

小麦水分生产函数及其效益的研究

刘昌明^{1,2}, 周长青^{1,3}, 张士锋¹, 王小莉²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院原石家庄农业现代化研究所, 石家庄 050021;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 我国北方地区水资源短缺, 有限的降水不足以满足小麦生长所需的水量, 为了避免因缺水造成的减产, 需要实施灌溉以补充水分。本文讨论了灌水与小麦产量的关系, 并以小麦田间试验数据为基础, 采用最小二乘法原理, 拟合了小麦的水分生产函数模型, 通过耗水资料的分析整理, 揭示了小麦的水分效应及需水规律。对典型灌溉制度下小麦水分生产函数的分析表明, 水资源投入的最佳效益点并非水分利用效率的最高点和产量最高点, 小麦灌水效益最佳点的确定原则为边际收益等于边际成本, 合理利用小麦灌溉生产函数及其规律, 可以实现小麦节水、高产、高效的较好统一。

关键词: 水分生产函数; 水分利用效率; 灌水效益; 小麦

文章编号: 1000-0585 (2005) 01-0001-10

小麦是我国主产粮食作物之一, 华北平原小麦和玉米产量占全国粮食总产量的五分之一。根据我国当前社会经济的发展形势, 为确保我国粮食安全, 要求华北平原的小麦产量必须上一个新的台阶。然而, 华北平原是属于资源型极度缺水的地区, 而小麦又是高耗水作物, 区域水资源不足, 直接影响着小麦生产的发展。华北平原降雨的时间分布与小麦需水的耦合性较差, 该地区多年平均降雨量为 500 ~ 650mm, 然而有 70% 的降雨是发生在 7 ~ 9 月份, 小麦生长时期的降雨量只有 100 ~ 180mm, 占作物生长时期所需水量的 25 ~ 40%, 因此小麦生长时期缺水严重^[1]。要解决这一矛盾, 必须有灌溉作保证, 华北地区灌溉用水占到了小麦总用水量 70% 以上。另外华北地区水资源贫乏, 地下水超采严重, 为了保护环境和保证农业的可持续发展, 必须在发展农业的过程中采取节水措施, 提高水资源利用效率。

国内外有关水分生产函数的研究有很多^[2~6], 从微观和宏观的不同层次和不同范畴研究了作物的水分利用效率, 并利用计算机模拟建立了各种水分生产函数模型, 其目的是通过模型找到作物需水的关键期, 以使有限的水资源发挥更大的作用。一般来说, 资源投入于农业生产都存在着报酬递减现象, 但是, 作物产量和灌水量、水分利用效率之间存在着较为复杂的关系, 至今未能得到很好的解决。本文试图通过对小麦水分生产函数的分析, 运用边际均衡原理分析灌溉用水量与小麦产量之间的最佳结合点, 在获得较高小麦产量的同时, 又有较高的灌水效率, 并能使水资源投入的经济效益达到最佳。这对于在有限的水资源条件下, 缓解华北平原缺水、保证粮食安全具有重要的意义。

收稿日期: 2004-08-05; 修订日期: 2004-11-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCXZ-SW-317)。

作者简介: 刘昌明 (1934-), 男, 汉族, 湖南岳阳人, 中国科学院院士。长期从事水文水资源研究, 发表论文、著作 150 余篇。

1 作物水分生产函数理论

1.1 灌水与小麦产量的关系

小麦耗水来自四个方面：土壤水、地下水、降雨和灌溉。在小麦生长时期，农田水量平衡式表达为：

$$ET = S_w + I + P + W_g - R \quad (1)$$

其中， ET 为小麦耗水量， S_w 为土壤水的利用量， I 为灌溉量， P 为全生育期内有效降水量， W_g 为地下水通过毛细管上升被小麦利用的水量， R 为深层渗透量。土壤含水量的变化，在小麦的全生育期内可以忽略不计；当地下水埋深较深（地下水位低于地表4m以上时），不易为小麦根系吸收利用；华北平原采用节水灌溉，深层渗透较小，可忽略。灌溉是为了弥补地下水和降雨不能满足作物生长发育所需的水分。在降雨量一致和自然地理条件相近的情况下，小麦生育期总需水量与小麦产量之间的关系较大程度上可以通过灌水量与产量的关系反映出来。

灌溉对产量的影响有两种，一种是水资源不足的影响，另一种是有限的水资源在小麦各生育阶段的分配方式。众多的试验证明^[7~12]：小麦生育期总耗水量与小麦产量之间存在着一定的关系。一般情况下，随着产量的提高，总耗水量有所增加，但二者并不成比例关系。土壤水分对产量的限制作用愈强，产量随总耗水量增加而增加的关系表现愈明显，在这种情况下适时增加灌溉水量能起较大的增产作用。而随着灌水量的增加，水分对小麦生长的制约作用逐渐降低，灌溉虽然导致了作物总耗水量的增加，增产效应却在下降，表现为递减生产率甚至为负生产率。

在灌溉制度一定的情况下，最佳灌水量与产量的关系，可通过水资源投入生产函数的分析来确定。研究作物水分的消耗和作物产量之间的关系函数，称水分生产函数。为了研究灌溉对作物产量的影响，我们假定在整个生产过程中，只有水资源一种投入物的数量是不断变化的，且施用技术既定，其他资源如肥料等均被视为固定资源，气候、阳光等不可控资源或供应量无法限制的资源也被对照处理所固定。

小麦产量与全生育期总耗水量的函数关系有线性性和二次抛物线等形式^[13]，即：

$$Y = a \cdot ET + b \quad (2)$$

$$Y = a \cdot ET^2 + b \cdot ET + c \quad (3)$$

式中： Y 为小麦的产量（ g/m^2 ）， ET 为小麦耗水量（mm）， a 、 b 、 c 为经验系数，通过试验资料确定。

大量研究表明^[14~17]，只有在一定范围内， Y 才随 ET 线性增加。当 Y 达到一定水平后，再继续增加则要依靠其他农业措施。因此，（2）式表达的线性函数关系一般只适用于灌溉水源不足、管理水平不高、农业资源未能得到充分发挥的中低产地区。随着水源条件的改善和管理水平的提高， Y 与 ET 的关系中出现了一个明显的界限值，当 ET 小于此界限值时， Y 随 ET 的增加而增加，开始增加的幅度较大，然后减少；当达到该界限值时，产量不再增加，其后 Y 随 ET 增加而减少。因此，呈现出二次抛物线关系，（3）式表达了其函数模型。

在分析整理灌水试验资料的基础上，通过灌水试验资料的统计分析得出：抛物线关系式最符合灌区的实际情况。用最小二乘法原理拟合的水分生产函数模型 $y = ax^2 + bx + c$ 能够较好地反映小麦的连续性及生长规律，而且参数 a 、 b 、 c 易于估计。因此，采用 $y = ax^2$

+ $bx + c$ 模型比较合理，且拟合程度较好，精度较高，易于应用推广。

1.2 水分利用效率

以往农业灌溉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。面对水资源日益紧张的严峻形势，如何用有限的水资源，开展农业用水有效性的研究，已经成为节水农业共同关注的焦点问题。水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 即水资源的平均生产能力，表示一单位水资源生产的作物产量或生产 1kg 作物产量的耗水量，它是节水农业研究的最终目标。水分利用效率可以分为单叶、群体和产量等三个不同的层次，本文是研究产量水平的水分利用效率。作物水分利用效率的表达方式有三种，一是用作物耗水量 (ET)，这是普遍所指的水分利用效率；二是用灌溉水量 (I)，得到的是灌溉水利用效率，它对于确定最佳灌溉定额必不可少，在节水灌溉中意义重大；三是用天然降水 (P)，得到的是降水利用效率，它是旱地节水农业中的重要指标。

小麦水分利用效率可以表示为：

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (4)$$

式中， WUE 为小麦水分利用效率， Y 为小麦产量， ET 为小麦耗水量。

1.3 小麦灌水边际效益

边际效益是经济学中经常用到的一个概念，它是指在其他情况不变的条件下，增加一单位要素投入给生产带来的产值增量。水的边际效益，是指在其他情况不变的条件下，增加一单位水，给生产带来产值的增加量，边际值 M_c 是边际曲线函数的导数。用公式来表示，则有：

$$M_c = \frac{Y}{X} = \frac{dy}{dx} \quad (5)$$

式中， M_c 为边际效益， Y 为产值的变化量， X 为投入要素的变化量。在经济学中一个重要的结论是投入要素的边际效益是递减的，也就是说，随着要素投入量的增加，这一要素能够带来的产量的增加量是递减的。假设以水作为投入要素，则可发现，随着用水量的增加，水的边际效益是在递减的，边际效益曲线是一条向右下方倾斜的曲线。

净收益是以价值形式表现的总产量与资源用量之间的差额，即：

$$\text{净收益}(P) = \text{总产值}(R) - \text{资源成本}(C) \quad (6)$$

欲求净收益最大时的作物灌水量，应设其目标函数为：

$$\text{Max}(P) = R(W) - C(W)$$

令其一阶导数等于 0，则得：

$$\frac{dP}{dW} = \frac{dR}{dW} - \frac{dC}{dW}$$

因此有：

$$\frac{dR}{dW} = \frac{dC}{dW} \quad (7)$$

$\frac{dR}{dW}$ 和 $\frac{dC}{dW}$ 分别为总产值曲线和总成本曲线上切线的斜率，亦即边际效益和边际成本。

可见净收益最大时的水资源用量即为边际效益等于边际成本时的资源用量，这便是边际均衡原理^[18,19]。根据这一原理，若边际收益大于边际成本，则只要继续增加资源投入量，

资源的净效益仍可继续增加；若边际效益小于边际成本，则此时增加资源投入量所取得的收益已经不能抵偿成本，显然当边际收益等于边际成本时才是资源投入的最佳效益点。

2 华北平原小麦灌水实验

根据水利部农田灌溉研究所的小麦灌水试验^[20]，我们对资料进行了处理，并研究了典型灌溉制度下小麦灌水及总耗水量生产函数的变化过程。根据公式（1）的分析，结合华北地区的实际情况，探讨灌水与小麦产量的关系，为了便于理论分析，我们在分析耗水量的变化时，不考虑土壤水的利用，只假定灌水量在变化，并且拟定降雨量和地下水利用量之和是一定值。试验结果显示，当小麦灌水量为 0 时，其实际耗水量为 247.65mm。根据表 1 的资料，将试验数据进行统计分析、数值曲线拟合，求得典型灌溉制度下小麦灌水生产函数的数学表达式如下：

$$Y = -0.0027ET^2 + 2.8647ET - 127.91 \quad (8)$$

对此函数求一阶导数，可得产量最大 631.95g/m²时的灌水量 282.85mm 和水分利用效率 1.19kg/m³。

根据（8）式拟合的曲线（图 1），从曲线上选取一些点，求得这些点的水分利用效率，然后将这些水分利用效率的点连成一条圆滑的曲线（图 2），该曲线也呈先增后减的变化趋势。需要说明的是，我们试验耗水量的取值范围是在 247.65 ~ 598.35mm 之间，在这个范围内，水分利用效率是随着耗水量的增加而单调下降的。虽然水分利用效率最高点的取值不在我们试验数据的范围内，但是我们可以从产量 Y 与总耗水量 ET 的变化趋势推算出水分利用效率随耗水量的变化规律。

表 1 灌水量与小麦产量的关系

Tab. 1 The relationships between irrigation and yield of wheat

灌水量 $I(\text{mm})$	耗水量 $ET(\text{mm})$	总产量 $Y(\text{g/m}^2)$	灌水增量 $W(\text{mm})$	产量增量 $Y(\text{g/m}^2)$	边际产量 Y/W	水分利用效率 (kg/m^3)
0	247.65	425.40	(415.94)			1.68
37.50	285.15		(469.42)	37.50	53.48	1.43
72.30	319.95	503.07	(512.26)	34.80	42.84	1.23
108.00	355.65		(549.41)	35.70	37.15	1.04
140.55	388.20	583.82	(577.28)	32.55	27.87	0.86
178.35	426.00		(602.47)	37.80	25.19	0.67
214.20	461.85	636.20	(619.23)	35.85	16.76	0.47
265.00	512.65		(631.09)	50.80	11.86	0.23
271.65	519.30	643.22	(631.61)	6.65	0.52	0.08
282.85	530.50		(631.95)	11.2	0.34	0.03
315.00	562.65		(629.16)	32.15	-2.79	-0.09
330.00	577.65		(625.95)	15.00	-3.21	-0.21
350.70	598.35	631.11	(619.52)	20.70	-6.43	-0.31

注：括号内的数值为根据实验点拟合的计算值

从表 1、图 1 和图 2 中可以得到以下两点认识：

小麦产量和耗水量的关系可近似为二次曲线。起初，随着灌水量的增加小麦产量也逐渐增加。当总耗水量达 530.52mm 时，小麦产量达最大值，约 631.95 g/m²，此时土壤水分到了小麦需水的阈限，灌水的边际效益趋于 0，小麦产量达到最大，水资源在小麦

生长发育过程中的短边效应已不存在。如果没有生产条件的重新组合，水资源生产力将表现为负增长，即随灌水量增加，小麦不但不增长，反而会减产。

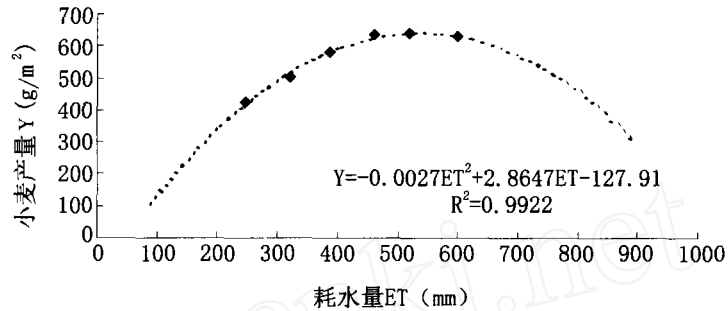


图 1 典型灌溉制度下的小麦水分生产函数

Fig. 1 Water production function of wheat in typical irrigation system

水分利用效率 WUE 与耗水量 ET 的关系。从图 2 可以看出，水分利用效率和耗水量的关系，也近似二次曲线。最初，水分利用效率随着灌水量的增加而增加，当耗水量达到 217.66mm 时，水分利用效率达到最大，为 $1.69\text{kg}/\text{m}^3$ ；当耗水量超过 217.66mm 以后，水分利用效率随着耗水量的增加而减小。显然，从提高水资源的利用效率的角度，小麦总耗水量以达到 217.66mm 为宜。

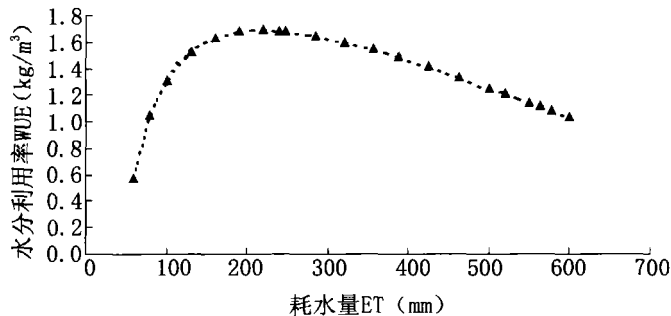


图 2 水分利用效率 (WUE) 与耗水量 (ET) 的关系

Fig. 2 Relations between water use efficiency (WUE) and evapotranspiration (ET)

3 结果分析

3.1 小麦产量与水资源利用效率

随着水资源投入量的增加，水资源生产力由递增到递减表现了生产函数的一般特性，这个过程体现了水资源生产力的三个不同的发展阶段。图 3 所示的投入 ET (耗水量) 与 Y (产量) 的关系曲线 (其他生长因素为定值) 是一条增值曲线，表明投入量在 C 之前，产品随投入的增加而增加。但若分析一单位水资源生产的小麦产量 (水资源利用效率)，它便不再是一条单一的增值曲线 ($WUE - ET$)，从图上看，在 B 点的左边 (第一阶段)， WUE 是增值的，表明产量增加的幅度大于水资源增加的幅度。在 B 的右方 (第二阶段)，产量增加的幅度小于投入量增加的幅度，出现所谓“报酬递减”现象。在 C 点的右边

(第三阶段), 产量随灌水的增加是逐渐减少的, 出现产量负增长。

$Y-ET$ 曲线反映的水资源生产力发展的三个阶段, 反映了小麦产量与水分关系的一般特征:

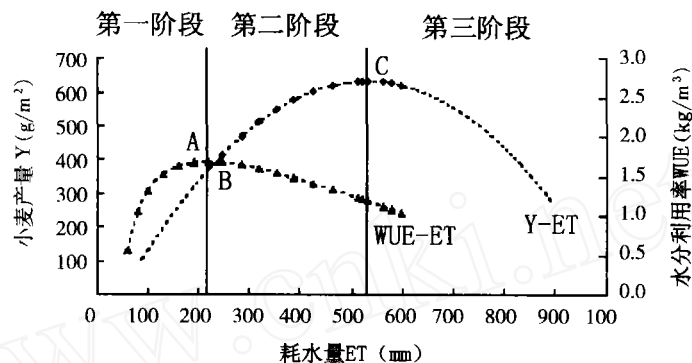


图 3 小麦产量 (Y)、水分利用效率 (WUE) 和耗水量 (ET) 对比关系

Fig.3 Contrast relations among yield of wheat (Y), water use efficiency (WUE) and evapotranspiration (ET)

第一阶段: 生产力迅速增长阶段。水资源总生产力迅速增长, 总产量由最低点上升到水分利用效率最高点, 水分利用效率最高点的值是 1.69kg/m^3 , 此时的耗水量是 217.66mm , 对应的产量是 367.71g/m^2 。在这个阶段, 资源利用效率处于最优时期, 水资源平均生产力达到了最高点。换言之, 在这一阶段中平均每投入一单位水资源所取得的产品量达到最大, 单位资源投入的成本最小, 价值形式表现的单位资源收益率响应最高。说明资源的利用尚存在较大的潜力。显然, 在这一范围内, 只要条件许可, 应尽可能增加投入, 以便获得最大产量。

第二阶段: 生产力缓慢增长阶段。随着水资源投入量的增加, 资源总生产力继续增长。总耗水量由 217.66mm 增加至 530.50mm , 小麦产量由 367.71g/m^2 上升到 631.95g/m^2 , 进入水资源投入的高产区间, 但资源投入的平均生产力或资源利用效率却在下降。从经济意义上看, 这一阶段资源得到相对充分利用, 资源效益得到较充分发挥。

第三阶段: 水资源生产力达到最高点以后的生产阶段, 即生产力回落阶段。在这一阶段随着水资源用量的增加, 总产量不增加反而下降, 小麦耗水量由 530.50mm 增至 598.35mm , 小麦产量反而由 631.95g/m^2 下降为 619.52g/m^2 。水资源利用效率继续下降, 由 1.19kg/m^3 下降到 1.04kg/m^3 。可见在这一阶段, 水资源用量追加越多, 造成的亏损越大, 这显然是不合理的生产阶段。

生产函数三阶段的划分, 说明小麦产量与水资源利用效率之间存在着差异, 二者并非同步变化。当水资源利用效率达到最高时, 小麦产量远未达到最大, 例如水分利用效率最高时小麦产量只有 367.71g/m^2 , 距最高产量相差约 264.24g/m^2 , 说明这时水资源潜力尚未充分发挥。在生产中, 若单纯追求资源利用效率指标, 无异于以资源投入的低效益换取较高的资源利用效率, 必然造成水资源的隐性浪费和经济不合理。而如果单纯追求产量而忽视资源的利用效率, 同样会造成资源浪费和利用不经济。

如果以获得单产最高为灌溉供水准则, 应按 $Y=f(ET)$ 曲线最大值 C 点确定灌溉供水量, 但在水资源不充分的地区, 将有限的水使较小的耕地面积获得最高产量的经济效益

大，还是适当减少单位面积的供水量（即实施有限灌溉），以不获得最高产量而换取较多的灌溉面积所取得的经济效益大，是灌溉决策者必须认真分析的一个关键问题。

3.2 小麦灌水边际效益分析

对于灌溉生产函数而言，随着灌水量的增加，小麦的产量产值亦相应增加，当灌水量增加到一定值时，小麦的产量随灌水量增加的速度变慢，当产量达到最大时，随灌水量的增加，产量反而出现下降趋势。边际效益由大到小以至于出现负值。因此，从公式（5）可以看出，在灌溉水量充足的条件下，取 $dy/dx=0$ 处的投入方案为最优方案。在干旱半干旱地区，水资源短缺是制约农业发展的关键因素，因此， $dy/dx=0$ 虽是最优方案，但不是最经济方案，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是经济方案。

根据以上的试验资料，可以分析小麦灌水的边际效益。从表 2 中可以看出，由于农业灌溉用水水价恒定，所以不管灌水量为多少，用水的增加和成本的增加都是呈等比例变化的，边际成本自然不会随着用水量的增加而改变，其值均为 $0.14 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。而随着灌水量的增加，边际效益逐渐减小，从 $1.57 \text{ 元}/\text{m}^3$ 减小到 $0.09 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。对比边际效益和边际成本的值可以看出，当灌水量由 253.05mm 增加到 265mm 时，边际效益等于边际成本，即：

$$\frac{R}{W} = \frac{6941.99 - 6925.05}{265.00 - 253.05} = 0.14$$

$$\frac{C}{W} = \frac{2125.50 - 2108.70}{265.00 - 253.05} = 0.14$$

此时的净收益达到最大的 $4816.49 \text{ 元}/\text{ha}$ ，毫米灌水净收益为 $18.18 \text{ 元}/\text{ha}$ 。如果继续增加灌水量，小麦的净收益将减小，即收入的增加小于成本的增加，从经济学来讲，是亏

表 2 小麦灌溉水的边际效益分析

Tab. 2 Marginal analysis of irrigation of wheat

灌水量 W (mm)	总产量 Y (g/m ²)	总产值 R (元 /ha)	总成本 C (元 /ha)	边际效益 $\frac{R}{W}$ (元 /m ³)	边际成本 $\frac{C}{W}$ (元 /m ³)	净收益 R-C (元 /ha)
0	415.94	4575.34	1754.40			2820.94
37.50	469.42	5163.62	1806.90	1.57	0.14	3356.72
72.30	512.26	5634.86	1855.65	1.35	0.14	3779.21
108.00	549.41	6043.51	1905.60	1.14	0.14	4137.91
140.55	577.28	6350.08	1951.20	0.94	0.14	4398.88
178.35	602.47	6627.17	2004.15	0.73	0.14	4623.02
214.20	619.23	6811.53	2054.25	0.51	0.14	4757.28
253.05	629.55	6925.05	2108.70	0.29	0.14	4816.35
265.00	631.09	6941.99	2125.50	0.14	0.14	4816.49
271.65	631.61	6947.71	2134.65	0.09	0.14	4813.06
282.85	631.95	6951.45	2150.40	0.03	0.14	4801.05
302.58	630.90	6939.90	2178.00	- 0.06	0.14	4761.90
315.00	629.16	6920.76	2195.40	- 0.15	0.14	4725.36
330.00	625.95	6885.45	2216.40	- 0.23	0.14	4669.05
350.70	619.52	6814.72	2245.35	- 0.34	0.14	4569.37

损的。边际收益等于边际成本点的灌水量为 265.00mm, 较产量最大时的灌水量 282.85mm 节约用水 17.85mm。前者和后者比较, 每毫米灌水产量由 $2.23\text{g}/\text{m}^2$ 增加到 $2.38\text{g}/\text{m}^2$, 每毫米灌水净收益增加 1.20元/ha, 水分利用效率提高 $0.04\text{kg}/\text{m}^3$, 小麦总产量只减少 $0.86\text{g}/\text{m}^2$ 。可见, 当边际收益等于边际成本时, 虽然总产量有微小降低, 但灌水净收益和灌水利用效率均有较显著增长。

通过以上对小麦灌水的产量、耗水量和水分利用效率的分析, 我们选取了华北临西、藁城、石家庄、曲周、南皮等五个不同地区 1982~1989年的试验数据, 分析了这些地区的小麦灌水效率, 验证了小麦灌水的生产规律。由表 3可以看出: 华北地区小麦的经济最佳灌水量约为 230~290mm, 而最高产量时的灌水量约为 260~340mm, 前者比后者节约用水 30~50mm。水分利用效率提高 $0.2\sim0.5\text{kg}/\text{m}^3$, 而产量只比后者低 $2.4\sim6.6\text{g}/\text{m}^2$ 。

对华北平原小麦灌水生产函数的分析得出与先前相同的结论: 小麦灌水的最佳效益点不是平均产量最大时的灌水量, 此时灌水利用效益虽达最高, 但要以重大的经济损失为代价。小麦灌水的最佳效益点即净收益最大时的灌水量, 此时边际效益等于边际成本。这个值出现在总产量最大点之前, 在最佳效益点之后, 产量虽有增加, 但变化很微小, 这符合报酬递减规律。

表 3 华北平原小麦灌水效率分析

Tab. 3 Analysis of irrigation efficiency of wheat in the North China Plain

地点	年份	产量最高时的 灌水量 (mm)	净收益最大时的灌 水量 (mm)	产量最大时的灌水 利用效率 (kg/m^3)	净收益最大时的灌水 利用效率 (kg/m^3)	净收益最大较 产量最高灌水 效率提高 (kg/m^3)	净收益最大 较产量最高 产量减少 (g/m^2)
临西	82~85	286.35	256.20	1.81	2.01	0.2	3.15
	82~85	310.80	264.45	1.59	1.85	0.26	4.20
藁城	84~85	260.10	234.00	1.80	1.99	0.19	2.40
	87~88	335.40	262.50	1.47	1.85	0.38	6.60
石家庄	86~87	325.65	295.95	2.06	2.56	0.50	6.15
曲周	86~87	286.20	259.95	1.88	2.06	0.18	3.90
南皮	86~89	298.50	271.20	1.72	1.90	0.18	2.70

从以上分析可知, 小麦灌水的最佳效益点并非水分利用效率的最高点和产量最高点, 小麦灌水的经济合理区间存在于资源生产力递减至总产量最高的生产阶段, 因此水资源利用的最佳效率点即产量、净效益、水分利用效率达到有效统一的灌水量也必然存在于这一区间。

4 结论

通过华北平原小麦灌水实验, 得到以下结论:

1、根据灌水试验资料的统计分析表明, 华北地区小麦产量与灌水量呈二次抛物线关系, 水分生产函数为二次函数。充分灌溉时小麦最高产量是 $631.95\text{g}/\text{m}^2$, 此时小麦耗水量是 530.50mm, 水分利用效率是 $1.19\text{kg}/\text{m}^3$ 。水分利用效率的最大值是 $1.69\text{kg}/\text{m}^3$, 此时的耗水量是 217.66mm, 产量为 $367.71\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2、根据水分利用效率的变化规律和产量与耗水量的关系, 可以将水资源生产力划分

为三个阶段。在耗水量小于 217.66mm 时为第一阶段，产量随耗水量的增加而增加，生产力迅速增长；耗水量从 217.66mm 到 530.50mm 为第二阶段，产量仍然是随耗水量的增加而增加，但增加的幅度减小，生产力缓慢增长；耗水量超过 530.50mm 以后为第三阶段，产量随耗水量的增加而逐渐减小，出现产量负增长，生产力回落。

3、边际效益等于边际成本时，小麦灌水的净收益最大，最大净收益为 4816.49 元 /ha，此时的灌水量为 265.00mm，较产量最大时的灌水量 282.85mm 节约用水 17.85mm。前者比后者每毫米灌水产量增加 0.15g/m^2 ，每毫米灌水净收益增加 1.20 元 /ha，水分利用效率提高 0.04kg/m^3 ，而小麦总产量只减少 0.86g/m^2 。此时总产量虽有微小降低，但灌水净收益和灌水利用效率均有较显著增长。

4、根据试验得出的小麦灌水生产规律，应用华北临西、藁城、石家庄、曲周、南皮等五个不同地区 1982 ~ 1989 年的试验数据，得出：华北地区小麦的经济最佳灌水量约为 230 ~ 290mm，而最高产量时的灌水量约为 260 ~ 340mm，前者比后者节约用水 30 ~ 50mm，水分利用效率提高 $0.2 \sim 0.5\text{kg/m}^3$ ，而产量只比后者低 $2.4 \sim 6.6\text{g/m}^2$ 。

参考文献：

- [1] Zhang H, Wang X, You M, *et al.* Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain. *Irrigation Science*, 1999, 19(1): 37 ~ 45.
- [2] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展. *水科学进展*, 2000, 11(1): 99 ~ 104.
- [3] 程维新. 作物生物学特性对耗水量的影响. *地理研究*, 1985, 4(3): 24 ~ 34.
- [4] 莫兴国. 河北平原冬小麦产量和蒸散量模拟. *地理研究*, 2004, 23(5): 623 ~ 631.
- [5] RAJPUTGS, SNGHJ. Water production function for wheat under different environmental conditions. *Agricultural Water Management*, 1986, 11: 318 ~ 332.
- [6] 袁小良, 王会肖, 张喜英, 等. 冬小麦产量与耗水量的关系. 见: 中国科学院台站网络《农作物耗水量研究》课题组. 作物与水分关系研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 10 ~ 17.
- [7] 马忠明. 有限灌溉条件下作物 - 水分关系的研究. *干旱地区农业研究*, 1998, 16(2): 75 ~ 78.
- [8] 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. *灌溉排水*, 1999, 18(2): 30 ~ 33.
- [9] 杨路华, 夏辉, 侯振军, 等. 河北平原冬小麦三种水分生产函数的试验比较. *河北农业大学学报*, 2003, 26: 5 ~ 8.
- [10] 王修贵, 张祖莲, 赵长友, 等. 作物产量对水分亏缺敏感性指标的初步研究. *灌溉排水*, 1998, 17(2): 25 ~ 30.
- [11] 陈亚新. 作物 - 水模型及其敏感指标的确认. *灌溉排水*, 1995, 14(4): 1 ~ 6.
- [12] 葛岩, 周林蕪, 张更元, 等. 沈阳地区冬小麦水分生产函数与水分敏感指标的初步研究. *沈阳农业大学学报*, 2003, 34(2): 131 ~ 134.
- [13] 彭永生, 苏里坦. 全生育期作物水分生产函数的建立. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(4): 122 ~ 124.
- [14] Wang Huixiao, Zhang Lu, Dawes W R, *et al.* Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China Plain—measurements and modeling. *Agricultural Water Management*, 2001, 48: 151 ~ 167.
- [15] Zhang H, Oweis T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 1999, 38: 295 ~ 311.
- [16] Zhang H, Oweis T, Garabet S, *et al.* Water-use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rain-fed conditions and supplemental irrigation in a Mediterranean-type environment. *Plant Soil*, 1998, 201: 295 ~ 305.
- [17] 李会昌, 沈荣开, 张瑜芳. 作物水分生产函数动态产量模型——Feddes 模型初探. *灌溉排水*, 1997, 16(4): 1 ~ 5.
- [18] 王智勇, 王劲峰, 于静洁, 等. 河北省平原地区水资源利用的边际效益分析. *地理学报*, 2000, 55(3): 318 ~ 328.
- [19] 张巨俭, 郭忠. 干旱地区灌溉生产函数与经济用水灌溉定额的确定方法探讨. *中国沙漠*, 1995, 15(4): 362 ~ 367.
- [20] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 水利电力出版社, 1995.

Study on water production function and efficiency of wheat

LU Chang-ming^{1,2}, ZHUO Chang-qing^{1,3}, ZHANG Shi-feng¹, WANG Xiao-li²

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Agricultural Modernization, CAS, Shijiazhuang 050021, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Water is scarce in the North China Plain and the limited precipitation is not enough to satisfy the water requirement for wheat growth. In order to avoid reduction of output caused by scarcity of water, irrigation is necessary to supplement water. This paper discusses the relationship between the amount of irrigation and the yield of wheat. Statistical analysis of experimental data of irrigation indicates that the relationship between yield of wheat and irrigation presents a quadratic parabola in North China. We fit the model of wheat water production function by adopting least squares theory on the basis of field experimental data of wheat. Water production function is quadratic function and its math expression is $Y = -0.0027ET^2 + 2.8647ET - 127.91$. Water productivity is divided into three different development stages according to the changing rule of water use efficiency and the relationship between yield and water consumption. Water consumption being less than 217.66mm is identified as the first stage when yield rises with the rise of water consumption, and productivity rises gradually at this stage. Water consumption at the second stage rises from 217.66mm to 530.50mm and the yield still rises with the rise of water consumption, but the range of rise reduces. The productivity rises slowly. Water consumption at the third stage exceeds 530.50mm and the yield reduces with the rise of water consumption. Negative rise occurs and productivity declines. The analysis of wheat irrigation production function under typical irrigation system indicates that the best point of irrigation efficiency of wheat is not the highest point of utilization ratio of water or the highest point of yield. The best point of irrigation efficiency of wheat is decided by the principle that marginal revenue is equal to the marginal cost. When marginal benefit equals marginal cost, net income of irrigation of wheat is the biggest. The maximal net income is 4816.49 yuan/ha, and irrigation water is 265.00mm at this time. Compared with the irrigation of the maximal yield, it saves 17.85mm of water. Making rational use of wheat water irrigation production function and its regularity can realize the better unification of water-saving, high-yield and high-efficiency of wheat.

Key words: water production function; water use efficiency; irrigation efficiency; wheat