

# 植被生态用水结构及绿水资源消耗效用 ——以黄河三门峡地区为例

王玉娟<sup>1</sup>, 杨胜天<sup>1\*</sup>, 刘昌明<sup>2,3</sup>, 戴 东<sup>4</sup>, 郑东海<sup>1</sup>, 曾红娟<sup>1</sup>

(1 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学地理学与遥感科学学院,

环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875; 2 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4 黄河水利委员会水文局, 郑州 450004)

**摘要:** 以黄河三门峡地区为研究对象, 构建适用于流域尺度植被生态用水估算的生态水文模型, 对三门峡地区 20 世纪 50 年代以来植被生态用水量进行了定量模拟, 得到研究区植被生态用水时空结构差异。在此基础上, 对三门峡地区不同植被类型绿水资源消耗效用进行了分析, 提出该区域植被结构调整方案。结果表明: 三门峡地区植被生态用水量自 20 世纪 50 年代以来, 由于气候和土地利用状况的变化, 总体呈现出降低-稳定-上升的趋势; 生态用水空间结构主要表现在不同植被类型下生态用水量差异上: 林地最大, 其次为农作物、灌丛, 草地最小; 林地高效消耗比例最大, 其次为草地和灌丛, 农用地最小。基于不同植被类型绿水资源消耗效用分析, 提出三门峡地区植被结构调整方案。在一定水资源消耗量状况下, 减少无效和低效消耗量, 增加高效消耗量, 是缓解该地区生产、生活、生态用水矛盾, 提高总体生态效益的重要途径。

**关键词:** 植被生态用水; 绿水资源消耗效用; 黄河三门峡

文章编号: 1000-0585(2009)01-0074-11

## 1 引言

从广义水资源理念出发, 将“绿水”纳入水资源范畴, 并合理配置绿水和蓝水比例, 对维持区域生态平衡、维持生态系统健康有着重要的意义。绿水资源, 作为水资源的重要组成部分, 不仅是维持陆地生态系统景观协调和平衡的重要水源, 而且支撑着全球耕地面积 83% 的雨养农业<sup>[1]</sup>。国内外对不同尺度的绿水定量研究取得了许多成果, 估算方法有很多种, 程国栋院士将其总结为以下 4 种<sup>[2]</sup>: ①利用生态系统生产干物质消耗的水量, 即需水量估算绿水资源。如 Postel<sup>[3]</sup> 等利用 Vitousek 获得的全球净初级生产力数据评价了全球淡水资源, 并计算了全球非灌溉植被蒸散量; ②根据影响蒸散的因素, 估算主要生物群系的绿水流。如 Rockstrom 等<sup>[4]</sup> 用这种方法估算了天然雨养生态系统和雨养农业绿水流; ③利用水文模型估算流域尺度的绿水流<sup>[5]</sup>; ④耦合植被生态、生物地理、生物地球化学和水文学模型估算绿水流。代表性的模型有兰德-波茨坦-耶拿 (Lund-Potsdam-Jena,

收稿日期: 2008-07-02; 修订日期: 2008-11-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAB06B07); 国家自然科学基金项目 (40671123)

作者简介: 王玉娟 (1981-), 女, 山东临沂人, 博士研究生。主要研究方向为环境科学、水文水资源遥感。

E-mail: wyjuan\_002@163.com

通讯作者: 杨胜天 (1965-), 男, 教授, 博士生导师。从事遥感和 GIS 应用研究。Email: yangshengtian@bnu.edu.cn

LPJ) 模型, 并得到了广泛应用<sup>[6~8]</sup>。

绿水资源量的确定和有效利用对于干旱半干旱地区水资源配置和生态建设提供依据。黄河流域作为我国重要的能源和重化工基地和粮棉基地, 经济发展前景广阔, 但是由于自然地理因素和人类活动因素两方面的影响, 造成水资源紧缺<sup>[9]</sup>, 针对这一矛盾, 很多学者对黄河流域水资源的供需<sup>[10]</sup>、开发利用<sup>[11]</sup>以及水资源演变规律<sup>[12]</sup>等方面进行了深入的研究, 但是在水资源评价过程中, 没有将绿水资源评价纳入其中, 过度夸大了水资源紧缺程度。对于黄河流域而言, 如何通过植被结构调整、种植和灌溉制度优化等措施提高绿水资源高效利用, 加大绿水与蓝水的转化量, 可以在一定程度上缓解流域水资源紧缺的现状。

三门峡水库位于黄河中游, 地理位置特殊, 是黄河中下游河段的重要控制工程, 其运行方式的不同对区域景观格局<sup>[13]</sup>、湿地生态系统<sup>[14]</sup>和下游水环境<sup>[15]</sup>等都带来严重影响, 该区域植被生态用水结构和绿水资源量的确定对于优化该区域水资源分配, 提高水库运行效率, 减少下游水资源短缺现状具有十分重要的意义。

为此, 将植被生态模型和水文模型相耦合, 构建植被生态用水估算模型, 利用该植被生态用水模块对三门峡地区 20 世纪 50 年代以来植被生态用水量进行定量模拟, 得到不同时段植被生态用水变化趋势, 以及不同植被类型和植被盖度下生态用水结构差异, 在此基础上对不同植被类型绿水资源消耗效用进行了分析, 提出该区域植被结构调整方案。

## 2 基本概念

### 2.1 植被生态用水

国内外在生态用水研究中, 所采用的概念除生态用水、生态需水外, 还有环境用水与环境需水、生态环境用水等。由于研究对象的不同<sup>[16~22]</sup>, 对水资源、需水、用水内涵理解的差异<sup>[20~22]</sup>, 以及对生态、环境和生态环境认识层次不同<sup>[21, 22]</sup>等原因, 使得对这些概念的界定多达 20 余种。

国内外的研究一致认为, 退化生态系统恢复与重建的关键在于恢复植被。此处的植被既包括天然植被也包括人工植被。植被生态需水量的确定, 对于区域植被建设和生态恢复有着重要的指导意义。目前对于植被生态需水的研究主要集中在水资源缺乏的干旱和半干旱地区。王芳等根据我国西北地区的生态环境特点, 将植被生态需水定义为维护生态系统稳定, 自然生态保护与人工生态建设所消耗的水量<sup>[16]</sup>。张思玉等根据西北干旱区的环境特点认为, 植被的生态用水是指在陆地生态系统中, 以生态保护为目的, 用于各类植被的地表水和地下水的水资源总量<sup>[23]</sup>。张远等将林地生态系统作为森林-土壤综合系统, 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<sup>[24]</sup>。张丽等则探讨了干旱区植被生态需水的计算方法<sup>[25]</sup>。闵庆文等从农业气象学原理出发, 认为森林植被的生态需水可以理解为林地的蒸散耗水量。并根据土壤有效性的划分, 确定了对应状态下的林地最小生态需水定额和适宜生态需水定额<sup>[26]</sup>。

基于以上认识, 植被生态用水是植被生态系统在某种生态水平下所消耗的水量, 受现实条件的限制, 是植被生态系统的实际耗水量。在植被生态系统中, 蒸散耗水量是其主要的水分支出项, 因此将其作为植被生态系统的生态用水量。

### 2.2 绿水资源

“绿水”概念是瑞典科学家于 1993 年在世界粮农组织 (FAO) 召开大会上, 针对雨

养农业提出来的<sup>[27]</sup>。瑞典著名水文学家玛琳·福克马克在 2005 年 2 月德国波恩的 SSC 会议上再次阐述了绿水的内涵及其意义<sup>[28]</sup>，把土壤水称为陆地生态系统的核心资源。刘昌明指出“绿水”为广义水资源内涵的一部分，将绿水引入到水资源的范畴中意味着对水资源全面而更真实的理解<sup>[29]</sup>。

根据玛琳·福克马克的表述<sup>[28]</sup>，在某一流域中水资源可分为“蓝水”和“绿水”两部分，“绿水”（气态水、土壤水）的循环供给陆生生态系统，主要是绿色植物、作物等，故形象称之为绿水；“蓝水”（液态水）循环供给水生生态系统和人类用水需求，反映了自然界“土壤-植物”生态系统用水消耗。

绿水又被定义为蒸散流，是流向大气圈的水气流<sup>[30]</sup>；也有被定义为具体的资源，即绿水是源于降水、存储于土壤并被植被蒸散发消耗的水资源，某一地区一段时间内能够获得的总的绿水资源量等于该时期内蒸散发累计量<sup>[31, 32]</sup>。中科院程国栋院士将其称为“看不见的水”<sup>[33]</sup>。

绿水资源是一个动态转化的过程量，在其接受补给的同时也在消耗。其实质是消耗量和非消耗量之和，因此，绿水资源可以分解为两部分，一部分为绿水资源消耗量，主要指植被蒸散发量，即植被生态用水量；另一部分为绿水资源非消耗量，主要指土壤水蓄变量。绿水资源量  $S$  可用下式表示<sup>[34]</sup>：

$$S = ET + \Delta W \quad (1)$$

其中， $ET$  为绿水资源消耗量； $\Delta W$  为时段土壤水蓄变量，可认为是绿水资源非消耗量。

### 2.3 绿水资源消耗效用

在绿水资源界定的基础上，将绿水资源消耗形式分为有效消耗和无效消耗两部分，其中植被蒸腾消耗、植被棵间蒸发消耗属于有效消耗，裸地蒸发消耗属于无效消耗。由于植被蒸腾消耗直接参与植株干物质的形成，是一种生产性消耗，认为是绿水资源有效消耗量中的高效消耗量，而土壤棵间蒸发消耗通过调节植被区域的小气候影响生物量的产生，属于低效消耗量，裸地蒸发消耗不参与植株生物量的形成，属于无效消耗。

不同的植被类型，不同的植被盖度，其绿水资源消耗形式及绿水资源中土壤蓄变量存在很大差异，使得其利用率明显不同。

因此，要调控地区绿水资源利用率，应结合区域特点，按照减少无效消耗，提高低效消耗，增大高效消耗原则进行区域植被类型、植被盖度和种植结构的调整。

## 3 植被生态用水定量计算方法

植物需水受到气候状况、植被状况和土壤水分状况三种条件的影响。在联合国粮食及农业组织 (FAO) 作物系数法<sup>[34]</sup>的基础上，将土壤水分条件限制因素考虑进去，提出了植被生态用水计算方法，如下所示： $E = K_c \times K_s \times ET_0$  (2)

其中， $E$  为生态用水量 (mm)； $ET_0$  为参考作物潜在蒸散量 (mm)； $K_c$  为植物系数， $K_s$  为土壤水分限制系数。计算流程见图 1。

### (1) 潜在耗水量的计算

植被潜在耗水量是某一气候条件下植被的潜在蒸散量，其值只与当地的气候条件有关，可以通过气象资料，利用 Penman-Monteith 公式<sup>[34]</sup>进行计算，计算流程见图 2。

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{areo} = \frac{1}{L} \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + r(1 + 0.34U_2)} + \frac{900r U_2 (e_a - e_d)}{T + 273} \frac{1}{\Delta + r(1 + 0.34U_2)}$$

$$= \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

(3)

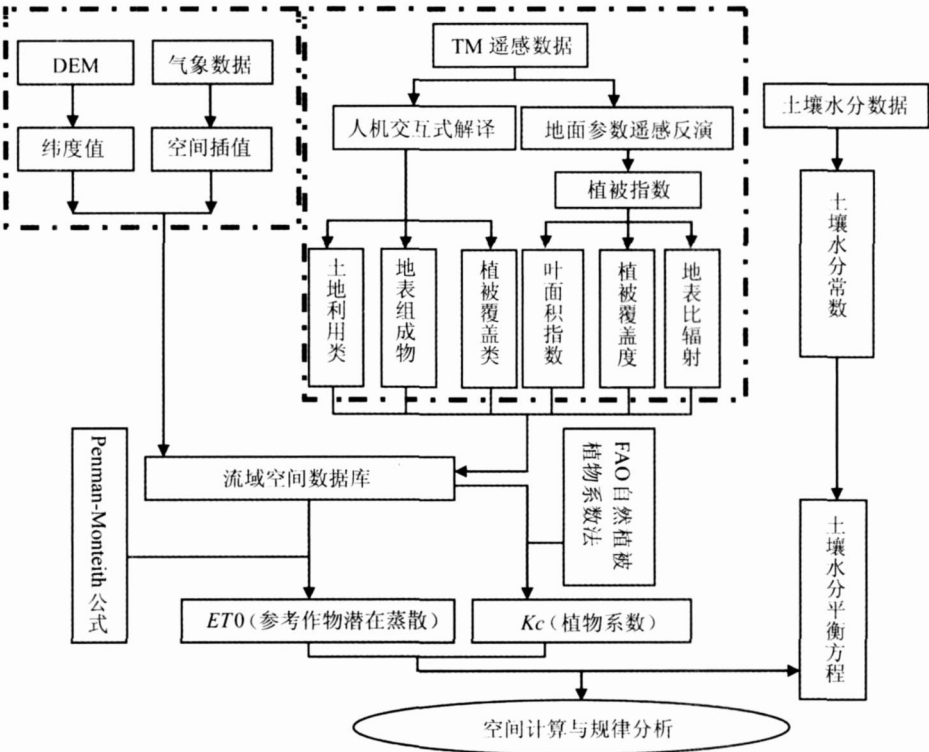


图 1 植被生态用水计算流程

Fig. 1 Framework of vegetation water use

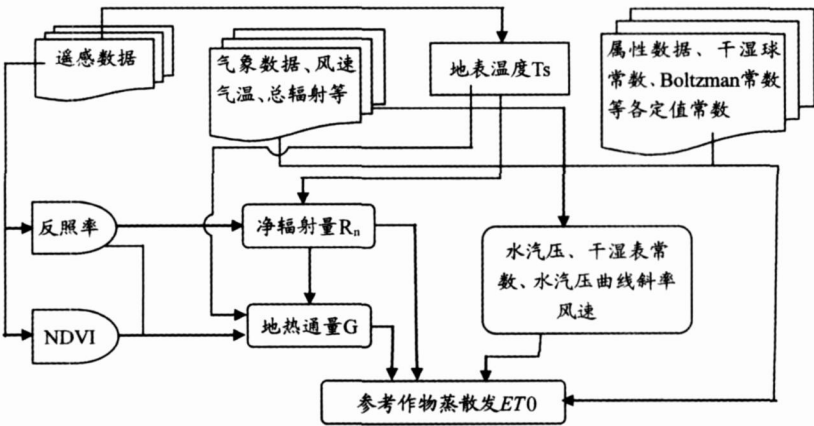


图 2 参考作物潜在蒸散发量的计算流程

Fig. 2 Framework of ET0

式中， $ET_0$  为参考作物蒸散量  $[mm \cdot day^{-1}]$ ， $ET_{rad}$  为辐射项， $ET_{areo}$  为空气动力学项， $L$  为水的蒸发潜热， $R_n$  地表净辐射量  $[MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}]$ ， $e_s$  为饱和水汽压  $[kPa]$ ， $e_a$  为实际水汽压  $[kPa]$ ， $(e_s - e_a)$  为饱和水汽压与实际水汽压之差，即水汽压亏缺  $[kPa]$ ， $\Delta$  为

饱和水汽压与温度关系曲线斜率[ $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $G$  为干湿表常数[ $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $U_2$  为 2m 高处的风速[ $\text{m s}^{-1}$ ]。

## (2) 植物系数 $K_c$ 的计算

对于植物系数的确定, 一般采用经验值来代替, 在一定程度上可以反映出植被类型、生长状况对潜在耗水量的影响差异, 但是不能更为准确地反映出区域植被差异, 如植被覆盖度等。因此采用 FAO 的非完全覆盖条件下自然植被植物系数的计算方法<sup>[35]</sup> 进行确定。该方法可以利用遥感技术, 得到不同时段区域的植物系数, 更客观地反映出区域植被差异。

生长期的  $K_c$  可采用下式计算:  $K_c = K_{cb} + 0.05$  (4)

式中,  $K_c$  为生长期植物系数,  $K_{cb}$  为非完全覆盖下的基本植物系数, 可由下式计算:

$$K_{cb} = K_{cb\min} + (K_{cb\text{full}} - K_{cb\min}) \times \min(1, 2, f_{\text{cell}}^{1/(1+h)}) \quad (5)$$

式中,  $K_{cb\min}$  为在缺少植被情况下的裸地最小植物系数 (0.15~0.20);  $K_{cb\text{full}}$  为全覆盖条件下 ( $\text{LAI} > 3$ ) 基本植物系数;  $h$  为植被高度 (m);  $f_{\text{cell}}$  为有效植被覆盖度。

$$K_{cb\text{full}} = K_{cb,h} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \times \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (6)$$

式中,  $K_{cb,h}$  为在标准湿润和风速条件下 ( $RH_{\min} = 45\%$  和  $U_2 = 2\text{m/s}$ ) 的全覆盖植被的  $K_{cb}$  基本植物系数;  $U_2$  为生长期 2m 高位置处的平均风速;  $RH_{\min}$  为生长期的平均最小相对湿度 (%);  $h$  为平均植被最大高度 (m)。  $K_{cb,h}$  可以利用下式进行估计:

$$\begin{aligned} K_{cb,h} &= 1.0 + 0.1h && \text{当 } h \leq 2\text{m} \\ K_{cb,h} &= 1.2 && \text{当 } h > 2\text{m} \end{aligned} \quad (7)$$

## (3) 土壤水分系数 $K_s$ 值的计算

采用 Jensen 公式<sup>[36]</sup> 来确定土壤水分供应不充足时植被的实际蒸散量随土壤水分含量的变化情况。根据 Jensen 等的研究表明, 土壤水分胁迫系数  $K_s$  可用下式表示:

$$K_s = \begin{cases} 0 & W < W_p \\ (W - W_p) / (W_k - W_p) & W_k \geq W \geq W_p \\ 1 & W > W_k \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $W$  为实际土壤水分含量 (mm) (通过土壤水平衡方程获取);  $W_k$  为土壤临界含水量 (mm);  $W_p$  为土壤凋萎湿度 (mm)。土壤临界含水量等同于毛管断裂湿度, 这里取田间持水量的 75%。

# 4 研究区概况与数据处理

## 4.1 研究区概况

研究区以黄河三门峡水库为中心, 界于东经  $110^\circ 21' 42'' \sim 112^\circ 01' 24''$ ; 北纬  $33^\circ 31' 24'' \sim 35^\circ 05' 48''$  之间, 面积为  $3754\text{km}^2$ 。研究区处于中纬度内陆地区, 属暖温带大陆性季风气候, 春季干旱降水少, 夏季炎热降水猛, 旱涝不均变化多, 秋季阴雨气温凉, 常有霜冻与寒潮, 冬季干冷雨雪稀, 晴日较多。三门峡市气象台多年年平均气温为  $13.8^\circ\text{C}$ 。多年平均日照时数为  $2293\text{h}$ 。多年平均年降水量为  $573.5\text{mm}$ , 降水量年际变化很大, 年内分布不均, 7~9 月的降水量一般约占全年降水量的 48%。

## 4.2 数据获取及处理

根据植被生态用水计算方法, 所需要的基本数据主要包括气象参数、遥感参数和土壤

水分常数。气象参数主要包括降雨量、气压、相对湿度、地温、风速、太阳总辐射、气温; 遥感参数主要包括植被指数、叶面积指数、地表比辐射率、植被覆盖度。设定土壤厚度为 1m, 土壤水分初始值为田间持水量的一半, 时间步长为月, 将上述数据以 ENVI 文件格式输入, 在 IDL 下编程模拟, 多次循环计算直到土壤水分含量比较稳定为止。时段选择 8 月份, 此时处于汛期, 植被生长受水分胁迫最小, 可以在一定程度上得到研究区植被潜在绿水资源消耗量。

**4.2.1 实测蒸散发数据获取及处理** 利用研究区附近泾川气象观测站的大孔径闪烁仪 (Large Aperture Scintillometry, LAS) 对蒸散量模拟结果进行了多方位的验证, LAS 由发射仪和接收仪组成, 两者分开一定距离。采用的 LAS, 泾川 LAS 站 (东经  $107^{\circ}21'$ , 北纬  $35^{\circ}20'$ ), 观测时间从 2006 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 30 日, 路径长度为 1343m; 风速仪高度为 11.2m, 发射端离地高度 2.8m, 接收端离地高度 10.88m, LAS 有效高度为 9.12m。接收仪接收发射仪发出的光强, 输出光强度方差, 由此可得空气折射指数的结构参数, 结合其他气象资料和辅助信息, 可获得由地面进入大气的显热通量。

计算 LAS 显热通量时, 用净辐射 ( $R_n$ ) 来判断稳定度 ( $R_n < 10 \text{ W/m}^2$  为稳定层结,  $R_n > 10 \text{ W/m}^2$  为不稳定层结)。用日平均  $R_n$  减去日平均  $H_{las}$  计算日  $ET$ , 这里假设日平均土壤热通量为 0, 即:

$$ET = (R_n - H_{las}) / L \quad (9)$$

其中,  $L = 2.49 \times 10^6$ ,  $ET$  单位为 mm。

**4.2.2 空间数据获取及处理** 空间参数数据的获取包括两部分: ①1987 年 8 月、1994 年 8 月和 2002 年 8 月 3 个时段遥感参数是利用 Landstat TM 数据反演得到。利用遥感反演模型, 得到模型所需要的地表反照率、植被指数、叶面积指数、地表比辐射率等空间数据; ②1957 年 8 月、1967 年 8 月和 1977 年 8 月 3 个时段遥感参数是利用统计模型进行推演得到。其中, 地表反照率是利用不同植被类型统计数据, NDVI 是通过建立与降水量之间的相关关系式推算得到, 地表比辐射率、植被覆盖度是利用与 NDVI 的经验公式反演得到。

土地利用类型数据获取包括: ①1987 年 8 月、1994 年 8 月和 2002 年 8 月 3 个时段土地利用数据是利用 Landstat TM 数据进行监督分类获得; ②1957 年 8 月、1967 年 8 月和 1977 年 8 月 3 个时段历史系列下垫面是通过植被推演的方式获取。基于 1987 年 4 月和 8 月、1994 年 4 月和 8 月、2002 年 5 月和 8 月 6 期 TM 遥感数据, 结合 1957~2002 年区域相关统计资料, 得到研究区各植被类型的年均增长率。以年均增长率作为重建因子, 通过各植被类型年均增长率和重建年限确定研究区植被变化总量, 将变化量按比例分配到每个地块上。基于 ENVI/IDL 语言编程环境编程实现了模拟程序, 以单独的地块作为计算的基本单元, 地块的空间扩张设计为八方向均匀扩张 (或收缩)。根据 1987 年三门峡地区植被类型分布图, 输入各植被年均增长率、重建年限, 在模拟程序中实现了上世纪 50 年代、60 年代和 70 年代三门峡地区植被类型时空分布的重建。

在  $Kc$  计算过程中, 植被高度数据是根据土地覆盖类型以及生长季节设定, 生长季 (4~10 月份) 参考张远等在黄河流域研究中设定的数值<sup>[24]</sup>, 林木高度 12m, 农作物高度 0.40m, 草生长高度 0.20m, 灌丛 0.80m; 非生长季设定林木高度 0.3m, 农作物高度 0.20m, 草生长高度 0.20m, 灌丛 0.25m。

5 结果验证与分析

5.1 结果验证

利用研究区附近的泾川 LAS 站观测的 2006 年 1 月日均显热通量值, 基于能量平衡, 得到观测点的日均蒸散发, 即植被生态用水量, 验证像元选取 LAS 发射端和接收端的光径路线所对应的像元。

将观测值与模拟结果进行验证分析 (见图 3)。

验证结果表明, 模拟值和实测值的相关系数为 0.90, 平均相对误差为 9.4%, 在一定程度上验证了植被生态用水量模型的有效性。

5.2 植被生态用水结构分析

三门峡地区植被生态用水结构包含两方面内容, 一方面为 20 世纪 50 年代以来研究区植被生态用水量时间结构变化; 另一方面为不同植被覆盖条件下多年植被生态用水空间结构差异。

5.2.1 植被生态用水时间结构分析 将模拟结果进行统计分析, 得到研究区 20 世纪 50 年代以来各个时段生态用水量 (见表 1):

表 1 三门峡地区历史系列植被生态用水结构 (单位: mm/month)

Tab 1 The pattern of historic water use of vegetation in Sanmenxia area (Unit: mm/month)						
年月	1957 年 8 月	1967 年 8 月	1977 年 8 月	1987 年 8 月	1994 年 8 月	2002 年 8 月
ETa	48.45	40.2	44.55	41.55	40.8	61.2

从表 1 和图 4 可以看出, 三门峡地区 20 世纪 50 年代以来, 植被生态用水量总体存在着降低-稳定-上升的趋势, 在 20 世纪 90 年代末 21 世纪初达到最高值, 这与史建国等<sup>[37]</sup>对黄河流域多年平均潜在蒸散量时间变化规律研究结果相符: 自 1957 年以来, 潜在蒸散量总体上呈下降-稳定-上升趋势, 在 20 世纪 90 年代末增到最高; 王浩等<sup>[12]</sup>在对历史事迹系列下垫面情景和 2000 年现状下垫面情景下的水资源评价中, 得到黄河流域有效蒸散发量是呈现增加趋势的。

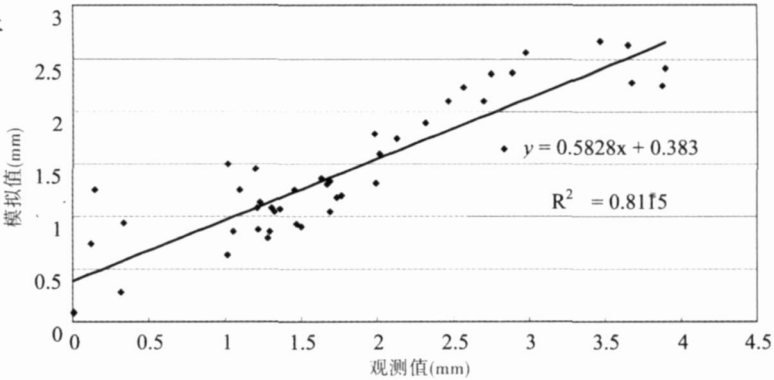


图 3 黄河三门峡地区植被生态用水模拟值与实测值匹配图

Fig. 3 Correlation analysis of simulated and observed result of water use of vegetation in Sanmenxia area

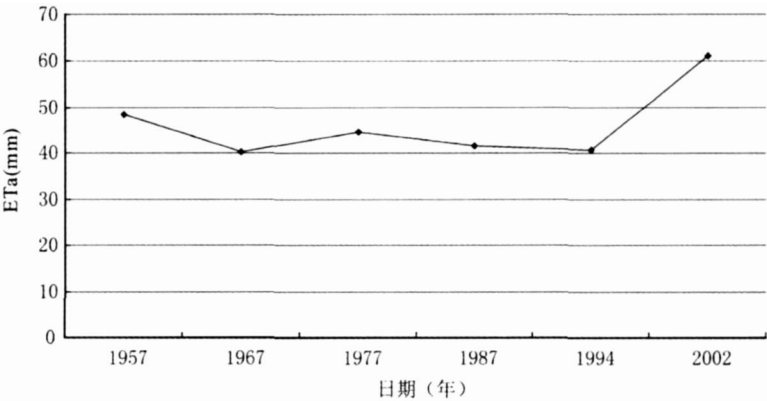


图 4 三门峡地区历史系列植被生态用水量变化趋势

Fig. 4 The trend of historic water use of vegetation in Sanmenxia area

王浩等<sup>[12]</sup>在对历史事迹系列下垫面情景和 2000 年现状下垫面情景下的水资源评价中, 得到黄河流域有效蒸散发量是呈现增加趋势的。

研究区植被生态用水量主要受气候和人类活动两方面的影响，通过对 20 世纪 50 年代以来研究区气候状况的分析，植被生态用水时间变化规律与研究区气温变化趋势相一致，从这里可以看出，研究区植被生态用水受全球气候变暖的影响而有所增加；另一方面，人类活动的影响主要通过改变研究区下垫面状况来间接实现，通过研究区土地利用结构的分析，由于三门峡水库运行模式的影响，1987 至 2002 年间研究区耕地面积减少了近一半<sup>[13]</sup>。根据已有研究成果表明<sup>[2]</sup>，由于农作物根系深度远小于森林植被，相应的植被截留损失较小，生长季较短，因此，耕地面积的减少，意味着植被生态用水量增加，与我们得到的结果相符。

5 2 2 植被生态用水空间结构分析 不同的林、灌、草、农作物种植比例和农作物种植结构，使得研究区植被生态用水量差异很大。因此，不同植被类型生态用水的确定，是地区植被结构调整和水资源结构调整的关键。将三门峡地区区域植被生态用水模拟结果按林地、灌丛、草地和农用地 4 种植被类型进行统计分析，得到三门峡地区 20 世纪 50 年代以来不同植被类型下植被生态用水量（见表 2）。

表 2 三门峡地区不同植被类型下植被生态用水结构 （单位：mm/ month）

Tab 2 The ecological water use of different vegetation types in Sanmenxia area （Unit: mm/month）

年月	林地	灌丛	草地	农用地
1957-8	56 45	48 65	40 43	50 83
1967-8	50 46	43 28	38 92	48 95
1977-8	64 09	50 55	39 67	57 64
1987-8	51 45	41 84	38 15	44 46
1993-8	48 89	40 88	34 39	45 17
2001-8	71 21	57 48	48 39	65 58

由表 2 可见，三门峡地区林地、草地、灌丛和农用地单位面积生态用水量平均值分别为：55.07mm、38.85 mm、45.67 mm、51.27 mm，农作物和林地生态用水相当，但作物生态效益远远小于林地和草地。黄河三门峡地区林地、草地、灌丛和农用地植被生态用水空间结构，对于水资源短缺的干旱地区植被结构和水资源调整尤为重要。

5 3 绿水资源消耗效用分析

在黄河三门峡植被生态用水结构分析基础上，将植被生态用水又分为高效消耗和低效消耗（见表 3），进而分析不同植被类型下绿水资源消耗效用。

表 3 三门峡地区不同植被类型下绿水资源消耗效用 （单位：mm/ month）

Tab 3 The green water of different vegetation types in Sanmenxia area （Unit: mm/month）

年月	林地		灌丛		草地		农用地	
	低效消耗	高效消耗	低效消耗	高效消耗	低效消耗	高效消耗	低效消耗	高效消耗
1957 年 8 月	26 49	29 96	24 56	24 09	18 78	21 65	31 96	18 87
1967 年 8 月	22 98	27 48	21 72	21 56	17 94	20 98	34 97	13 98
1977 年 8 月	31 07	33 02	25 88	24 67	19 66	20 01	37 06	20 58
1987 年 8 月	24 72	26 73	22 36	19 48	18 17	19 98	28 25	16 21
1993 年 8 月	23 66	25 23	21 53	19 35	16 61	17 78	30 9	14 27
2001 年 8 月	34 16	37 05	29 91	27 57	23 92	24 47	43 11	22 47

由表 3 可见，研究区林地、草地、灌丛和农用地绿水资源单位面积低效消耗量分别为：27.18mm、22.79mm、29.91mm、34.47mm，其中低消耗量分别为相应植被类型条



件下总有效消耗量的 46.7%、47.9%、50.7%、66.3%。在有效消耗量中,农用地低消耗量占较大比重,林地和草地的高效和低效耗量相近,但草地的低消耗量大于林地,这一结论与王浩等的研究结果基本一致<sup>[33]</sup>。

从这里可以看出,对于三门峡地区而言,要提高绿水资源消耗效用,应增加高消耗量的植被类型覆盖,如林地和草地等;调整种植结构和种植密度,减少棵间土壤的低效消耗,特别是农田和灌丛的棵间土壤蒸发消耗。

#### 5.4 植被结构调整方案

从三门峡地区绿水资源消耗效用结构来看,林地的高消耗量最大,其次为草地、灌丛,农用地最小,其中林地和草地的低消耗量最小。

三门峡地区绿水资源消耗效用结构,从一个方面反映了该区域水资源利用的结构,以及生态效益和经济效益的结构。从而可以为该区域水资源结构调整提供一定的依据。水资源结构调整不仅仅与水资源有关,还与土地资源有关。

在对该区域绿水资源消耗效用结构分析的基础上,对该区域植被结构调整也是水资源结构调整的一个重要方面。植被结构调整包括两个层次:(1)调整农作物、灌丛、林地和草地结构。从该区域绿水资源利用率结构分析,林地和草地最高,农作物最低,而且林地和草地的生态效益远高于农作物,因此,对于该区域来讲,退耕还林(草),有利于缓和该地区生产、生活、生态“三生用水”矛盾;(2)优化农作物内部结构,选择保水性更好的草种,也是植被结构调整的一个重要方面。在文中没有对具体作物品种需水量差异进行分析,在以后的研究中,这也是很关键的,而且具有重要的实际意义。

### 6 结论

(1)在人类活动和气候变化的影响下,黄河三门峡地区 20 世纪 50 年代以来,植被生态用水量总体存在着降低-稳定-上升的趋势,在 20 世纪 90 年代末 21 世纪初达到最高值;

(2)黄河三门峡地区林地、草地、灌丛和农用地单位面积生态用水量平均值分别为:55.07mm、38.85mm、45.67mm、51.27mm,农作物和林地生态用水相当,但作物生态效益远远小于林地和草地;

(3)研究区林地、草地、灌丛和农用地绿水资源单位面积低效消耗量分别为:27.18mm、22.79mm、29.91mm、34.37mm,其中低消耗量分别为相应植被类型条件下总有效消耗量的 46.7%、47.9%、50.7%、66.3%。在有效消耗量中,农用地低消耗量占较大比重,林地和草地的高效和低效耗量相近,但草地的低消耗量大于林地;

三门峡地区植被生态用水结构和绿水资源消耗效用分析为研究区植被建设和水资源优化配置提供依据:在绿水资源利用中必须加强调控和管理,调控绿水资源消耗效用,增加植被盖度,减少裸地面积,从而减少绿水资源的无效消耗量;此外还要调整植被结构,以减少植被棵间土壤的低效消耗量。

#### 参考文献:

- [1] Alexandratos N, Wiley J, Chicheste S. World Agriculture: Towards 2010. FAO, 1995.
- [2] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展. 地球科学进展, 2006, 21(3): 221~ 227.
- [3] Postel S L, Daily G C, Ehlich P R. Human appropriation of renewable fresh water. Science, 1996, 271: 785

~ 788

- [ 4 ] Rockström J, Gordon L. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001, 26( 11~ 12): 843~ 851.
- [ 5 ] L'vovich M I, White G I. Use and transformations of terrestrial water systems. In: WCC Turner, B L *et al.* ( eds ), *The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere over the Past 300 years*. U K: Cambridge University Press, 1990.
- [ 6 ] Gordon L, Jønsson B, Johannessen A, *et al.* Large scale redistribution of global vapor flows by deforestation and irrigation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2003, 358: 1973~ 1984.
- [ 7 ] Gerten D, Hoffmann A, Bondean A, *et al.* Contemporary green water flows: Simulations with a dynamic global vegetation and water balance model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30: 334~ 338.
- [ 8 ] Dunn S M, Mackay R. Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, 1995, 171: 49~ 73.
- [ 9 ] 焦士兴. 黄河流域水资源开发利用研究. *商丘师范学院学报*, 2005, 21( 2 ) : 148~ 150.
- [ 10 ] 唐德善. 黄河流域水资源供需分析. *水利水电科技进展*, 1995, 15( 2 ) : 40~ 43.
- [ 11 ] 尹国康. 黄河流域环境对水资源开发承受力的考虑. *地理学报*, 2002, 57( 2 ) : 224~ 231.
- [ 12 ] 王浩, 等. 人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探. *自然资源学报*, 2005, 20( 2 ) : 157~ 162.
- [ 13 ] 李景玉, 杨胜天, 等. 三门峡水库回水变动区土地利用/ 土地覆被变化及其景观格局分析. *农业工程学报*, 2007, 23( 3 ) : 61~ 68.
- [ 14 ] 毛战坡, 等. 三门峡水库运行水位对湿地水文过程影响研究. *中国水利水电科学研究院学报*, 2006, 4( 1 ) : 36~ 41.
- [ 15 ] 韦洪莲, 等. 三门峡水库运行模式对黄河下游水环境的影响. *水利学报*, 2004, ( 9 ) : 9~ 17.
- [ 16 ] 王芳, 梁瑞驹, 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.
- [ 17 ] 左其亭. 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.
- [ 18 ] 陈锐. 流域尺度生态需水的估算模型与应用——以克里雅河流域为例. *地理研究*, 2005, 24( 5 ) : 725~ 732.
- [ 19 ] Gleick P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1998, 8( 3 ) : 571~ 579.
- [ 20 ] 崔宝山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究. *环境科学学报*, 2002, 22( 2 ) : 213~ 218.
- [ 21 ] 王西琴, 张远, 等. 辽河流域生态需水估算. *地理研究*, 2007, 21( 6 ) : 22~ 29.
- [ 22 ] 宋炳煜, 杨劫. 关于生态用水研究的讨论. *自然资源学报*, 2003, 18( 5 ) : 617~ 625.
- [ 23 ] 张思玉, 杨辽, 陈戈萍. 生态用水的概念界定及其在西北干旱区实施的策略. *干旱区地理*, 2001, 24( 3 ) : 277~ 281.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] 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~ 17.
- [ 26 ] 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 ) : 2130~ 2135.
- [ 27 ] FAO 1995. Land and water integration and river basin management. Proceeding of an informal workshop 31 Jan~ 2 Febr 1993. Land and Water Bulletin. Food and Agricultural Organization. Rome.
- [ 28 ] Malin Falkenmark. GREEN WATER- CONCEPTUALISING WATER CONSUMED BY TERRESTRIAL ECOSYSTEMS. GLOBAL WATER NEWS No. 21 August 2005| www. gwsp. org.
- [ 29 ] 刘昌明. 土壤水的资源评价. 刘昌明, 任遵道主编: 水量转换——实验与计算分析. 北京: 科学出版社, 1988.
- [ 30 ] Ringersma J, Satjes N, Dent D. Green Water: Definitions and Data for Assessment( ISRIC Report ). Wageningen, December, 2003.
- [ 31 ] Savenije H H G. Water scarcity indicators: The deception of numbers. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, 25( 3 ) : 199~ 204.
- [ 32 ] Falkenmark M. Land-water linkages: A synopsis. In: Land and Water Integration and River Basin Management. Land and Water Bulletin No. 1, FAO, Rome, 1995: 15~ 17.
- [ 33 ] 王浩, 杨贵羽, 等. 基于区域 ET 结构的黄河流域土壤水消耗效用研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37( 12 ) : 1643~ 1652.

- [34] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceeding of Royal Societ, Annually, 1948, 193: 454~ 465
- [35] Allen Richard G, Luris S. Pereria, DirkRaes, *et al.* Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage. Rome: Food and Agriculture Organization of the Unites Nations 1998, 56
- [36] Jensen E. 耗水量与灌溉需水量. 马文 译. 北京: 农业出版社, 1982
- [37] 史建国, 严昌荣, 等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析. 干旱区研究, 2007, 24(6): 773~ 778

## The analysis on the pattern of eco-water use of vegetation and the availability of green water in Sanmenxia area of Yellow River

WANG Yu-juan<sup>1</sup>, YANG Sheng-tian<sup>1</sup>, LIU Chang-ming<sup>2,3</sup>, DAI Dong<sup>4</sup>,  
ZHENG Dong-hai<sup>1</sup>, ZENG Hong-juan<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

4. Hydrological Office of Yellow River Conservancy Committee, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** In recent years, regional vegetation water use has been a new and “hot” field in ecology, hydrology and water resources, especially in the arid and semiarid regions. Economic development of the Yellow River Basin is based upon energy, heavy chemical industry, grain and cotton. These activities, combined with climate change, have resulted in a shortage of water resources. In this paper, an eco-hydrological model was constructed to simulate the regional vegetation water use. The patterns of eco-water use by vegetation in Sanmenxia area of the Yellow River were studied using RS and GIS technology, TM data, meteorological data, observed data and vegetation and soil texture information. On the basis of the patterns of regional vegetation water use, the availability of green water are analyzed for different vegetation types. The results are as follows: due to the variation of climate and land cover, the eco-water use of vegetation has had a trend of decreasing stable-increasing in Sanmenxia area since the 1950s; different vegetation types have different patterns. Forest, shrub, grass and farmland were chosen to compare eco-water amount, indicating forest > corn field > shrub > grass. Among them, the forest has the highest utility of green water, followed by grassland, shrub and farmland. Based on these calculations and analyses, the countermeasures suggested for high-efficiency use of water and land resources are: to adjust vegetation structure and crops structure to realize optimal allocation of water resources.

**Key words:** ecological water use of vegetation; green water availability; Sanmenxia