

旱区植被生态需水量间接法计算参数的研究

姜田亮, 张恒嘉, 马国军, 石媛媛, 王雅云
(甘肃农业大学 水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 植被生态需水问题是水资源优化配置和生态环境研究的热点, 间接计算法是量化干旱地区天然植被生态需水量的主要方法。为了使计算结果更加准确, 结合 0.618 法与去极值法对间接法计算公式中潜水蒸发量 E 的计算做出改进, 建立植被系数 K 的二阶 Gaussian 模型, 最后运用灰色模型 GM(1,1) 对植被面积 S 的发展趋势进行预测。结果表明: 优化所得潜水蒸发量——埋深曲线对实测数据拟合度更好, 植被系数取值更加精确, 以甘肃省民勤县为例, 计算出该地 2015 年各类植被面积与资料记载差异较小, 所得生态需水量结果与 FOA 推荐使用的 Penman-Monteith 模型相比无显著差异。在此基础上预测出 2020 年民勤县天然植被生态需水总量为 $4060.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中天然林地生态需水量预测为 $3100.1 \times 10^4 \text{ m}^3$, 天然草地生态需水量为 $960.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。研究使间接计算法对植被生态需水量的量化更加准确, 为干旱地区水资源的分配及生态恢复政策的制定奠定了一定的研究基础。

关键词: 植被生态需水量; 潜水蒸发量; 植被影响系数; 植被面积; 灰色模型 GM(1,1); 干旱区

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0254-07

Study on indirect calculation method parameters for ecological water requirement of vegetation in arid area

JIANG Tianliang, ZHANG Hengjia, MA Guojun, SHI Yuanyuan, WANG Yayun

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The ecological water requirement of vegetation is a hotspot in the research of optimal allocation and ecological environment, and the indirect calculation method is the main method to quantify the ecological water requirement of natural vegetation in arid area. In order to calculate more accurate, by combining the 0.618 method and the Extremum method to improve the calculation of the submersible evaporation of the indirect method, we established the second order Gaussian model of vegetation coefficient K and forecasted the development trend of the vegetation area S with the grey model GM(1,1). The results showed that the optimized phreatic water evaporation - buried depth curve fitted the measured data better, and the vegetation coefficient were more accurate. Taking the Minqin County of Gansu Province as an example, the difference of area between recorded and calculated data in 2015 was small, and the results of ecological water requirement were not significantly different from those of FOA recommended Penman-Monteith model. Based on which, the total ecological water requirement of Minqin County natural vegetation in the 2020 was predicted to be 40.608 million m^3 , of which the ecological water requirement of natural forest was 31.001 million m^3 , and the ecological water requirement was 9.607 million m^3 . The indirect calculation method is more accurate for the quantification of ecological water requirement of vegetation, which lays a foundation for the allocation and policy of ecological restoration in arid areas.

Key words: ecological water requirement of vegetation; phreatic water evaporation; vegetation influence coefficient; vegetation area; grey model GM(1,1); arid area

收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669001)

作者简介: 姜田亮(1993-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事生态需水及其机理研究。

通讯作者: 张恒嘉(1974-), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究。

1 研究背景

植被恢复是退化绿洲生态系统重建的关键,对于水资源供需矛盾突出,生态环境相对脆弱的干旱地区,植被生态需水量的准确计算对于指导该区域植被生态恢复与生态建设具有重要意义^[1]。目前植被生态需水量计算的方法主要有直接算法、间接算法、水量平衡方程法以及基于遥感技术的计算方法^[2]。对地下水依赖较强的干旱地区,天然植被的生态需水量可以通过潜水蒸发来估算,即间接算法^[3-5],计算公式为:

$$W = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot K_i \cdot S_i) \quad (1)$$

式中: W 为天然植被生态需水量, m^3 ; E_i 为第 i 种植被的潜水蒸发强度, mm ; K_i 是第 i 种植被影响系数; S_i 为第 i 种植被所占面积, hm^2 。对上述参数进行合理计算是准确量化天然植被生态需水量的关键。

潜水蒸发强度 E 的大小决定着影响植物生长的土壤水分状况,土壤稳定蒸发时,地表蒸发强度与土壤含水量都保持稳定,三者数值上相等。目前主要有两种计算方法:一种是根据降雨量、温度、辐射量等气象因素建立模型,如 Penman - Monteith 模型、Hargreaves 模型等^[6],但这类模型的计算需要长期观测和积累大量气象数据,很难应用于部分工作基础较差(难以通过试验获取所需数据)且模型参数获取困难的干旱地区;另一种是建立潜水蒸发量与埋深的关系模型,常见的关系模型大体可分为 3 类:第 1 类是潜水蒸发系数与潜水埋深呈单一的相关关系,如叶水庭指数型公式^[7],由于忽视了 E 与蒸发能力相关的规律,故有一定的局限性。第 2 类公式对此进行了改进,同时考虑了 E 与埋深及蒸发能力的关系,如沈立昌公式^[8]。第 3 类是潜水蒸发系数与土壤输水特性及土表蒸发具有相互关系,如雷志栋公式^[9]。已有研究表明^[10],后两类公式拟合埋深大于 1 m 的实测资料较好。由于 3 类计算公式具有不同的适用条件,本文基于 MATLAB 软件利用去极值法和 0.618 法对 7 个常用公式所得结果进行优选,并提出一种无实测数据情况下的潜水蒸发量估算方法。

植被系数 K 反映了一定区域内植被对潜水蒸发量的影响,不同植被适宜生存的地下水埋深不同,利用植被地段的潜水蒸发量除以无植被地段的潜水蒸发量求得^[11]。目前旱区植被系数选取,主要参照河西走廊玉门镇有关的试验结果^[12],即查表法。为

克服查表法信息局限的缺点,本文基于已有试验数据建立了潜水埋深与植被系数间的关系函数,为植被系数 K 的选取提供更为科学有效的方法。

植被覆盖面积 S 是一个地区生态环境的综合反映,现阶段,植被覆盖面积一般通过遥感影像人工解译土地利用覆盖图,在此基础上运用 ARCGIS9.0 软件统计出各种天然植被的覆盖情况^[13]。研究植被面积的变化趋势的常用方法有时间序列法、灰色模型法、生长曲线法、生产函数法、回归分析法和马尔科夫模型等^[14],其中灰色模型 GM(1,1) 不需要大量样本就能得到较为准确的预测结果,可应用于干旱地区植被面积的预测分析。

通过对公式中参数值的优选及算法改进,有助于植被生态需水量的准确量化和间接算法的推广,为旱区水资源的分配及生态恢复政策的制定提供合理依据。

2 试验地点及数据来源

2.1 民勤县概况

民勤绿洲位于 $38^{\circ}03' \sim 39^{\circ}28'N$ 、 $101^{\circ}49' \sim 104^{\circ}12'E$,沿石羊河两岸呈西南 - 东北向带状分布,西、北、东三面被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠包围。气候干燥,降水稀少,蒸发强烈,温差较大,属于典型的干旱地区,多年平均蒸发量 $2\ 644\ mm$ ^[15]。历史记载中民勤水草丰盛,草甸及沼泽植被是过去绿洲主要的原生植被^[16]。现如今地下水的严重超采致使地下水埋深急剧加大,土壤盐渍化、沙化,水质恶化日益严峻,进而导致植被覆盖率降低,生态环境遭到严重破坏,给经济发展和区域内人民的生活带来了严重的威胁^[17-18]。因此,民勤地区植被生态需水量准确计算对指导该地区水资源的优化配置与生态建设具有重要的意义。

2.2 数据来源

民勤地区各类植被面积数据以《民勤县国民经济和社会发展统计资料汇编》^[19] 为准;对照组使用张奎俊^[16]对石羊河流域下游进行研究所得潜水埋深 - 蒸发埋深数据;阿维里昂诺夫参数的选取依据中科院寒区旱区研究所和甘肃省水文二队在典型干旱区玉门、张掖试验所标定的值^[20-21];各植被最适地下水埋深数据以栗晓玲^[22]和杨秀英等^[23]的研究为依据。

3 研究方法

3.1 潜水蒸发量 E 的优选

由于现有潜水蒸发模型适用条件不同,若利用

常规方法对潜水蒸发量计算,则对不同埋深下的潜水蒸发量反映不够理想。因此,利用 MATLAB 将各类公式(表 1 中公式 1~7)编入同一个程序,分别对不同埋深的潜水蒸发点进行拟合,排除不满足相关度的模型公式后,结合去极值法和 0.618 法进行结果优选,编程思路如下:

由于民勤县极限地下水位埋深 h_{max} 为 4.5m^[18],因此 h 以 [1,4.5] 为区间、0.01 为步长增长,代入各公式得到 350 组不同的潜水蒸发量,构成矩阵 E :

$$\begin{bmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & \cdots & E_{1,6} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & \cdots & E_{2,6} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_{350,1} & E_{350,2} & \cdots & E_{350,6} \end{bmatrix}$$

去掉每行的最大值、最小值得到新的矩阵 E' :

$$\begin{bmatrix} E'_{1,1} & E'_{1,2} & \cdots & E'_{1,6} \\ E'_{2,1} & E'_{2,2} & \cdots & E'_{2,6} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E'_{350,1} & E'_{350,2} & \cdots & E'_{350,6} \end{bmatrix}$$

用下式求得优化结果 $E_{优化}$:

$$E_{优化} = \max(E'_i) \times 0.618 + \min(E'_i) \times 0.382 \quad (2)$$

$(i = 1, 2, \dots, 350)$

表 1 潜水蒸发公式

公式编号	公式名称	公式形式	参考文献
1	沈立昌公式	$E = c\mu E_0^a / (1 + h)^b$	[8]
2	叶水庭公式	$E = E_0 e^{-ah}$	[7]
3	雷志栋公式	$E = ah^{-b} (1 - e^{-0.85E_0/ah-b})$	[9]
4	毛晓敏公式	$E = E_0 [1 - (h - \Delta h)/h_0]^a$	[24]
5	张朝新公式	$E = aE_0 / (h_0 + N)^b$	[25]
6	反 log 公式	$E = cE_0 / ae^{bh}$	[26]
7	束苍龙公式	$E = aE_0^{(1+b)} (1 - h/h_0)^c$	[27]
8	阿维里昂诺夫公式	$E = aE_0 (1 - h/h_0)^b$	[28]

注: a, b, c 为经验参数,即拟合系数; E_0 为大气蒸发量,mm/d; h 为地下水埋深,m。

针对部分研究地区试验条件有限,缺乏实测潜水蒸发量-埋深数据的现状,可以根据研究区的土壤和气候特点,使用相似地区阿维里昂诺夫经验参数模拟出数据点进行计算。阿维里昂诺夫模型形式简单(公式 8),易于推广,现已被广泛应用于实际生产,积累了大量的研究资料。选取 3 组阿维里昂诺夫经验参数,以 3 组不同的潜水埋深(1、2、3、4 m); (1.35、2.65、3.35、4.35 m); (1.75、2.25、3.75、3.85 m)生成模拟蒸发点进行拟合。

3.2 植被影响系数 K 的计算

K 值的常规解法是查表法^[22-23],如表 2 所示。但当潜水埋深取值不在表中时, K 只能通过专业人员估值得到,降低了结果的准确度。利用 MATLAB 中的二阶 Gaussian 函数对数据进行准确拟合,结果如公式(3)和图 1。

$$K_i = 1353.5 \exp\left(-\left(\frac{h + 16.59}{6.79}\right)^2\right) + 1.07 \exp\left(-\left(\frac{h - 3.13}{1.92}\right)^2\right) \quad (3)$$

式中: h 为潜水埋深,m。经检验, R 为 0.9957,拟合度较高。

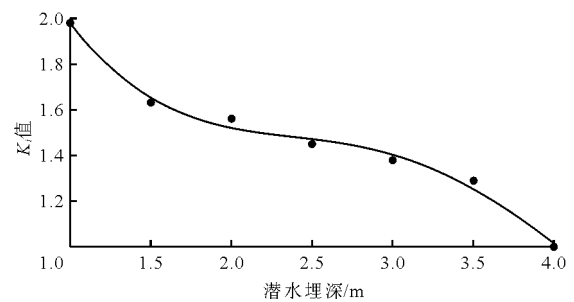


图 1 K_i 值拟合曲线

表 2 干旱区潜水埋深与植被影响系数表

潜水埋深/m	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
植被影响系数	1.98	1.63	1.56	1.45	1.38	1.29	1.00

3.3 植被面积 S 的研究预测

利用灰度模型 GM(1,1) 分别对乔木林、灌木林、疏林地、高盖度草地、中盖度草地 2005-2014 年的面积数据进行率定,通过后验差检验,得到 2015 年各植被面积,与记载资料^[19]进行对比验证,进而对 2020 年植被面积进行预测。灰度模型具体思路如下^[29]:

(1) 各植被面积原始序列数据为 $x^{(0)}(k) = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$, 并对其作累加处理得: $x^{(1)}(k) = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

(2) 灰度模型 GM(1,1) 的建立。即:

$$\alpha x^{(1)} + \frac{dx^{(1)}}{dt} = \mu \quad (4)$$

式中: μ 为内生控制灰数; α 为发展灰数。

(3) 向量 Y 和矩阵 B 的构建:

$$B = \begin{bmatrix} -[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)]/2 & \cdots & 1 \\ -[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)]/2 & \cdots & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ -[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)]/2 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (6)$$

(4) 利用最小二乘法估计模型参数可得:

$$a = B^T(B^T B)^{-1} Y \quad (7)$$

其中,待估参数向量 $a = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$, 微分方程 $Y = Ba$ 。

(5) 预测模型求解:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \mu/\alpha + [x^{(0)}(1) - \mu/\alpha]e^{-\alpha k} \quad (8)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n$$

(6) 利用累减还原法得到灰色预测模型:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (9)$$

(7) 后验差法计算残差,得:

$$e(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), \quad (10)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

残差序列 e 和原始序列 $x^{(0)}$ 的方差分别是 S_1^2 、 S_2^2 , 其中:

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [e(k) - \bar{e}]^2 \quad (11)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2 \quad (12)$$

式中: $\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e(k)$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k)$ 。

后验差比为:

$$C = S_2/S_1 \quad (13)$$

精度检验等级如表 3 所示。

表 3 精度检验等级参照表

模型精度等级	均方差比值 C
1 级(优)	$C \leq 0.35$
2 级(良)	$0.35 < C \leq 0.5$
3 级(合格)	$0.5 < C \leq 0.65$
4 级(不合格)	$C > 0.65$

4 结果分析

4.1 潜水蒸发量

在充分考虑不同植被盖度的蒸腾量、不同水质以及地下水埋深与植被蒸腾量的相关关系的基础上,对表 4 中阿维里昂诺夫初始参数生成的模拟点进行拟合,结果如图 2~5。各公式拟合度均大于 $R_{0.05}$, 线性关系合理,与 3 种经典公式相比,优选曲线拟合程度更好。与张奎俊^[16]在民勤所做潜水蒸发试验结果进行对比,相关系数 R 分别为 0.918, 0.917, 0.907, 0.926, P 值分别为 0.912, 0.849, 0.900, 0.911, 0.934, 其中优化结果的相关系数最大,且无差异的显著性水平最高,如表 5 所列,说明了优化的合理性。

表 4 阿维里昂诺夫初始参数

参数	第 1 组	第 2 组	第 3 组
a	0.606	0.620	0.600
b	2.349	2.800	2.128

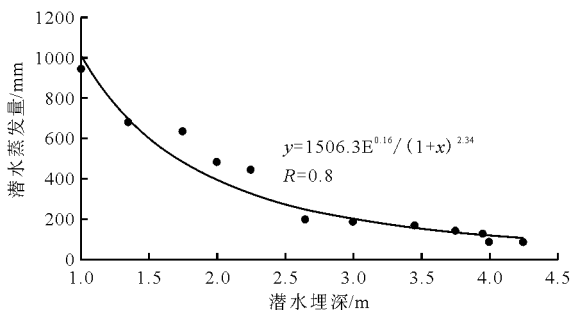


图 2 沈立昌公式拟合结果

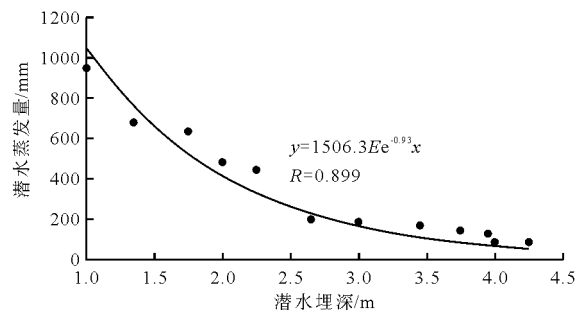


图 3 叶水庭公式拟合结果

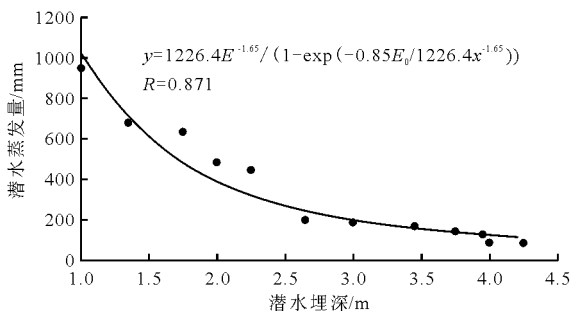


图 4 雷志栋公式拟合结果

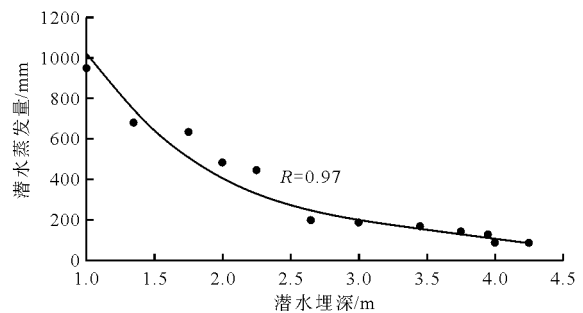


图 5 优选结果

表5 各公式拟合结果与张奎俊模拟点相关性分析及差异性检验

计算公式	不同埋深下的潜水蒸发量/mm								相关系数 R	$R_{0.05}$	p 值
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.25			
沈立昌公式	1042.894	617.839	325.747	264.095	153.243	115.883	87.659	85.380	0.918	0.707	0.912
叶水庭公式	1056.182	669.789	345.795	268.157	125.054	79.127	47.584	45.225	0.917	0.707	0.900
雷志栋公式	1056.882	624.001	319.025	258.767	120.761	104.075	92.761	83.254	0.907	0.707	0.911
优化结果	1051.106	652.301	338.137	266.605	142.475	101.842	72.351	70.041	0.926	0.707	0.934
张奎俊结果	993.103	706.864	360.596	274.549	163.589	150.268	94.344	83.133	1	0.707	1

4.2 植被系数

据栗晓玲^[22]和杨秀英等^[23]的研究,民勤地区乔木林的最适地下水埋深为1~4.5 m,灌木林3~4 m,疏林地3.5~4.5 m,高覆盖度草3~4.5 m,中覆盖度草4~4.5 m。选取中间值作为计算埋深代入公式(2),得到各类植被影响系数及潜水蒸发量,结果如表6所列。

表6 各类植被不同地下水埋深植被影响系数及潜水蒸发量

植被类型	地下水埋深/m	计算埋深/m	植被影响系数	潜水蒸发量/mm
乔木林	1.0~4.5	3.3	1.324	153.06
灌木林地	3.0~4.0	3.5	1.253	134.38
疏林地	3.5~4.5	4.0	1.016	99.01
高覆盖度草地	3.0~4.5	3.7	1.167	118.53
中覆盖度草地	4.0~4.5	4.0	1.016	99.01

4.3 植被面积

利用民勤县2005年至2014年的数据对模型进

行率定,依据公式(4)和(7)计算得出,代入式(8)则分别得到乔木林、灌木林、疏林地、高覆盖度草及中覆盖度草的面积累计预测公式,得到5个单一灰色GM(1,1)模型,结果皆通过后验差法进行检验。基于Matlab编程并代入面积数据运行,结果如表7。

在此基础上计算,到2015年,乔木林、灌木林、疏林地面积分别为1475、7181、13025 hm²,高覆盖度草地和中覆盖度草地面积分别为1571、6873 hm²。《民勤县2015年国民经济和社会发展统计资料汇编》统计,乔木林、灌木林、疏林地面积分别为1498、7943、12901 hm²,高覆盖度草地、中覆盖度草地面积分别为1600、6954 hm²。两组数据 p 值为0.9611,无差异。2015年结果如图6~10所示。代入公式(1),得到2015年民勤县生态需水量为3726.8×10⁴ m³,其中乔木林需水量为299.0×10⁴ m³,灌木林1208.9×10⁴ m³,疏林地需水量为1310.2×10⁴ m³,高覆盖度草为217.3×10⁴ m³,中覆盖度草地为691.4×10⁴ m³。

表7 各植被类型面积计算公式及后验差检验

植被类型	面积计算公式	后验差比	精度
乔木林	$x_1^{(0)}(k+1) = 69826 e^{0.018k} - 68592$	0.1844	优
灌木林	$x_2^{(0)}(k+1) = 345888 e^{0.019k} - 339360$	0.2455	优
疏林地	$x_3^{(0)}(k+1) = 144410 e^{0.009k} - 1325300$	0.2371	优
高覆盖度草地	$x_4^{(0)}(k+1) = 23890 e^{0.043k} - 22873$	0.1607	优
中覆盖度草地	$x_5^{(0)}(k+1) = 3049523 e^{0.0022k} - 3042800$	0.1965	优

注: $k = 2 \sim 10$,代表2006~2014年的时间序列, $x^{(0)}(1)$ 为2005年的植被面积。

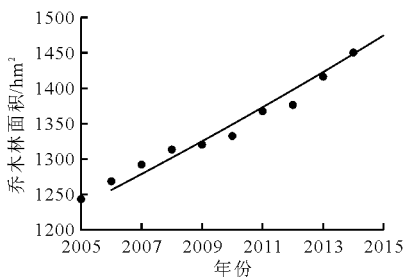


图6 乔木林面积增长趋势

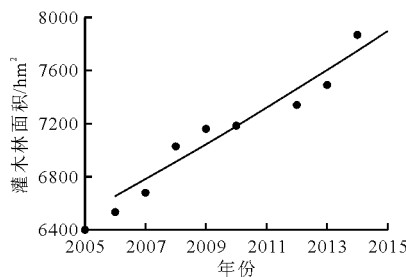


图7 灌木林面积增长趋势

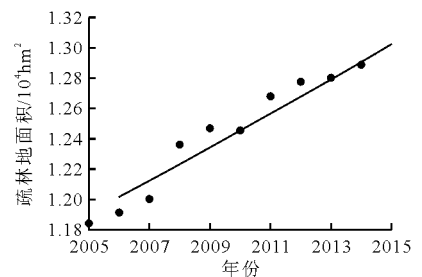


图8 疏林地面积增长趋势

因此可以预测,到 2020 年,民勤县乔木林面积将达到 $1\ 623\ \text{hm}^2$,灌木林 $7\ 899\ \text{hm}^2$,疏林地 $14\ 328\ \text{hm}^2$,高覆盖度草 $1\ 728\ \text{hm}^2$,中覆盖度草 $7\ 141\ \text{hm}^2$ 。届时民勤县天然植被生态需水量为 $4\ 060.8 \times 10^4\ \text{m}^3$

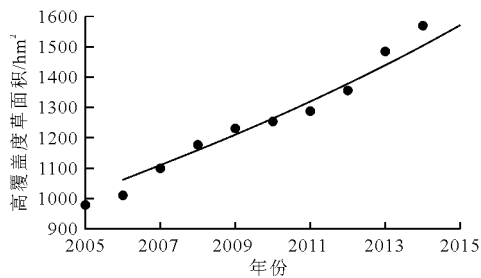


图 9 高覆盖度草面积增长趋势

m^3 ,其中乔木林 $329.0 \times 10^4\ \text{m}^3$,灌木林地 $1\ 329.8 \times 10^4\ \text{m}^3$,疏林地 $1\ 441.3 \times 10^4\ \text{m}^3$,高覆盖度草地 $239.0 \times 10^4\ \text{m}^3$,中覆盖度草地 $721.7 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。

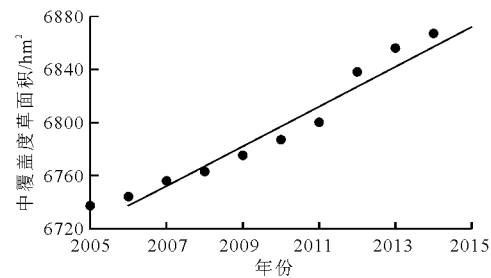


图 10 中覆盖度草面积增长趋势

5 讨论

本研究探求潜水蒸发量 E 是对众多潜水蒸发公式所得结果的优选,无具体的模型公式,所得潜水蒸发量-埋深曲线是由大量优选点组成的折线,需要借助计算软件(如 MATLAB)进行编程求解。由图 2~5 可见,当埋深较浅时,对潜水蒸发量取值影响较大的是第一类公式;当埋深大于 $3.5\ \text{m}$,由更适宜计算该埋深条件的二、三类公式决定潜水蒸发量降低速率,因此图 5 中优化的潜水蒸发量-埋深曲线更具有代表性。

由图 1 见,植被系数 K 的减小速率随埋深增先逐渐变小,后趋于稳定,最后逐渐变大。已有文献^[30-31]发现,不同植被影响系数的大小是一个随潜水埋深变化的函数,其值随地下水埋深的增大而减少。当地下水埋深小于 $2\ \text{m}$ 时,减小速率随埋深的加大逐渐变小,当埋深在 $2\sim 3\ \text{m}$ 时, K 值趋于稳定;当埋深大于 $3\ \text{m}$ 时,减小速率逐渐上升,可以用二阶 Gaussian 函数精确的拟合。朱艳红^[32]研究表明,干旱地区地下水埋深小于 $2\ \text{m}$ 时,土壤含水率减小速率随埋深加大逐渐变小,当潜水埋深大于 $2\ \text{m}$ 时,土壤含水率趋于稳定。上述变化规律与图 1 中 K 值变化趋势一致。因此可得出,在潜水埋深小于 $3\ \text{m}$ 的范围内,土壤水蒸发是影响旱区植被生态需水量的主要因素,此时 K 值的变化速率与土壤含水率变化速率一致。当潜水埋深大于 $3\ \text{m}$ 时,土壤水蒸发对植被生态需水量的影响逐渐变小,而地表植被由蒸腾作用更为强烈的乔木、灌木变为蒸腾作用较弱草地,导致 K 值迅速变小。

Penman-Monteith 模型是一种根据降雨量、温度、辐射量等气象因素建立的潜水蒸发模型,郝博

等^[33]利用该模型计算得出 2015 年民勤县总生态需水量 $4\ 118 \times 10^4\ \text{m}^3$,其中乔木林 $278 \times 10^4\ \text{m}^3$,灌木林地 $1\ 194 \times 10^4\ \text{m}^3$,疏林地 $1\ 431 \times 10^4\ \text{m}^3$,高覆盖度草地 $203 \times 10^4\ \text{m}^3$,中覆盖度草地 $702 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。与本研所得结果相比,各类植被生态需水量相关度为 0.9739 ,大于 $R_{0.05}$, p 值为 0.962 ,两者无差异。总生态需水量较本研究结果偏高,究其原因该方法计算结果中的天然林地包括除以上 3 种林地外的其他林地。

6 结论

(1)通过优化植被生态需水量间接法计算公式中每个参数,更加准确的计算和预测了民勤县的自然植被生态需水量,该方法也为我国部分环境恶劣、试验条件艰苦而难以取得准确观测数据的干旱地区生态需水量的估值提供了科学的参照。其中潜水蒸发量的算法以去极值法和 0.618 优选法为基础,植被影响系数的核心是一元函数的拟合,植被面积的计算及预测运用灰色模型理论,整个方法所使用的理论简单有效、可操作性强,是一种容易推广的计算方法。

(2)预测得到 2020 年民勤县的生态需水量将达到 $4\ 060.7 \times 10^4\ \text{m}^3$,即 2015 年至 2020 年以每年 $66.78 \times 10^4\ \text{m}^3$ 的速度增加。为了恢复绿洲植被面积,实现民勤绿洲的社会经济可持续发展的战略,必须先满足绿洲天然植被的生态需水。地下水的持续超采是民勤绿洲生态恶化的主要原因,因此石羊河的地表径流是民勤最主要的供水源。所以,在合理规划生活、生产用水的前提下,增加进入民勤绿洲的地表水量,是解决水资源危机、缓解地下水持续超采、保证民勤绿洲安全的最重要对策,亦是不容延误

的当务之急。

(3)本研究对民勤县潜水蒸发量进行估算时,由于未使用实测潜水蒸发量-埋深点,因此估算结果很大程度上取决于阿维里昂诺夫公式初始参数的选择,其中初始参数 a 与优化结果呈正相关, b 呈负相关。为了更加准确的估算天然植被生态需水量,消除估算所得潜水蒸发量与实际值间偏差,今后应考虑观测和确定不同植被类型在不同地下水位所对应的潜水蒸发参数,准确掌握植被蒸腾与潜水位之间的关系,以提高生态需水的计算精度。

参考文献:

- [1] 周丹,沈彦俊,陈亚宁,等.西北干旱区荒漠植被生态需水量估算[J].生态学报,2015,34(3):670-680.
- [2] 夏哲超,潘志华,安萍莉.生态恢复目标下的生态需水内涵探讨[J].中国农业资源与区划,2007,28(4):5-8.
- [3] 魏华.植被生态需水理论及计算研究进展[J].现代农业科技,2018(2):179-182.
- [4] 郭巧玲,杨琳洁,李恩宽.额济纳绿洲植被生态需水量空间分布[J].干旱区资源与环境,2013,27(8):103-107.
- [5] 马晓真,解宏伟.基于遥感方法的三江源生态需水量计算[J].青海大学学报,2016,34(3):24-30.
- [6] 刘钰,PEREIRA L S.气象数据缺测条件下参照蒸发量的计算方法[J].水利学报,2001,32(3):11-17.
- [7] 叶水庭,施鑫源,苗晓芳.用潜水蒸发经验公式计算给水度问题的分析[J].水文地质工程地质,1982(4):45-48+6.
- [8] 沈立昌.关于潜水蒸发经验公式的探讨[J].水利学报,1985,16(7):34-40.
- [9] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.潜水稳定蒸发的分析与经验公式[J].水利学报,1984,15(8):60-64.
- [10] 唐海行,苏逸深,张和平.潜水蒸发的实验研究及其经验公式的改进[J].水利学报,1989,20(10):37-44+72.
- [11] 易永红.植被参数与蒸发的遥感反演方法及区域干旱评估应用研究[D].北京:清华大学,2008.
- [12] 张丽.黑河流域下游生态需水理论与方法研究[D].北京:北京林业大学,2004.
- [13] 陈乐,张勃,任培贵,等.石羊河流域天然植被适宜生态需水量估算[J].水土保持通报,2014,34(1):327-333.
- [14] 彭晨蕊,高斌,刘星,等.城市规划中的需水量预测方法研究[C]//规划创新:2010中国城市规划年会论文集.2010.
- [15] 张瑞君,段争虎,谭明亮,等.石羊河流域天然植被生态需水量估算及预测[J].中国沙漠,2012,32(2):545-550.
- [16] 张奎俊.石羊河流域下游民勤绿洲生态需水与措施研究[D].兰州:兰州理工大学,2008.
- [17] 石媛媛,马国军,王雅云,等.荒漠绿洲植被生态需水研究现状及发展趋势——以民勤县为例[J].水资源与水工程学报,2018,29(2):34-38+44.
- [18] 王雅云,纪永福,张恒嘉,等.荒漠绿洲植被生态需水研究进展[J].中国水运(下半月),2018,18(2):123-126+162.
- [19] 民勤县统计局,国家统计局.民勤县国民经济和社会发展统计资料汇编[M].武威:民勤县电力圣典出版社,2005-2015.
- [20] 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.
- [21] 赵文智,黑河流域生态需水量与生态地下水位研究[R].中国科学院,2003.
- [22] 粟晓玲.石羊河流域面向生态的水资源合理配置理论与模型研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [23] 杨秀英,张鑫,蔡焕杰.石羊河流域下游民勤县生态需水量研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(1):169-173.
- [24] 毛晓敏,雷志栋,尚松浩,等.作物生长条件下潜水蒸发估算的蒸发面下降折算法[J].灌溉排水学报,1999(2):26-29.
- [25] 张朝新.潜水蒸发系数分析[J].水文,1984(6):39-43.
- [26] 赵成义,胡顺军,刘国庆,等.潜水蒸发经验公式分段拟合研究[J].水土保持学报,2000,14(S1):122-126.
- [27] 束龙仓,荆艳东,黄修东,等.改进的无作物潜水蒸发经验公式[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(6):1859-1865.
- [28] 孙栋元,胡想全,金彦兆,等.疏勒河中游绿洲天然植被生态需水量估算与预测研究[J].干旱区地理(汉文版),2016,39(1):154-161.
- [29] 王勇.基于灰色GM(1,1)模型的城市生活用水量预测[J].地下水,2010,32(2):104-106.
- [30] 吕京京.海流兔河流域地下水对植被指数分布的影响研究[D].北京:中国地质大学,2013.
- [31] 齐蕊,王旭升,万力,等.地下水和干旱指数对植被指数空间分布的联合影响:以鄂尔多斯高原为例[J].地学前缘,2017,24(2):265-273.
- [32] 朱红艳.干旱地域地下水浅埋区土壤水分变化规律研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2014.
- [33] 郝博,粟晓玲,马孝义.甘肃省民勤县天然植被生态需水研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(2):158-164.