

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.012

# 内蒙古河套灌区节水工程改造效果分析与评估\*

屈忠义 杨晓 黄永江

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 以内蒙古河套灌区 1982—2012 年长系列农业净引水量和年降水量资料为基础, 运用均值分析、方差分析、相关分析、时间序列分析和生存分析等数理统计学方法, 并结合内蒙古河套灌区农业种植发展进程, 分析了河套灌区多年农业净引水量变化趋势与影响因素, 得出年降水量(超过 211.76 mm 时, 即丰水年)和节水工程改造分别独立地与农业净引水量呈明显负相关关系的结论。运用时间序列法预测了 2013、2014 和 2015 年河套灌区的农业净引水量分别为 44.5、44.18 和 43.86 亿  $m^3$ ; 同时运用生存分析法预测了在灌区现有节水改造规模条件下, 河套灌区农业净引水量区间为 35~55 亿  $m^3$ , 平均为 45 亿  $m^3$ 。

**关键词:** 河套灌区 净引水量 时间序列 生存分析 节水工程 预测

**中图分类号:** S271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0070-07

## Analysis and Assessment of Water-saving Project of Hetao Irrigation District in Inner Mongolia

Qu Zhongyi Yang Xiao Huang Yongjiang

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

**Abstract:** The net water diversion of agriculture in Hetao Irrigation District was studied. Based on the data during 1982 to 2012 in Hetao Irrigation District, the characteristics of the net water diversion variability in 31 years were analyzed by using several statistic methods, such as ANOM, ANOVA, correlation analysis, time series analysis and survival analysis. In addition, the impact of annual precipitations and water-saving engineering projects was analyzed by the progress of Hetao Irrigation District developmental history. The forecasted net water diversion in Hetao Irrigation District would be about  $44.5 \times 10^8 m^3$  in 2013,  $44.18 \times 10^8 m^3$  in 2014 and  $43.86 \times 10^8 m^3$  in 2015 by the time series analysis method. In current water-saving engineering project, the forecasted net water diversion would be from  $35 \times 10^8 m^3$  to  $55 \times 10^8 m^3$  by the survival analysis method. The net water diversion was influenced sharply by annual precipitation (more than 211.76 mm, namely wet years) and water-saving engineering project. These two factors had a negative correlation with the net water diversion. Finally, the relationship between net water diversion and total investment of water-saving engineering project was discussed. The results provided an important foundation for the management of sustainable development in Hetao Irrigation District.

**Key words:** Hetao Irrigation District Net water diversion Time series Survival analysis Water-saving project Forecast

### 引言

河套灌区位于黄河上中游内蒙古段北岸的冲积

平原, 总土地面积为 119 万  $hm^2$ , 设计灌溉面积 73 万  $hm^2$ , 农业人口 100 余万人<sup>[1-2]</sup>, 是亚洲最大的一首制灌区和全国 3 个特大型灌区之一, 也是中国

收稿日期: 2014-04-30 修回日期: 2014-06-11

\* 国家自然科学基金资助项目(51069006)和内蒙古自治区水利厅资助项目(NMSH2012-01)

作者简介: 屈忠义, 教授, 博士生导师, 主要从事区域土壤水环境与节水灌溉理论研究, E-mail: quzhongyi68@sohu.com

和内蒙古自治区重要的商品粮、油生产基地。河套灌区地处我国干旱的西北高原,降水量少,蒸发量大,属于没有引水灌溉便没有农业的地区。灌区引水量大,在当今水资源紧缺的条件下,节水工程迫在眉睫。1998 年起,灌区进入了以节水为中心的发展阶段。

自 1998 年到 2012 年累计总投资 13.68 亿元,到 2003 年节水工程初见规模。灌区发展到 2006 年已比 1999 年节水 1.46 亿 m<sup>3</sup>,2012 年比 1999 年节水约 3 亿 m<sup>3</sup>,随着工程整体运行寿命的延长,全灌区工程完好率由 1998 年的 61.6% 提高到目前的 73.8%<sup>[3]</sup>。同时,减少了侧渗,降低了土地盐碱化程度,促进了周边生态环境的好转<sup>[4]</sup>。

对节水工程改造效果进行后评价,不仅是对现有成果的总结,更可为后续发展提供参考依据。进行节水工程改造效果后评价是缓解水资源供需矛盾的需要,也是发展现代农业,促进农业增产的需要;是调整农业结构,实现农民增收的需要,更是改善生态环境,保障河套灌区为我国农产品主要供应基地的需要。

本文运用数理统计的方法,对河套灌区农业净引水量进行分析。由均值分析与方差分析研究年降水量和节水工程改造对农业净引水量的影响。进而用时间序列法对 2013、2014 和 2015 年的农业净引水量进行预测;用生存分析法分别从节水工程改造和年降水量角度预测河套灌区农业净引水量的区间。

## 1 原理

### 1.1 时间序列分析原理

#### 1.1.1 自相关分析

$n$  阶自回归方程表达式<sup>[5]</sup>为

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_n X_{t-n} + a_t \quad (1)$$

式中  $X_t$ ——时间序列  $a_t$ ——白噪声序列

$\varphi_i$ ——自回归参数,  $i = 1, 2, \dots, n$

$n$ ——自回归模型阶数

一般地,  $n$  阶自回归模型的自相关函数<sup>[5]</sup>为

$$\rho_k = \varphi_1 \rho_{k-1} + \varphi_2 \rho_{k-2} + \dots + \varphi_n \rho_{k-n} \quad (2)$$

式中  $\rho$ ——自相关函数

$k$ ——滞后系数

#### 1.1.2 指数平滑分析

指数平滑方程表达式为

$$S_t = \alpha F_t + (1 - \alpha) S_{t-1} \quad (3)$$

式中  $S_t$ —— $t$  时刻的预测值

$F_t$ —— $t$  时刻的实测值

$S_{t-1}$ —— $t - 1$  时刻的预测值

$\alpha$ ——平滑系数,介于 0 ~ 1 之间

## 1.2 生存分析

### 1.2.1 生存函数

生存函数<sup>[6]</sup>又称为累计生存概率,表达式为

$$S(u) = P(X > u) = \int_u^\infty f(\theta) d\theta \quad (4)$$

本文将变量  $u$  看成农业净引水量,则生存函数  $S(u)$  表示农业净引水量大于某一值时的概率。

### 1.2.2 Kaplan - Meier 生存分析

Kaplan - Meier 分析<sup>[7]</sup>方法又称为乘法极限估计、PL 法和最大似然估计法。这是一种生存函数的非参数算法,在处理小样本时,能充分利用每个数据所包含的信息,得到满意的预测模型。

## 2 基于描述性统计方法的河套灌区农业净引水量分析

### 2.1 水文频率分析

采用皮尔逊 III 型频率法对河套灌区 1982—2012 年 31 年的农业净引水量进行计算分析,计算结果如图 1 所示。

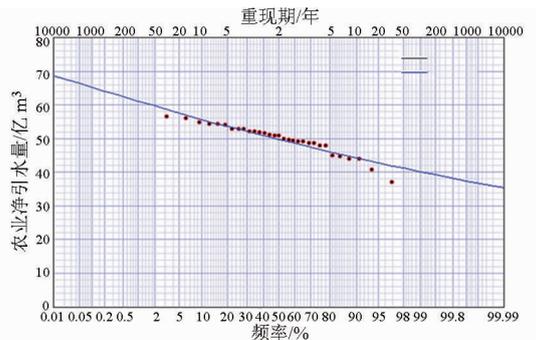


图 1 皮尔逊 III 型水文频率曲线

Fig. 1 Frequency curve of P-III

频率为 25% 的年份出现在 1993 年,农业净引水量是 52.99 亿 m<sup>3</sup>,降水量为 109.65 mm;最大降水出现在 2012 年,降水量为 307.74 mm,为罕见的特殊丰水年份,部分地区出现涝灾现象,净引水量是 37.16 亿 m<sup>3</sup>;频率为 50% 的年份为 1997 年,净引水量是 50.93 亿 m<sup>3</sup>,降水量为 199.20 mm;频率为 75% 的年份为 2007 年,净引水量是 48.03 亿 m<sup>3</sup>,降水量为 190.52 mm;特枯年为 1986 年,净引水量高达 56.01 亿 m<sup>3</sup>,降水量仅为 77.94 mm。

根据年降水量的大小和农业净引水量水文频率曲线,进行聚类分析,进一步细化,将这 31 年重新划分成枯水年、平水年和丰水年,它们的范围依次是年降水量小于 130.43 mm、介于 130.43 ~ 211.76 mm 之间、大于 211.76 mm。在这 31 年中,平水年出现 16 次,丰水年和枯水年分别出现 7、8 次。经过聚类分析得出的水文年型和传统频率分析得出的水文年型的年降水量略有不同。传统水文频率分析的结果

是:枯水年 120.64 mm,平水年 160.72 mm,丰水年 199.20 mm,与聚类分析的结果平均相差 10 mm。这是因为:传统水文频率分析的结果是某一年的观测值,而聚类分析的结果打破了这一限制,是由原始数据计算得出的值。所以本文在划分这 31 年的水文年型时,采用聚类分析的结果。

## 2.2 正态性检验

正态分布是连续性随机变量中最重要的分布之一,引水量大都服从正态分布。对 1982—2012 年的年净引水量用非参数 K-S 检验(图 2),得到渐进双侧显著性概率  $P$  是 0.630,远大于显著性水平 0.05,所以接受原假设,认为河套灌区农业净引水量服从正态分布  $N(49.91, 4.44^2)$ 。

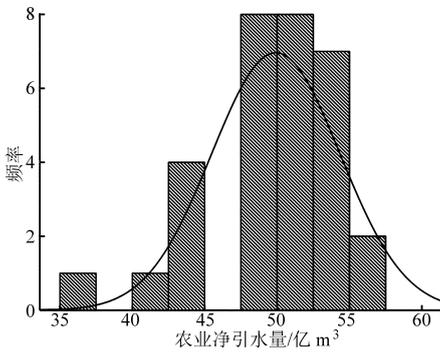


图 2 农业净引水量正态检验直方图

Fig. 2 Normality test histogram of net water diversion

## 2.3 均值分析

均值分析能更清晰地反映不同因素影响下数据的平均水平。河套灌区 1982—2012 年农业净引水量以水文年型和衬砌为因素的均值分析如表 1 所示。由表 1 可见,衬砌后的农业净引水量明显小于衬砌前的农业净引水量;并且枯水年的净引水量最大,平水年次之,丰水年最小,它们之间的差异性分析见 2.4 节的方差分析。河套灌区衬砌后不同水文

表 1 不同因素下的均值分析

Tab. 1 ANOM under different factors

控制因素	水文年型	净引水量均值/亿 m <sup>3</sup>	个数
节水改造(衬砌)前 (1982—2002 年)	枯水年	54.272	5
	平水年	52.265	10
	丰水年	49.167	3
	总计	52.306	18
节水改造(衬砌)后 (2003—2012 年)	枯水年	49.250	3
	平水年	47.598	6
	丰水年	43.100	4
	总计	46.595	13
节水改造前至后 (1982—2012 年)	枯水年	52.389	8
	平水年	50.515	16
	丰水年	45.700	7
	总计	49.911	31

年型的净引水量比衬砌前不同水文年型的净引水量平均小 4 亿 m<sup>3</sup>;各水文年型下的农业净引水量平均相差 2~5 亿 m<sup>3</sup>。

## 2.4 方差分析

### 2.4.1 方差齐性分析

方差齐性分析是判断各组间是否有相同方差的方法,同时也是进行方差分析的前提。对 1982—2012 年的净引水量数据以水文年型和衬砌为因素分别进行方差齐性分析,结果如表 2 所示。

表 2 方差齐性分析

Tab. 2 Homogeneity test of variance

分析类型	Levene 统计量	显著性 $P$
水文年型	1.505	0.239
衬砌与否	6.812	0.014

由表 2 可知,以水文年型为因素的显著性概率  $P$  是 0.239,大于显著性水平 0.05,所以认为数据间是齐性的,可以进行方差分析;但以节水工程(衬砌与否)为因素的显著性概率是 0.014,小于显著性水平 0.05,认为数据间非齐性,农业净引水量按节水工程实施与否分成 2 组方差不同的样本空间。

### 2.4.2 单因素方差分析

按水文年型进行方差分析的结果如表 3 所示。组间的显著性概率  $P$  是 0.006,远小于显著性水平 0.05,所以认为丰水年、平水年和枯水年的农业净引水量变化及其明显。经计算丰水年、平水年和枯水年的农业净引水量平均值分别为 45.70、50.52、52.39 亿 m<sup>3</sup>,并且有各自的变化范围。

表 3 单因素方差分析

Tab. 3 One-way analysis of variance

项目	平方和	均方	$F$	显著性 $P$
组间	179.079	89.539	6.079	0.006
组内	412.389	14.728		
总数	591.467			

### 2.4.3 多因素方差分析

对以水文年型与节水工程(衬砌与否)为控制因素的农业净引水量进行主体间检验,得到显著性概率  $P$  是 0.877,远大于显著性水平 0.05,所以认为节水工程与降水量的交互作用对河套灌区农业净引水量没有明显影响,它们只是独立地对河套灌区农业净引水量起显著作用。从年降水量和节水工程 2 个因素出发,结合统计学分析方法,单独分析二者对河套灌区净引水量的影响,由图 3 可知,节水工程的实施可以使农业净引水量明显减小,而年降水量基本不受影响(方差满足齐性要求且方差分析的显著性概率  $P$  是 0.609),这说明河套灌区农业净引水

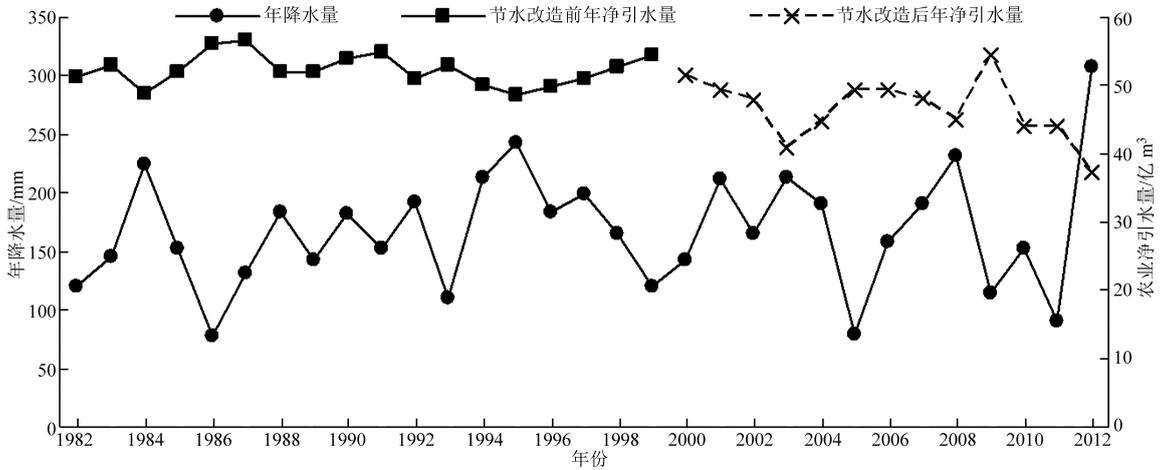


图3 节水工程的影响

Fig. 3 Impact of water-saving engineering project

量的减小给降水带来的影响很小。

### 3 基于时间序列分析的河套灌区农业净引水量分析

根据河套灌区1982—2012年农业净引水量资料,按年份创建时间序列,步长为1,运用指数平滑方法进行时间序列分析。

此模型残差序列的自相关(ACF)和偏自相关(PACF)函数如图4和表4所示,可知ACF和PACF基本均无显著的趋势变化特征(拖尾或截尾趋势)<sup>[8]</sup>,属于白噪声,较好地模拟了实测值的96.9%。但是显著性概率 $P$ 为0.003,小于显著性水平0.05,此序列不是平稳随机系列,原因是逐年节水工程的实施引起农业净引水量人为地减小所导致。另外,由表5可知,该模型水平 $\alpha$ 的值是1.000, $P$ 值为0.001,说明此模型不仅作用很大而且很显著,很好地模拟了河套灌区农业净引水量的变化规律。由图5可知,从1982—2012年,河套灌区农业净引水量有3次剧烈的波动下行,有3次剧烈的波动上升,但是河套灌区农业净引水量整体呈现减小的趋势。

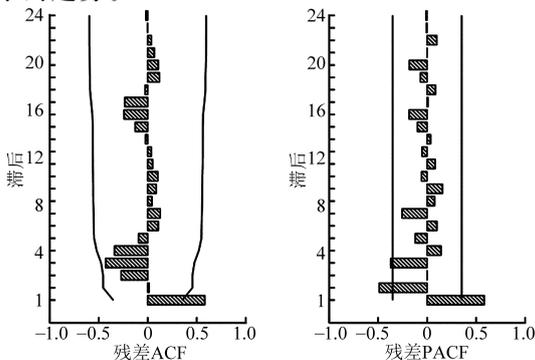


图4 残差自相关和偏自相关图

Fig. 4 Residual errors of autocorrelation and partial autocorrelation

根据此模型计算出2013、2014和2015年的河套灌区农业净引水量预测值及置信区间如表6所示。由表6可知2013—2015年的农业净引水量预测值基本在40亿 $m^3$ 左右。2013年河套灌区实测农业净引水量是43.14亿 $m^3$ ,可知模型拟合度很好。

表4 残差相关分析

Tab. 4 Analysis of residual errors

模型名称	模型拟合	Ljung-Box Q(18)		
	统计量 $R^2$	统计量	显著性 $P$	离群值数
河套灌区农业净引水量模型	0.969	37.653	0.003	0

表5 模型参数

Tab. 5 Parameters of model

模型概况	$\alpha$ 估计	显著性 $P$
河套灌区农业净引水量模型	无转换	1.000

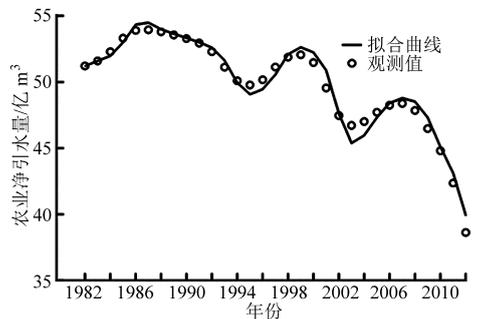


图5 观测值与拟合值的比较

Fig. 5 Comparison of observed data with simulated value

### 4 基于生存分析的河套灌区农业净引水量分析

对河套灌区农业净引水量分别按水文年型和节水工程为因子进行生存分析。

表6 河套灌区农业净引水量模型预测值

Tab.6 Prediction of net water diversion 亿 m<sup>3</sup>

农业净引水量	年份		
	2013	2014	2015
预测值	44.5	44.18	43.86
区间上限	51.79	51.5	51.21
区间下限	37.21	36.86	36.51

表7 农业净引水量生命表(以节水工程为因子)

Tab.7 Life table of net water diversion (water-saving project)

亿 m<sup>3</sup>

时间段	均值	标准误差	95% 置信区间		中位数	标准误差	95% 置信区间	
			下限	上限			下限	上限
			1982—2002年	52.306			0.543	51.241
2003—2012年	46.595	1.278	44.090	49.101	47.930	1.995	44.020	51.840
1982—2012年	49.911	0.797	48.348	51.474	50.930	0.979	49.010	52.850

表8 农业净引水量四分位数表(以节水工程为因子)

Tab.8 Quartile table of net water diversion (water-saving project)

亿 m<sup>3</sup>

时间段	25%	50%	75%
1982—2002年	54.04	52.10	50.93
2003—2012年	49.30	47.93	44.05

差齐性检验的结论一致。

表9给出了整体比较的结果。从3种检验的显著性概率值可以看出,在0.05的显著性水平上,经过节水工程改造后,河套灌区农业净引水量减小程度很显著。图6为生存函数曲线,从图6中直观地看出,节水工程改造后的农业净引水量明显减小。从图6中也可以看出,河套灌区目前农业净引水量区间为35~55亿m<sup>3</sup>;而2003年以前的农业净引水量为48~57亿m<sup>3</sup>。节水改造后的农业净引水量曲线走势缓、跨度大、范围小,并且在48亿m<sup>3</sup>处突然变陡,说明河套灌区在保持现有节水水平的基础上,农业净引水量有较大的概率在38~48亿m<sup>3</sup>之间。

表9 不同检验方法对比(以节水工程为因子)

Tab.9 Comparison of different test methods (water-saving project)

检验方法	$\chi^2$	显著性P
Log Rank (Mantel - Cox)	12.059	0.001
Breslow (Generalized Wilcoxon)	16.174	0.001
Tarone - Ware	14.864	0.001

表10 农业净引水量生命表(以水文类型为因子)

Tab.10 Life table of net water diversion (hydrological year)

亿 m<sup>3</sup>

水文年型	均值	标准误差	95% 置信区间		中位数	标准误差	95% 置信区间	
			下限	上限			下限	上限
			枯水年	52.389			1.477	49.494
平水年	50.515	0.769	49.007	52.023	50.970	0.650	49.696	52.244
丰水年	45.700	1.878	42.019	49.381	48.700	4.936	39.025	58.375
整体	49.911	0.797	48.348	51.474	50.930	0.979	49.010	52.850

#### 4.1 以节水工程为因子的河套灌区农业净引水量生存分析

表7和表8为河套灌区农业净引水量生命表的均值、中位数和四分位数。从表7和表8中可以看出,自实施节水工程后,河套灌区农业净引水量的均值、中位数和四分位数的差异很明显,由此初步判断渠道衬砌能显著减小灌区用水量,这与2.4.1节方

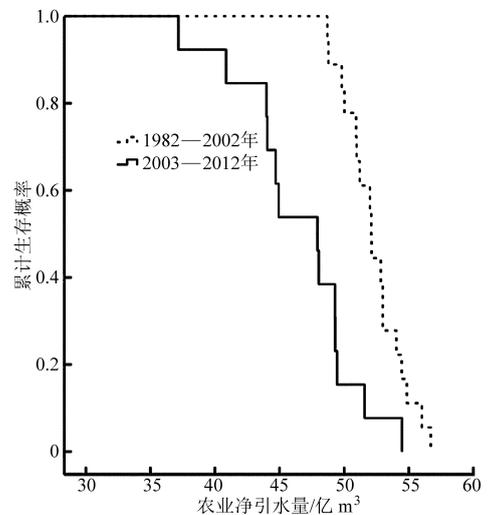


图6 农业净引水量生存曲线(以节水工程为因子)

Fig.6 Survival curve of net water diversion (water-saving project)

#### 4.2 以年降水量(水文年型)为因子的河套灌区农业净引水量生存分析

由表10和表11可知,枯水年和平水年的均值、中位数和四分位数相差较小。而丰水年却与之相差较大,说明丰水年对河套灌区农业净引水量的影响很大。而由表12看出,3种检验概率都远小于显著性水平( $P < 0.05$ )。从图7中得出,丰水年、平水年和枯水年的农业净引水量范围依次为:35~50、43~55、44~57亿m<sup>3</sup>。说明年降水量超过一定值时,能对河套灌区农业净引水量起显著作用。

表 11 农业净引水量四分位数表 (以水文年型为因子)

**Tab. 11 Quartile table of net water diversion (hydrological year)**

水文年型	25%	50%	75%
枯水年	54.47	52.99	49.29
平水年	52.12	50.97	48.03
丰水年	49.45	48.7	40.86

表 12 不同检验方法对比 (以水文年型为因子)

**Tab. 12 Comparison of different test methods (hydrological year)**

检验方法	$\chi^2$	显著性 $P$
Log Rank (Mantel - Cox)	15.718	0.001
Breslow (Generalized Wilcoxon)	11.752	0.003
Tarone - Ware	13.568	0.001

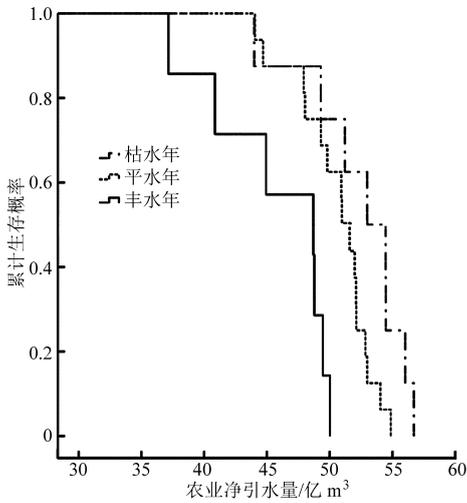


图 7 农业净引水量生存曲线 (以水文年型为因子)

Fig. 7 Survival curve of net water diversion (hydrological year)

## 5 年降水量 (水文年型) 和农业节水工程对河套灌区农业净引水量的影响

### 5.1 年降水量 (水文年型) 对河套灌区农业净引水量的影响

经计算,河套灌区 1982—2012 年降水量 K-S 检验的显著性概率是 0.999,服从正态分布  $N(167.16, 51.12^2)$ , 平均年降水量是 167.16 mm。

图 8 是按年降水量降序排列的总干渠农业净引水量曲线。年降水量与农业净引水量的相关系数是 -0.568, 呈现负相关的规律。但是河套灌区农业净引水量变化却不明显,说明当降水强度超过一定级别时才显著影响净引水量,但农业净引水量均随降水量的增加而减小。

表 13 给出了不同降水年型下,河套灌区农业净引水量 3 种检验方法的多重比较结果。由表 13 看出,尽管方差分析所得出的结论是不同降水年型下

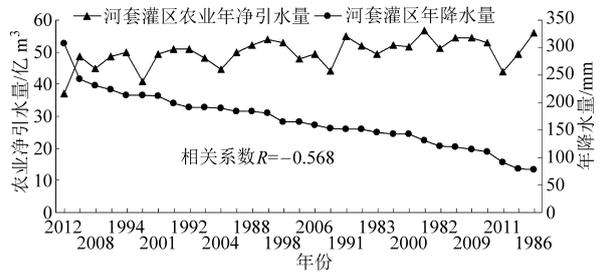


图 8 年降水量与农业净引水量相关分析

Fig. 8 Correlation analysis between annual precipitation and net water diversion

表 13 不同降水年型的多重比较

**Tab. 13 Multiple comparison of different annual precipitations**

检验方法	水文年型	显著性 $P$
Scheffe	枯水年 平水年	0.537
	枯水年 丰水年	0.009**
	平水年 枯水年	0.537
	平水年 丰水年	0.034*
	丰水年 枯水年	0.009**
	丰水年 平水年	0.034*
Bonferroni	枯水年 平水年	0.807
	枯水年 丰水年	0.007**
	平水年 枯水年	0.807
	平水年 丰水年	0.030*
	丰水年 枯水年	0.007**
	丰水年 平水年	0.030*
Sidak	枯水年 平水年	0.610
	枯水年 丰水年	0.007**
	平水年 枯水年	0.610
	平水年 丰水年	0.029*
	丰水年 枯水年	0.007**
	丰水年 平水年	0.029*

河套灌区农业净引水量有显著差异,但是这种差异是由于丰水年引起的,枯水年和平水年的农业净引水量无显著差异,这和上述结论一致。从而可以进一步把水文年型归为 2 类:一类为年降水量超过 211.76 mm 的年份,称之为丰水年;另一类是年降水量小于 211.76 mm 的年份,因为这种年份在河套灌区很平常,所以称之为常水年。

### 5.2 农业节水工程对河套灌区农业净引水量的影响

由图 9 可知,河套灌区节水改造从 1998 年开始,经过 2 年的工程实施,在 2000 年河套灌区农业净引水量开始显著减小。运用配对样本  $t$  检验,得到检验显著性概率  $P$  是 0.004 (表 14),远远小于显著性水平 0.05,表明经过 16 年的渠道节水工程投资建设,河套灌区农业净引水量已经大大减少,并且由图 10 可知,工程实施前后农业净引水量相差约 4.3 亿  $m^3$ ,与上文均值分析得出的结论一致。

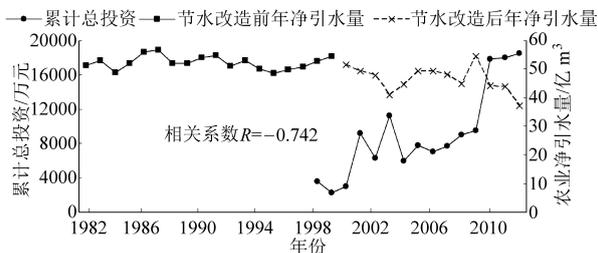


图9 历年节水总投资与年净引水量

Fig. 9 Annual total water saving investment and net water diversion

表14 配对样本  $t$  检验结果Tab. 14 Result of paired sample  $t$  test

对比项目	差分 均值	差分标 准差	标准 误差	$t$	显著性 $P$
衬砌后-衬砌前	4.684 00	5.310 12	1.371 07	3.416	0.004

总投资与农业净引水量的相关系数是  $-0.742$ , 说明这 16 年的节水改造工程(主要是渠道防渗方面), 资金投入量越大, 节水效果越明显, 原因是节水改造工程是一个漫长的过程, 投资额和节水效果

表15 2013年河套灌区农业净引水量预测值与实际值对比

Tab. 15 Comparison of predicted value and observed value

预测方法	预测值/亿 $m^3$	实际值/亿 $m^3$	相对误差/%
时间序列法	44.50		3.15
生存分析(节水工程法)	范围 35 ~ 55, 大概率范围 38 ~ 48	43.14	位于范围之内
生存分析(水文年型法)	丰水年范围 35 ~ 50; 常水年范围 43 ~ 57		位于范围之内

## 6 结论

(1) 河套灌区农业净引水量服从正态分布, 变化规律呈现明显的减小趋势, 这与节水改造工程的实施有很大关系。

(2) 节水改造工程和年降水量相互独立地影响河套灌区农业净引水量, 二者之间的交互作用对农业净引水量的影响较小, 且均与河套灌区农业净引

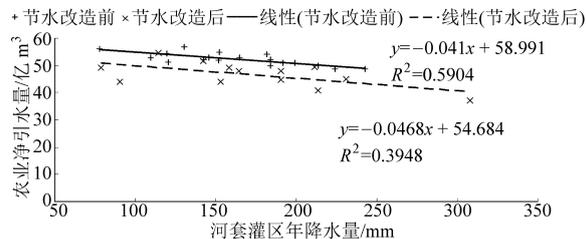


图10 节水工程实施前后农业净引水量对比

Fig. 10 Comparison of net water diversion before and after water saving engineering project

产生了积累效应。

表 15 总结了上述各种方法的预测值。用时间序列法得出 2013 年河套灌区农业净引水量的预测结果接近于 2013 年实测农业净引水量, 相对误差仅为 3.15%。用生存分析得出的预测区间也都包含着 2013 年河套灌区农业实测净引水量。其中以节水工程为因子的生存分析给出了大概率引水区间。以上 2 种高级统计分析预测法, 分别以点和区间的形式给出河套灌区农业净引水量的预测值, 可信度较高。

水量为负相关。

(3) 经过节水工程改造, 河套灌区在渠道方面有节水阈值, 预测此阈值是 35 亿  $m^3$ 。节水改造后农业净引水量比改造前减小大约 13 亿  $m^3$ , 作用很显著。

(4) 年降水量对农业净引水量的影响也很显著, 3 种不同水文年型间的引水量平均相差 3 亿  $m^3$ ; 丰水年对农业净引水量影响显著, 常水年几乎无影响。

## 参 考 文 献

- 武银星, 秦景和. 内蒙古河套灌区供排水运营管理统计资料汇编(1960年—2008年)[G]. 巴彦淖尔: 内蒙古河套灌区, 2009.
- 巴彦淖尔市统计局. 巴彦淖尔市统计年鉴(2000年—2010年)[M]. 巴彦淖尔市: 巴彦淖尔市统计局, 2000—2010.
- 屈忠义, 陈亚新, 史海滨, 等. 内蒙古河套灌区节水灌溉工程实施后地下水变化的 BP 模型预测[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 59—62.
- 李振玺, 张万宝. 宁夏引黄灌区渠道衬护对地下水水位的影响[J]. 人民黄河, 2010, 32(11): 81—83.
- 刘次华. 随机过程[M]. 4版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008: 138—170.
- 卢守峰, 王红茹, 刘喜敏. 基于生存分析法的行人过街最大等待时间研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(5): 69—71.  
Lu Shoufeng, Wang Hongru, Liu Ximin. Traffic congestion management decision support based on traffic distribution[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(5): 69—71. (in Chinese)
- 吴冰. 生存分析及其应用: 以创业研究为例[J]. 上海交通大学学报: 哲学社会科学版, 2006, 14(3): 63—71.  
Wu Bing. On how renaissance philosophy affects the origin of modern science[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Philosophy and Social Sciences, 2006, 14(3): 63—71. (in Chinese)

- 7 Kisi Ö. Generalized regression neural networks for evapotranspiration modelling[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2006, 51(6): 1092 – 1105.
- 8 Kisi Ö, Öztürk Ö. Adaptive neurofuzzy computing technique for evapotranspiration estimation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(4): 368 – 379.
- 9 Moghaddamnia A, Ghafari Gousheh M, Piri J, et al. Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques[J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(1): 88 – 97.
- 10 顾世祥, 王士武, 袁宏源. 参考作物腾发量预测的径向基函数法[J]. *水科学进展*, 1999, 10(2): 123 – 128.  
Gu Shixiang, Wang Shiwu, Yuan Hongyuan. A radial basis function model predicting daily reference evapotranspiration[J]. *Advances in Water Science*, 1999, 10(2): 123 – 128. (in Chinese)
- 11 Khu S T, Liong S Y, Babovic V, et al. Genetic programming and its application in real-time runoff forecasting[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(2): 439 – 451.
- 12 Aytel A, Alp M. An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling[J]. *Journal of Earth System Science*, 2008, 117(2): 145 – 155.
- 13 Shiri J, Kisi Ö. Comparison of genetic programming with neuro-fuzzy systems for predicting short-term water table depth fluctuations[J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(10): 1692 – 1701.
- 14 元昌安, 彭显忠, 覃晓, 等. 基因表达式编程算法原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 15 Guven A, Kisi Ö. Estimation of suspended sediment yield in natural rivers using machine-coded linear genetic programming[J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(2): 691 – 704.
- 16 刘钰, Pereira L S, Teixeira J L, 等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. *水利学报*, 1997, 28(6): 27 – 33.  
Liu Yu, Pereira L S, Teixeira J L, et al. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 28(6): 27 – 33. (in Chinese)
- 17 Yin Y, Wu S, Chen G, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(1–2): 19 – 28.
- 18 胡庆芳, 尚松浩, 温守光, 等. 基于投影寻踪的径向基函数网络在参考腾发量预测中的应用[J]. *水利学报*, 2006, 37(9): 1151 – 1154.  
Hu Qingfang, Shang Songhao, Wen Shouguang, et al. Using radial basis function network based on project pursuit to forecast reference evapotranspiration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1151 – 1154. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 76 页)

- 8 杨晓斌. 基于 SPSS 软件的浦东新区长江引水量分析和预测[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(4): 70 – 73.  
Yang Xiaobin. Analysis and prediction of water diversion from the Yangtze River in the Pudong new district based on SPSS[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(4): 70 – 73. (in Chinese)
- 9 且木仁加甫. 中长期水文预报与 SPSS 应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011.
- 10 门登霍尔 W, 辛塞奇 T. 统计学[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- 11 何晓群. 多元统计分析[M]. 3 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2012: 1 – 87.
- 12 陆军, 张红涛, 魏德云, 等. 基于时间序列分析的雾滴页面动态接触角预测与建模[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 80 – 86.  
Lu Jun, Zhang Hongtao, Wei Deyun, et al. Dynamic contact angle forecasting and modeling for drop leaf interface based on time series analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 80 – 86. (in Chinese)
- 13 蒋智, 况明生. 重庆地区近 57 年降雨量变化特征及其影响分析[J]. *亚热带水土保持*, 2009, 21(2): 9 – 13.  
Jiang Zhi, Kuang Mingsheng. Analysis on the characteristic of precipitation variability & effects in recent fifty-seven years in Chongqing area[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2009, 21(2): 9 – 13. (in Chinese)
- 14 曾小凡, 翟建青, 姜彤, 等. 长江流域年降水量的空间特性和演变规律分析[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(6): 727 – 732.  
Zeng Xiaofan, Zhai Jianqing, Jiang Tong, et al. Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2008, 36(6): 727 – 732. (in Chinese)
- 15 张焱, 韩军青, 郭刚. 西晋黄土高原地区近 47 年降雨量的统计分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(1): 89 – 91.  
Zhang Yan, Han Junqing, Guo Gang. Statistical analysis on precipitation in Jinxibei region during the last 47 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(1): 89 – 91. (in Chinese)
- 16 方积乾. 生存分析的概念与方法学[J]. *自然杂志*, 1988, 11(11): 826 – 831.
- 17 徐英, 骆福添. 生存分析中几种模型的研究概况[J]. *中国卫生统计*, 2006, 23(4): 364 – 366.
- 18 张娜, 屈忠义, 杨晓, 等. 贝叶斯模型在土壤转换函数中的应用与适应性评价[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 149 – 155.  
Zhang Na, Qu Zhongyi, Yang Xiao, et al. Application and adaptability evaluation of Bayesian model in soil transfer functions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 149 – 155. (in Chinese)
- 19 Oakes D. Biometrika centenary: survival analysis[J]. *Biometrika*, 2001, 88(1): 99 – 142.
- 20 Tiwari G, Bang diwala S, Saraswat A, et al. Survival analysis: pedestrian risk exposure at signalized intersections[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2007, 10(2): 77 – 89.