

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0164

朱伟峰,王斌,姜宁.利用Free Search算法推求作物水分响应Jensen模型参数[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):142-147., ZHU W F, WANG B, JIANG N. Estimation for parameters of Jensen model using free search algorithm[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 142-147. (in Chinese)

利用 Free Search 算法推求作物水分 响应 Jensen 模型参数

朱伟峰¹, 王斌², 姜宁³

(1. 黑龙江省农田水利管理中心, 哈尔滨 150040; 2. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江大学 水利电力学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 依据最小二乘法原理推求作物水分响应模型参数时可能存在参数不合理、模型模拟精度尚可提升、试验处理少而难于估计模型参数等问题。针对这些问题,以 Jensen 模型参数推求为例,引入自由搜索(Free Search, FS)算法率定作物水分响应模型参数,将 FS 单个动物每步探查行走的位置向量作为参数的一组潜在解,利用 FS 算法的动物群体迁移行为推求一组最优参数,从而改善作物水分响应模型的适用性。三个实例研究结果表明:FS 算法概念清晰,操作便捷,可以直接率定作物水分响应模型参数,不需转换作物水分响应模型的数学形式,能够有效避免参数出现负值或大于 1 等不合理现象,并提升作物水分响应模型的模拟精度;当难于采用线性回归方法时,可以考虑利用 FS 算法推求作物水分响应模型参数。

关键词: 作物水分生产函数; 作物水分响应模型; 残差平方和; 参数估计; 自由搜索

中图分类号: S274.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Estimation for parameters of Jensen model using free search algorithm

ZHU Weifeng¹, WANG Bin², JIANG Ning³

(1. Water Conservancy Management Center of Heilongjiang Province, Harbin 150040, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

3. College of Water Conservancy and Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Using the least square method to estimate the parameters of the model of crop response to water (MCRW) may present some problems such as unreasonable parameters, unsatisfying simulation accuracy, and inestimable parameter due to insufficient irrigation experimental treatments. To solve these problems, Free Search (FS) was used to estimate the parameters of Jensen model in this paper. The position vector of each exploratory step of the individual animal of FS was taken as a set of potential solutions of the parameter, and a set of optimal parameters was estimated based on the animal group migration of the FS algorithm. Three case studies showed that the FS algorithm can calibrate directly the parameters of Jensen model without converting the model. FS can also effectively avoid unreasonable phenomenon such as a negative parameter or a parameter greater than 1, and improve the simulation accuracy of the Jensen model. When it is difficult to adopt the linear regression method, FS

收稿日期: 2018-05-25 修回日期: 2018-09-15 网络出版时间: 2018-10-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180929.1654.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400101); 国家自然科学基金(51009026); 农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题(2015002)

Funds: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0400101); National Natural Science Foundation of China (51009026); Research Project of Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources of the Ministry of Agriculture (2015002)

作者简介: 朱伟峰(1977-), 男, 黑龙江林甸人, 高级工程师, 主要从事灌溉管理、节水灌溉技术推广方面研究。E-mail: zhuweifeng@126.com

通讯作者: 王斌(1976-), 男, 黑龙江桦南人, 副教授, 主要从事农业节水和水文过程模拟研究。E-mail: wangbin@neau.edu.cn

algorithm can be used to estimate the parameters of MCRW.

Key words: crop water production function; model of crop response to water; residual sum of squares; parameter estimation; free search

作物产量与水分投入量(或消耗量)之间的数学关系称为作物水分生产函数(Crop Water Production Function, CWPF),而描述作物水分生产函数的数学模型称为作物水分响应模型(Model of Crop Response to Water, MCRW)^[1-4]。在大量的灌溉试验基础上,国外学者提出了一系列不同形式的作物水分响应模型,这些模型通常可以分为全生育期模型和生育阶段模型两大类,后者一般还可以细分为相加模型和相乘模型,其中常见的相加模型有 Blank 模型、Stewart 模型、Singh 模型等,而 Jensen 模型和 Minhas 模型则是较经典的相乘模型^[1-2,4-8]。我国自 20 世纪 80 年代开始从国外引进各种作物水分响应模型,并针对不同地区的气候、土壤、作物品种等因素与作物产量的关系,通过非充分灌溉试验开展了大量的模型考核、模型筛选及模型参数估计工作,从研究小麦、玉米、水稻等作物扩展为研究棉花、葡萄、马铃薯、红枣等^[8-11],涝渍胁迫、干旱、宽垄沟灌等生产条件也逐渐被考虑进来^[12-14],并把作物不同生育阶段的水分敏感性与作物的根系生长、叶面积气孔效应、光合产物分配等研究结合起来,极大促进了我国节水灌溉理论与实践的发展。

然而,在推求作物水分响应模型参数时,对于全生育期模型,通常结合实测数据,利用一元或多元线性回归方法求解模型参数;而生育阶段模型一般需要经对数变换等方法先将作物水分响应模型转换为线性回归模型,再根据最小二乘法原理求回归系数的最优解从而获得原作物水分响应模型参数。最小二乘法虽然能够保证线性回归模型的残差平方和(Sum of Squares for Error, SSE)最小,但无法保证经过对数变换以前的作物水分响应模型的 SSE 同时最小;并且线性回归方法求解的参数可能存在负值或大于 1 的可能,与作物水分响应模型参数的物理意义相矛盾;此外,求解多元线性回归方程组时对样本容量有要求,当灌溉试验处理数(样本容量)小于等于生育期阶段数(解释变量个数)时,将难于采取线性回归方法估计作物水分响应模型参数。为解决这些问题,本文以多个实例为研究对象,引入自由搜索(Free Search, FS)算法^[15-16]率定作物水分响应模型参数,以期提供一种改善作物水分响应模型适用性的新方法。

1 FS 率定作物水分响应模型参数原理

FS 是一种源于动物群体(animals)迁移行为的优化算法,在 FS 的概念性模型中,动物群体凭借多次离散运动通过搜索空间。在搜索过程中,动物个体(animal)采取探查行走方式,目的是为了发现一个自己偏好的位置,在实际优化问题中,这个偏好的位置即为目标函数的一个潜在解,在搜索行为结束时群体找到的最优位置即为目标函数的最优解^[15]。

采用 FS 率定作物水分响应模型参数时,单个动物每次探查行走的位置向量对应一组模型的初始参数,每个动物多步探查的结果构成了如下的作物水分响应模型参数矩阵:

$$P_j = \begin{bmatrix} p_{1j} \\ p_{2j} \\ \vdots \\ p_{sj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11j} & p_{12j} & \cdots & p_{1nj} \\ p_{21j} & p_{22j} & \cdots & p_{2nj} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{s1j} & p_{s2j} & \cdots & p_{snj} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, m$, m 为动物群体数量; s 为探查步数; $k = 1, 2, \dots, s$; n 为 FS 搜索空间的维数(即作物水分响应模型参数个数,亦即划分的作物生育阶段数), $i = 1, 2, \dots, n$; P_j 为第 j 个动物在 s 步探查过程的位置矩阵(由 s 组作物水分响应模型参数构成); p_{kj} 为第 j 个动物第 k 步探查时的位置向量(即第 k 组作物水分响应模型参数); p_{kij} 为第 j 个动物第 k 步探查时第 i 维位置分量(即第 k 组参数中第 i 个生育阶段的参数)。

利用 FS 率定作物水分响应模型参数时,需要向 FS 提供作物各生育阶段参数的变化区间,考虑到作物水分响应模型参数的物理意义,可将各阶段的参数变化区间设置在 0~1 之间,既为算法提供了参数初始值的变化范围,又可以使得算法在寻优过程中获得的参数始终具有实际意义。寻优目标是使得 FS 率定参数的作物水分响应模型的 SSE 最小,目标函数见式(2)。在算法迭代过程中,FS 的每个动物均会以式(1)为基础,依据算法迭代机制和修改策略不断更新自己的位置,并利用式(2)计算目标函数值,继而确定自身下一步的探查位置,从而估计一组最优的作物水分响应模型参数值。

$$\min SSE = \sum_{i=1}^N (Y_d - Y_d)^2 \quad (2)$$

式中: N 为灌溉试验处理数目, $I=1, 2, \dots, N$; Y_{ai} 为第 I 个处理的作物实测产量 (kg/hm^2); Y_{ai} 为 FS 率定参数的作物水分响应模型模拟的第 I 个处理作物产量 (kg/hm^2)。

FS 自动判断是否满足设定的终止条件, 如果满足则说明算法已经搜索到可以接受的最优解, 如不满足则继续探查搜索。由上述可见, 利用 FS 率定作物水分响应模型参数的方法概念清晰, 不需要复杂的数学变换, 能够便捷地直接寻优得到模型参数。

2 利用 FS 率定和改善作物水分响应模型实

下面仅以在我国水稻等作物灌溉和估产中应用较广的 Jensen 模型为例, 利用 FS 推求 Jensen 模型参数, 分析该方法对 Jensen 模型适用性的改善效果, Jensen 模型公式如下:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right)^{\lambda} \quad (3)$$

式中: Y_a 为作物实际产量 (kg/hm^2); Y_m 为作物最高产量 (kg/hm^2); ET_{ai} 为第 i 生育阶段作物实际蒸发蒸腾量 (mm); ET_{mi} 为第 i 生育阶段作物最大蒸发蒸腾量 (mm); λ 为第 i 生育阶段的 Jensen 模型参数。

2.1 推求合理的作物水分响应模型参数

在推求作物水分响应模型参数时, 通常先将这些模型转化为某种形式的线性方程组, 然后运用最小二乘法拟合。这种方法推求的参数可能存在负值或者大于 1, 与作物灌溉促产的实践和作物水分响应模型的意义不符; 实测的某生育阶段蒸发蒸腾量可能高于充分灌溉处理的蒸发蒸腾量, 此时相对蒸发蒸腾量大于 1, 与作物水分响应模型相对蒸发蒸腾量小于等于 1 等前提不符, 采用线性回归方法不易处理这种情况; 此外, 当考虑其他因素建立的复杂模型难于转换成线性表达式, 采用线性回归方法无法求解这种情况下的模型参数。

为研究干旱区作物-水分关系, 魏占民在内蒙古临河市东郊的巴盟水利所曙光试验站开展了玉米等旱作物的非充分灌溉田间试验, 其中玉米蒸发蒸腾量及产量试验结果见表 1^[4]。由表 1 可见, 00Y3 和 00Y5 处理在灌浆-收获阶段、00Y8 和 00Y9 处理在喇叭口-抽雄阶段的蒸发蒸腾量均高于充分灌溉的处理 00Y1, 且文献[4]Jensen 模型参数在拔节-喇叭口、灌浆-收获阶段均出现了负值。采用 FS 率定的 Jensen 模型模拟结果见表 1, 模型参数对比情况见表 2。

表 1 内蒙古临河市巴盟水利所玉米各处理蒸发蒸腾量及产量

Tab. 1 Evapotranspiration and yield of maize at Bameng Water Science Institute of Inner Mongolia

处理	生育阶段蒸发蒸腾量/mm				产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^2$)		
	拔节-喇叭口	喇叭口-抽雄	抽雄-灌浆	灌浆-收获	实测	文献[4]Jensen 模型模拟	FS 率定 Jensen 模型模拟
00Y1	105.1	120.4	129.6	107.4	8 829.5	8 829.5	8 829.5
00Y2	73.7	119.3	78.3	78.4	7 817.7	7 840.0	7 825.4
00Y3	27.7	94.0	70.4	113.9	7 611.9	7 597.8	7 561.0
00Y4	85.6	102.8	89.5	101.0	8 017.4	8 025.1	8 034.6
00Y5	88.0	56.1	77.1	113.8	7 555.7	7 568.7	7 579.2
00Y6	99.3	118.4	65.6	69.1	7 649.7	7 489.5	7 499.6
00Y7	89.3	117.5	44.0	75.3	6 735.3	6 763.0	6 815.7
00Y8	95.3	127.0	74.4	71.2	7 644.6	7 747.8	7 748.8
00Y9	86.6	127.6	73.7	50.9	7 771.7	7 785.0	7 732.1

表 2 内蒙古临河市巴盟水利所玉米 Jensen 模型参数及其残差平方和

Tab. 2 Jensen model parameters of maize and residual sum of squares at Bameng Water Science Institute of Inner Mongolia

参数估计方法	Jensen 模型参数				SSE
	拔节-喇叭口	喇叭口-抽雄	抽雄-灌浆	灌浆-收获	
文献[4]	-0.0098	0.0302	0.2536	-0.0182	38 182.8
FS 率定	0.0001	0.0376	0.2387	0.0002	44 918.2

为便于比较, 将文献[4]研究成果一并列入表 1、表 2 中, 从表 2 可以看出, FS 在推求 Jensen 模型参数时, 参数率定与模型是否经过线性转换以及各阶段的相对蒸发蒸腾量大小无关, 通过限定参数变

化区间可以有效避免参数出现不合理值, 且推求的生育阶段参数从大到小排列顺序与文献[4]采纳的 Minhas 模型相同。与原 Jensen 模型相比, 虽然 FS 率定的 Jensen 模型 SSE 略大, 但原 Jensen 模型参

数在两个生育阶段出现了负值;此外,经计算文献[4]采纳的 Minhas 模型的 SSE 为 150 723.9,而 FS 率定的 Jensen 模型大大降低了 SSE。

2.2 提升作物水分响应模型模拟精度

为揭示中稻产量与需水量及稻田水分间的定量关系,崔远来等^[5]于 1992–1993 年在河北省唐海县

农科所开展了中稻水分生产函数试验研究,并提出了水资源不足条件下应用作物水分生产函数优化设计水稻灌溉制度的方法。该项研究的所有试验处理均在大型称重式蒸渗器内进行,并利用大型非称重式蒸渗器校核了试验成果,实测 1992 年中稻各处理的蒸发蒸腾量及产量见表 3。

表 3 河北省唐海县农科所中稻各处理蒸发蒸腾量及产量

Tab. 3 Evapotranspiration and yield of rice at Tanghai Agricultural Science Institute of Hebei province

处理	生育阶段蒸发蒸腾量/mm				产量/(kg·hm ⁻²)		
	分蘖	拔节孕穗	抽穗开花	乳熟	实测	文献[5]Jensen 模型模拟	FS 率定 Jensen 模型模拟
1	90.9	174.0	163.2	126.5	11 175.0	12 268.0	12 205.8
2	82.8	168.2	158.4	124.2	11 191.5	11 533.3	11 446.0
3	71.3	150.8	148.8	121.9	10 482.0	10 053.1	9 917.2
4	112.7	171.1	156.0	121.9	10 185.0	12 250.3	12 193.2
5	112.7	150.8	148.8	119.6	9 867.0	11 026.1	10 928.4
6	110.4	127.6	141.6	117.3	10 168.5	9 645.1	9 508.9
7	115.0	182.7	139.2	124.2	11 622.0	11 850.5	11 746.3
8	115.0	188.5	124.8	117.3	9 732.0	11 085.8	10 953.3
9	112.7	176.9	110.4	115.0	9 672.0	9 775.0	9 594.3
10	110.4	188.5	163.2	101.2	13 249.5	12 836.6	12 875.7
11	110.4	188.5	163.2	92.0	12 571.5	12 620.9	12 684.9
12	110.4	185.6	163.2	73.6	11 494.5	12 026.3	12 140.9
13	80.5	124.7	134.4	108.1	8 182.5	8 480.9	8 327.2
14	112.7	147.9	105.6	103.5	8 869.5	8 430.7	8 247.6
15	115.0	188.5	122.4	69.0	10 041.0	9 956.1	9 939.6
16	89.7	133.4	88.8	92.0	7 176.0	6 611.8	6 406.3
17	112.7	171.1	115.2	59.8	8 206.5	8 792.3	8 761.7
18	112.7	185.9	160.8	112.7	12 910.5	12 910.5	12 910.5

在文献[5]中,Blank 模型和 Singh 模型参数均出现了负值,而 Jensen 模型和 Stewart 模型各生育阶段参数从大到小排列顺序相同,与中稻的水分生理理论及灌溉实际经验一致,且相关系数均较高,均属合理模型,相对而言, Jensen 模型更适宜描述唐海县各生育阶段水分对中稻产量的影响。如前文所述,当采用线性回归方法推求 Jensen 模型参数时,虽然能使得转换形式后的线性回归模型获得最小 SSE,但不一定同时使得 Jensen 模型模拟产量的 SSE 最小。采用 FS 率定的 Jensen 模型模拟结果见表 3,模型参数对比情况见表 4。

从表 4 可以看出,FS 率定的 Jensen 参数均为正值,与文献[5]中的参数变化规律完全一致,表现为抽穗开花期最大,其次为拔节孕穗期和分蘖期,最小为乳熟期,且 SSE 比文献[5]减小 2.2%。虽然模拟精度提升有限,但足以表明在估计 Jensen 模型参数时,经过数学变换后的线性回归模型存在降低原

模型模拟精度的现象,而采用 FS 率定作物水分响应模型参数,可以提升作物水分响应模型模拟精度。

表 4 河北省唐海县农科所中稻 Jensen 模型参数及其残差平方和

Tab. 4 Jensen model parameters and residual sum of squares at Tanghai Agricultural Science Institute of Hebei province

参数估计方法	Jensen 模型参数				SSE
	分蘖	拔节孕穗	抽穗开花	乳熟	
文献[5]	0.2092	0.5538	0.6763	0.1778	10679968.9
FS 率定	0.2186	0.5733	0.7222	0.1566	10442972.5

2.3 解决试验处理少时的模型参数难于估计问题

在推求作物水分响应模型参数时,为获得唯一可行解,应满足 $N > n + 1$;为获得最优解,应满足 $N \geq n + 1$ 的条件约束^[1]。然而,在开展作物水分生产函数试验时,根据《灌溉试验规范(SL 13–2015)》,宜将作物全生育期划分为 4~6 个阶段,应

针对不同阶段的缺水程度安排处理, 并安排任何阶段均不缺水的处理作为对照; 可依据不同阶段、不同土壤含水率下限或不同的灌水次数与灌水定额设计 3~4 种缺水水平, 同时安排不同缺水水平下阶段间连续受旱或间隔受旱的处理; 各处理需安排 3 次以上重复, 且各处理的重复次数应相等^[3]。假如按规范规定的最低要求开展试验, 仅将作物全生育期划分为 4 个阶段, 每个阶段仅设计 3 种缺水水平, 仅考虑前后衔接的 2 个和 3 个生育阶段连续受旱且仅安排一种缺水水平, 加上对照仍需要 18 个处理。由于水分生产函数试验通常需要依托测坑、蒸渗仪等开展, 即使安排 3 次重复则最少需要 54 个测坑或蒸渗仪, 通常很难具备这样的试验条件, 当试验条件不具备、试验处理数小于生育阶段数时, 采用线性回归法

难于估计作物水分响应模型参数。

为研究调亏灌溉模式对寒地黑土区水稻产量的影响, 孙艳玲等在黑龙江省庆安县和平灌区水稻灌溉试验站采用测坑试验研究了寒地黑土区水稻水分生产函数。该试验考虑了 6 个生育期, 设计了包含对照在内的 7 个试验处理, 各处理蒸发蒸腾量及产量实测结果见表 5^[6]。虽然试验处理数比生育阶段数多 1, 但当采取线性回归方法求解作物水分响应模型参数时, 如果采用对数变换生成多元线性方程组, 则对照处理的相对蒸发蒸腾量、相对产量的对数值均为 0, 此时试验处理数目与生育阶段数相同, 难于按普通的线性回归方法求解模型参数。采用 FS 率定的 Jensen 模型模拟结果见表 5, 模型参数对比情况见表 6。

表 5 黑龙江省庆安县水稻灌溉试验站水稻各处理蒸发蒸腾量及产量

Tab. 5 Evapotranspiration and yield of rice at Qing'an Irrigation Experimental Station of Heilongjiang province

处理	生育阶段蒸发蒸腾量/mm						产量/(kg·hm ²)		
	返青	分蘖前	分蘖中	分蘖后	拔节	抽穗	实测	文献[6] Jensen 模型模拟	FS 率定 Jensen 模型模拟
A1	18.64	26.79	16.63	42.29	267.49	73.79	8 532.7	8 229.8	8 121.6
A2	10.33	39.99	35.36	50.15	128.54	111.81	9 747.1	10 012.2	9 149.9
A3	12.33	98.00	46.42	42.84	110.12	65.33	9 484.4	9 418.7	9 095.0
A4	46.98	22.84	43.35	15.82	209.78	41.38	7 535.5	7 713.9	7 978.9
A5	67.40	24.13	14.40	60.43	178.55	103.65	7 604.6	7 725.5	8 353.8
A6	56.40	28.30	72.55	25.33	112.85	73.30	9 078.7	8 834.2	8 956.4
CK	74.86	129.97	74.38	87.12	295.17	113.23	10 220.6	10 220.6	10 220.6

表 6 黑龙江省庆安县水稻灌溉试验站水稻 Jensen 模型参数及其残差平方和

Tab. 6 Jensen model parameters and residual sum of squares at Qing'an Irrigation Experimental Station of Heilongjiang province

参数估计方法	Jensen 模型参数						SSE
	返青	分蘖前	分蘖中	分蘖后	拔节	抽穗	
文献[6]	-0.0666	0.0530	0.1055	-0.0526	0.0453	0.2360	272 566.5
FS 率定	0.0001	0.0445	0.0687	0.0085	0.0009	0.1175	1 450 144.9

从表 6 可以看出, 与文献[6]相比, FS 率定的 Jensen 模型模拟精度有所下降, SSE 大幅增大, 这可能是试验处理数目较少、作物生育阶段数目较多原因造成的。但采用 FS 率定的 Jensen 模型参数均为正值, 从大到小排序为抽穗>分蘖中>分蘖前>分蘖后>拔节>返青, 与庆安县当地的灌溉实际经验基本一致, 且可以有效推求处理数较少情况下的作物水分响应模型参数, 而文献^[6]的 Jensen 模型出现了两个阶段参数均为负值的不合理现象。需要说明的是, 采用此例是为了说明在试验处理数与生育阶段数已定、试验处理数相对较少、线性回归方法失效情况下的作物水分响应模型参数推求方法。

3 结论

针对根据最小二乘法原理推求作物水分响应模型参数时可能存在的参数不合理、模型模拟精度难于提升、试验处理少时模型参数难于推求等问题, 以 Jensen 模型为例, 引入 FS 算法率定 Jensen 模型参数, 以改善该模型的适用性, 得到结论如下。

(1) 采用 FS 率定作物水分响应模型参数, 可以限制参数的变化范围, 有效避免参数出现负值或大于 1 等不合理现象, 且参数的大小排序与当地灌溉经验和作物水分响应关系较一致。

(2) 即使选取的作物水分响应模型合理, 利用最小二乘法推求的参数小于 1 且不为负值, 但只能保

证转化形式后的模型 SSE 最小,不能保证原作物水分响应模型的 SSE 同时最小,采用 FS 不需转换作物水分响应模型数学形式,可以直接率定模型参数,且能提升作物水分响应模型的模拟精度。

(3) 当试验处理数目相对较少,难于达到利用最小二乘法的前提条件时,可以考虑利用 FS 算法推求作物水分响应模型参数。

参考文献(References):

- [1] 陈亚新,康绍忠.非充分灌溉原理[M].北京:水利电力出版社,1995.(CHEN Y X,KANG S Z.Principle of inadequate irrigation[M].Beijing:Water and Power Press,1995.(in Chinese))
- [2] 李远华.节水灌溉理论与技术[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.(LI Y H.Water-saving irrigation theory and technology[M].Wuhan:Press of Wuhan Water and Power University,1999.(in Chinese))
- [3] 中华人民共和国水利部.灌溉试验规范:SL 13-2015[S].北京:中国水利水电出版社,2015.(Ministry of water resources of China.Specifications for irrigation experiment:SL 13-2015[S].Beijing:China Water and Hydropower Press,2015.(in Chinese))
- [4] 魏占民.干旱区作物-水分关系与田间灌溉水有效性的 SWAP 模型模拟研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2003.(WEI Z M.Study on crop water relationship and availability of field irrigation water based on SWAP model simulation in arid area[D].Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2003.(in Chinese))
- [5] 崔远来,李远华,张明炷,等.中稻水分生产函数及应用研究[J].灌溉排水,1995,14(2):47.(CUI Y L,LI Y H,ZHANG M Z,et al.Study on midrice water production function[J].Journal of Irrigation and Drainage,1995,14(2):47.(in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.ggps.1995.02.002.
- [6] 孙艳玲,李芳花,尹钢吉,等.寒地黑土区水稻水分生产函数试验研究[J].灌溉排水学报,2010,29(5):139-142.(SUN Y L,LI F H,YIN G J,et al.Experimental research of the rice water production functions in black soil of the cold regions[J].Journal of Irrigation and Drainage,2010,29(5):139-142.(in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2010.05.029.
- [7] 程卫国,卢文喜,安永凯.吉林省水稻水分生产函数模型的适应性研究[J].灌溉排水学报,2015,34(2):61-66.(CHENG W G,LU W X,AN Y K.Adaptability of water production function models for rice in Jilin province[J].Journal of Irrigation and Drainage,2015,34(2):61-66.(in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2015.02.015.
- [8] 杨旭东,白云岗,张江辉,等.塔里木盆地棉花水分生产函数模型研究[J].南水北调与水利科技,2008,6(4):110-112.(YANG X D,BAI Y G,ZHANG J H,et al.Study on water production function of cotton in Tarim Basin[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2008,6(4):110-112.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2008.04.038.
- [9] 孔维萍,鱼生智,王海峰,等.调亏灌溉下酿酒葡萄耗水特性及水分生产函数研究[J].灌溉排水学报,2017,36(2):93-100.(KONG W P,YU S Z,WANG H F,et al.Effects of regulated deficit irrigation on wine grape water consumption characteristics and water production function[J].Journal of Irrigation and Drainage,2017,36(2):93-100.(in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2017.02.015.
- [10] 杜嘉,张恒嘉,张明,等.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯水分生产函数及灌溉制度优化[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):158-164.(DU J,ZHANG H J,ZHANG M,et al.Water production function and optimization in irrigation schedule of potato with mulched drip irrigation under water deficit in oasis region[J].Agricultural Research in the Arid Areas,2017,35(1):158-164.(in Chinese)) DOI:10.7606/j.issn.1009-7601.2017.01.24
- [11] 王则玉,马晓鹏,刘国宏,等.基于 Jensen 模型的红枣水分生产函数及敏感指数研究[J].新疆农业科学,2017,54(4):634-638.(WANG Z Y,MA X P,LIU G H.,et al.Research on water production function and sensitive indexes based on jujube Jensen model[J].Xinjiang Agricultural Sciences,2017,54(4):634-638.(in Chinese)) DOI:10.6048/j.issn.1001-4330.2017.04.006.
- [12] 莫春华.渍涝胁迫下的作物水分生产函数[J].南水北调与水利科技,2012,10(6):27-30,92.(MO C H.Crop water production function under water logging stress[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2012,10(6):27-30,92.(in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2012.03040
- [13] 石瑞花,陈晓霞,姜彪,等.黑龙江省水稻干旱水分生产函数试验研究[J].东北水利水电,2017,(12):54-56.(SHI R H,CHEN X X,JIANG B,et al.Experimental on rice water production function in Heilongjiang province[J].Water Resources & Hydropower of Northeast China,2017,(12):54-56.(in Chinese)) DOI:10.14124/j.cnki.dbsltd22-1097.2017.12.021.
- [14] 汪顺生,李欢欢,王康三,等.宽垄沟灌下冬小麦水分生产函数试验研究[J].灌溉机械工程学报,2017,35(11):987-992.(WANG S S,LI H H,WANG K S,et al.Field plot experiment on water production function of winter wheat in wide ridge and furrow irrigation[J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2017,35(11):987-992.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0141.
- [15] PENEV K,LITTLEFAIR G.Free Search a comparative analysis[J].Information Sciences,2005,172:173-193.DOI:10.1016/j.ins.2004.09.001.
- [16] 张袁,付强,王斌.基于自由搜索的水库入库含沙量预测模型[J].南水北调与水利科技,2012,10(3):40-43,72.(ZHANG Y,FU Q,WANG B.Prediction model of reservoir inflow sediment concentration based on Free Search[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2012,10(3):40-43,72.(in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2012.03040.