是干旱区天然植被,降雨量稀少,主要依靠地下水生存,要准确计算天然植被生态需水量,就应该从植被生长的需水来源、水分转化角度研究生态需水,这是 Hargreaves 算法所不具备的。

计算植物蒸散发量的方法还有很多,如波文比法、蒸渗仪法、涡度相关法、热脉冲法、热扩散法、道尔顿经验公式等。不管采用那种方法计算植物蒸散发量,由于地面植被和土壤分布的不均匀性,按照植物蒸腾和土壤蒸发计算的蒸散发量在向大尺度的转化过程中均会产生误差,影响计算结果的精度。但针对我国植被生态需水研究还比较薄弱的实际情况,用该方法可近似估算基础资料较全区域的植被生态需水量。

2.4 水量平衡法

目前,对植被生态需水的研究只注重给出生态需水的量值,而缺乏对植被在水文循环过程各个环节所起的作用以及对不同环节变化响应的关系研究,特别是植被与土壤水分关系的研究。分析植被所需水分的主要来源(地下水、降水还是土壤水)、需水的时间分布以及同一生态系统中不同植物间水分利用和竞争的关系,对准确计算生态需水至关重要。因此,只有在水文循环和水量平衡的基础上,辨识水文过程和生态过程的相

互作用,才能合理地估算生态需水,为生产实践提供更科学、更有效的信息指导^[39]。研究表明,植被生态需水具有一定的区域性,可以根据不同区域的典型植被类型(农田防护林、防风固沙林、牧场防护林等)耗水特征,结合降水补给土壤水分的实际可利用量,采用水量平衡法进行植被生态需水量计算^[36]。

把植被生态系统视为植被-土壤综合系统,对该系统列水量平衡方程,求出一个时段植被的蒸散量,用植被蒸散量加上时段末土壤含水量作为此时段植被生态需水量^[40~42]。在无人为干扰的情况下,植被-土壤系统的水量平衡关系可表示为:

$$E_t + (W_{t+1} - W_t) = (P + C) - (R + D) \tag{12}$$

式中, E_t 为 t 到 $t+1$ 时段植被蒸散量; P 为降雨量; C 为地下水补给量; R 为地表径流量; D 为土壤水渗漏量; W_t 为 t 时刻土壤含水量; W_{t+1} 为 $t+1$ 时刻土壤含水量;以上各量的单位均为mm。其中,在地下水埋深较大时, C 和 D 忽略不计。

由于土壤含水量实测资料只能代表点的情况,故通常用前期影响雨量 P_a 间接表示土壤含水量^[34], P_a 的计算公式如下:

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t - R_t) \quad K = 1 - EM / WM \tag{13}$$

式中, $P_{a,t}$ 为第 t 日的前期影响雨量(mm); $P_{a,t+1}$ 为第 $t+1$ 日的前期影响雨量(mm); K 为土壤含水量的日消退系数或折减系数; P_t 、 R_t 分别为 t 日的降雨量和径流量(mm); EM 为流域日蒸散发能力(mm); WM 为流域最大蓄水量(mm)。

在确定 P_a 的起始值时,一般若前期较长一段时间无雨,则令 $P_a=0$;若在一场或几场大雨之后,可令 $P_a=WM$,具体计算时可令 W_t (或 W_{t+1})= P_a 。

也有学者^[29]研究认为干旱区植被耗水量与地下水位降幅之间存在水量平衡关系,以此关系式计算出植被耗水量之后,就可以间接确定植被的生态需水量。关系式如下:

$$Q_1 = P\lambda_1 + R\lambda_2 - \mu\Delta H \tag{14}$$

式中, Q_1 植被耗水量(mm); P 、 R 分别表示灌水量和降水量(mm); λ_1 、 λ_2 分别表示灌水和降水补给系数; μ 表示给水度; ΔH 表示地下水位降幅(mm)。

总之,水量平衡法是目前植被生态需水量计算最常用的方法之一,比较适合完整流域的生态环境需水计算。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,原理成熟方法简单,也是区域较大尺度上,当缺乏生态系统本身的有关数据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、海滦河等流域都有具体实际的应用案例。然而,水量平衡法计算的是天然植被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,没有从生态系统的结构和功能对水分需求的角度来计算生态需水,因此也具有不合理的一面。同时水量平衡法算式中各水分收入项、支出项的精确确定仍然是比较困难的,这也影响区域植被生态需水量的计算精度。

2.5 基于生物量的生态需水计算法

生物量法是针对单纯靠降水支撑的地带性植被,其生态需水可用生物生产量以及其水分利用率来确定^[43]。对不同的生态系统而言,水分利用效率各不相同,也就是说单位水量所生产的干物质量有所差别。因此,植被的不可控生态需水量 E 值^[44]可用以下公式计算:

$$E = \sum A_i \times Q_{nppi} \times \mu_i \tag{15}$$

式中, A_i 为 i 类植被利用面积(m^2), Q_{nppi} 为 i 类植被的净第一性生产力,即单位面积、单位时间内干物质的重量($g/(m^2 \cdot a)$), μ_i 为 i 类植物水分利用系数,表示单位土地面积上生产的干物质与蒸散耗水之比(g/kg)。

生物量的估算应包括根、径、叶等,在目前研究中,一般只考虑了地上部分,而对地下部分的估算则重视不够。由于生物量的估算较为困难,特别是根系的生物量,同时水分利用效率的数据也难以准确获取,因此该方法的应用受到一定限制。但是该方法从另外一个角度提供了计算生态需水的途径,尤其是随着遥感技术在生

物量估算中的应用,这一方法有相当的应用前景^[39]。

2.6 基于遥感技术的植被生态需水量计算法

目前最新的研究方法是基于植被生长需水的区域分异规律,通过遥感手段、GIS(地理信息系统)软件和实测资料相结合计算植被生态需水量^[44]。主要思路为:首先利用遥感与GIS技术进行生态分区,然后通过生态分区与水资源分区叠加分析确定流域各级生态分区的面积及其需水类型,再进一步分析生态分区与水资源分区空间对应关系,确定生态耗水的范围和标准(定额),并以流域为单元进行降水平衡分析和水资源平衡分析,在此基础上根据实测资料计算不同植被群落、不同盖度、不同地下水位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^[35]。计算公式如下:

$$Q = \sum Q_i \tag{16}$$

$$Q_i = Q_{i1} + Q_{i2} \tag{17}$$

式中, Q 为区域植被总需水量; Q_i 为植被类型*i*的生态需水量; Q_{i1} 为植被类型*i*的植株蒸腾量; Q_{i2} 为植被类型*i*的棵间潜水蒸发量。

基于遥感技术的植被生态需水量计算方法^[32,35,45,46]是一种新兴的计算方法,能够方便地提供大范围的地表特征信息,为大尺度非均匀区域的腾发(耗水)研究提供新途径。国内外已有不少应用遥感信息估算区域腾发量的模型和方法,其中植被指数——地表温度法较为直观和方便应用^[47]。而MODIS遥感数据则具有免费接收和使用、高光谱分辨率、高时间分辨率的优点,非常适用于大区域、长时段尺度的植被腾发量计算。张丽等^[48]人利用遥感技术提供的影像资料计算了黑河流域下游天然植被生态需水量,并将计算结果与其它算法的结果进行了比较,认为该算法是合理可行的,可以推广应用到干旱区或其它地区的生态需水量计算。赵文智等^[5]采用3S技术与野外生产力测定相结合的方法,通过建立植被归一化指数NDVI、生产力、蒸腾系数之间的关系方程,计算了额济纳荒漠绿洲植被现状生态需水量和达到目前最高生产力水平对应的生态需水量。结果表明:维持额济纳绿洲现状的需水量为 $1.53 \times 10^8 \text{ m}^3$,若要使现有的植被恢复到目前最高生产力水平的生态需水量应为 $3.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。张凯等^[27]人在植被和土壤野外调查资料的基础上,以RS和GIS为主要技术手段,确定出民勤绿洲不同植被类型面积;按不同植被类型和生长状态,确定每种植被类型的地下水埋深范围和平均埋深,并用阿维里扬诺夫公式计算出植被单位面积蒸散量;然后用不同植被类型面积与单位面积植物蒸散量的乘积计算得到一定面积植被生态的总需水量。结果表明,民勤绿洲现有植被最低生态需水量为 $1.4927 \times 10^8 \text{ m}^3$,而目前的生态用水量只有 $0.3525 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。植被生态用水的严重不足,加快了民勤绿洲生态环境的日益恶化。然而该方法具有工作量大和技术复杂的特点,在遥感技术知识薄弱的地方,应用推广目前尚有一定的困难。

3 存在的问题及研究展望

(1)在水资源供需矛盾突出,植被退化严重的干旱半干旱地区,虽然已有不少植被生态需水量的计算方法,但缺少长序列实验数据支持和实践验证,加上评价的标准不统一规范,使应用者很难确定哪种方法的计算结果更加可行。因此未来应在基础数据库、标准体系建设方面加强研究,为准确计算生态需水量提供可靠的基础数据和理论依据。

(2)基于遥感技术的植被生态需水量算法虽经证明是先进的、科学的,但由于影像资料分辨率的问题、实效性的问题、数值提取技术的问题,该方法还不是很成熟。若能和某区域的野外地面、地下调查工作结合起来,获取更丰富的原始资料,建立相应的计算模型,进一步完善计算方法,其计算结果会更加可靠。未来应充分利用“3S”技术提供的信息,以实现对植被生态系统的动态监测,实时评价。

(3)目前从宏观角度出发研究某区域植被生态需水的成果较多,而从微观角度出发研究植被生理耗水规律的成果较少。事实上不同植物、不同类型植被在长期适应环境演替的过程中,都形成了各自不同的生理特征,耗水机理差别也很大,且水分的来源不同,即便是同一区域,相同的植被类型,其生态需水情况也不同。计算时要根据具体情况加以区别,不能把不同分布、不同盖度、不同地下水位、不同水分补给情况下的植被生态

需水量简单地平均或综合。应根据不同研究区域,不同植物类型、不同生态运行机制开展试验研究工作,只有摸清植物的生理、生态耗水规律,才能从真正意义上建立合理的植被生态需水理论体系和计算方法。

(4)鉴于干旱地区非地带性天然植被的需水量受水资源开发利用影响明显,在供水不足的情况下迅速退化,是生态环境中十分脆弱、最易受到破坏的部分。所以用水分循环水量平衡法,计算天然植被的生态需水量时,应对植被生态系统水分收入项部分的水分来源及其转化规律加强研究,这对提高水分的有效利用率和计算成果的准确性非常有利。

References:

[1] Gleick P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1998, 8(3):571-579.

[2] Tang Q C. The development in oases and rational use of water resource. *Journal of Land Resource and Environment*, 1995, 9(3):107-111.

[3] Jia B Q, Xu Y Q. The conception of the eco- environmental water demand and its classification in arid land-taking Xingjiang as an example. *Arid Land Geography*, 1998, 21(2):8-12.

[4] Zheng H X, Liu C M, Feng H L. On concepts of ecological water demand. *Advances in Water Science*, 2004, 15(5):626-633.

[5] Zhao W Z, Chang X L, He Z B, *et al.* Study on ecological water requirement of desert oasis vegetation in Ejina area. *Science in China (Series D)*, 2006, 36(6):559-566.

[6] Zhao W Z, Cheng G D. Review of some problems of the ecohydrological process in arid area. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(22):1851-1857.

[7] Wang F, Liang R J, Yang X L, *et al.* A study of ecological water requirements in Northwest China Part I: Theoretical analysis. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1):1-8.

[8] He Y T, Min Q W, Li W H, *et al.* Progress and perspectives on ecological water requirement of vegetation. *Resources Science*, 2005, 27(4):8-12.

[9] Liang R J, Wang F. Ecological water demand in northwest China. *China water resources Institute 2000 Learning annual meeting study corpus*, 2001:71-76.

[10] Xia J, Zheng D Y, Liu Q G, *et al.* Study on evaluation of eco- water demand in northwest China. *Hydrology*, 2002, 22(5):12-17.

[11] Zhang Y, Yang Z F. Minimum ecological water requirement of forestland in Huang- huai- hai Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2):72-75.

[12] Min Q W, He Y T, Li W H, *et al.* Estimation of forests' ecological water requirement based on agro meteorology: Taking Jing he watershed as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2131-2135.

[13] Hu G L, Zhao W Z, Xie G X. Advances on theories of ecological water requirements of vegetation in arid area. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(2):193-200.

[14] Han Y, Rao B Y. Method for estimating ecological water requirement of vegetation. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2006, 12(9):605-606.

[15] Zuo Q T. Study on vegetation ecological use for water resources in arid and semiarid region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(3):114-117.

[16] Chen L H, Wang L X. Classification of ecological water use and quota determination of ecological water Use of forest covers in Beijing. *Research of Soil and Water Conservation*, 2001, 8(4):161-164.

[17] Su X L, Kang S Z. Concept of ecological water requirement and its estimation method. *Advances in Water Science*, 2003, 14(6):740-744.

[18] Wei G, He J S, Wu L Q. Research on the calculating method eco- environmental water demand. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2006, 34(17):4386-4388.

[19] Wang X Q, Liu C M, Yang Z F. Research advance in ecological water demand and environmental water demand. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4):507-514.

[20] Pan Q M, Ren Z Y, Hao G Z. Analysis of ecological water demand in HeiHe River Basin. *Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute*, 2001, 13(1):14-16.

[21] Zhang L, Dong Z C, Ding D F. Progress and problem of ecological water requirement research. *China Rural Water and Hydropower*, 2003, (1):13-15.

[22] Jia B Q, Ci L J. The primary estimation of water demand by the eco-environment in Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2):243-250.

[23] Yang W Z, Shao M G. A study of soil moisture in loess plateau. Beijing: Science Press, 2000.

- [24] He Y T, LI W H, LI G C, *et al.* Ecological water requirement of forests in Loess Plateau. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 35–39.
- [25] Chen T L, Xu X X, Zhang B Y, *et al.* Ecological water requirement of robinia pseudoacacia in Loess Hilly Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(2): 54–57.
- [26] Lei Z D, Yang S X, Xie C S. *Soil Dynamics*. Beijing: Tsinghua University Press, 1985.
- [27] Zhang K, Han Y X, SI J H, *et al.* Ecological water demand and ecological reconstruction in Minqin Oasis. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 813–817.
- [28] Huang T M, Wang X S, Shi P Z. Estimating of water demand of ecosystem and rebuilding ecosystem in arid areas. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(8): 43–47.
- [29] Wang G X, Cheng G D. Water demand of ecosystem and estimate method in arid inland river basin. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(2): 129–134.
- [30] SI J H, Gong J D, Zhang B. The primary estimation of water demand for the eco-environment in arid regions. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(1): 49–53.
- [31] Lei Z D, Yang S X, Xie C S. Analysis of stable groundwater evaporation and empirical formula. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, (8): 60–64.
- [32] Liu C M. The strategic research on water resource scheme between eco- environment construct and sustainable development in northwest china. Beijing: Science Press, 2004: 125–140.
- [33] Bao W F, Huang J S, Yu F L. Research on calculation methods of ecological water requirement for region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 139–142.
- [34] Feng H L, Wang C, Li J C. Estimation of ecological water requirement of a river basin in arid areas. *Environmental Science & Technology*, 2002, 25(1): 31–34.
- [35] Bian G Y, Zhou M Y, Zhu C L. Present situation and prospect of calculating methods on ecological and environmental water requirements. *Water Resources Protection*, 2003, (6): 46–49.
- [36] Jiang D J, Wang H X, Li L J. A review on the classification and calculating methods of ecological and environmental water requirements. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 369–378.
- [37] Liu Yu, Pereira L S. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, (3): 11–17.
- [38] Liu L, Xia J, Feng H L. Preliminary discussion on the eco-logical water demand of terrene system. *Chinese Rural Water Conservancy and Hydro-Electricity*, 2005, (2): 32–34.
- [39] Feng H L, Zheng H X, Cao Y. On theories and methodologies of ecological water demand estimation. *Journal of Nan Jing Xiao Zhuang College*, 2005, 21(5): 50–55.
- [40] Huang Y L, Chen L D, Fu B J, *et al.* Assessment on vegetation ecological water consumption in gully catchments of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 152–155.
- [41] He Z B, Zhao W Z, Fang J. Ecological water requirements of vegetation in the middle reaches of Heihe River. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 705–710.
- [42] Yang Z F, Cui B S. *Theory, method and practice on ecological and environmental water requirements*. Beijing: Science Press, 2003.
- [43] Cheng S Y, Liu B Q. Current state and progress of research on ecological and environmental water requirements. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2005, (6): 39–41.
- [44] Wang F, Wang H, Chen M J, *et al.* A study of ecological water requirements in Northwest China Part II: Application of remote sensing and GIS. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 129–137.
- [45] Zhang L, Dong Z C, Zhao B. Method for estimating ecological water requirement of natural vegetation in arid area. *Advances in Water Science*, 2003, 14(6): 745–748.
- [46] Li J R, Huang S F. *Guideline of “3S” technology application in water conservancy*. Beijing: China Water Power Press, 2003.
- [47] Liu Z W, Lei Z D, Dang A R, *et al.* Remote sensing and the SEBAL model for estimating evapotranspiration in arid regions. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(3): 421–424.
- [48] Zhang L, Dong Z C. A study on ecology water requirement and its prediction of natural vegetation in the Lower Heihe river basin. *Water Resources Planning and Design*, 2005, (2): 44–48.

参考文献:

- [2] 汤奇成. 绿洲的发展与水资源的合理利用. *干旱区资源与环境*, 1995, 9(3): 107–111.

[3] 贾宝全,许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类. 干旱区地理,1998,21(2):8~10.

[4] 郑红星,刘昌明,丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨. 水科学进展, 2004,15(5):626~633.

[5] 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. 中国科学:D 辑, 2006, 36(6):559~566.

[6] 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(22):1851~1857.

[7] 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. 自然资源学报,2002,17(1):1~8.

[8] 何永涛,闵庆文,李文华. 植被生态需水研究进展及展望. 资源科学,2005,27(4):8~12.

[9] 梁瑞驹,王芳. 中国西北地区的生态需水. 中国水利学会 2000 年学术年会论文集. 2001:71~76.

[10] 夏军,郑东燕,刘青娥,等. 西北地区生态环境需水估算的几个问题探讨. 水文,2002,22(5):12~17.

[11] 张远,杨志峰. 黄淮海地区林地最小生态需水量研究. 水土保持学报, 2002,16(2):72~75.

[12] 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. 生态学报,2004,24(10):2131~2135.

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

[14] 韩英,饶碧玉. 植被生态需水量计算方法综述. 水利科技与经济,2006, 12(9):605~606.

[15] 左其享. 干旱半干旱地区植被生态用水计算. 水土保持学报, 2002,16(3):114~117.

[16] 陈丽华,王礼先. 北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定. 水土保持研究, 2001, 8(4):161~164.

[17] 栗晓玲,康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法. 水科学进展,2003,14(6):740~744.

[18] 魏国,何俊仕,武立强. 生态环境需水计算方法研究. 安徽农业科学,2006,34(17):4386~4388.

[19] 王西琴,刘昌明,杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻. 水科学进展,2002,13(4):507~514.

[20] 潘启民,任志远,郝国占. 黑河流域生态需水量分析. 黄河水利职业技术学院学报, 2001, 13(1):14~16.

[21] 张丽,董增川,丁大发. 生态需水研究进展及存在问题. 中国农村水利水电,2003,(1):13~15.

[22] 贾宝全,慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算. 生态学报,2000,20(2):243~250.

[23] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京:科学出版社,2000.

[24] 何永涛,李文华,李贵才,等. 黄土高原地区森林植被生态需水研究. 环境科学,2004,25(3):35~39.

[25] 陈天林,徐学选,张北赢,等. 黄土丘陵区刺槐生长季生态需水研究. 水土保持通报,2008,28(2):54~57.

[26] 雷志栋,杨诗秀,谢传森. 土壤动力学. 北京:清华大学出版社,1985.

[27] 张凯,韩永翔,司建华,等. 民勤绿洲生态需水与生态恢复对策. 生态学杂志,2006,25(7):813~817.

[28] 黄天明,王雄师,石培泽. 干旱区生态需水量估算与退化生态重建. 干旱区资源与环境,2004,18(8):43~47.

[29] 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. 中国沙漠,2002,22(2):129~134.

[30] 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. 干旱区资源与环境,2004,18(1):49~53.

[31] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 潜水稳定蒸发的分析与经验公式. 水利学报,1984,(8):60~64.

[32] 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. 北京:科学出版社,2004.

[33] 鲍卫锋,黄介生,于福亮. 区域生态需水量计算方法研究. 水土保持学报,2005,19(5):139~142.

[34] 丰华丽,王超,李剑超. 干旱区流域生态需水量的估算原则分析. 环境科学与技术,2002,25(1):31~34.

[35] 卞戈亚,周明耀,朱春龙. 生态需水量计算方法研究现状及展望. 水资源保护,2003,(6):46~49.

[36] 姜德娟,王会肖,李丽娟. 生态环境需水量分类及计算方法综述. 地理科学进展,2003,22(4):369~378.

[37] 刘钰,Pereira L. S. 气象数据缺测条件下参照腾发量的计算方法. 水利学报, 2001,(3):11~17.

[38] 刘蕾,夏军,丰华丽. 陆地系统生态需水量计算方法初探. 中国农村水利水电,2005,(2):32~34.

[39] 丰华丽,郑红星,曹阳. 生态需水计算的理论基础和方法探析. 南京晓庄学院学报,2005,21(5):50~55.

[40] 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. 水土保持学报,2005,19(2):152~155.

[41] 何志斌,赵文智,方静. 黑河中游地区植被生态需水量估算. 生态学报,2005,25(4):705~710.

[42] 杨志峰,崔保山. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京:科学出版社,2003.

[43] 程慎玉,刘宝勤. 生态环境需水研究现状与进展. 水科学与工程,2005,(6):39~41.

[44] 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. 自然资源学报, 2002, 17(2):129~137.

[45] 张丽,董增川,赵斌. 干旱区天然植被生态需水量计算方法. 水科学进展,2003,14(6):745~748.

[46] 李纪人,黄诗峰. “3S”技术水利应用指南. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[47] 刘志武,雷志栋,党安荣,等. 遥感技术和 SEBAL 模型在干旱区腾发量估算中的应用. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(3):421~424.

[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. 水利规划与设计,2005,(2):44~48.