

网络出版时间:2016-04-07 09:00

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.05.018

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.036.html

基于人均 GDP 差异的生活用水量 模拟及增长潜力分析

马黎华¹, 粟晓玲²

(1 西南大学 资源环境学院, 重庆 北碚 400715; 2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】**分析城市居民人均生活用水量的增长潜力, 为保障城市用水安全提供决策依据。**【方法】**以 2009—2011 年 858 个中国城市用水及相关数据为研究对象, 应用线性回归模型、幂函数模型、对数函数模型和 ANN-BP 模型, 基于人均 GDP 的差异分别建立人均生活用水量模型, 进行人均生活用水量的增长潜力分析。**【结果】**在不同的人均 GDP 水平下, 模型对于高收入的数据样本最为敏感; 线性回归模型、幂函数模型和 ANN-BP 模型的模拟效果较为接近, 对数函数模型的误差最大。人均生活用水量增长潜力最大的是年人均 GDP 低于 3 万元的城市, 增长潜力最小的为年人均 GDP $>3 \sim \leq 10$ 万元的城市。**【结论】**基于人均 GDP 差异可以进行生活用水量的模拟与预测, 人均 GDP 小于 3 万元的城市将成为人均生活用水量增加的主要来源。

【关键词】 城市用水; 用水量预测; 用水量增长潜力分析; GDP; ANN-BP 模型

【中图分类号】 TV212.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)05-0133-06

Simulation and growth potential of domestic water consumption based on difference in per capita GDP

MA Li-hua¹, SU Xiao-ling²

(1 College of Resources and Environments, Southwest University, Beibei, Chongqing 400715, China;

2 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** This study analyzed the growth potential of urban residential water use per capita to provide basis for protection of urban water security. **【Method】** Water consumption and relevant data in 2009 to 2011 of 858 cities were analyzed using linear regression model, power model, logarithmic model, and ANN-BP model. Then, the domestic water consumption model was established based on difference in per capita GDP and it was used to analyze the growth of per capita water use. **【Result】** The performance of models was most sensitive to high income data group. The error of logarithmic model was the largest while that of linear regression model, power model and ANN-BP model were similar. The cities with per capita GDP of less than 3×10^4 Yuan had the greatest potential for growth of per capita water use while the cities with per capita GDP of $3 \times 10^4 - 10 \times 10^4$ Yuan had the smallest potential. **【Conclusion】** Based on the analysis of difference in per capita GDP, the cities with per capita GDP of less than 3×10^4 Yuan will become the main contributor to the increase of urban residential water use per capita.

【收稿日期】 2014-09-19

【基金项目】 国家自然科学基金项目(51279166; 51509214); 西南大学基本科研业务费专项(XDJK2013C153); 西南大学博士基金项目(2120132467)

【作者简介】 马黎华(1983—), 女, 河南平顶山人, 讲师, 博士, 主要从事水文及水资源相关数据建模研究。

E-mail: malihua1210@yeah.net

【通信作者】 粟晓玲(1968—), 女, 四川开江人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水资源配置及生态需水研究。

E-mail: suxiaoling17@126.com

Key words: urban water use; water consumption forecasting; growth potential analysis of water consumption; GDP; ANN-BP model

随着我国社会经济的迅猛发展,城市需水量增长迅速。城市用水量的增加有很大一部分来自于城市居民生活用水量的增加,居民生活用水量占总供水量的比例由 2002 年的 19.51% 上升至 2012 年的 34.4%, 因此对居民生活用水量进行模拟与合理预测有积极的现实意义。

对用水量的预测可以由其影响因素进行推求,也可以根据用水量的历史数据通过时间序列分析实现预测,例如修正组合模型^[1]、小波分析^[2]等。针对居民生活用水量影响因素的分析表明:城市人口的增加是城市生活用水总量增加的主要原因^[3],居民的人均生活用水量与区域经济增长密切相关^[4]。同时,不同区域之间的居民用水习惯和气候特征也决定了居民生活用水量的差距,水价、平均工资、人均住房面积以及气候差异也会对居民生活用水量产生不同程度的影响^[5-6]。在宏观水资源分析或者对预测精度要求不高时,可由人口与居民人均生活用水定额直接计算求得^[7]。目前,根据研究的不同侧重相继提出用线性回归模型^[8]、非线性回归模型^[9]、计量经济学模型^[10]、模糊模型^[11]以及神经网络模型^[12]等预测用水量,近年来基尼系数^[13]和恩格尔系数^[14]等也被用于用水量的预测,旨在体现居民生活水平对用水变化的影响程度。以往的研究表明,人均生活用水量往往随着经济水平的发展而变化,但是将 GDP 指标作为参数进行居民人均生活用水量与人均 GDP 的关系模拟分析比较少。基于我国 GDP 高速发展的现状^[15],人均 GDP 的巨大差异必然导致人均生活用水量的巨大差异,进行城市居民人均生活用水量随人均 GDP 的变化模拟,可以深入理解城市经济水平与人均生活用水量之间的响应关系,实现对未来用水增长潜力的合理预测。

本研究针对近几年中国城市居民人均生活用水量与人均 GDP 的关系进行模拟与分析,并对未来中国城市居民用水量的增长潜力进行了探讨,旨在对高速经济增长条件下的城市居民人均生活用水量模型进行比较与选择,有效估计 GDP 显著差异条件下我国城市居民人均生活用水量的未来增长潜力。

1 研究方法

1.1 样本数据整理

所采用的样本数据主要来自《中国城市统计年

鉴》(2009—2011 年)。主要指标包括:市辖区居民生活用水量(万 t)、地区生产总值(万元)、年末总人口(万人)。其中 2009 年共选取 287 个地区和城市,2010 年共选取 285 个地区和城市,2011 年共选取 286 个地区和城市,共计 858 个城市的数据样本。在数据的初步处理中,已经剔除了数据不匹配的样本(如只有人口而无国内生产总值数据等)。

1.2 人均 GDP 对生活用水量的影响程度分析

从城市之间人均 GDP 水平的差异入手,采用相关分析与互信息分析,研究不同收入层次下的人均生活用水量与人均 GDP 之间的关系。针对本研究中选用的 2009—2011 年的 858 个数据样本,为突出不同人均 GDP 水平的差异,按照 >10 万元、>5~≤10 万元、>3~≤5 万元、>1~≤3 万元、≤1 万元分为 5 组。

相关系数 r 的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{1}$$

式中: r 为相关系数, n 为样本数量, X 为人均 GDP (元/年), $\bar{X}$ 为人均 GDP 的样本均值(元/年), Y 为人均居民生活用水量(t/年), $\bar{Y}$ 为人均居民生活用水量的样本均值(t/年)。

互信息(Mutual Information)的计算原理为:

$$MI = \iint f_{X,Y} \ln \left[\frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_X(x)f_Y(y)} \right] dx dy \tag{2}$$

式中: MI 为互信息值, $f_{X,Y}(x,y)$ 为 X,Y 的联合边际分布函数, $f_X(x)$ 、 $f_Y(y)$ 为变量 X,Y 的边际分布函数。如果 X,Y 之间没有关系, MI 的值为 0;反之,如果随机变量 X,Y 关系紧密,则 MI 的值会很大。

1.3 模型模拟与敏感性分析

采用不同的训练样本和检测样本进行模型模拟与敏感性分析,目的是比较不同类型模型的拟合优度以及对 GDP 水平差异的敏感程度。以 2/3 的样本共 572 组数据为建模样本,以 1/3 的样本共 286 组数据为检测样本。在模型模拟对比分析中,分别以 2010 与 2011 年为建模样本,2009 年为检测样本;2009 与 2011 年为建模样本,2010 年为检测样本;2009 与 2010 年为建模样本,2011 年为检测样本。在模型敏感性分析中,将所有样本数据按照人

均 GDP 值的大小排序,并按照每组样本数量一致的原则,将所有样本分为低收入、中收入和高收入 3 组,分别以低收入、中收入为建模样本,高收入为检测样本;中收入、高收入为建模样本,低收入为检测样本;高收入、低收入为建模样本,中收入为检测样本。

在模型模拟效果的评价中采用检测样本的误差比较,误差由预测值与真实值的相关系数 R 和均方根误差 $RMSE$ (Root Mean Square Error) 表达,若 R 值越接近 1 则模型的模拟效果越好; $RMSE$ 的值越小表明模型模拟的效果越好。但由于 $RMSE$ 与真实值的量纲相同,在模型预测研究中的应用更为广泛。

R 的计算公式为:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^n(\hat{Y}_i-\bar{\hat{Y}})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(\hat{Y}_i-\bar{\hat{Y}})^2\sum_{i=1}^n(Y_i-\bar{Y})^2}}.$$

(3)

$RMSE$ 的计算公式为:

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(Y_i-\hat{Y}_i)^2}.$$

(4)

式中: R 为相关系数, $RMSE$ 为均方根误差, n 为样本数量, $\hat{Y}$ 为模型模拟的人均生活用水量(t/年), $\bar{\hat{Y}}$ 为模型模拟的人均生活用水量(t/年)的平均值, Y 为人均居民生活用水量(t/年), $\bar{Y}$ 为人均居民生活用水量的平均值(t/年)。

表 1 人均 GDP 与人均生活用水量的相关分析与 MI 分析

Table 1 Correlation and mutual information analysis of per capita water use and per capita GDP of urban cities

人均 GDP/(万元·年 ⁻¹) Per capita GDP	样本容量(n) Sample capacity	相关系数(r) Correlation	MI 分析 Mutual information analysis
>10	56	0.505 *	5.365
>5~≤10	185	0.116	5.855
>3~≤5	262	0.075	5.626
>1~≤3	319	0.403 * *	5.246
≤1	36	0.546 * *	4.896

注: * * 表示极显著相关水平, * 表示显著相关水平。
Note: * * stands for very significant level, * stands for significant level.

由表 1 可知,根据相关系数 r 和互信息值 MI 得到人均 GDP 与人均生活用水量关系的紧密程度略有差异。经过显著性分析发现,人均 GDP 与城市居民人均生活用水量的 r 值在人均 GDP 为 10 万元以上和 3 万元以下时呈显著线性相关。而基于互信息值的分析结果表明:不同的人均 GDP 水平与人均生活用水量的关系差异不大,>5~≤10 万元时的 MI 值最大,人均 GDP≤1 万元时 MI 值最低。

2.2 不同模型的模拟效果与敏感性分析

对不同类型模型的模拟效果与敏感性进行分析,得到不同建模数据下线性回归模型、幂函数模

1.4 人均生活用水量增长潜力分析

增长潜力分析的数据样本参照人均 GDP 水平在>10 万元、>5~≤10 万元、>3~≤5 万元、>1~≤3 万元、≤1 万元的分组情况。基于人均 GDP 差异的人均生活用水量模型拟采用一元线性回归模型(以下简称为线性回归模型)、幂函数模型、对数函数模型和神经网络模型误差逆传播算法 ANN-BP(Artificial Neural Networks-Back Propagation)模型,运用模型求导和 MC(Monte Carlo)设计分析 GDP 不同差异水平下未来我国城市居民人均生活用水量的增长潜力。其中线性回归模型、幂函数模型和对数函数模型的增长潜力计算由已建立的模型公式求导得到。由于 ANN-BP 模型为数据驱动模型,因此采用 MC 设计来进行增长潜力分析。按照设定的 GDP 年增长水平,随机生成新的输入项数据,将新的数据导入已建立的模拟模型中,然后计算模型输出结果的平均增长率,即增长潜力。

2 结果与分析

2.1 人均 GDP 对生活用水量的影响程度

将 858 个数据样本分成 5 组,这 5 组数据样本人均 GDP 范围对应的样本容量以及在这种分组情况下人均 GDP 与人均生活用水量的相关系数(r)和互信息值(MI)如表 1 所示。

型、对数模型和 ANN-BP 模型检测样本的 R 值和 $RMSE$ 值如表 2 所示。从表 2 中不同模型的模拟效果来看,对数函数模型的平均 $RMSE$ 最大, R 值最小;线性回归模型的平均 $RMSE$ 最小,幂函数模型的 R 值最大;同时,线性回归模型、ANN-BP 模型与幂函数模型的模拟效果较为接近。模型类型不同而模拟结果类似,表明人均 GDP 与人均生活用水量之间有较稳定的数量关系。在增长潜力分析中,可以采用线性回归模型、ANN-BP 模型与幂函数模型对人均生活用水量增长潜力进行分析。

根据敏感性分析结果,在不同人均 GDP 水平

下,以低收入和高收入为建模样本、中等收入为检测样本时,所得到的模型误差最小;以低收入和中收入为建模样本,高收入为检测样本时,所得到的模型误差最大。因此认为在不同的人均 GDP 水平下,模型对于高收入的数据样本最为敏感。

表 2 不同建模数据下多元线性回归模型、幂函数模型、对数函数模型和 ANN-BP 模型拟合的 R 与 $RMSE$ 值

Table 2 R and root mean square error ($RMSE$) of linear regression models, power models, logarithmic model and ANN-BP models with different inputs

样本类型 Type of sample		线性回归模型 Linear regression model		幂函数模型 Power model		对数函数模型 Logarithmic model		ANN-BP 模型 ANN-BP model	
		R	$RMSE$	R	$RMSE$	R	$RMSE$	R	$RMSE$
年份 Year	2009	0.621	26.74	0.590	28.71	0.511	28.81	0.621	27.14
	2010	0.591	19.95	0.596	20.29	0.563	20.43	0.609	20.14
	2011	0.630	18.42	0.627	18.01	0.592	19.31	0.628	18.56
收入 Income	低 Low	0.485	31.92	0.525	31.62	0.547	34.56	0.474	31.50
	中 Medium	0.399	15.26	0.433	15.26	0.464	16.27	0.386	15.34
	高 High	0.561	15.44	0.548	15.76	0.486	17.19	0.553	15.71
平均 Mean		0.548	21.29	0.553	21.61	0.527	22.76	0.545	21.40

2.3 人均生活用水量的增长潜力

2.3.1 参数拟合与误差分析 在不同人均 GDP 水平下,采用线性回归模型、幂函数模型和 ANN-BP 模型进行模拟分析,其中模型拟合的统计结果和误差如表 3、表 4 所示。

表 3 不同人均 GDP 水平下线性回归模型与幂函数模型的拟合结果

Table 3 Statistical data for linear regression model and power model under different per capita GDP levels

人均 GDP/(万元·年 ⁻¹) Per capita GDP	线性回归模型 Linear regression model		幂函数模型 Power model	
	F	显著性 Sig.	F	显著性 Sig.
>10	18.450	0.000	7.059	0.010
>5~≤10	2.475	0.117	1.761	0.186
>3~≤5	1.467	0.227	2.384	0.124
>1~≤3	61.631	0.000	79.282	0.000
≤1	14.431	0.001	13.257	0.001

表 4 不同人均 GDP 水平下线性回归模型、幂函数模型与 ANN-BP 模型的 $RMSE$ 值

Table 4 Root mean square error ($RMSE$) of linear regression model, power model and ANN under different per capita GDP levels

人均 GDP/(万元·年 ⁻¹) Per capita GDP	样本容量(n) Sample capacity	线性回归模型 Linear regression model	幂函数模型 Power model	ANN-BP 模型 ANN-BP model
>10	56	58.70	63.81	60.75
>5~≤10	185	21.01	21.61	21.23
>3~≤5	262	17.36	17.82	17.36
>1~≤3	319	11.22	11.51	11.35
≤1	36	4.14	4.29	4.24
平均值 Mean	172	22.49	23.81	23.03

从模型整体拟合的 F 检验显著性来看,人均 GDP 水平在>10 万元、>1~≤3 万元、≤1 万元时均可以达到 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,其中在人均 GDP 为>1~≤3 万元水平下模型的模拟效果最好。在人均 GDP 水平>5~≤10 万元和>3~≤5 万元时,模型未通过 F 检验;这与影响程度分析中相关系数 r 值的结果相一致(表 1)。对原始数据进行再分析后发现,数据样本人均 GDP 水平在>5~≤10 万元和>3~≤5 万元时,即人均 GDP 的差异较大时对应的人均用水量差异却不大,二者一致性变化

规律不明显是导致线性回归模型无法通过 F 检验的主要原因。

表 4 结果表明,在人均 GDP>5~≤10 万元和>3~≤5 万元水平下各模型的拟合误差($RMSE$)与其他人均 GDP 水平下的模型相比并不是最大,因此认为在人均 GDP>5~≤10 万元和>3~≤5 万元水平下采用拟合系数进行的增长潜力分析仍具有一定意义。根据不同人均 GDP 水平下线性回归模型、幂函数模型和 ANN-BP 模型的 $RMSE$ 值结果,可以认为幂函数模型的误差最大,线性回归

模型的误差最小。

2.3.2 增长潜力分析 根据城市居民人均生活用水量增长潜力计算结果,人均 GDP 的年平均增长率设为 8%,对已建立的线性回归模型、幂函数模型和

ANN-BP 模型进行增长潜力分析,得到基于上述模型的不同人均 GDP 水平下人均用水量增长率的变化情况如图 1 所示。

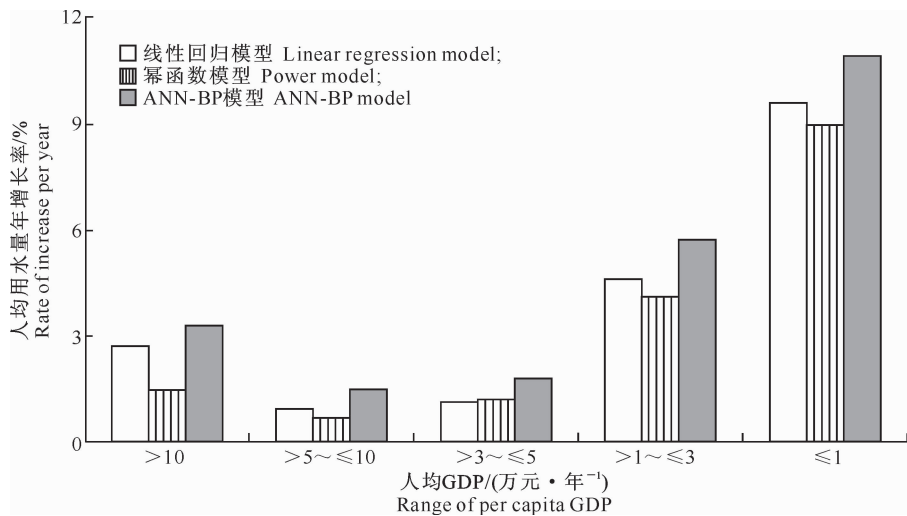


图 1 基于线性回归模型、幂函数模型和 ANN-BP 模型的不同人均 GDP 水平下用水量增长率的变化

Fig.1 Growth potential rate based on linear regression model,power model and ANN-BP model under different per capita GDP levels

从 3 种模型对人均生活用水量增长率的计算结果(图 1)可以看出,人均生活用水量年增长率最大的为人均 GDP≤1 万元的城市,其均值为 10.07%;其次是人均 GDP 为>1~≤3 万元的城市,其均值为 4.81%;人均 GDP 为>5~≤10 万元、>3~≤5 万元的城市人均生活用水量增长率最低;人均 GDP>10 万元城市的人均生活用水量增长率较人均 GDP>5~≤10 万元、>3~≤5 万元的略高,为 2.51%。说明我国城市人均生活用水量增长潜力最大的是低收入城市,即年人均 GDP≤3 万元的城市,其样本总数为 355 个,占全国城市样本总数的 41.38%,年均用水增长潜力在年均 10%左右。

3 结 论

本研究分别用线性回归模型、幂函数模型、对数函数模型和 ANN-BP 模型构建城市居民人均生活用水量与人均 GDP 的关系模型,并对不同人均 GDP 水平下的人均生活用水量增长潜力进行了进一步分析。结果表明:对数函数模型的误差最大,线性回归模型的误差最小;同时,线性回归模型、ANN-BP 模型与幂函数模型的模拟效果较为接近,基于人均 GDP 差异可以进行生活用水量的模拟与预测。在不同的人均 GDP 水平下,模型对于高收入的数据样本最为敏感。我国城市人均生活用水量未

来增长潜力最大的是年人均 GDP 低于 3 万元的低收入城市,较为稳定的是年人均 GDP 为 3 万~10 万元的中等收入城市,位于二者之间的是年人均 GDP 大于 10 万元的高收入城市,占到我国城市比例 40%左右的人均 GDP 小于 3 万元的城市会成为人均生活用水量增加的主要来源。

[参考文献]

[1] 冯天梅,张 鑫.基于修正组合模型的包头市用水量预测分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(3):227-234.
Feng T M,Zhang X. Prediction of water consumption in Baotou based on amended combination model [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed),2014,42(3):227-234. (in Chinese)

[2] 魏津瑜,苏思沁,施鹤南.基于小波分析的城市需水量预测[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(S2):183-187.
Wei J Y,Su S Q,Shi H N. Urban water demand forecast based on wavelet analysis [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2013,44 (S2): 183-187. (in Chinese)

[3] Alcamo J,Döll P,Henrichs T. Development and testing of the Water GAP 2 global model of water use and availability [J]. Hydrological Sciences Journal,2003,48(3):317-337.

[4] Oki T,Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. Science,2006,313:1068-1072.

[5] 张华丽,董 婕,延军平,等.西安市城市生活用水对气候变化

响应分析 [J]. 资源学报, 2009, 31(6): 1040-1045.

Zhang H L, Dong J, Yan J P, et al. Urban domestic water consumption's response to climate change in Xi'an [J]. Resources Science, 2009, 31(6): 1040-1045. (in Chinese)

[6] 周景博. 中国城市居民生活用水影响因素分析 [J]. 统计观察, 2005(6): 75-76.

Zhou J B. Analysis of factors affecting the Chinese city residents water use [J]. Statistical Observation, 2005(6): 75-76. (in Chinese)

[7] 王 彬, 穆瑞林, 卜喆芬. 城市生活用水预测方法的探讨 [J]. 中国给水排水, 1990(6): 32-37.

Wang B, Mu R L, Bu Z F. The method of city living water prediction [J]. Chinese Water Supply and Drainage, 1990(6): 32-37. (in Chinese)

[8] Döll P, Hauschild M. Model-based scenarios of water use in two semi-arid Brazilian states [J]. Regional Environmental Change, 2002, 4(2): 150-162.

[9] Zhou S L, McMahon T A, Walton A, et al. Forecasting operational demand for an urban water supply zone [J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(3): 189-202.

[10] 沈大军, 陈 雯, 罗健萍. 城镇居民生活用水的计量经济学分析与应用实例 [J]. 水利学报, 2006, 37(5): 593-597.

Shen D J, Chen W, Luo J P. Econometric analysis and application examples of urban household water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 593-597. (in Chinese)

[11] Gato S, Jayasuriya N, Roberts P. Temperature and rainfall thresholds for base use urban water demand modeling [J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(3/4): 364-376.

[12] Adamowski J, Karapataki C. Comparison of multivariate regression and artificial neural networks for peak urban water-demand forecasting: evaluation of different ANN learning algorithms [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15(10): 729-743.

[13] 李建芳, 栗晓玲, 王素芬. 基于基尼系数的内陆河流域用水公平性评价: 以石羊河流域为例 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 217-221.

Li J F, Su X L, Wang S F. Evaluating the fairness of water use based on the Gini coefficient in inland river basins: a case study on Shiyang River basin [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2010, 38(8): 217-221. (in Chinese)

[14] 张志果, 邵益生, 徐宗学. 基于恩格尔系数与霍夫曼系数的城市需水量预测 [J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1304-1309.

Zhang Z G, Shao Y S, Xu Z X. Prediction of urban water demand based on Engel Index and Hoffmann Coefficient [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1304-1309. (in Chinese)

[15] 杨充霖, 文先明. 从传统 GDP 到可持续发展 GDP 的历史性转变: 可持续发展 GDP 研究及对中国的意义 [J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2008(1): 134-139.

Yang C L, Wen X M. Historical change from traditional GDP to sustainable development GDP: significance of sustainable development GDP research to China [J]. Journal of Beijing Normal University (Social Science), 2008(1): 134-139. (in Chinese)