文章编号: 1006-4710(2011)03-0334-05

干旱区绿洲水分生产力影响因素研究

刘金鹏[1,2], 费良军[1], 尹亚坤[2], 南忠仁[3]

(1. 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048; 2. 甘肃省水利水电学校,甘肃 兰州 730021;
3. 兰州大学 资源环境学院,甘肃 兰州 730000)

摘要: 根据干旱区绿洲——民勤绿洲 1985—2007 年的统计资料和相关试验资料,运用灰色关联分析理论,对影响绿洲农作物水分生产力的主要因素进行了排序研究,指出灌水量是提高作物水分生产力的关键因素。依据水分生产函数概念,建立了水分生产函数模型,在此基础上,运用边际效益理论得出经济合理的灌溉定额为 5 690.55 m^3/hm^2(379.37 m^3/亩),对应的作物水分生产力为1.26 kg/m^3。

关键词: 水分生产力; 水分生产函数; 边际效益; 干旱区; 民勤绿洲

中图分类号: S161.9 **文献标志码**: A

A Study of Impacting Factors of Water Productivity in Arid Oasis

LIU Jinpeng[1,2], FEI Liangjun[1], YIN Yakun[2], NAN Zhongren[3]

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Gansu Water Resources and Hydropower School, Lanzhou 730021, China;
3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: According to statistics of arid oasis — Minqin in 1985—2007 and related test data, the gray relational analysis theory is used to carry out the sequencing study of major factors affecting water productivity of oasis farming crops, pointing out that the amount of irrigation water is the key factor to raise crop water productivity. Based on water production function concept, water production function model is established, on the basis of research results, the marginal benefit theory is applied in studying economic and rational irrigation norm, being 379.37 m^3/mu in corresponding to the crop water productivity of 1.26 kg/m^3. This scheme is not only of the important realist significance for improving highly-efficient water-saving agricultural development in oasis areas, but also of playing an active role in improving oasis eco-environment with extreme water shortage.

Key words: water productivity; water-production functions; marginal benefit; arid region; Minqin oasis

农田系统是干旱区绿洲生态系统的重要组成部分[1,2]。长期以来,农业用水挤占生态用水是导致干旱区绿洲生态环境恶化的重要原因之一,所以开展农业节水研究对于实现高效农业和改善干旱区绿洲生态环境问题,具有重要的意义。研究表明[3-5],提高作物水分生产力是节水农业研究的最终目标。明确作物水分生产力的变化特征,可以确定一个地区的节水潜力,便于制定水资源合理分配决策和方案。

作物水分生产力(Water Productivity)概念的雏形是水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)。之后,有许多研究人员从各自的专业领域出发,对作物水分生产力进行了详细的研究[6-8]。目前,作物水分生产力普遍被定义为单位耗水量所获得的作物产出量。此概念表达了水分管理过程中各项水分消耗产生的价值和收益,对干旱和半干旱地区水资源管理和作物生产具有重要意义。

以往这方面的研究多从满足作物的生物学需水以夺取高产的角度来确定灌溉定额,对于如何使有限的水分取得最好的生产效益研究不足[9]。李保国等[10]认为, 作物生长总的水损耗是由有益水损

收稿日期: 2010-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079121)。

作者简介: 刘金鹏(1972-),男,甘肃古浪人,高级讲师,博士,研究方向为水文与农业水资源。E-mail: liujp03@lzu.cn。

耗和无益水损耗组成的。有益水损耗主要是指在流域范围内直接用于作物生长的水分损耗，无益水损耗主要是指在水分的传输和分配过程中无法被经济利用的水。根据这一研究，作物水分生产力是随着不同区域、不同田块以及其他相关因素而变化的，如气候条件、灌溉技术和田间水分管理、土地利用和基础设施、农业生产投入（劳动力、肥料和机械化程度）。

本文正是基于上述研究背景，通过研究影响干旱区绿洲农作物水分生产力的主要因素出发，确定影响因素的影响排序，并以研究区相关实验数据为依据，最终确定最优的水分生产效益下的作物水分生产力，以期对干旱区绿洲农业生产的高效性和生态保护的可持续性提供科学的指导依据。

1 研究区概况

甘肃省民勤绿洲区位于石羊河下游，其西、北、东三面被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠所包围，南面沿石羊河两岸的绿洲与武威绿洲连接。绿洲面积约 2.4×10^3 km^2，约占全区土地总面积的 15%。民勤绿洲气候干燥，降水稀少，蒸发强烈，风大沙多，气候环境十分恶劣；年平均气温 7.6℃，年平均降水量为 115.41 mm，其中 7～9 月的集中降水量占年平均总降水量的 60% 以上；年平均水面蒸发量为2 664 mm。

近半个世纪以来，石羊河上游因修建水库，拦截了有限的水资源，使进入民勤绿洲的地表水比 20 世纪 50 年代几乎减少了 80%。地下水位下降，大面积的植被因缺水而衰败死亡，沙丘活化，流沙移动加速，土地退化，沙尘暴频发；湖区土地盐渍化严重，大面积的耕地弃耕；农业“十年九灾”，多年农作物水分生产力平均为 0.8 kg/m^3。因此，对民勤绿洲农作物水分生产力进行研究，对提高农业的高效用水及居民生活水平、保证生态环境需水具有重要意义。

2 民勤绿洲农作物水分生产力影响因素

影响干旱区绿洲农作物水分生产力的因素众多，涉及自然、人为、经济、技术等方面。在这些因素中，有的因素是可控的，有的因素是不可控的，在遴选指标时必须尽量全面、完整地选择各类指标。结合民勤绿洲实际情况，本文选取了生长期有效降水量、大于等于 10℃的积温、农业机械总动力、化肥施用量、水费、沙尘暴天数等 6 项指标作为主要影响因素，其中自然因子有 3 项，人为因子有 3 项；农作物以小麦为代表，研究的范围是整个绿洲地区，未考虑研究区内的土地差异性。

本文采用灌溉尺度上的水分生产力，即单位面积灌溉用水量上的作物总产量，公式为：

$$W_{pi}=\frac{Y}{W_i} \tag{1}$$

式中，W_{pi} 为灌溉水分生产力（kg/m^3），Y 为单位面积产量（kg/hm^2），W_i 为单位面积灌溉用水量（m^3/hm^2）。

根据民勤县水务局提供的灌水资料和《甘肃统计年鉴》的相关资料，民勤绿洲 1985—2007 年的农作物水分生产力计算结果如表 1 所示。由表 1 可看出，民勤绿洲 1985—2007 年的作物水分生产力基本上呈逐年增大的趋势。

表 1 民勤绿洲 1985—2007 年的农作物水分生产力

Tab. 1 Water productivity of crops in 1985—2007 in Minqin oasis

年份	水分生产力/(kg/m^3)	年份	水分生产力/(kg/m^3)
1985	0.42	1998	0.49
1989	0.47	1999	0.59
1990	0.48	2000	0.50
1991	0.47	2001	0.52
1992	0.49	2002	0.57
1993	0.47	2003	0.92
1994	0.42	2004	1.15
1995	0.43	2005	1.24
1996	0.43	2006	1.23
1997	0.48	2007	1.25

3 民勤绿洲农作物水分生产力影响因素的灰色关联度分析

灰色关联分析是对一个发展变化的系统发展动态的量化比较，其基本思想是根据因素间几何形状的相似程度来判断关联程度，据以判断引起系统发展的主要因素与次要因素。关联度是反映这种密切程度大小的量，关联度越大说明因素间变化的态势越接近，其关系越密切，反之，说明因素间关系越不密切[11]。灰色关联度计算步骤如下。

1）对原始数据进行标准化处理

$$s_i(k)=\frac{x_i(k)-\bar{x}}{s_i}\quad(i=0,1,2,\cdots,n) \tag{2}$$

式中，$s_i(k)$ 为原始数据标准化处理后的值，$x_i(k)$ 为对应的原始数据，$\bar{x}$ 为同一影响因素指标值的平均值，s_i 为同一因素值的标准差，n 为因素个数 。

2）求关联系数

$$\xi_i(k)=\frac{\min\limits_i\min\limits_k|s_o(k)-s_i(k)|+\rho\times\max\limits_i\max\limits_k|s_o(k)-s_i(k)|}{|s_o(k)-s_i(k)|+\rho\times\max\limits_i\max\limits_k|s_o(k)-s_i(k)|} \tag{3}$$

式中，$|s_o(k)-s_i(k)|$为参考因素 $s_o(k)$ 与比较因素

$s_i(k)$的绝对值,ρ为分辨系数,一般情况下取$\rho = 0.5$。

3)求关联度

$$r_i = \frac{1}{n}\sum \xi_i(k) \quad (i = 1,2,\cdots,n) \qquad (4)$$

式中,n为因素个数。

根据上述程序,民勤绿洲农作物水分生产力影响因素灰色关联分析结果分别如表2、表3和表4所示。

表2 民勤绿洲1991—2007年小麦水分利用效率影响因素数据标准化处理结果

Tab.2 The standardized data of WUE impacting factors of crops in 1991—2007 in Minqin oasis

年份	水分利用效率	灌水量	化肥施用量	沙尘暴天数	农机总动力	水费	≥10℃积温	生长期有效降雨
1991	-0.67	-0.82	-	-	-1.21	-	0.00	0.78
1992	-0.61	0.36	-	-	0.25	-	1.23	1
1993	-0.67	-0.3	-	-	0.30	-	0.00	1.07
1994	-0.80	0.77	-	-	1.39	-	0.18	0.86
1995	-0.78	-1.51	-1.91	-1.21	0.03	0.79	0.18	-1.40
1996	-0.78	-1.66	-1.21	0.46	1.03	0.81	-0.35	-0.95
1997	-0.64	0.57	-0.92	0.11	-0.11	0.65	-1.23	-0.97
1998	-0.61	1.51	-0.45	-0.37	0.28	0.58	0.18	-0.40
1999	-0.29	1.73	0.54	-0.12	-0.74	-0.04	-0.18	1.00
2000	-0.56	-0.63	0.41	-2.21	0.52	-0.01	0.35	1.76
2001	-0.50	-0.28	1.00	-1.21	-0.60	0.15	-0.18	1.42
2002	-0.37	-1.08	1.12	0.92	2.01	0.05	-0.18	0.51
2003	0.73	0.54	0.39	-0.01	1.00	-1.19	-1.75	-0.47
2004	1.44	0.71	-0.52	-1.05	-0.18	-1.59	-1.05	-0.72
2005	1.71	-	-0.25	0.98	-0.26	-1.71	-	0.01
2006	1.67	-	0.15	0.95	-1.19	-1.68	-	-0.56
2007	1.74	-	1.60	2.76	-	-1.74	-	0.79

表3 民勤绿洲1991—2007年小麦水分利用效率与影响因素的灰色关联系数

Tab.3 The gray relational index of WUE of crops and impacting factors in 1991—2007 in Minqin oasis

年份	灰色关联系数						
	灌水量	化肥施用量	沙尘暴天数	农机总动力	水费	≥10℃积温	生长期有效降雨
1991	0.957	-	-	0.794	-	0.750	0.567
1992	0.668	-	-	0.696	-	0.507	0.541
1993	0.857	-	-	0.669	-	0.752	0.521
1994	0.546	-	-	0.460	-	0.667	0.532
1995	0.734	0.632	0.835	0.711	0.547	0.672	0.768
1996	0.691	0.834	0.608	0.510	0.545	0.835	0.945
1997	0.615	0.897	0.729	0.798	0.598	0.778	0.874
1998	0.470	0.953	0.916	0.689	0.618	0.717	0.930
1999	0.482	0.704	0.949	0.827	0.911	0.976	0.599
2000	0.998	0.668	0.535	0.643	0.791	0.684	0.447
2001	0.927	0.560	0.737	0.982	0.760	0.879	0.496
2002	0.738	0.561	0.598	0.440	0.839	0.936	0.692
2003	0.938	0.868	0.729	0.902	0.495	0.429	0.615
2004	0.732	0.489	0.429	0.540	0.380	0.428	0.464
2005	-	0.491	0.736	0.490	0.352	-	0.527
2006	-	0.556	0.736	0.395	0.357	-	0.457
2007	-	0.963	0.656	-	0.347	-	0.674

表4 民勤绿洲1991—2007年小麦水分利用效率影响因素的灰色关联度及排序

Tab.4 Degree of grey relational and sorted result of impacting factors in 1991—2007 in Minqin oasis

影响因素	灌水量	化肥施用量	沙尘暴天数	农机总动力	水费	≥10℃积温	生长期有效降雨
关联度	0.739	0.706	0.707	0.659	0.570	0.715	0.625
排序	1	4	3	5	7	2	6

从表3、表4可以看出，影响民勤绿洲小麦水分利用效率的影响因素的不可控因素中大于等于10℃的积温关联度排序第二，沙尘暴天数排序第三，生长期有效降水量排序第六。积温对小麦生产的影响结果进一步说明了民勤绿洲地区小麦水分利用效率对自然因素的依赖性较强，从统计年鉴资料中也可以看出凡是生长期发生霜冻、降温等气象变化的年份，该年的小麦产量普遍呈下降趋势。沙尘暴属于严重的气象灾害，对小麦的生产影响十分严重，但沙尘暴不像积温那样人为不可防范，只要重视生态环境建设，加强生态环境保护，沙尘暴的影响可以人为降低。该地区降水量稀少（平均110 mm），蒸发量却很大（平均2 400 mm），尤其是大于5 mm的有效降水量更为稀少，所以生长期有效降水量对小麦水分利用效率的影响较小。

在人为因素中，灌水量排序第一，化肥施用量排序第四，农机总动力排序第五，水费排序第七。对于化肥施用量和农机总动力而言，这是研究区保证小麦产量提高的重要手段，从绿洲区历年的这方面投入分析，凡是当年所投入的农机总动力和肥料使用量较大，绿洲区当年的小麦产量就会相应提高。比如，2007年所投入的农机总动力为952 092 kW，相应的关联系数达到0.963，而2004年所投入的农机总动力为740 196 kW，相应的关联系数只有0.489。水费排序靠后说明该地区水费征收实际对农业生产用水的牵制没有起到约束作用，所以2009年民勤县政府决定将水费由目前的0.151 元/m^3 提高到0.202 元/m^3，以加强对农业用水的管理水平。灌水量影响排序为第一，充分说明了民勤绿洲作物水分利用效率对灌溉的依赖程度相当密切。但是在实际调查中发现存在两个问题：一是灌溉方式不合理，该地区长期的灌水方式是大水漫灌，而这种灌水方式对水资源的浪费极为严重；二是灌溉制度不合理，单就灌溉定额而言，以2005年为例，该地区平均灌溉定额为12 000 m^3/hm^2，而临近黑河流域平均灌溉定额为7 000 m^3/hm^2。另外，农作物水分利用效率的提高，不仅意味着用较少的水生产出更多的产量，也意味着在相同的用水量上产量得到进一步提高。因此，研究该绿洲区小麦的经济灌溉定额将更具意义。

4 民勤绿洲农作物水分生产函数及经济灌溉定额的确定

灌溉对产量的影响包括水资源不足的影响、受有限的水资源在农作物各生育阶段的分配方案的影响。试验证明[12-13]，作物生育期总耗水量与产量之间存在着密切的关系。在灌溉制度一定的情况下，最佳灌水量与产量的关系可通过对水分生产函数的分析来确定。

根据民勤绿洲1999年至2007年的统计资料和民勤小坝口（1989年）灌区试验资料，可得到该地区作物耗水量与产量的水分生产函数，即：

$$Y = -0.002X^2 + 2.2762X + 70.33$$

拟合的相关系数 $R^2 = 0.9821$。

对此函数求一阶导数，可得产量最大值718.0 kg/m^2 时的灌水量为569.05 mm。但是根据有关研究，此时的方案虽然为最优方案，但对于缺水地区而言并不一定是最经济方案。所谓经济方案是指当水量投入所增加的产出大于或等于水量投入本身的价值时，即边际收益不小于边际成本时的投入方案[14]。因此，依据研究得到的水分生产函数模型，对农作物灌水边际效益进行了分析，以验证该方案的经济性。分析结果见表5。

表5 民勤绿洲农作物灌溉水边际效益分析

Tab.5 Analysis of crops' irrigation marginal benefit in Minqin oasis

模拟灌溉水量/mm	总产量/（g/m^2）	总产值/（元/hm^2）	边际成本/（元/m^3）	边际效益/（元/m^3）
350	622	6 842	0.151	10.74
400	660.81	7 268.91	0.151	8.54
450	689.62	7 585.82	0.151	6.34
500	708.43	7 792.73	0.151	4.14
550	717.24	7 889.64	0.151	1.94
598.17	**716.27**	**7 878.99**	**0.151**	**0.151**
600	716.05	7 876.55	0.151	-0.26
650	704.86	7 753.46	0.151	-2.46
700	683.67	7 520.37	0.151	-4.66
750	652.48	7 177.28	0.151	-6.86
800	611.29	6 724.19	0.151	-9.06

从表5可知，当边际效益等于边际成本时，总产量为716.27 g/m^2，灌溉水量为598.17 mm，比总产

量最大值718.0 g/m^{2}所对应的灌水量569.05 mm多29.12 mm。因此,该水分生产函数所确定的方案,即灌溉水量569.05 mm,折合灌溉定额为5 690.55 m^3/hm^2(379.37 m^3/亩),对应的水分生产力为1.26 kg/m^3,是研究区最经济的灌溉方案。

5 结 论

本文利用灰色关联分析方法对民勤绿洲农作物水分生产力主要因素进行了关联度排序研究,并利用研究区1985—2007年的统计资料和民勤小坝口试验资料研究得到绿洲灌溉水分生产函数模型为:$Y = -0.002X^2 + 2.2762X + 70.33$,$R^2 = 0.9821$。依据水分生产函数模型,对研究区农作物灌水边际效益进行了分析,得出灌溉水量为569.05 mm,折合灌溉定额5 690.55 m^3/hm^2(379.37 m^3/亩),对应的水分生产力为1.26 kg/m^3,是研究区最经济灌溉方案。以上研究成果对极其干旱缺水的绿洲生态环境改善和农业生产发展奠定了科学基础。

参考文献:

[1] 宋冬梅,肖笃宁,张志城,等. 石羊河下游民勤绿洲生态安全时空变化分析[J]. 中国沙漠,2004,24(3):335-342.
Song Dongmei,Xiao Duning,Zhang Zhicheng,et al. Change of ecological security of Minqin Oasis in Shiyanghe River Basin [J]. Journal of Desert Research,2004,24(3):335-342.

[2] 方创琳. 河西走廊绿洲生态系统的动态模拟研究[J]. 生态学报,1996,16(4):389-398.
Fang Chuanglin. Dynamic simulation and sustainable ecological measures of oases ecosystem in Hexizoulang [J]. Acta Ecologica Sinica,1996,16(4):389-398.

[3] 沈荣开,杨路华,王康. 关于以水分生产率作为节水灌溉指标的认识[J]. 中国农村水利水电,2001,(5):9-11.
Shen Rongkai, Yang Luhua, Wang Kang. Recognition of taking water productivity as index of water saving irrigation [J]. China Rural Nater and Hydropower,2001,(5):9-11.

[4] Droogers P, Bastiaanssen W. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2002,128(1):11-18.

[5] Kijne J W, Randolph Barker, Molden D J. Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement[C]//Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. Wallingford, UK: CABI Press,2003:163-179.

[6] Kijne J W, Randolph B, David M. 谈提高农业水分生产率[J]. 中国农村水利水电,2006,(12):23-25.
Kijne J W, Randolph B, David M. Improving water productivity[J]. China Rural Nater and Hydropower,2006,(12):23-25.

[7] 段爱旺,张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J]. 农业工程学报,2000,16(4):41-44.
Duan Aiwang,Zhang Jiyang. Water use efficiency of grain crops in irrigated farmland in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2000,16(4):41-44.

[8] 郑捷,李光永,韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产力分析[J]. 农业工程学报,2008,24(11):46-50.
Zheng Jie, Li Guangyong, Han Zhenzhong. Sino-US irrigation water use efficiencies of main crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(11):46-50.

[9] 李保国,黄峰. 提高农业水分利用效率是实现粮食和水资源安全的根本途径[C]// 节水型社会建设的理论与实践:中国水利学会2005学术年会论文集. 北京:中国水利水电出版社,2005:322-329.

[10] 胡广录. 绿洲灌区水分生产力分布格局及影响因素研究[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2009.
Hu Guanglu. Spatial Pattern and Influential Factors of Water Productivity in Oasis Irrigation [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences,2009.

[11] 谭学瑞,邓聚龙. 灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J]. 统计研究,1995,12(3):46-48.
Tan Xuerui, Deng Julong. Grey connected analysis: a new method of multifactor statistical analysis[J]. Statistical Research, 1995,12(3): 46-48

[12] 雷志栋,胡和平,杨诗秀,等. 叶尔羌河灌区冬小麦灌溉试验与分析[J]. 灌溉排水,1999,18(2):30-33.
Lei Zhidong,Hu Heping,Yang Shixiu, et al. Irrigation experiment for winter wheat in Yeerqiang river irrigation district[J]. Irrigation and Drainage, 1999,18(2):30-33.

[13] 彭永生,苏里坦. 全生育期作物水分生产函数的建立[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(4):122-124.
Peng Yongsheng, Su Litan. The establishment of water-production functions during crops full-bearing period[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment,2003,17(4):122-124.

[14] 刘昌明,周长青,张士锋,等. 小麦水分生产函数及其效益的研究[J]. 地理研究,2005,24(1):1-9.
Liu Changming, Zhou Changqing, Zhang Shifeng, et al. Study on water production function and efficiency of wheat [J]. Geographical Research, 2005,24(1):1-9.

(责任编辑 王卫勋)