

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.12.0199

## 北京市平原区农用机井水电折算系数试验研究

尹世洋<sup>1,2</sup>, 吴文勇<sup>2</sup>, 刘洪禄<sup>2</sup>, 孙振华<sup>3</sup>, 祁兴会<sup>2</sup>, 原桂霞<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 北京市水科学技术研究院水资源研究所, 北京 100048; 3. 北京市昌平区水务局, 北京 102200)



尹世洋

**摘要:**沿潮白河冲积扇、永定河冲积扇上中下游,针对不同包气带结构、不同地下水埋深条件,布置 62 个数据监测点,系统开展了水电折算系数率定测试试验。通过布置远程水量监测系统、远程电量监测系统、动态水位监测系统、数据实时传输系统,实时获得农用机井的出水量、耗电量以及动态水位,分析得出不同区域、不同动态水位下农用井出水量与耗电量之间的折算关系,发现含水层的富水性以及区域地下水埋深是影响水电折算系数的主要参数。对比分析研究区域内的含水层富水性以及地下水水位埋深,得知北京市各区县水电折算系数为  $2.53 \sim 4.88 \text{ m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$  的结论。该成果为支撑水电折算计量系统在北京以及全国的推广,并为提高较高水电折算计量系统的精度,提供了技术支持。

**关键词:**农用机井;水电折算系数;北京;平原;试验研究

**中图分类号:** S274; TN914.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2014)11-0998-07

尹世洋, 吴文勇, 刘洪禄, 等. 北京市平原区农用机井水电折算系数试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(12): 998-1004.

Yin Shiyang, Wu Wenyong, Liu Honglu, et al. Experiments on conversion coefficient between electricity consumed and water pumped for agricultural wells in Beijing plain[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME), 2014, 32(11): 998-1004. (in Chinese)

## Experiments on conversion coefficient between electricity consumed and water pumped for agricultural wells in Beijing plain

Yin Shiyang<sup>1,2</sup>, Wu Wenyong<sup>2</sup>, Liu Honglu<sup>2</sup>, Sun Zhenhua<sup>3</sup>, Qi Xinghui<sup>2</sup>, Yuan Guixia<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Water Resources Research Institute, Beijing Water Science &amp; Technology Institute, Beijing 100048, China; 3. Changping District Water Authority, Beijing 102200, China)

**Abstract:** A series of systematic tests were conducted to calibrate conversion coefficient between electricity power consumed and water pumped for agricultural wells by means of 62 monitoring points located at different vadose zone structures and groundwater tables in the up-, mid- and down-stream alluvial fans of River Chaobai and River Yongding. The conversion coefficients between the electricity consumed and water pumped were obtained for the agricultural wells distributed in the different alluvial fans based on the real-time water flow rate, electricity consumed and dynamic level of groundwater, which were measured by using the remote water flow rate, electricity power and dynamic groundwater level monitoring systems as well as a real-time data transmission system. It was identified that the aquifer water abundance and local groundwater level are the dominant factors for determining a conversion coefficient. Moreover, the conversion coefficients under various water abundances and groundwater levels were compared, the coefficient is in a range of  $2.53 \sim 4.88 \text{ m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$  for the counties and

收稿日期: 2012-12-04; 网络出版时间: 2014-11-26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.12.0199.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD25B00, 2012BAD08B02); 北京市科技计划项目

作者简介: 尹世洋(1984—), 男, 河南濮阳人, 工程师(yinshiyang@aliyun.com), 主要从事农业节水灌溉机械研究。

吴文勇(1977—), 男, 江苏射阳人, 教授级高级工程师, 博士(wenyongwu@126.com), 主要从事农业节水、水文水资源研究。

districts in Beijing. Not only can this outcome provide a technical support for an electricity – water conversion metering system to be applied in Beijing even in the whole nation, but also it can improve the accuracy of the system.

**Key words:** agricultural well; conversion coefficient between electricity consumed and water; Beijing; plain area; experimental study

20 世纪 80 年代以来,北京市地表水资源呈现不断减少的趋势,由于全社会用水量不断增多和近期持续干旱,造成了地下水过度开采、地下水水位的持续下降.2010 年全市平原区地下水平均埋深为 24.92 m,比 1980 年下降了 17.68 m,创历史新高.地下水储量日益减少,农业灌溉供水形势日益严峻<sup>[1]</sup>.

为了应对水资源短缺、提高用水效率,必须实现农业用水由原有的粗放式管理向精细化管理转变.传统的水表计量方式维护成本高<sup>[2-3]</sup>,采集数据耗费人力物力<sup>[4-5]</sup>,冬天容易冻胀<sup>[6]</sup>,而远传水表虽然可以实时采集数据,但无法实现智能化用水管理<sup>[7]</sup>,且维护、防盗、管理成本较高.近年来,基于农业用水管理的特点,北京、天津、河北等地提出了采用水电折算计量系统<sup>[8-10]</sup>测算农用机井用水量的方法,即通过分析水电之间的折算关系,以电量折算水量,这不仅能大大提高农业用水的计量效率、降低人力成本,还能为农业用水以电计水、以电控水、以电管水的发展思路提供技术支撑.

水电折算计量系统针对农民用水特点、农业用水管理中存在的实际问题而研制,国外还没有相关报道<sup>[11-13]</sup>.目前,该计量系统已经在北京、河北、天津等地得到试点推广,但由于水电折算系数的测算多是依靠室内试验或野外几个点的试验数据获得,没有区域性的针对水电折算系数测试的试验研究,很难保证大尺度上的计量精度<sup>[14-15]</sup>.

文中沿潮白河冲积扇、永定河冲积扇上中下游,针对不同包气带结构、不同地下水埋深条件,布置 62 个数据监测点系统开展实地试验,监测点均匀分布在通州、大兴、密云、怀柔等 13 个郊区县,获得相应农用机井的出水量、耗电量以及动态水位,以分析不同区域、不同动态水位下农用机井出水量与耗电量之间的折算关系,探讨不同工况条件下的水电折算系数.

## 1 基本理论与方法

### 1.1 理论基础

水电折算系数即探讨水泵出水量与单位用电

量之间的对应关系.为了统一标准,水电折算系数定义为水泵的单位电耗出水量.

$$C = \frac{Qt}{E} = \frac{3\,600\eta_1\eta_2}{gH}, \quad (1)$$

式中: $C$  为水电折算系数,  $\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;  $Q$  为  $t$  时间段内的出水流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $E$  为  $t$  时间段内的耗电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $\eta_1, \eta_2$  分别为  $t$  时间段内的供电、水泵的使用效率;  $H$  为水泵扬程,  $\text{m}$ .  $\eta_1$  主要反映电压的稳定程度,北京市内电压比较稳定,此处可以不考虑;  $\eta_2$  与水泵的使用工况有关.

泵的有效功率  $P_u$  与轴功率  $P$  的比值  $\eta$  是标志水泵性能优劣的一项重要技术经济指标.有效功率又称为输出功率,即单位时间内流过泵的液体从泵处得到的能量.

$$P_u = \rho g Q H, \quad (2)$$

$$\eta = P_u / P, \quad (3)$$

$$P = P_u / \eta = \rho g Q H / \eta, \quad (4)$$

$$E = \frac{\rho g Q H}{1\,000\eta_1\eta_2} t. \quad (5)$$

由式(1)可知,影响农用机井水电折算系数的主要因素为水泵电源的供电效率、水泵的使用效率以及水泵的工作扬程.水泵电源的供电效率主要包括 2 个因素:供电电源的稳定性、水泵是否使用变频控制;水泵的使用效率主要受其自身参数、连接方式、实际扬程等因素的影响;水泵的工作扬程主要受研究区域抽水的水位降深、水泵装置的局部和沿程水头损失以及区域地下水埋深等参数的影响.

通过测试各监测点农用机井各抽水时段的出水量与耗电量,分析各监测点机井出水量、用电量的相关关系,探讨其影响因素.

### 1.2 研究方案

选定的 62 个农用机井监测点布置水电折算系数率测定测试装置,包括远程水量监测系统、远程电量监测系统、动态水位监测系统、数据实时传输系统等.通过该监测装置,能够实时获得农用机井的出水量、耗电量以及动态水位,分析得出不同区域、不同动态水位下的水电折算系数.监测点如图 1 所示.

1) 远传电量计量系统:实时采集农用机井的用

电量,采用三相四线制,水泵工作时每 5 min 采集 1 次数据.

2) 远传水表计量系统:安装在水泵出水管地面的直管段处,保证直管段的长度符合前  $10D$  后  $5D$  (水表前面有 10 倍直径长的直管段,水表后面有 5 倍直径长的直管段)的要求,获得水泵的出水量,水泵工作时每 5 min 采集 1 次数据.

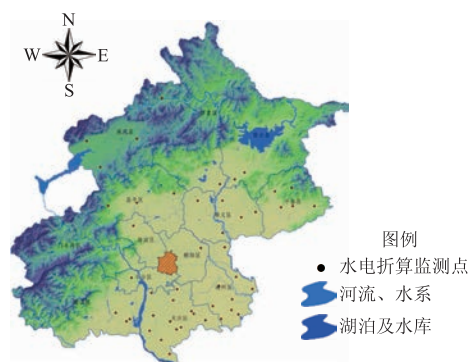


图 1 系统的监测点分布示意图  
Fig. 1 Sketch of monitoring points distribution

3) 水位在线监测系统:安装在农用机井的抽水泵上面、距离井水水面 0 ~ 15 m 处,能够实时获得井水水位动态变化数据. 根据水位监测系统的深度,反求出实时动态水位.

4) GPRS 实时传输系统:通过 GPRS 数据模块,把各个监测点实时采集到的水量数据、电量数据、动态水位数据发送到数据采集中心.

## 2 单因素对水电折算系数的影响

### 2.1 电源对水电折算系数的影响

农用机井多采用统一市政供电,电源比较稳定. 电源对水电折算系数的影响主要体现在是否安装变频装置. 机井安装变频以后,水泵无论出水量多少,始终处于保压状态,相应的耗电量也较大. 表 1 为变频情况下的水电折算系数. 由表可知,在同一区域,机井安装变频装置后,水电折算系数明显小于不使用变频装置的农用机井,平均降低了 48.5%.

表 1 变频情况下水电折算系数  
Tab. 1 Conversion coefficient  $C$  at variable frequency

乡镇	村名	有无变频	$C / (\text{m}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$
潞城	大台	无	5.46
	西堡	有	2.65
西集	侯东义	有	2.93
	西集	无	5.51
	柏福	无	4.58

### 2.2 水泵额定参数对水电折算系数的影响

根据监测点的分布情况,选择处于同一地下水埋深的监测点,剔除其中安装了变频控制器的监测点,分析其余监测点水电折算系数与水泵额定功率  $P_r$ 、额定流量  $Q_r$ 、额定扬程  $H_r$  的相关关系. 其关系曲线分别如图 2~4 所示.

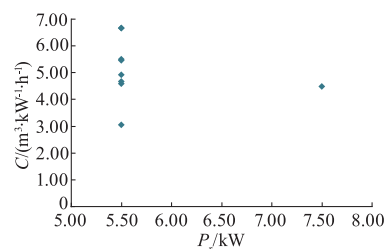


图 2 水电折算系数与额定功率关系  
Fig. 2 Relationship between conversion coefficient  $C$  and pump rated power

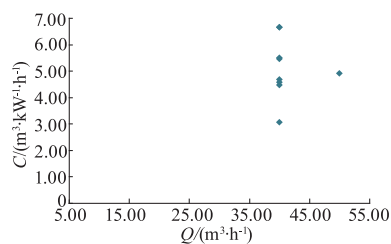


图 3 水电折算系数与额定流量的关系  
Fig. 3 Relationship between conversion coefficient  $C$  and pump rated flow rate

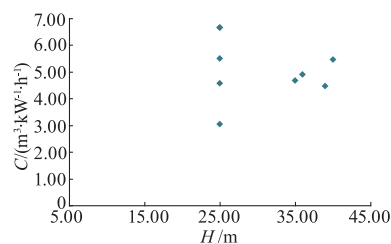


图 4 水电折算系数与额定扬程的关系  
Fig. 4 Relationship between conversion coefficient  $C$  and pump rated head

由图 2~4 可知,在同一区域内,水泵额定的功率、流量、扬程与水电折算系数之间不存在显著的线性关系,同一额定功率(额定的流量或扬程)可能出现不同的水电折算系数.

### 2.3 地下水埋深对水电折算系数的影响

同样剔除带有变频农用机井的监测点,分析各监测井水位埋深与对应的水电折算系数的相关关系,关系图如图 5 所示,图中  $h$  为地下水埋深. 由图可知,水电折算系数受区域水位埋深影响较大,呈现较好的线性关系:地下水水位埋深越大,所对应



的水电折算系数越小.

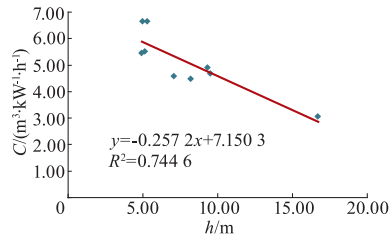


图 5 水电折算系数与地下水水位埋深关系  
Fig. 5 Relationship between conversion coefficient C and groundwater level

分别提取 6 月 18,22,29 日以及 7 月 12 日的数  
据,列于表 2,表中  $R^2$  为相关系数. 由表可见,该段  
时间内地下水处于农业灌溉开采期,地下水动水位  
处于不断下降的状态;由于地下水水位不断降低,  
水电折算系数也随之变小,最大降幅在 14% 左右.

表 2 不同时段水电折算系数 Tab. 2 Conversion coefficient C in different periods of time			
编号	日期	$C/(\text{m}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	$R^2$
1	2011-06-18	4.88	0.999
2	2011-06-22	4.48	0.998
3	2011-06-29	4.31	0.999
4	2011-07-12	4.19	0.996

2.4 含水层富水性对水电折算系数的影响

为了分析含水层富水性对水电折算系数的影  
响,筛选出地下水埋深差别不大的区域(埋深小于  
10 m 的监测点),见表 3,表中  $C_a$  为水电折算系数平  
均值. 由表 3 可知,在同一埋深区域,含水层富水性  
中等区机井的水电折算系数为  $5.74 \text{ m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,  
含水层富水性较差区机井的水电折算系数为  $4.37$   
 $\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$ . 由此可知,含水层的富水性越好,机  
井对应的水电折算系数越大.

表 3 不同富水性区域的水电折算系数 Tab. 3 Conversion coefficient C in regions with different water abundances			
富水性	监测点	$C/(\text{m}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	$C_a/(\text{m}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$
中等	大台	5.46	5.74
	岱头	6.66	
	西集	5.51	
	柏福	4.58	
	石洲营	6.43	
	伙洲营	6.63	
	西定安	4.92	
较差	小务	5.00	4.37
	仇庄	4.68	
	下力城	4.45	
	西安定	3.32	

由以上分析可知:① 机井的水电折算系数主要  
受地下水位埋深、含水层富水性的影响. ② 在其他

环境相同的条件下,地下水埋深越大,水电折算系  
数越小;含水层富水性越好,水电折算系数越大.

3 北京市水电折算关系分析

3.1 区域划分

根据以上对水电折算系数影响因素的分析结  
果,选择北京市含水层富水性与地下水埋深 2 个因  
素,划分不同的控制区.

北京市平原区地下水含水层富水性分布如图 6  
所示. 富水性决定了含水层抽水的回补速率以及单  
位降深下的出水量,共划分为 3 个类型:富水性较好  
区(降深为 5 m 时单井出水量  $> 3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ),主要  
分布在海淀山前、密云、平谷山前一带;富水性较差  
区(降深为 5 m 时单井出水量  $< 500 \text{ m}^3/\text{d}$ ),主要分  
布在大兴南部、通州西部以及顺义南部的部分区  
域;其他区域为地下水富水性中等区(降深为 5 m  
时单井出水量为  $500 \sim 3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

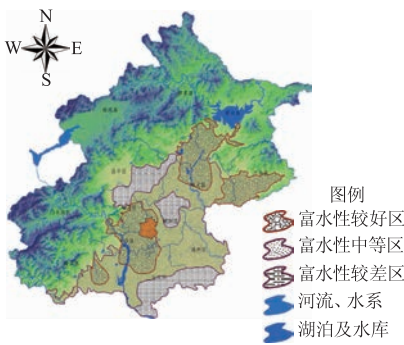


图 6 地下水含水层富水性分布示意图  
Fig. 6 Schematic of subdivision for aquifer water abundance

图 7 为地下水埋深分布图. 耦合比较图 6 与图  
7,依据布点代表性的原则,每种富水性区域都要布  
置监测点. 地下水水位埋深以 5 m 为单元段进行划  
分,对应各个埋深段分别为  $[5, 10]$ ,  $(10, 15]$ ,  $(15,$   
 $20]$ ,  $(20, 25]$ ,  $(25, 30]$ , 30 m 以上等 6 个区域.

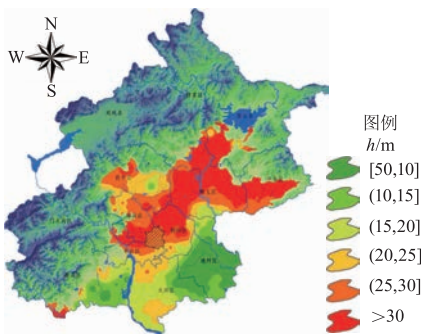


图 7 地下水埋深分布示意图  
Fig. 7 Schematic of groundwater table

根据含水层富水性与地下水埋深区段的叠加,北京市平原区共划分为 18 个区域单元,各区域单元的具体信息如表 4 所示.

表 4 计算区域划分 Tab. 4 Division of analyzed regions						
富水性	h/m					
	[5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,25]	(25,30]	>30
较好	好	好	好	好	好	好
中等	中	中	中	中	中	中
较差	差	差	差	差	差	差

3.2 不同区域水电折算统计

提取地下水水位埋深为 5 ~ 10 m 的区域,使其与研究区域含水层的富水性进行叠加,得到该埋深段与含水层富水性较差区耦合图,如图 8 所示. 该区域内共布置有 6 眼监测井.

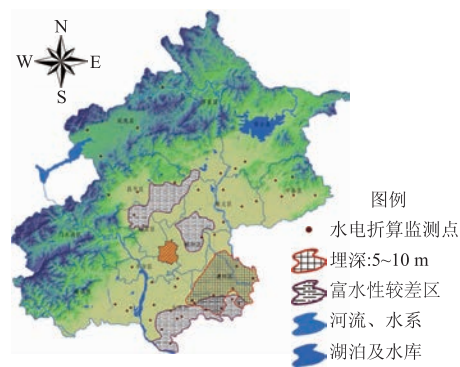


图 8 富水性较差区分布示意图  
Fig. 8 Region with poor water abundance

地下水埋深为 5 ~ 10 m 区域与含水层富水性中等区耦合图如图 9 所示,该区域内共布置有 3 眼监测井;该水位埋深区域与含水层富水性较好区没有耦合区域.

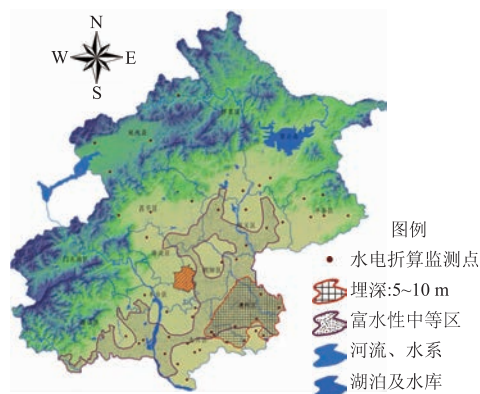


图 9 富水性中等区分布示意图  
Fig. 9 Region with medium water abundance

分析各控制区段内的水电折算系数见表 5. 由表可知,在 5 ~ 10 m 地下水埋深与含水层富水性中

等区的耦合区域,机井单位耗电的出水量为 4.56 ~ 6.66 m<sup>3</sup>/(kW · h),平均值为 5.74 m<sup>3</sup>/(kW · h); 5 ~ 10 m 地下水埋深与含水层富水性较差区的耦合区域水电折算系数为 4.45 ~ 5.00 m<sup>3</sup>/(kW · h),平均值为 4.71 m<sup>3</sup>/(kW · h).

表 5 地下水埋深 5 ~ 10 m 区域水电折算系数 Tab. 5 Conversion coefficient C in the region with 5 ~ 10 m groundwater level			
序号	富水性	C/(m <sup>3</sup> · kW <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )	
		范围	平均值
1	中等区	4.56 ~ 6.66	5.74
2	较差区	4.45 ~ 5.00	4.71

根据以上统计结果,得出各含水层富水性区域、各地下水埋深区段对应的水电折算系数,见表 6.

表 6 各区域水电折算系数统计表 Tab. 6 Conversion coefficient C for each district			
序号	h/m	富水性	C/(m <sup>3</sup> · kW <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )
1	[5,10]	较好区	0
2		中等区	5.74
3		较差区	4.71
4	(10,15]	较好区	4.60
5		中等区	3.32
6		较差区	2.75
7	(15,20]	较好区	4.73
8		中等区	3.87
9		较差区	3.15
10	(20,25]	较好区	3.81
11		中等区	3.60
12		较差区	2.26
13	(25,30]	较好区	3.05
14		中等区	2.85
15		较差区	2.57
16	>30	较好区	2.78
17		中等区	2.17
18		较差区	2.11

3.3 各区县水电折算系数的确定

以不同地下水埋深、不同含水层富水性所获得的水电折算系数为基础,根据不同的地下水埋深,含水层富水性耦合出不同的水电折算系数分区,通过 ArcGIS 的空间分析功能提取不同水电折算系数分区段所包含的面积,加权求平均值,获得各区县一个综合的水电折算系数值.

图 10 为大兴区地下水埋深分布示意图,图 11 为大兴区含水层富水性分布示意图,根据两者的分段进行耦合叠加,得出大兴区水电折算系数区段分布示意图,见图 12. 通过 ArcGIS 的空间分析功能,计算每个区段对应的面积,叠加计算,得出各区县

综合水电折算系数. 计算公式见式(6), 各区县综合计算结果见表 7.

$$C_p = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} S_{ij} / S_p, \tag{6}$$

式中: $C_p$  为区县水电折算系数; $C_{ij}$  为地下水埋深  $i$  区段第  $j$  种含水层富水性区域对应的水电折算系数,  $\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;  $S_{ij}$  为对应控制区段的面积,  $\text{km}^2$ ;  $S_p$  为对应区县的总面积,  $\text{km}^2$ .

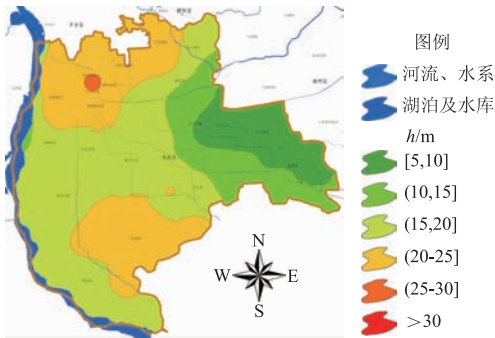


图 10 大兴区地下水埋深分布示意图  
Fig. 10 Schematic of groundwater table in Daxing district



图 11 大兴区含水层富水性分布示意图  
Fig. 11 Schematic of water abundance in Daxing district

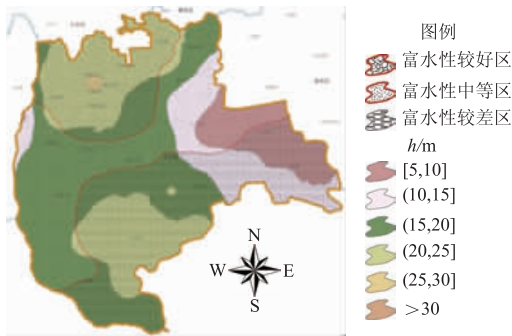


图 12 大兴区水电折算系数区段划分示意图  
Fig. 12 Subdivision for estimate conversion coefficient C of Daxing district

表 7 北京市各区县水电折算系数表  
Tab. 7 Conversion coefficient C for each county and district in Beijing

序号	区县	$C/(\text{m}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$
1	通州区	4.88
2	大兴区	3.76
3	顺义区	2.69
4	昌平区	2.53
5	平谷区	2.85
6	密云县	2.95
7	怀柔区	2.75
8	延庆县	3.14
9	门头沟区	2.67
10	房山区	3.31

4 结 论

- 1) 对北京市 62 个农用机井监测点的水电折算系数进行了分析,发现含水层的富水性以及区域地下水埋深是影响农用机井水电折算系数的最主要因素.
- 2) 水泵机井安装变频以后,水泵无论出水量多少,始终处于保压状态,相应的耗电量也比较大,对应的水电折算系数比同区域不装变频机井水电折算系数平均降低了 48.5%.
- 3) 通过对比分析研究区域内的含水层富水性以及地下水水位埋深,得出了北京市水电折算系数表,为北京市水电折算计量系统的推广提供了技术支撑.
- 4) 各监测点的水电折算系数随时段变化而变化.由于灌水前期与灌水后期有一定的区别,在进行水电折算计量时,单用 1 a 的电量折算水量,可能存在一定的误差.因此,建议开展 1 个完整年的水电折算系数监测工作,得出不同时段的水电折算系数.
- 5) 水电折算计量系统符合中国国情和管理特点,水电折算计量系数的获得是推广水电折算计量系统的前提.若想取得较好的计量精度,必须建立水电折系数计量与实时校正网络.

参考文献 (References)

[ 1 ] 北京市水务局. 北京市水资源公报(2010 年度)[ EB/OL]. (2012-03-08). <http://www.bjwater.gov.cn/pub/bjwater/zfgk/tjxx/>.

[ 2 ] 连少伟,吕旺,李静,等. 河北省井灌区农业灌溉用水计量模式的探索与分析[J]. 河北水利,2012(4):22.

Lian Shaowei, Lü Wang, Li Jing, et al. Exploration and

- analysis of agricultural water metering mode for well irrigation district in Hebei [J]. Hebei Water Resources, 2012(4):22. (in Chinese)
- [3] Chen Qingzhang, Wang Peng, Chen Rongshu. The design and implement of intelligent TM card water-meter and its management system[J]. Key Engineering Materials, 2010,439/440:257-262.
- [4] 张卫群. 河北省乐亭县农业灌溉用水计量管理与应用[J]. 中国水利, 2006(7):63.  
Zhang Weiqun. Measurement of agricultural irrigation water management in Leting county, Hebei province [J]. China Water Resources, 2006(7):63. (in Chinese)
- [5] Yao Ling, Wang Kaituo, Xu Liang. Rapid sample product trial manufacture technique for developing water meter new products[J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2008,13(4):225-231.
- [6] 刘春来, 杨万龙, 王剑波. 机井灌溉计量收费管理与控制系统研制[J]. 节水灌溉, 2009(6):55-57.  
Liu Chunlai, Yang Wanlong, Wang Jianbo. Research on management and control system for charge and measuring of well irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2009(6):55-57. (in Chinese)
- [7] 郑兆镇. 井灌区 IC 卡系统灌溉计量的应用[J]. 地下水, 2009,31(2):140,142.  
Zheng Zhaozhen. Application of IC card water metering system in irrigation district [J]. Ground Water, 2009,31(2):140,142. (in Chinese)
- [8] 武保国. 农业灌溉计量智能 IC 卡控制技术在唐山的试验示范推广[J]. 水科学与工程技术, 2008(6):68-69.  
Wu Baoguo. The agricultural the irrigation metering intelligent IC card control technology demonstration to promote the role of Tangshan [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2008(6):68-69. (in Chinese)
- [9] 张骏涛. 天津市农业灌溉用水量模式分析[J]. 天津农业科学, 2009,15(6):20-22.  
Zhang Juntao. Metering mode analysis of agricultural irrigation water in Tianjin [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2009,15(6):20-22. (in Chinese)
- [10] 熊伟. 浅谈农业灌溉地下水智能计量设施的基本功能及技术要求[J]. 节水灌溉, 2011(6):63-64.  
Xiong Wei. The basic functional and technical requirements for smart metering facilities for agricultural irrigation with groundwater [J]. Water Saving Irrigation, 2011(6):63-64. (in Chinese)
- [11] Chou Jui-Sheng, Hsu Yu-Chien, Lin Liang-Tse. Smart meter monitoring and data mining techniques for predicting refrigeration system performance [J]. Expert Systems with Applications, 2014,41(5):2144-2156.
- [12] Leeungculsatien T, Lucas G P. Measurement of velocity profiles in multiphase flow using a multi-electrode electromagnetic flow meter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013,31:86-95.
- [13] Guo Jingtao, Jin Zhigang. Autonomous algorithm for relative error of generalized flow meters in tree topology [J]. Measurement, 2011,44(9):1592-1597.
- [14] 徐全怀. 水表误差的原因分析与探讨[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2004(5):41-43.  
Xu Quanhui. Analysis and discussion of error reason of water meter [J]. Instrument Standardization & Metrology, 2004(5):41-43. (in Chinese)
- [15] Britton T C, Stewart R A, O'Halloran K R. Smart metering: Enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management [J]. Journal of Cleaner Production, 2013,54:166-176.

(责任编辑 张文涛)