

# 北京市灌溉农田水资源利用效率研究

郑煜,陈阜,张海林,唐衡

(中国农业大学农学与生物技术学院 农作制度研究室,北京 100094)

**摘要:**以各种作物的水分利用效率、水分能量生产效率和水分经济利用效益评价为依据,对北京市灌溉农田的水分利用状况进行了综合评价,提出了该区域优化粮食作物、果树和瓜菜类作物的种植结构,推进节水型种植业发展的思路与途径。

**关键词:**北京市;水资源利用效率;水分能量生产效率;水分经济效益

**中图分类号:**S271

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2006)06-0055-03

## Study on Water Resources Utilization in Irrigation Field of Beijing

ZHENG Yu, CHEN Fu, ZHANG Hai-lin, TANG Heng

(Farming system lab, College of Agronomy and Biotechnology, CAU, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Based on water use efficiency, water produce energy efficiency and economic benefit of water use to different crops, an overall evaluation of water use efficiency to cropping system in irrigation field of Beijing is made, and a planting structure of grain cropping, fruit growing and vegetables in this region is put forward to promote the development of thought and approach about water saving cropping system.

**Key words:** Beijing; water resources use efficiency; water produce energy efficiency; Economic benefit of water use

北京是个严重缺水的大都市,近年来,随着工业经济的快速发展和城市规模的扩大及近年来年降水量的减少,水资源紧缺越来越严峻。全市人均占有量不足 300 m<sup>3</sup>,远远低于国际公认 1 000 m<sup>3</sup> 的缺水下限。北京市农业年用水量高达 15.6 亿 m<sup>3</sup>,占全市用水量的 45.2%,北京市有灌溉农田面积 30 多万 hm<sup>2</sup>,灌溉农田用水占农业用水的比重较大。与此同时,我国水资源利用效率较低。为此,本文将以顺义区作为北京市灌溉农田的代表为例,从各种作物的水分利用情况,作物的水分利用效率和水分利用效益等方面,对北京市灌溉农田主要作物水资源利用效益进行综合评价,以期对节约农业用水、建设节水型农作制度、提高水资源利用效率做出科学指导,并对北京市种植结构调整提供参考建议。

## 1 材料和方法

### 1.1 田间试验

试验于 2003 年 3~11 月在顺义区“三高农业示范区”进行,采用春玉米、春大豆、春花生、苜蓿、苹果、桃、梨、葡萄、露地西瓜、菜豆、大白菜和红萝卜为研究作物。所有作物的田间管理措施均采用常规技术。对其生育期的降水量、灌溉量、产量(包括生物产量和经济产量)进行测量。

### 1.2 数据统计与数学模型

#### 1.2.1 水分供需平衡特征

$$d = ET_a / ET_m$$

其中:  $ET_a = P - w$   $ET_m = K_c \cdot ET_o$

式中:  $d$ ——作物的水分满足率;  $ET_a$ ——生育期内(或某生育阶段)的实际耗水量;  $ET_m$ ——作物需水量;  $P$ ——有效降水量(数

据来源为北京市水利局,2003 年降水统计);  $w$ ——土壤储水变化量;  $K_c$ ——作物系数,采用 FAO 提出的作物  $K_c$  值;  $ET_o$ ——参考蒸散量,采用 FAO 修正后的彭曼公式计算。<sup>[1,3,7]</sup>

#### 1.2.2 作物水分利用效率

$$WUE = M / S \times W$$

式中:  $M$ ——干物质增加量(或产量),单位为 kg;  $S$ ——农田面积,单位为 hm<sup>2</sup>;  $W$  为作物耗水量,单位为 mm。  $WUE$  为水分利用效率,单位为 kg/(hm<sup>2</sup>·mm),常转化为 kg/m<sup>3</sup>。水分利用效率越高,表明外界水分条件与作物内部生理功能之间配合良好。

#### 1.2.3 水分能量生产效率

$$WP EE = M \times E \times W^{-1}$$

式中:  $M$ ——干物质增加量(或产量),单位为 kg/hm<sup>2</sup>;  $E$ ——单位干物质(或产量)产生的热量,单位为 kJ/kg,参考中国农业出版社出版的《农业生态学》,沈亨理主编,农产品热量表  $WP EE$  为水分能量生产效率,单位为 kJ/m<sup>3</sup>。水分能量生产效率越高,表明外界水分条件与作物储存能量之间配合良好。  $W$ ——作物耗水量,单位为 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

#### 1.2.4 水分经济利用效益

指在同一地域,同种管理水平下,不同水分处理不同作物在消耗单位水量所能产生的效益。

$$EBWU = V \times W^{-1}$$

式中:  $V$ ——单位面积农作物产值,单位为元/hm<sup>2</sup>,  $W$ ——单位面积上作物耗水量,单位为 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,  $EBWU$  单位为元/m<sup>3</sup>。

\* 收稿日期:2005-11-21

基金项目:北京市教委项目,节水农作制研究与示范

作者简介:郑煜(1982-),男,山西太原人,在读硕士,主要从事农作制度研究与管理和农业水资源利用的研究工作;通讯作者:陈阜。

不同作物最终产品价格均为当年调查统计的平均价格。

水分利用效益 1 为收益中不计水价成本后的水生产效益;水分利用效益 2 为收益中考虑水价成本后的水生产效益,其中水价为 0.6 元(根据 2004 年 8 月 1 日北京市水价调整方案)。

2 结果与分析

2.1 各种作物水分利用率比较

从表 1 可以看出各种作物的自然降水量都不能满足其耗水量,降水满足率较低。从水分利用效率(WUE)来看:在粮食类作物中春玉米的水分利用效率为最高,达 1.37 kg/m<sup>3</sup>,春大豆和春花生次之;在牧草作物中由于苜蓿的产量较高为 20.9 kg/m<sup>3</sup>;在果树作物中,苹果的水分利用效率最高为 5.74 kg/m<sup>3</sup>,桃、梨、葡萄依次降低;在瓜菜类作物中,大白菜的水分利用效率最高,为 20.44 kg/m<sup>3</sup>,其次依次为露地西瓜、红萝卜和菜豆。其水分利用效率高都是由于此种作物较其它同类作物的产量高。

2.2 作物水分能量生产效率比较

作物的水分利用效率的比较方法有很多,但是由于各种作物的生物特性不同,简单利用生物产量或经济产量与耗水量的比进行比较并不能准确反应作物水分利用效率的真实情况。为此,本文将作物的经济产量进行热量换算,确定一个不同作物间的比较标准,通过作物经济产量的热量和耗水量比,即水分能量生产效率对作物的水分利用效率进行评价。

表 2 为作物水分能量生产效率比较,从中可以看出,粮食类作物的水分能量生产效率较高,果树类次之,瓜果类中的露地西瓜和菜豆以及牧草类较低。在粮食类作物中春花生的水分能量生产效率是最高的为 2.36 ×10<sup>4</sup> kJ/m<sup>3</sup>,其经济产量是指花生米的热量,其计算是按照花生经济产量的 80%(出米率)来进行统计的;春玉米的水分能量生产效率次之,春大豆的较低,原因是其经济产量较低。牧草类中苜蓿,由于其单位热能较低为 422.5,加之其耗水量较大,因此其

水分能量生产效率较低,仅为 8.86 ×10<sup>3</sup> kJ/m<sup>3</sup>。在果树类作物中,苹果的水分能量生产效率较高为 1.85 ×10<sup>4</sup> kJ/m<sup>3</sup>;桃和葡萄次之;梨树的最低,为 1.02 ×10<sup>3</sup> kJ/m<sup>3</sup>,其原因是由于经济产量所产生的热量较低,且梨树的耗水量较大。在瓜果类中大白菜和红萝卜的水分能量生产效率较高,虽单位热量较低,但其产量较大;菜豆次之,原因是由于其产量相对较低;而露地西瓜水分能量生产效率最低,仅为 1.44 ×10<sup>3</sup> kJ/m<sup>3</sup>,其产量和单位热量都较低。

| 表 1 各农作物水分利用效率比较 |       |           |        |         |                           |                              |
|------------------|-------|-----------|--------|---------|---------------------------|------------------------------|
| 作物类型             | 作物    | 生育期降水量/mm | 耗水量/mm | 降水满足率/% | 产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 水分利用效率/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
| 粮食类              | 春玉米   | 203.8     | 494.7  | 41.2    | 6792                      | 1.37                         |
|                  | 春大豆   | 244.5     | 474.6  | 51.5    | 2922                      | 0.62                         |
|                  | 春花生   | 210.2     | 382.8  | 54.9    | 3102.1                    | 0.91                         |
| 牧草类              | 苜蓿    | 258.4     | 572.5  | 45.1    | 11991                     | 2.09                         |
| 果树类              | 苹果    | 369.1     | 695.19 | 53.1    | 46930                     | 6.75                         |
|                  | 桃     | 369.1     | 642.01 | 57.5    | 36867                     | 5.74                         |
|                  | 梨     | 369.1     | 750.18 | 49.2    | 41496                     | 5.53                         |
|                  | 葡萄    | 369.1     | 701.4  | 52.6    | 36142                     | 5.15                         |
| 瓜菜类              | 露地西瓜  | 141.5     | 442.9  | 31.9    | 6000                      | 13.55                        |
|                  | 菜豆    | 107.9     | 338.4  | 31.9    | 9750                      | 2.88                         |
|                  | 大白菜   | 186.4     | 587.2  | 31.7    | 120000                    | 20.44                        |
|                  | 心里美萝卜 | 180.4     | 435.1  | 41.5    | 52500                     | 12.07                        |

2.3 作物水分经济生产效益比较

对作物的水分利用效益(EBWU)进行比较,可以更直观了解不同作物之间的水资源利用情况,搞清每吨水能产生多少经济效益。由表 3 可以看出北京市主要农作物的水分利用效益情况,其中水分利用效益 1 为最终收入不考虑水价成本,而水分利用效益 2 为最终收入要减去水分利用成本。

| 表 2 作物水分能量生产效率比较 |      |   |   |                             |              |                       |                                |
|------------------|------|---|---|-----------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|
| 作物类型             | 作物名称 | 耗水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) | 灌水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) | 经济产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 单位热能/(kJ·kg) | 总热能/kJ                | 水分能量生产效率/(kJ·m <sup>-3</sup> ) |
| 粮食类              | 春玉米  | 4947                                    | 2800                                    | 6792                        | 16526.8      | 1.12 ×10 <sup>8</sup> | 2.26 ×10 <sup>4</sup>          |
|                  | 春大豆  | 4746                                    | 2167                                    | 2922                        | 20669.0      | 6.04 ×10 <sup>7</sup> | 1.27 ×10 <sup>4</sup>          |
|                  | 春花生  | 3828                                    | 1600                                    | 2788                        | 25882.2      | 9.02 ×10 <sup>7</sup> | 2.36 ×10 <sup>4</sup>          |
| 牧草类              | 苜蓿   | 5725                                    | 2400                                    | 11991                       | 4225.8       | 5.07 ×10 <sup>7</sup> | 8.86 ×10 <sup>3</sup>          |
| 果树类              | 苹果   | 6952                                    | 4238                                    | 46930                       | 2756.8       | 1.29 ×10 <sup>8</sup> | 1.85 ×10 <sup>4</sup>          |
|                  | 桃    | 6420                                    | 3902                                    | 36867                       | 2155.8       | 7.95 ×10 <sup>7</sup> | 1.23 ×10 <sup>4</sup>          |
|                  | 梨    | 7502                                    | 5345                                    | 41496                       | 1851.4       | 7.68 ×10 <sup>7</sup> | 1.02 ×10 <sup>4</sup>          |
|                  | 葡萄   | 7014                                    | 4642                                    | 36142                       | 2205.8       | 7.97 ×10 <sup>7</sup> | 1.14 ×10 <sup>4</sup>          |
| 瓜菜类              | 露地西瓜 | 4429                                    | 2888                                    | 6000                        | 1065.0       | 6.39 ×10 <sup>6</sup> | 1.44 ×10 <sup>3</sup>          |
|                  | 菜豆   | 3384                                    | 2492                                    | 9750                        | 1435.1       | 1.40 ×10 <sup>7</sup> | 4.14 ×10 <sup>3</sup>          |
|                  | 大白菜  | 5872                                    | 4270                                    | 120000                      | 772.8        | 9.27 ×10 <sup>7</sup> | 1.58 ×10 <sup>4</sup>          |
|                  | 红萝卜  | 4351                                    | 2912                                    | 52500                       | 1513.4       | 7.95 ×10 <sup>7</sup> | 1.83 ×10 <sup>4</sup>          |

在粮食类作物中,春花生的水分利用效益 1、2 都较高分别为 3.91 元/m<sup>3</sup> 和 3.66 元/m<sup>3</sup>,春大豆次之分别为 2.22 元/m<sup>3</sup> 和 1.94 元/m<sup>3</sup>,春玉米最低分别为 1.92 元/m<sup>3</sup> 和 1.58 元/m<sup>3</sup>,其主要原因是由于其市场价格不同所致;在牧草类作物中,苜蓿由于其市场价格低,仅为 0.2 元/kg,致使其水分利用效益 1 较低,在加上其耗水量大,减去灌溉用水的成本其水分利用效益 2 仅为 0.17 元/m<sup>3</sup>。果树类作物的水分利用效益 1、2 都较高,主要是由于其产量较大,市场价

格较高所致,其中苹果的水分利用效益 1、2 都较高分别为 12.15 元/m<sup>3</sup> 和 11.76 元/m<sup>3</sup>;葡萄、桃次之;梨的水分利用效益 1、2 较低,分别为 9.40 元/m<sup>3</sup> 和元/m<sup>3</sup>,其主要原因是由于梨的耗水量较高,且灌水量较大,生产成本增加。在瓜果类作物中,大白菜的水分利用效益 1、2 较高,分别为 8.17 元/m<sup>3</sup> 和 7.74 元/m<sup>3</sup>,主要是由于其产量较大所致;菜豆次之,水分利用效益分别为 4.03 元/m<sup>3</sup> 和 3.59 元/m<sup>3</sup>,其主要是由于市场价格较高所致;红萝卜的水分利用效益 1、2 为

3.61 元/ m<sup>3</sup> 和 3.22 元/ m<sup>3</sup>;而露地西瓜的水分利用效益 1、2 较低,分别为 1.35 元/ m<sup>3</sup> 和 0.96 元/ m<sup>3</sup>。

3 结论与讨论

3.1 确保粮食类作物的种植面积,并进行内部结构调整

在粮食类作物中,春玉米虽其水分利用效率较高,但由于其耗水量和灌水量较高,水分能量生产效率较低,水分利用效益较低,应减少春玉米的种植面积;同时,春花生由于其耗水量和灌水量较低,水分能量生产效率较高,水分利用效益较高,因此,应适当增加春花生的种植面积。

3.2 减少牧草类作物的种植面积

本文以苜蓿作为牧草类的代表进行研究,研究表明,苜

蓿的耗水量和灌溉量较大,自然降水满足率较低,作物水分能量生产效益较低,水分利用效益为所有参试作物中最低,若把水价考虑到成本中,其水分利用效益仅为 0.17 元/ m<sup>3</sup>,如若把劳力、地租、化肥等成本因素考虑入内,其最终收益将为负值,因此,应大幅度减少苜蓿等牧草类作物的种植面积。

3.3 控制果树类作物的种植面积,并进行内部结构调整

果树类作物的耗水量和需水量较其它作物明显偏高,但其水分利用效益较高,因此有必要控制其种植面积,达到合理分配水资源的目的。在果树类作物中,梨树的耗水量和灌水量较高,水分能量生产效益较低,水分利用效益较低,应减少梨树的种植面积。

| 表 3 作物水分利用效益比较 |      |  |  |                                   |                 |                                  |                                     |                                     |
|----------------|------|--|--|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 作物类型           | 作物名称 | 耗水量/<br>(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> ) | 灌水量/<br>(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> ) | 经济产量/<br>(kg · hm <sup>-2</sup> ) | 单价/<br>(元 · kg) | 经济产值/<br>(元 · hm <sup>-2</sup> ) | 水分利用效益 1/<br>(元 · m <sup>-3</sup> ) | 水分利用效<br>益 2/(元 · m <sup>-3</sup> ) |
| 粮食类            | 春玉米  | 4947   | 2800   | 6792                              | 1.4             | 9508.8                           | 1.92                                | 1.58                                |
|                | 春大豆  | 4746   | 2167   | 2922                              | 3.6             | 10519.2                          | 2.22                                | 1.94                                |
|                | 春花生  | 3828   | 1600   | 3485                              | 4.3             | 14985.5                          | 3.91                                | 3.66                                |
| 牧草类            | 苜蓿   | 5725   | 2400   | 11991                             | 0.2             | 2398.2                           | 0.42                                | 0.17                                |
| 果树类            | 苹果   | 6952   | 4238   | 46930                             | 1.8             | 84474.0                          | 12.15                               | 11.79                               |
|                | 桃    | 6420   | 3902   | 36867                             | 1.8             | 66360.6                          | 10.34                               | 9.97                                |
|                | 梨    | 7502   | 5345   | 41496                             | 1.7             | 70543.2                          | 9.40                                | 8.98                                |
|                | 葡萄   | 7014   | 4642   | 36142                             | 2.3             | 83126.6                          | 11.85                               | 11.45                               |
| 瓜菜类            | 露地西瓜 | 4429   | 2888   | 6000                              | 1.0             | 6000.0                           | 1.35                                | 0.96                                |
|                | 菜豆   | 3384   | 2492   | 9750                              | 1.4             | 13650.0                          | 4.03                                | 3.59                                |
|                | 大白菜  | 5872   | 4270   | 120000                            | 0.4             | 48000.0                          | 8.17                                | 7.74                                |
|                | 红萝卜  | 4351   | 2912   | 52500                             | 0.3             | 15750.0                          | 3.61                                | 3.22                                |

其中:水分利用效益 1 为不计水价成本后的水生产效益;水分利用效益 2 为计水价成本后的水生产效益,其中水价为 0.6 元(根据 2004 年 8 月 1 日北京市水价调整方案)

3.4 合理规划瓜菜类作物的种植面积

瓜菜类作物在北京市的种植面积逐年增加,其用水量较大。瓜菜类作物的品种较多,本文仅选取其中四种有代表性的作物进行分析研究。在参试作物中,露地西瓜的耗水量和灌水量较高,产量较低,水分能量生产效益和水分利用效益较低,其中水分利用效益要远远低于其它瓜菜类作物,去除水价成本后的水分利用效益仅为 0.96 元/ m<sup>3</sup>,应减少露地西瓜的种植面积。传统的蔬菜作物如大白菜、红萝卜的耗水量和灌水量虽比较多,但其产量较大,因此其水分能量生产效益和水分利用效益较高。

参考文献:

[1] 李玉义,周宪龙,张海林,等.京郊山地旱作区作物水分生态适应性系统评价[J].华北农学报,2005,(2):59-62.

[2] 信乃途.计算农田蒸发的水量平衡法[J].干旱地区农业研究,1986,(2):33-403.

[3] 陶毓汾,王立祥,韩仕峰,等.中国北方旱农地区水分生产潜力及开发[M].北京:气象出版社,1993.62-1572.

[4] 周宪龙,陈阜,宫飞,等.京郊平原农业水资源可持续利用研究[A].生态农业理论与实践[M].南昌:江西科技出版社,2004.214-219.

[5] 周宪龙,李玉义,陈阜,等.北京种植业用水结构变化及平衡研究[J].农业现代化,2005,(4):287-290.

[6] 刘巽浩,陈阜.中国农作制[M].北京:农业出版社,2005.

[7] 李锋瑞.干旱农业生态系统研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1998.37-73.

[8] Rao N H. A simple dated water production function for use in irrigated agriculture[J]. Agric. Water Management,1986,(13):25-32.

[9] 王龙昌,谢小玉,王立祥,等.黄土丘陵区旱地作物水分生态适应性系统评价[J].应用生态学报,2004,15(5):758-76.

[10] Rao N H. A simple dated water production function for use in irrigated agriculture. Agric[J]. Water Management,1986,(13):25-32.

[11] 段爱旺.水分利用效率的内涵及使用中需要注意的问题[J].灌溉排水学报,2005,24(1):8-11.