

# 城市水资源需求量变化趋势预测模型及应用

王春娟, 冯利华

(浙江师范大学 地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004)

**摘要:** 利用灰色关联分析, 可挑选出与需水量关系较为紧密的影响因子, 而利用前期的影响因子进行计算, 可以使物元分析具有预测功能。讨论了物元分析的方法步骤及应用。结果表明: 根据物元分析来预测未来义乌市需求量的变化趋势是较为理想的。

**关键词:** 水资源; 水资源需水量; 物元分析; 灰色关联分析

中图分类号: TV21; TU991.31

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)05-0051-04

## Prediction model of change tendency of urban water resources demand and its application

WANG Chunjuan, FENG Lihua

(College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** By the utilization of grey correlation analysis, the paper pick out impact factors in close relationship with water resources demand and use of previous impact factors to calculate, witch make matter element analysis possess forecast function. The paper discussed steps and applications of matter element analysis. The result showed that the forcast of future change tendency of water resources demand in Yiwu accordance with matter element analysis is relatively ideal.

**Key words:** water resources; water resources demand; matter element analysis; gray correlation analysis

水资源是基础自然资源, 是生态环境的控制因素之一, 同时也是战略性经济资源, 是一个国家或地区综合实力的有机组成部分。我国是世界水资源严重短缺的国家之一。水资源总量居世界第6位, 占世界水资源总量的7%, 但人均水资源量只有世界平均水平的25%, 而且时空分布不均, 年内年际变化较大, 污染严重, 造成了大部分地区严重缺水, 水生态系统退化。水资源短缺已成为严重制约我国经济、社会、环境协调可持续发展的瓶颈, 预测我国用水高峰期将在2030年前后出现<sup>[1]</sup>。因此, 进行水资源的需求预测已成为各个国家和地区进行水资源规划的主要任务<sup>[2]</sup>。

需水预测研究最早始于100年前的美国。美国内战结束后, 城市重建及随后的工业化进程中建设了不少城市供水系统, 其中大部分都是服务于全部居民的, 甚至超前考虑到未来用水发展需要<sup>[3]</sup>。之后美国又于1965、1968年分别进行了第一次、第二次全国水资源评价, 对各类用水进行需水预测<sup>[4]</sup>。日本、英国、法国、荷兰、加拿大等过从20世纪60年

代也逐步开展需水预测, 并将其作为宏观管理的手段。1977年联合国世界水会议号召各国进行专门的国家级水资源评价活动。1987年和1992年联合国世界环境与发展委员会先后出版了《我们共同的未来》及《21世纪议程》, 使水资源开发管理开始围绕面向未来的可持续发展问题展开, 推动了需水量预测研究的深入进行<sup>[5]</sup>, 世界其他国家也陆续开展了中长期供需水的预测工作, 并对水资源需水管理进行了研究<sup>[6]</sup>。

建国以后, 随着计划经济体系的建立, 为了满足国民经济和人民生活用水需求, 我国逐步开展需水预测研究工作。20世纪70年代, 我国开始出现水资源短缺问题。改革开放以后, 随着国民经济迅速发展, 工业用水急剧增加, 城镇居民生活用水也发福增加, 城市用水矛盾日益突出, 需水预测理论及方法研究广泛而深入地开展起来。2001年以后中国科学院支持并开展了“华北地区水循环与水资源安全”项目, 研究社会经济转型过程中水资源供给和需求变化规律。在此期间, 众多专家对我国未来需

收稿日期: 2012-05-18; 修回日期: 2012-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171430, 40771044)

作者简介: 王春娟(1984-), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 研究方向为水文学与水资源、资源地理。

通讯作者: 冯利华(1955-), 男, 浙江建德人, 教授, 主要从事水文学与水资源的教学与研究工作。

水情况进行预测,姚建文,徐子恺等<sup>[7]</sup>预测2010年我国需水总量为6600亿~6900亿 $\text{m}^3$ ,2030年需水量7800亿~8200亿 $\text{m}^3$ ,2050年需水量8500亿~9000亿 $\text{m}^3$ ;贾绍风等<sup>[8]</sup>根据水库兹涅茨曲线判断出我国工业用水的变化规律,并分析预测在2030年左右我国基本进入蓄水的“零增长”阶段;而陈家琦等<sup>[9]</sup>认为,到2100年我国用水量才可达到国内水资源可使用量的极限,称为受水资源条件制约的零增长状态。

因此,为了使水资源供需平衡发展下去,特别是区域水资源需求均衡发展,需水预测工作的研究迫在眉睫。本文以义乌市为例,首先利用灰色关联分析法对义乌市需水量的影响因子进行排序,接着使用物元分析方法进一步预测义乌市需水量的变化趋势,结果显示需水量预测结果较为理想,可为义乌市未来水资源优化配置及水资源管理的提供重要依据。

## 1 需水量影响因子的关联排序

需水量高低和影响因子之间的关联度是有大小之别的,为了能够对影响因子进行较为准确的挑选,利用灰色关联法对其进行分析研究。

设有母序列 $x_0(t)$ 和子序列 $x_i(t)$ 。对 $x_0(t)$ 和 $x_i(t)$ 进行无量纲化处理,并记它们在 $t$ 时刻的绝对差为<sup>[10]</sup>:

$$\Delta_{0i}(t) = |x_0(t) - x_i(t)|, (t = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

二级最小差为:

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_t |x_0(t) - x_i(t)| \quad (2)$$

二级最大差为

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_t |x_0(t) - x_i(t)| \quad (3)$$

$$\text{那么关联系数: } \delta_{0i}(t) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(t) + k\Delta_{\max}} \quad (4)$$

式中: $K$ 为分辨系数, $K \in [0, 1]$ 。由此可得关联度

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \delta_{0i}(t) \quad (5)$$

式中:关联度 $\gamma_{0i}$ 表示母序列 $x_0(t)$ 和子序列 $x_i(t)$ 之间相关的程度, $\gamma_{0i}$ 的值大时,表示 $x_0(t)$ 和 $x_i(t)$ 的相关程度高,反之则表示相关程度低。

现以分析义乌市需水量的变化趋势为例来分析影响因子的挑选问题,先确定义乌市年总用水量为母序列 $x_0(t)$ (单位为亿 $\text{m}^3$ )。影响区域水资源需求量的因素众多,可分为社会经济因素、自然因素。水资源需求量可通过若干特征变量表示出来,若把这些变量界定为评价指标,那么这些评价指标就成为测定水资源需求量的指示器,以便对水资源进行

优化配置奠定基础<sup>[11]</sup>。本文遵循可测性原则、可靠性原则、充分性原则,针对义乌市的水资源供需情况,并参考了专家意见<sup>[12-13]</sup>,从义乌市统计年鉴、水资源公报中选取了9个评价指标,其中, $X_1$ :人口,万人; $X_2$ :GDP,亿元; $X_3$ :降水量,亿 $\text{m}^3$ ; $X_4$ :人均水资源量,10<sup>2</sup> $\text{m}^3$ ; $X_5$ :水资源利用率,%; $X_6$ :农业用水量,亿 $\text{m}^3$ ; $X_7$ :工业用水量,亿 $\text{m}^3$ ; $X_8$ :万元GDP用水量, $\text{m}^3$ ; $X_9$ :污水年排放量,10<sup>6</sup>t的数据作为子序列(即比较序列)(表1)。

首先进行无量纲化处理,再根据(2)、(3)式,求出绝对最大差值和绝对最小差值,最后根据(4)、(5)式计算出关联系数( $k = 0.5$ ),同时得出母序列与子序列之间的关联度 $\gamma_{0i}$ (表1),逐次删去关联度小于0.7的因子,可以得到以下顺序: $\gamma_{01} > \gamma_{04} > \gamma_{08} > \gamma_{02}$ 。

## 2 需水量预测的物元模型

根据灰色关联分析,对前期的影响因子做出了关联排序,然后对母序列和子序列划分等级,并进行物元分析。在此过程中,根据关联排序的结果,不断调整母序列与子序列各等级的分界值,从而使母序列计算等级与实际等级的历史拟合率(历史拟合率=历史报对次数/历史总次数100%)达到最大。同样可以加入预测年的前期因子,进行物元分析,就可以较准确的预测需水量的变化趋势。

表1 义乌市年用水量、影响因子及其关联度

| 年份            | $X_0$    | $X_1$    | $X_2$    | $X_4$    | $X_8$    |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1997          | -1.05354 | -0.67360 | -1.41141 | 1.15974  | 1.59674  |
| 1998          | 0.71053  | -0.53244 | -1.39032 | 0.72289  | 2.18059  |
| 1999          | 0.71164  | -0.51842 | -0.34466 | 0.18243  | 0.09513  |
| 2000          | -0.27950 | -0.37326 | -0.02071 | 0.48540  | -0.38613 |
| 2001          | 0.82998  | -0.33121 | 0.25694  | -0.71658 | -0.46447 |
| 2002          | 0.33848  | -0.28916 | -0.95926 | 2.17140  | 0.79464  |
| 2003          | -1.83462 | -0.24812 | -0.65422 | -0.80314 | -0.29286 |
| 2004          | -1.42522 | -0.17003 | 0.22598  | -1.29703 | -0.75547 |
| 2005          | -0.54614 | -0.07892 | 0.39624  | 0.01329  | -0.57453 |
| 2006          | 0.86475  | 0.01418  | 0.88528  | -0.41089 | -0.51297 |
| 2007          | 1.10329  | 0.11029  | 1.53235  | -0.71859 | -0.72189 |
| $\gamma_{0i}$ |          | 0.9664   | 1.48378  | 0.9027   | 0.8774   |

### 2.1 确定物元

物元分析理论主要研究事物的可拓性,可以解决矛盾问题<sup>[14]</sup>,其原理是以物元为基元建立物元模型,以物元可拓为依据,应用物元变化矛盾问题为相容问题。

在物元分析中,把事物 $N$ 及其特征 $c$ 和量值 $x$

的三元有序组合<sup>[10]</sup>:

$$R = (N, c, x) \quad (6)$$

称为物元。假设义乌市水资源需求量  $N$  有多个特征,需要以  $n$  个特征  $c_1, c_2, \dots, c_n$  和相应的量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  来描述,用矩阵表示为:

$$R = \begin{pmatrix} N & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & x_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

## 2.2 物元分析的具体步骤

(1) 确定经典域:

$$R = (N_{0j}, c_i, x_{0ij}) = \begin{pmatrix} N & c_1 & x_{01j} \\ & c_2 & x_{02j} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & x_{0nj} \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} N_{0j} & c_1 & \langle a_{01j} & b_{01j} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{02j} & b_{02j} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_n & \langle a_{n1j} & b_{n1j} \rangle \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中:  $N_{0j}$  为事物的第  $j$  个等级 ( $j = 1, 2, \dots, m$ );  $c_i$  为事物第  $j$  个等级的第  $i$  个特征;  $x_{0ij}$  为  $N_{0j}$  关于  $c_i$  的量值范围,即各等级关于对应特征的经典域为:  $\langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle$ 。

(2) 确定节域:

$$R_p = (P, c_i, x_{pi}) = \begin{pmatrix} P & c_1 & x_{p1} \\ & c_2 & x_{p2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & x_{pn} \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} P & c_1 & \langle a_{p1} & b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2} & b_{p2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_n & \langle a_{pn} & b_{pn} \rangle \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中:为事物等级的全体;  $x_{pi}$  为关于  $c_i$  的量值范围——节域  $\langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 。这里要求  $x_{0ij} \in x_{pi}$ 。

(3) 列出待评事物:

$$R_i = (P_k, c_i, x_i) = \begin{pmatrix} P & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & x_n \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中:  $P_k$  为待评事物 ( $k = 1, 2, \dots, l$ ); 为  $P_k$  关于  $c_i$  的量值,即各个特征的实际数据。

(4) 计算权系数。根据专家意见,对  $n$  个特征中

任意两个特征之间的重要性进行两两比较,给出比值 ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ),得到判断矩阵:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ & & \dots & \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中:对矩阵的每一行元素先相乘,再求  $n$  次方根,

得一向量  $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$ ,  $b_i = (\prod_{j=1}^n d_{ij})^{1/n}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。作归一化处理,即令  $a_i = b_i / \sum_{i=1}^n b_i$ ,

从而得到权系数  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ , 并且满足  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。

(5) 确定关联函数。令

$$Y_j(x_i) = \frac{\rho(x_i, x_{0ij})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{0ij})} \quad (12)$$

$$\rho(x_i, x_{0ij}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{0ij} + b_{0ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{0ij} - a_{0ij}) \quad (13)$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \quad (14)$$

那么,待评事物  $P_k$  关于第  $j$  个等级的关联函数

$$Y_j(p_k) = \sum_{i=1}^n a_i Y_j(x_i) \quad (15)$$

(6) 评定事物等级。根据最大隶属原则,在  $Y_j(P_k)$  中寻求最大的关联函数值

$$Y_{j'}(P_k) = \max[Y_1(P_k), Y_2(P_k), \dots, Y_m(P_k)] \quad (16)$$

那么,待评事物应归属于第  $j'$  个等级。

## 3 实例研究

就表 1 而言,待评事物为义乌市水资源用水量的序列 ( $k = 1, 2, \dots, 11$ ),特征为前期的影响因子 ( $i = 1, 2, 4, 8$ )。根据年用水量的变化,将其分为 4 个等级:低用水量、中用水量、较高用水量、高用水量。各因子也相应地分为 4 个等级 ( $j = 1, 2, 3, 4$ )。根据参考序列计算等级与实际等级的历史拟合率最大的原则,在计算过程中,反复调整等级分界值,最后得到历史拟合率最大的参考序列和 3 个比较序列及其等级分界值(表 2)。

### 3.1 确定经典域、节域和待评物元

根据义乌市多年的用水量变化情况,确定出影响因子 4 个等级的经典域,如影响因子第 1 等级(低

用水量)的经典域为:

$$R_{01} = (N_{0j}, c_i, x_{0i1}) = \left| \begin{array}{cccc} N_{01} & c_1 & < 0 & 64 > \\ & c_2 & < 0 & 111 > \\ & c_3 & < 0 & 5.5 > \\ & c_4 & < 50 & 90 > \end{array} \right|$$

其它等级的经典域见表2。

表2 参考序列与比较序列的等级分界表

| 等级         | 1 低用水量  | 2 中用水量    | 3 较高用水量    | 4 高用水量      |
|------------|---------|-----------|------------|-------------|
| $X_0$      | 0 ~ 2.3 | 2.3 ~ 2.6 | 2.6 ~ 2.75 | 2.75 ~ 2.85 |
| $X_1(c_1)$ | 0 ~ 64  | 64 ~ 67.9 | 67.9 ~ 80  | 80 ~ 110    |
| $X_2(c_2)$ | 0 ~ 111 | 111 ~ 340 | 340 ~ 400  | 400 ~ 430   |
| $X_4(c_3)$ | 0 ~ 5.5 | 5.5 ~ 8.9 | 8.9 ~ 15   | 15 ~ 20     |
| $X_8(c_4)$ | 50 ~ 90 | 90 ~ 149  | 149 ~ 192  | 192 ~ 230   |

根据  $x_{0ij} \subset x_{pi}$  的要求,确定影响因子的节域为:

$$R_p = (P, c_i, x_{pi}) = \left| \begin{array}{ccc} P & c_1 & < 0 & 120 > \\ & c_2 & < 0 & 440 > \\ & c_3 & < 0 & 25 > \\ & c_4 & < 0 & 240 > \end{array} \right|$$

列出待评物元。根据表1所列的数据,1997年的4个影响因子物元表示为:

$$R_1 = (P_1, c_i, x_i) = \left| \begin{array}{ccc} P_1 & c_1 & 63.80 \\ & c_2 & 108.04 \\ & c_3 & 14.94 \\ & c_4 & 191.0 \end{array} \right|$$

其余的待评物元同上。

### 3.2 计算权系数和关联函数值

利用(11)式,并结合专家的咨询意见,综合得到3个因子的权系数  $c_1 = 0.32$ ,  $c_2 = 0.18$ ,  $c_3 = 0.27$ ,  $c_4 = 0.23$ 。根据(12)~(14)式,计算得出每年用水量各等级的关联函数表(表3)。

### 3.3 评定年用水量等级

由表3可知,在1997~2007年的11年中,义乌市用水量的计算等级与实际等级符合的期限为10年,而1997年的计算等级和实际等级虽情况不符,但仅差一个等级,可见计算的结果是较为合理的。由于相似的影响因子组合会导致相似的年需水量,因此,可通过前期的影响因子来预测义乌市未来年的需水量变化趋势。首先分别加入2008、2009、2010年影响义乌市水资源需求量的因子:  $X_1 = 101.40$ ,  $X_2 = 415.65$ ,  $X_3 = 7.43876$ ,  $X_4 = 54.0$ ;  $X_1 = 189.21$ ,  $X_2 = 519.53$ ,  $X_3 = 4.22758$ ,  $X_4 = 51.9$ ;  $X_1 = 191.25$ ,  $X_2 = 614.10$ ,  $X_3 = 7.72873$ ,  $X_4 = 47.4$ ,接着进行物

元分析,得到预测结果(表4)。

表3 义乌市年用水量各等级的关联数值、计算等级及其实际等级表

| 年份   | 1     | 2     | 3     | 4     | $j'$ | 计算等级 | 实际等级 | 是否符合 |
|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 1997 | -0.28 | -0.11 | -0.14 | -0.21 | 2    | 2    | 1    | 否    |
| 1998 | -0.32 | -0.25 | -0.03 | -0.06 | 3    | 3    | 3    | 是    |
| 1999 | -0.23 | 0.03  | 0.05  | -0.23 | 3    | 3    | 3    | 是    |
| 2000 | -0.18 | 0.09  | -0.09 | -0.32 | 2    | 2    | 2    | 是    |
| 2001 | -0.14 | 0.13  | 0.19  | -0.40 | 3    | 3    | 3    | 是    |
| 2002 | -0.33 | -0.09 | -0.20 | -0.18 | 2    | 2    | 2    | 是    |
| 2003 | -0.13 | -0.19 | -0.22 | -0.41 | 1    | 1    | 1    | 是    |
| 2004 | -0.03 | -0.07 | -0.25 | -0.41 | 1    | 1    | 1    | 是    |
| 2005 | -0.16 | -0.01 | -0.09 | -0.35 | 2    | 2    | 2    | 是    |
| 2006 | -0.20 | -0.07 | -0.06 | -0.36 | 3    | 3    | 3    | 是    |
| 2007 | -0.20 | -0.18 | -0.23 | -0.16 | 4    | 4    | 4    | 是    |

表4 义乌市2008~2010年用水量各等级的关联数值、计算等级及其实际等级表

| 年份   | 1     | 2     | 3     | 4     | $j'$ | 计算等级 | 实际等级 | 是否符合 |
|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 2008 | -0.42 | -0.37 | 0.43  | 0.23  | 3    | 3    | 3    | 是    |
| 2009 | -0.23 | -0.54 | -0.14 | -0.79 | 3    | 3    | 3    | 是    |
| 2010 | -0.47 | -0.51 | -0.62 | 0.08  | 4    | 4    | 4    | 是    |

由表4可得,义乌市在2008年的水资源需求量变化趋势应位于较高用水量等级,实际上义乌市在2008年的需水量为2.665400亿 $m^3$ ,属于第三等级,预测准确;在2009年的水资源需求量变化趋势应位于较高用水量等级,实际上义乌市在2009年的需水量为2.696900亿 $m^3$ ,属于第三等级,预测准确。而在2010年的水资源需求量变化趋势应位于较高用水量等级,实际上义乌市在2010年的需水量为2.9091亿 $m^3$ ,属于第四等级,预测准确。由以上3年的预测结果得知,运用物元分析法预测区域需水量是切实可行的,这可为义乌市水资源规划及管理等工作展开提供重要的依据。

## 4 结 语

利用前期的影响因子进行计算,使物元分析方法具有了预测功能。在计算过程中,反复调整分界值,可以使母序列的计算等级和实际等级的历史拟合率达到最大,其结果是较为理想。因此,物元分析法可以对未来义乌市水资源需求量变化做出较为准确的预测,是一条科学、可靠、有效的途径。

(下转第58页)

得结果具有相同的变化规律,对于原状土样,含水率越低、固结围压越高,一定破坏振次对应的土样的动强度值越大,而重塑土样,干密度越大、含水率越低、固结围压越高,一定破坏振次对应的动强度值越大。

(2)原状土样和重塑土样在相同土样参数和试验条件下所得到的相同破坏振次对应下的动强度值具有明显差异,但差异值受相关参数的影响,固结围压越大,原状土样和重塑土样的动强度差值就越大,而含水率的增加时动强度差值的稍有减少。

## 5 展 望

本文对陕西杨凌揉谷地区的黄土进行了不同含水率、干密度、固结围压条件下的动强度变化规律研究,验证了黄土的动强度特性变化规律,但由于动荷载作用时,土体承受的通常是轴向和侧向复合振动荷载,且天然固结情况也不尽相同,故而本文所控制的影响因素仍具有很大的局限性。因此,为了能够较为全面的分析研究黄土的动力特性,笔者认为可以进行以下一些相关的研究工作:

(1)本文研究所采用的试验为单一变量法,而在实际工程中,黄土受力十分复杂,可以考虑将不同条件参数相组合进行动强度研究。

(2)随着数值模拟软件的发展和普及,可以采用试验研究与数值模拟相结合的试验方法,合理综

合分析相关数据,使试验研究和数值模拟互补,得到更加准确的黄土动力特性规律。

### 参考文献:

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.
- [2] 卞敬玲, 骆亚生. 黄土动力特性研究回顾与探讨[J]. 防渗技术, 2001, 7(4): 9-15.
- [3] 吕立强, 邵生俊, 龙吉勇. 对黄土基本动力特性的认识[J]. 地下水, 2007, 29(6): 109-111.
- [4] 谢定义, 姚仰平, 党发宁. 高等土力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [5] 朱思哲, 刘 虔, 马 林. 三轴试验原理与应用技术[M]. 北京:中国电力出版社.
- [6] 谭东岳, 骆亚生, 杨永俊, 等. 不同地区黄土动强度变化规律试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 903-910.
- [7] 骆亚生, 谢定义, 陈存礼. 黄土不同湿度状态下破坏动强度的试验分析[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(4): 403-407.
- [8] 骆亚生, 李 瑞, 田堪良. 非饱和黄土动力特性试验方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1041-1046.
- [9] 宋 章, 程谦恭, 张 炜. 黄土动强度特性试验分析[J]. 路基工程, 2009(6): 65-67.
- [10] 谢定义. 动荷载下的土的强度特性[J]. 水利学报, 1987, 18(12): 17-32.

(上接第 54 页)

### 参考文献:

- [1] 中国工程院“21 世纪中国可持续发展水资源战略研究”题目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J]. 中国工程科学, 2000, 2(8): 1-17.
- [2] 贺丽媛, 夏 军, 张利平. 水资源需求预测的研究现状及发展展望[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(1): 61-64.
- [3] Hartley J A, Powell R S. The Development of A combined water demand prediction system [J]. Civil Engineering Systems, 1991, 8(4): 231-236.
- [4] Prassifka D W. Current trends in water supply planning [M]. New York: Von Nostrand Reinhold Com - pang, 1988.
- [5] 马兴冠, 傅金祥, 李 勇. 水资源需求量预测研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版), 2002, 18(2): 135-138.
- [6] Atef Al - K harabsheh, Rakad Ta any. Challenges of water demand management in Jordan[J]. Water Inter - national, 2005, 30(2): 210-219.
- [7] 姚建文, 徐子恺, 王建生. 21 世纪中叶中国蓄水展望[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 91-95.
- [8] 贾绍风, 张士锋, 杨 红, 等. 工业用水与经济发展的关系[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 279-280.
- [9] 陈家琦. 中国水资源问题及 21 世纪初期供需展望[J]. 水问题论坛, 1994(1): 25-31.
- [10] 冯利华. 水资源变化趋势的物元分析[J]. 地域研究与开发, 1999, 18(2): 18-21.
- [11] 傅 湘, 纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价——主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 168-173.
- [12] 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34.
- [13] 刘昌明, 王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 635-644.
- [14] 蔡 文. 物元模型及应用[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1994.