

# 北京市城市绿化用水的供需风险评估

孙红<sup>1</sup>, 米锋<sup>1</sup>, 田明华<sup>1</sup>, 彭强<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 经济管理学院, 北京 100083; 2. 北京市园林绿化局, 北京 100029)

**摘要:**北京市水资源短缺的问题已成为制约社会经济发展和影响社会稳定的重要因素之一,因此,如何协调北京市城市绿化与水资源的合理有效利用问题亟需得到解决。基于北京市城市绿化现状及水资源利用现状,采用尺度扩展法,计算了 2012 年北京市城市绿化的生态需水量,并结合北京市有效降雨利用量和实地调查数据,求得 2012 年北京市城市绿化的理论供水量和实际供水量。在此基础上,利用灰色马尔科夫链模型与熵值法对北京市城市绿化供水的 3 种来源(地表水、地下水、再生水)做出评估,得出 2014 年实际供水量预测值区间。2012 年北京市理论供水量为  $5.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,实际供水量为  $6.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2014 年预测实际供水量区间为  $7.29 \times 10^8 \sim 7.93 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。评估结果表明,北京市仍存在城市绿化用水供需风险问题,并据此提出相关节水措施和建议,为保障北京城市供水安全与水资源可持续利用相关研究提供参考和借鉴。

**关键词:**城市绿化; 水资源; 风险评估; 北京

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0153-05

中图分类号: P962, P641.76

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.035

## Risk Assessment of Water Supply and Demand for Urban Greening in Beijing City

SUN Hong<sup>1</sup>, MI Feng<sup>1</sup>, TIAN Ming-hua<sup>1</sup>, PENG Qiang<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Beijing Forestry University,  
100083, China; 2. Landscaping Administration of Beijing City, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Water resources shortage has become one of the important factors restricting the economic development and the social stability of Beijing City, so it is a fatal time to coordinate urban greening and water resource. Based on the current situation of urban greening and water utilization in Beijing City, the authors calculated the ecological water demand of urban greening by scale extending computing methods, and by effective utilization of rainfall combined with survey data to calculate the theoretical and actual water supply of Beijing's urban greening in 2012. On this basis, the three sources of Beijing's water supply for urban greening, which including surface water, ground water and reclaimed water, were evaluated by the gray Markov chain model and entropy evaluation method, thus obtained the predicted value of water actual supply in 2014. The results indicated that the theoretical water supply was  $5.07 \times 10^8 \text{ m}^3$  and the actual amount of water was  $6.86 \times 10^8 \text{ m}^3$  in 2012, possible range for the actual amount of water is between  $7.29 \times 10^8 \text{ m}^3$  and  $7.93 \times 10^8 \text{ m}^3$  in 2014. Accordingly, there have risks of Beijing's greening water supply and demand, so the authors provides some advice about water-saving measures and related research references to ensure Beijing's urban water supply security and sustainable utilization of water resource.

**Keywords:** urban greening; water resource; risk assessment; Beijing City

近年来,北京市的城市绿化建设卓有成效,基本形成了乔灌草结合、宿根花卉搭配、四季皆有景观、错落有致的城市绿化景观,城市生态环境不断改善。北京市城市绿化面积和绿化覆盖率不断增加,由 2000

年的  $26\,680 \text{ hm}^2$  和  $36.5\%$  增至 2012 年的  $65\,539.76 \text{ hm}^2$  和  $46.2\%$ <sup>[1]</sup>。与此同时,为保证绿地植被的正常生长每年需消耗大量水分,给城市用水带来极大压力。随着城市绿地率、人均绿地面积逐年增高,北京

收稿日期:2014-04-04

修回日期:2014-07-25

资助项目:北京市园林绿化局科研项目“北京市森林生态建设政策评价研究”(201301)

作者简介:孙红(1990—),女(汉族),天津市人,硕士研究生,研究方向为林业技术经济与城市林业研究。E-mail:kathy\_0907sh@126.com。

通信作者:米锋(1976—),女(汉族),山东省泰安市人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事林业技术经济与城市林业研究。E-mail:mifeng-sun@163.com。

水资源紧缺与城市绿化用水量增加之间的矛盾日益突显。水资源是基础自然资源,是生态环境的控制性因素,同时又是战略性经济资源。因此,进行城市绿化用水的供需风险评估,进一步明确绿地合理供水量,提高绿化水资源利用效率,对于缓解城市绿化与水资源紧缺矛盾,实现城市绿化用水的合理配置,促进城市持续健康发展具有重要的现实意义。

关于城市绿化与水分关系的研究,国外始于 19 世纪初,主要从测算树木蒸腾耗水量及树木尺度辨析及转换等方面展开;国内学者从 20 世纪 60 年代起,对多种植物需水量测定方法进行了完善。在绿化植被耗水方面,目前的研究主要集中在蒸腾与林分密度、土壤水分关系,蒸腾对水量平衡的影响以及植物对环境的响应机制(水分利用效率、叶面积变异)等方面<sup>[2-5]</sup>,研究尺度多以叶片、单株尺度到林分耗水尺度转换<sup>[6-7]</sup>,围绕某一植被类型绿地水分利用和管理进行研究,为城市绿化用水研究奠定了基础。在城市绿化供水方面,目前多以年为时间尺度,运用定额法和水量平衡法进行研究,其中,生态用水率成为核算绿化用水量和供水合理性的有效指标<sup>[8]</sup>。在绿化合理供水方案制定方面,大多集中于城市绿化节水技术研究,例如灌溉方式改进、灌溉管理精细化等方面<sup>[9]</sup>,研究角度较为单一,大多仅从节水技术角度提出措施建议,而基于供需分析即预测的视角提出城市绿化合理供水方案的研究寥寥无几。在评估水资源供需风险的方法应用方面,目前较为成熟的方法有风险指数法、概率统计法、极值统计学法、模糊风险分析法以及灰色马尔科夫链分析法等<sup>[10-12]</sup>。马尔科夫链模型是近几年在水资源短缺风险评价应用领域中一种具有高精度度的新方法。

因此,本文利用灰色马尔科夫链模型计算 2014 年北京市城市绿化用水的实际供水预测值区间,试图对城市绿化用水供需状况进行风险评估。在倡导“生态文明建设”及“水资源科学管理”的背景下,开展北京市城市绿化用水的供需风险研究,完善城市绿化用水供需平衡理论体系,合理利用规划绿化用水资源,可为北京市城市绿化及水资源的可持续发展提供理论借鉴和实践指导。

## 1 北京市城市绿化用水供需量现状分析

北京市城市绿化用水的供给量包括理论供水量和实际供水量两方面。理论供水量<sup>[13]</sup>指为绿化植物能够维持自身生存和生长需要所提供的供水量,即生态需水量减去有效降雨量的部分。其中,有效降雨利

用量是指被植物截留、蒸腾和生长以及土壤蒸发所利用的降雨量<sup>[14]</sup>。实际供水量则指各种绿化水源工程为绿化提供的包括输水损失在内的毛供水量。

目前,对生态需水量计算方法研究较少。本文采用尺度扩展法对北京城市绿化中乔木、灌木、草坪的年生态需水量进行估算,以植物耗水量(植物蒸腾量)来代替植物需水量。通过已有模型<sup>[1,15-17]</sup>,结合北京市各类绿化品种的株数、面积等相关统计数据,本文计算了 2012 年北京市城市绿化中乔木、灌木以及草坪的年生态需水量(如表 1 所示)。

表 1 北京市城市绿化品种年生态需水量估算结果

绿化品种		生态需水量	绿化品种数	年均生态需水量
乔木	常绿乔木	951.80	890.37	0.08
	落叶乔木	27 086.86	2 482.16	6.72
灌木	常绿灌木	55.71	796.82	0.44
	落叶灌木	263.21	126.49	0.33
草坪	草坪	537.51	9 435.31	0.51
总计		—	—	8.09

注:单株(或单位面积)年均生态需水量由《北京城区绿地主要乔灌草年耗水量的估算》中的单株年生态需水量、单位叶面积生态需水量数据计算得到;实有株数(或面积)数据引自《2012 年北京市绿地报告》;需水量中,乔木生态需水量单位为单株年均生态量(kg/g);灌木生态需水量为单株叶面积年均需水量[kg/(m<sup>2</sup>·a)];草坪生态需水量为单位面积年均需水量(kg/m<sup>2</sup>);绿化品种数一项中,乔木品种数为实有株数(万株);灌木品种数为实有叶面积(10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>);草坪品种数的单位为实有叶面积(1.00×10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>)。年生态需水量单位为 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

由表 1 可知,北京市城市绿化品种的年生态需水总量为 8.09×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。其中,北京城市绿化乔木实有植株年生态需水量约为 6.81×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;灌木生态需水量约为 7.8×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>;草坪生态需水量约为 5.1×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。本研究采用徐鹤等<sup>[14]</sup>的有效降雨利用量计算公式,计算 2012 年北京市城市绿地有效降雨利用量为 3.02×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,城市绿化年理论供水量为 5.07×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

对于实际供水量数据的获取,本文于 2012 年选择北京植物园、北京动物园、景山公园、昌平公园、丰台区丰葆路两侧绿地、白云观停车场等 24 个公共绿地;大东流苗圃、北京林业大学苗圃 2 个生产绿地;房山区园林绿化局造林科 1 处防护绿地以及 16 个附属绿地;共 43 处样点进行调研。采用尺度扩展法,结合调研数据,求得北京市不同绿地类型年实际供水量(详见表 2)。

表 2 北京市不同绿地类型年实际供水量估算

绿地类型	实地调研				尺度扩展				
	灌溉方式				绿地面积/	年实际供水			
	编码				hm <sup>2</sup>	量/m <sup>3</sup>	单位面积年实际供水/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	绿地面积/	年实际供水给量/
					hm <sup>2</sup>	10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>			
公共绿地	1	2	3	6	5 560.24	13 196 491	2 373.37	18 069.74	0.43
附属绿地	1	2	—	—	65.38	1 165 000	19 348.42	27 531.36	4.91
防护绿地	1	—	—	—	53.36	525 000	9 838.83	14 870.59	1.46
生产绿地	1	2	4	—	59.90	280 836	4 688.41	1 223.66	0.06
合计									6.86

注:编码 1 指人工灌溉;编码 2 指喷灌;编码 3 指微喷灌;编码 4 指漫灌;编码 5 指滴灌(用专门的管道系统和设备将低压水送到灌溉地段并缓慢地滴到作物根部土壤中的一种灌溉方法);编码 6 指洒水车灌溉。

如表 2 所示,北京市公共绿地类型面积的年总绿化用水量约为  $4.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,附属绿地、防护绿地以及生产绿地类型面积的年总绿化用水量分别为  $4.9 \times 10^8$ ,  $1.46 \times 10^8$  和  $0.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此,北京市城市绿化用水年实际供给总量为  $6.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从北京市城市水资源合理利用的角度出发,绿化水资源存在  $1.79 \times 10^8 \text{ m}^3$  的节水潜力。因此,如何提高绿化用水的利用效率,减少绿化用水资源的浪费,成为城市可持续发展的重要课题。

## 2 北京市城市绿化用水的供需风险评估

北京市城市绿化用水来源包括地表水、地下水和再生水 3 方面。本文在借助上述供需分析的基础上,采用灰色马尔科夫模型和熵值法对北京市城市绿化用水供需风险进行评估。依次对地表水、地下水和再生水 3 个研究变量进行预测,并确定各变量权重,然后加权形成绿化用水实际供给量预测区间,将其与北京市城市绿化用水供需量现状数据进行对比,进而分析北京市城市绿化用水供需风险。

### 2.1 研究方法与数据来源

采用灰色马尔科夫的组合预测法对已有数据用灰色理论做出初步预测,并获取绝对误差值数列。继而用马尔科夫链对初步预测值进行修正,按误差波动确定误差的状态区间,从误差值数列确定的状态间的转移概率矩阵,确定预测值的误差变动区间的概率<sup>[11-12]</sup>。将转移概率最大的误差状态区间中间值作为期望误差值,对灰色预测法的初步预测值进行修正,形成灰色马尔科夫链预测模型的最终预测值。

(1) 对原始数据序列建立一阶微分方程式:

$$\frac{dx(t)}{dt} + ax(t) = \mu \quad (1)$$

根据灰色 GM(1,1),得出预测函数:

$$x(t) = \left[ x(0) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-at} + \frac{\mu}{a} \quad (2)$$

式中: $a, \mu$ ——待辨识参数。

本研究中需要使用 2012 年各项数据来预测 2014 年北京市城市绿化实际供给量,因此将  $t$  替换成  $(t+2)$  代入。

(2) 根据相对误差序列建立马尔科夫预测模型,确定状态转移概率矩阵,根据样本数据的实际情况,将相对误差序列分为 4 个层次。设实际值与预测值的误差率为  $X(t)$ ,则存在以下关系:

$$X(t) = [X_{db}(t) - x_{db}(t) / X_{db}(t)] \quad (3)$$

式中: $X$ ——实际值与预测值的相对误差率; $x_{db}(t)$ ——第  $t$  期的原始数据值, $X_{db}(t)$ ——第  $t$  期灰色理论的预测值。

考察  $X$  数列,求相对误差率的最大值和最小值,设为  $N_{max}$  和  $N_{min}$ ,并使  $d_a = (N_{max} - N_{min}) / 4$  作为误差区间的划分间隔,将误差依次划分区间,分列为 4 个状态,定义如下:

属于 1 的条件:  $(N_{min} + d_a) \geq X(t) \geq N_{min}$

属于 2 的条件:  $(N_{min} + 2 \times d_a) \geq X(t) > (N_{min} + d_a)$

属于 3 的条件:  $(N_{min} + 3 \times d_a) \geq X(t) > (N_{min} + 2 \times d_a)$

属于 4 的条件:  $N_{max} \geq X(t) > (N_{min} + 3 \times d_a)$

(3) 确定其概率转移矩阵

$$P^{(m)} = \begin{bmatrix} p_{11}^{(m)} & \cdots & p_{1n}^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_m^{(m)} & \cdots & p_{mm}^{(m)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中状态转移概率为:

$$p_{ij}(m) = \frac{M_{ij}(m)}{M_i} \quad (j=1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

(4) 对灰色模型产生的初步预测值,用马尔科夫链产生的期望误差值修正,形成最终的预测值。并通过分别计算下列数值,实现精度检验、对比与评价:后验差比值:  $C = S_2 / S_1$  (其中,  $S_1, S_2$  为原始数据的标准差),一个好的模型要求  $C$  越小越好。

本研究中北京市城市绿化覆盖率数据及北京市

水资源(地表水、地下水、再生水)数据来源于北京统计年鉴;城市绿化中地表水、地下水和再生水的用水量数据估算基于北京市城市绿化覆盖率与北京市地下水、地表水以及再生水的来源数据。

## 2.2 结果分析

本文通过 Matlab 对数据进行处理,得出 2014 年北京市的绿化供水(地表水、地下水、再生水)的预测区间(详见表 3)。

表 3 2014 年北京市城市绿化供水预测值

供水	地表水	地下水	再生水
灰色初步预测值	1.302 6	4.395 1	2.103 5
马尔科夫相对误差上限	-0.163 1	-0.218 6	0.134 9
相对误差下限	-0.140 0	-0.065 6	0.080 0
最终预测值区间	(1.139 5,1.442 6)	(4.176 5,4.460 7)	(1.968 6,2.023 5)

在信息论中,熵值反映了信息的无序化程度,可以用来表示系统的不确定性、稳定程度和信息量。熵值越小,则系统无序度越小。通过熵值法,得到地表水、地下水、再生水的权重分配,结果见表 4。从表 4 中可以看到地下水所占权重较大,而再生水所占权重相对较低。权重占比可以有效的辅助进行城市绿化水资源风险评价,同时有利于确定风险转移的方向。

表 4 供水类型的权重分配

水来源	地表水	地下水	再生水
权重	0.334	0.4344	0.2316

C 值为度量模型精确度的典型指标(表 5)。把计算出来的 C 值与表 6 预测精度检验等级参考表做对比,可见 C 值均小于 0.35,模型的精度非常高,拟合效果很好,因此认为模型通过检验,表明此模型对于预测北京市城市绿化用水供水量的精度较高。

表 5 模型精度 C 值

水来源	地表水	地下水	再生水
C 值	0.237 4	0.149 5	0.312 4

表 6 城市绿化供水量预测值精度检验等级

检验等级	好	合格	勉强	不合格
方差比值	<0.35	<0.50	<0.65	≥0.65

根据上述模型计算得出预测结果:2014 年北京市城市绿化所用地表水量区间为  $(1.139 5 \times 10^8, 1.442 6 \times 10^8) \text{m}^3$ ;所用地下水量区间为  $(4.176 5 \times 10^8, 4.460 7 \times 10^8) \text{m}^3$ ;所用再生水量区间为  $(1.968 6 \times 10^8, 2.023 5 \times 10^8) \text{m}^3$ 。由此可以看出,北京市城市绿化用水的大部分来源为地下水,所占比例约为 60%,地表水和再生水所占比例相近。另外,权重占比可以有效地辅助进行水资源短缺风险评价,同时有助于确定风险转移的方向。根据权重分配表可以说

明相比较之下评估出地下水的风险较大,再生水的风险较小。由于目前北京市的供水来源主要是地下水和地表水。因此,北京市城市绿化用水比例相当不协调,过分依赖于地下水。同时由于水污染严重,生态环境日益恶化,据调查全市年污水排放量过大。而 2012 年全市污水处理率约为 83%,因此,为了达到降低地下水的风险,可以将地下水的风险转移到再生水,即提高污水处理率,将部分再生水代替北京市城市绿化用水的地下水,从而加大再生水的使用量,同时减少地下水的使用量。通过模型计算得出 2014 年北京市城市绿化总供水量区间为  $(7.28, 7.93) \times 10^8 \text{m}^3$ ,而上文根据估算研究得出的 2012 年北京市城市绿化水资源的实际供给量约为  $6.86 \times 10^8 \text{m}^3$ ,理论供给量为  $5.07 \times 10^8 \text{m}^3$ ,可见北京市城市绿化供水呈现上升趋势,应及时采取措施避免造成城市水资源短缺的后果。

## 3 结论

(1) 北京市城市绿化用水结构不合理。地下水在绿化中水中约占为 56.27%,比例超过 1/2,因此,合理开发、引进污水处理技术,提高水资源的循环利用,可以增加供水来源渠道,使再生水更多的承担起城市绿化用水的重担。另外,北京市河湖水资源丰富,随着治理工作的顺利开展,水质有明显改善,河湖两岸绿地就可以就近取水灌溉,替代部分地下水用于城市绿化。

(2) 北京市城市绿化灌溉方式良莠不齐。北京市大型公共绿地中普遍采用人工灌溉、喷灌、微喷灌等先进灌溉方式,有针对性的不同绿化植物进行灌溉管理,绿化水资源利用率较高;而附属绿地,尤其是中低档居民社区绿地主要以人工灌溉为主,喷灌为辅,灌溉方式比较粗放,容易出现灌溉过度,水源浪费严重,大约有 80%的水由于深层渗漏及无效蒸发而损失掉,这就导致了绿化用水量大,对水资源的浪费比较严重。因此,城市绿化应采用灌溉方式多样化,针对不同情况采用不同的灌溉方式,提高水资源利用率。

(3) 北京市城市绿化用水管理制度不完善。目前,北京市城市绿化相关政府部门,没有管水组织、制定工程和经营制度等统一管理的部门。因此,中国应当有专业的绿化行业管理,组建相关组织协会,严格执行政府监管,这样才能有效推动绿化节水灌溉的发展,达到节水型绿地的目标。北京市水务局和相关政府部门应将城市绿化节水措施提上日程,不断改善水资源浪费状况,提高水资源的利用效率。

(4) 随着北京市绿化工作的深入,绿化面积不断增长,相应的绿化用水量也日益增加,据此在今后的城市绿化管理工作中应注重采用规避绿化用水风险的措施,以期实现城市绿化与城市水资源的协调可持续发展。具体措施如下。

① 提高再生水的使用比例。绿地管理单位可以引进具备高标准水循环处理系统,在满足城市绿地植物健康生长的前提下,推广再生水利用技术,合理适宜地推广绿化再生水,合理建设城市绿化再生水管线。例如在公共绿地、附属绿地、街旁绿地等区域修建蓄水池、生态型透水地面铺装等方式收集雨水,开展与污水处理厂的合作,将水景景观水(喷泉、人工瀑布等)及雨水进行处理。

② 建立科学的绿化用水价格体系。目前,地下水在北京市城市绿化用水中占有较大的比重,而水价是水资源管理的主要经济杠杆,对绿化用水的配置和管理起重要的导向作用。绿化用水的浪费在一定程度上是因为水价偏低,由于部分城市绿地有政府补贴,绿化养护人员更加无节制的用水。据国外相关研究,水价提高10%可使用水的需求量下降约5%<sup>[17]</sup>。因此,北京市相关部门可以考虑建立科学的绿化用水价格体系,按绿化地块设置水表,实行动态定额管理,规范绿化用水使用量。

③ 建立城市绿化用水考核指标体系。北京市城市绿化用水在一定程度上比较短缺,因此,应建立健全绿化节水法规体系,尽量减少大批量水景建设,监督各绿化单位的绿化用水情况,以此建立城市绿化考核指标体系,把绿化用水来源指标和节水指标列入主管单位考核指标,实行节奖超罚。

从目前研究来看,国内研究植物需水量的成果较少,仅限于少数植物。因此,建议今后应加强对常见园林植物需水量数据的精确测定,这既是制定绿化节水灌溉方案的基础,也是节约型绿地园林建设的重要工作。此外,本文选择的北京市城市绿化用水只分3类,有一定的局限性,今后应有更具体的城市绿化用水研究,使研究结论更为准确,从而更好地为北京市城市绿地的合理灌溉及有效节水提供依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] 北京市园林绿化局. 2012年城市绿化资源情[EB/OL]. [2013-03-27]. [http://www.bjyl.gov.cn/zwgk/tjxx/201303/t20130327\\_115588.html](http://www.bjyl.gov.cn/zwgk/tjxx/201303/t20130327_115588.html).
- [2] Yunusa I A M, Aumann C D, Rab M A, et al. Topographical and seasonal trends in transpiration by two co-occurring *Eucalyptus* species during two contrasting years in a low rainfall environment [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(9):1234-1244.
- [3] Stape J L, Binkley D, Ryan M G, et al. Water use, water limitation, and water use efficiency in a *Eucalyptus* plantation [J]. *Bosque*, 2004, 25(2):35-41.
- [4] Sprintsin M, Cohen S, Maseyk K, et al. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(5):565-574.
- [5] Inostroza L, Acuña H. Water use efficiency and associated physiological traits of nine naturalized white clover populations in Chile [J]. *Plant Breeding*, 2010, 129(6):700-706.
- [6] Liang Zongsuo, Yang Jianwei, Shao Hongbo, et al. Investigation on water consumption characteristics and water use efficiency of poplar under soil water deficits on the Loess Plateau [J]. *Colloids and Surfaces (B): Biointerfaces*, 2006, 53(1):23-28.
- [7] 高永年,高俊峰,张万昌,等. 地形效应下的区域蒸散遥感估算[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10):218-223.
- [8] 魏彦昌,苗鸿,欧阳志云,等. 城市生态用水核算方法及应用[J]. *城市环境与城市生态*, 2003(S1):18-20.
- [9] 宋秀瑜,张小侠,王秀茹,等. 城市绿地节水灌溉自动控制研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(6):317-321.
- [10] 王颖,马莉媛,郁尧,等. 关于水资源风险评价数学模型的讨论[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(2):69-72.
- [11] 刘宗明,贾志绚,李兴莉. 基于灰色马尔科夫链模型的交通量预测[J]. *华东交通大学学报*, 2012(2):22-23.
- [12] 李东,苏小红,马双玉. 基于新维灰色马尔科夫模型的股价预测算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(2):13-15.
- [13] 赵西宁,吴普特,王万忠,等. 生态环境需水研究进展[J]. *水科学进展*, 2005, 16(4):617-622.
- [14] 徐鹤,褚俊英,刘家宏,等. 城市绿地生态系统合理供水辨识分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(6):136-139.
- [15] 车文瑞. 北京城区绿地主要乔灌草年耗水量的估算[D]. 北京:北京林业大学, 2008:31-46.
- [16] 北京市 2012 年统计年鉴[EB/OL]. [2013-10-23]. <http://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2012-tjnj.index.html>.
- [17] 刘伟. 中国水制度的经济学分析[D]. 上海:复旦大学, 2004:46-50.