

福建省用水结构与产业结构相关性的区域变化

钟科元¹, 陈莹^{1,2,3}, 陈兴伟^{1,2,3}, 李孝成⁴

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007;
3. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007; 4. 福建省水利水电科学研究院, 福州 350007)

摘要: 基于福建省1998年-2010年用水结构和产业结构数据, 采用对称Logratio变换与偏最小二乘回归方法, 分别建立了福建省沿海、山区以及九个设区市用水结构与产业结构成分数据线性回归模型, 分析结果表明, 福建省地区间用水结构与产业结构的相关性存在显著差异, 其中沿海地区工业用水与第二产业相关性最强, 而山区灌溉用水与第一产业相关性最强。各设区市中, 厦门市三大用水与三大产业均成高度相关, 南平市、龙岩市和宁德市仅灌溉用水与第一产业成较强相关性, 三明市和漳州市用水结构与产业结构相互关系均不显著。

关键词: 用水结构; 产业结构; PLS回归; 区域变化; 福建省

中图分类号: F062.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0593-04

Analysis of the correlation between water consumed structure and industrial structure in different regions of Fujian Province

ZHONG Ke yuan¹, CHEN Ying^{1,2,3}, CHEN Xing wei^{1,2,3}, LI Xiao cheng⁴

(1. College of geographical science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China;

3. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China; 4. Fujian Institute of Water Resources & Hydropower Research, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Based on the data of water consumption structure and industrial structure in Fujian Province between 1998 and 2010, linear regression models of the correlations between water consumption structure and industrial structure in Fujian Province, including the coastal area, mountainous area, and nine prefectures, were established using the application of symmetrical logratio transformation and partial least squares. The results showed that the correlations between water consumption structure and industrial structure vary in different regions of Fujian Province. The industrial water consumption is highly related with the secondary industry in the coastal area, whereas the irrigation water consumption is highly related with the primary industry in the mountainous area. Water consumption is highly correlated with three industries in Xiamen, irrigation water shows significant correlation with the primary industry in Nanping, Longyan, and Ningde, while there is no obvious correlation between water consumption structure and industrial structure in Sanming and Zhangzhou.

Key words: water consumed structure; industrial structure; PLS regression; regional variation; Fujian Province

用水结构是指农业用水、工业用水和生活用水之间互相关联、互相依存的结合方式及其比例关系^[1]。分析用水结构与产业结构的相互关系及其地区差异, 对于确定用水结构的影响因素和演变趋势, 实现区域水资源的合理配置和经济可持续发展具有重要意义。目前相关研究主要集中于用水结构变化及其驱动力分析^[2-6], 较少考虑用水结构和产业结构

的内部存在相互影响的问题, 如贾绍凤等^[7]分析了工业用水与经济发展的关系, 王玉宝等^[8]研究了农业用水的发展变化及未来发展方向。也有学者分析了产业结构与用水结构的内部关联性, 但是均限于对单一城市或地区, 如刘晓霞^[9]运用协整理论和Granger因果关系法研究了山西省用水结构与产业结构变动关系, 刘小军^[10]等采用信息熵理论分析了

收稿日期: 2014-04-08 修回日期: 2015-03-31 网络出版时间: 2015-05-14
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.1138.013.html>
基金项目: 福建省科技计划重大项目(2010Y4001)
作者简介: 钟科元(1987-), 男, 江西兴国人, 主要从事水文与水资源方面研究。E-mail: zkygeo@163.com
通讯作者: 陈兴伟(1963-), 男, 教授, 主要从事流域水沙污染物过程及其模拟研究。E-mail: cxwchen215@163.com

榆林市区域用水结构演变规律及影响因素, 云逸等^[11] 结合了对称 Logratio 变换与偏最小二乘回归法, 探讨了北京用水结构与产业结构的相关性; 苏龙强等^[12]、张曼等^[13] 分别对福建省和泉州市用水结构和产业结构的相关性进行了分析。目前, 关于用水结构与产业结构相关性的地区间差异的研究成果还未见报道。

福建省水资源较丰富, 但空间分布不均, 经济发展相对落后的闽西北地区水资源相对丰富, 经济较发达的闽东南地区水资源相对贫乏, 水资源分布与经济社会发展矛盾突出^[14]。探讨福建省用水结构与产业结构相关性地区变化及其相互影响机制, 有助于更好地解释用水结构的影响因素和演变规律, 为深化福建省水资源研究和合理配置水资源提供参考。

1 研究方法和模型

1.1 研究方法

偏最小二乘回归(PLS 回归) 是一种多元回归建模方法, 它可以在自变量集合存在严重多重相关性及样本点容量较少的条件下进行回归建模, 并对两组变量的相关性进行分析, 从而确定两者的相互关系程度^[15]。通过对称 Logratio 变换, 可以有效地消除成分数据的定和约束, 并且使得变换后的非成分数据更能反映成分数据的特性, 提高模型的解释能力。将对称 Logratio 变换与 PLS 理论相结合的方法对用水结构与产业结构建模, 不仅可以确定两者的相互关系程度, 而且可以排除两者存在的多重相关性对模型的干扰。对称 Logratio 变换与 PLS 理论相结合建立成分数据线性回归模型的具体方法可参考文献[11]。

1.2 模型建立

福建省共九个设区市, 根据地理区位和经济发展程度的不同可划分为沿海地区和山区, 其中沿海地区包括宁德市、福州市、莆田市、泉州市、厦门市、漳州市六个设区市, 山区包括三明市、南平市和龙岩市。本文基于福建省统计年鉴^[16]、水资源公报^[17] 的基础数据, 以沿海、山区及其九个设区市为研究单元, 将 1998 年- 2009 年九个设区市和两地区三大产业产值比重的成分数据作为自变量 X , 以用水结构的成分数据作为因变量 Y , 建立各地线性回归分析模型。具体线性回归模型为

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3$$

$$y_2 = b_0 + a_2x_1 + b_2x_2 + c_2x_3$$

$$y_3 = c_0 + a_3x_1 + b_3x_2 + c_3x_3$$

式中: y_1 、 y_2 、 y_3 分别为灌溉用水、工业用水和生活用水的比重; x_1 、 x_2 、 x_3 分别为第一产业、第二产业和第三产业的比重; a 、 b 、 c 为回归系数。

建模后可以形成以三大产业为自变量, 以用水结构为因

变量的各区域标准化回归方程, 回归系数见表 1。利用表 1 的回归结果进一步分析, 发现模型对原始建模数据的拟合效果良好, 见图 1。

表 1 福建省各地区产业结构和用水结构回归模型系数

Tab. 1 Regression models of water consumed structure and industrial structure in each region of Fujian Province

| 区域 | 灌溉用水 | | | 工业用水 | | | 生活用水 | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | a_1 | b_1 | c_1 | a_2 | b_2 | c_2 | a_3 | b_3 | c_3 |
| 沿海 | 0.32 | -0.73 | 0.08 | -0.32 | 0.73 | -0.09 | 0.14 | -0.40 | 0.12 |
| 山区 | 0.38 | -0.41 | -0.15 | -0.33 | 0.30 | 0.24 | -0.03 | 0.11 | -0.13 |
| 厦门 | 0.35 | -0.33 | -0.32 | -0.31 | 0.30 | 0.29 | -0.33 | 0.32 | 0.31 |
| 泉州 | 0.33 | -0.33 | -0.27 | -0.33 | 0.33 | 0.26 | 0.28 | -0.27 | -0.23 |
| 福州 | 0.41 | -0.28 | -0.33 | -0.43 | 0.29 | 0.34 | 0.42 | -0.42 | -0.33 |
| 莆田 | 0.35 | -0.56 | 0.09 | -0.39 | 0.59 | -0.05 | 0.21 | -0.26 | -0.07 |
| 南平 | 0.49 | -0.23 | -0.37 | -0.51 | 0.24 | 0.39 | 0.52 | -0.24 | -0.39 |
| 龙岩 | 0.29 | -0.31 | -0.08 | -0.15 | 0.15 | 0.04 | -0.21 | 0.22 | 0.06 |
| 宁德 | 0.28 | -0.25 | 0.29 | -0.21 | 0.19 | 0.21 | -0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 三明 | 0.16 | -0.13 | -0.12 | -0.02 | 0.02 | 0.02 | -0.05 | 0.04 | 0.04 |
| 漳州 | 0.09 | 0.13 | -0.18 | -0.01 | -0.02 | 0.02 | -0.25 | -0.32 | 0.45 |

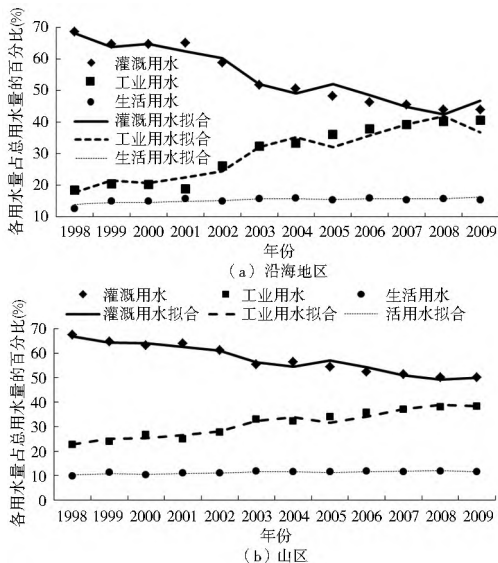


图 1 沿海和山区 1998 年- 2009 年用水结构拟合值与实际值对比

Fig. 1 Comparison of simulated and observed water consumed structure in the coastal region and mountainous area from 1998 to 2009

1.3 模型验证

将各区域 2010 年产业结构数据代入线性回归方程, 得到对应的目标变量, 经逆 Logratio 变换, 最终求出相对应的用水结构的预测值(表 2), 结果显示, 沿海和山区误差可控制在 3% 以内, 大部分城市误差小于 6%, 总体而言模型拟合精度比较高。

表 2 2010 年各区域用水结构预测与实际值误差

Tab. 2 Comparison of simulated and observed water consumed structure in 2010

| 地区 | 误差 (%) | | | | | | | | | | |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 沿海 | 山区 | 厦门 | 泉州 | 福州 | 龙岩 | 南平 | 莆田 | 宁德 | 漳州 | 三明 |
| 灌溉用水 | -1.99 | 2.07 | 2.21 | -6.84 | 2.40 | 5.39 | -1.44 | -5.72 | 9.10 | 3.85 | 1.55 |
| 工业用水 | 2.41 | -2.60 | 3.94 | 9.16 | 3.65 | 5.99 | 1.72 | 3.62 | 11.24 | -3.77 | -2.02 |
| 生活用水 | -0.15 | 0.53 | -6.16 | 2.33 | -1.25 | 0.60 | -0.28 | 2.10 | 2.13 | 0.08 | 0.47 |

2 用水结构和产业结构相关性的区域变化分析

为了直观地观察用水结构与产业结构的相关关系,可以绘制偏最小二乘回归因子载荷图(图2)。在因子载荷图中, w 为 X 数据集权重, c 为 Y 数据集权重,第一个主成分可以得到 X 、 Y 数据综合权重 $w \cdot c[1]$,第二个主成分可以得到 X 、 Y 数据综合权重 $w \cdot c[2]$ 。两要素之间的距离越近,它们相关性越强,反之相关性越弱;在相关圆内并靠近与圆心的要素与其他变量相关性均较弱^[11]。通过有效因子载荷图和回归系数之间的对比,可对产业结构和用水结构进行相关性分析,进而确定两者的相关程度。

2.1 沿海和山区相关性差异分析

从偏最小二乘回归因子载荷图(图2)中可以看出如下结果。

在山区,第一产业与灌溉用水之间的距离最近,两者高度相关(图2(a));第二产业与工业用水、第三产业与生活用水距离均较远,说明第二产业与工业用水、第三产业与生活用水相互关系均不显著。从回归系数直方图(图3(a)),可以看出第一产业对灌溉用水、第二产业对工业用水都起到促进作用,即随着产业的发展用水量和用水结构比重也逐渐增加,并且第一产业对灌溉用水的促进作用更显著。近年来山区二、三产业虽有所发展,但是农业仍占重要地位,灌溉用水在用水结构中仍占主导。

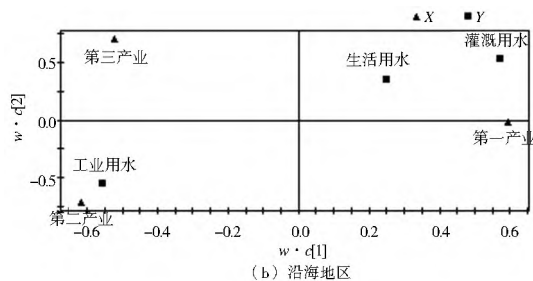
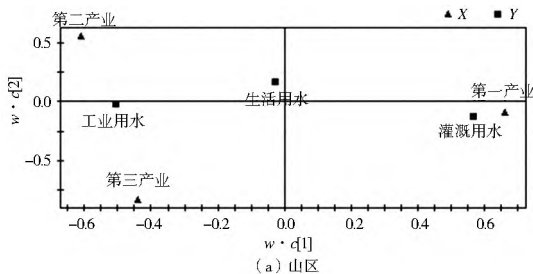


图2 山区和沿海回归因子载荷

Fig. 2 Regression factor loading diagram in the mountainous area and coastal region of Fujian Province

在沿海地区,工业用水与第二产业距离最近,两者高度相关(图2(b));其次为灌溉用水和第一产业;生活用水与三大产业相关性均不显著。从回归系数直方图(图3(b))中可以看出,第一产业对灌溉用水、第二产业对工业用水都起到促进作用,且后者作用更显著。沿海地区经济较发达,第二产业在经济中占有举足轻重的地位,工业用水决定着本区的用水总量和分配,对用水结构影响明显。

无论山区还是沿海地区,生活用水与三大产业相关性均不显著,这一方面是因为生活用水占总用水量比重较低,另一方面因为生活用水所包含的数据比较复杂,没有完全与生

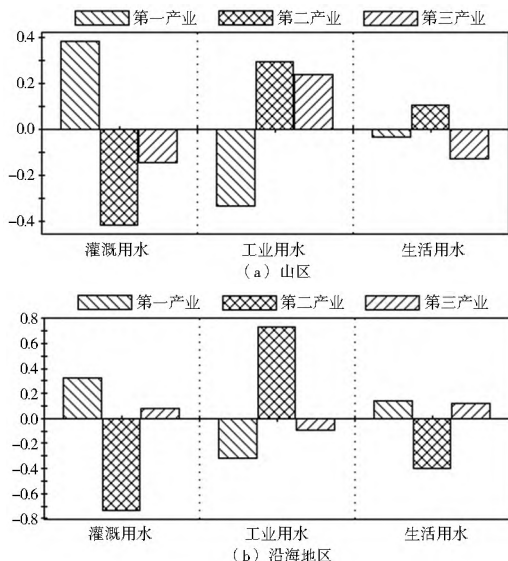


图3 山区和沿海地区回归系数直方图

Fig. 3 Regression coefficient histogram in the mountainous area and coastal region of Fujian Province

活用水对应的生产部门。

2.2 设区市相关性变化

产业结构一般经历“一二三”转为“二一三”,再到“二一三”,最终变为“三二一”的演化过程^[18]。用水结构一般从用水量大、附加值相对较低的农业用水逐步向高附加值的第二产业、第三产业转移^[9]。目前福建省九个设区市经济发展程度不一,产业结构差异较大,根据九个设区市用水结构与产业结构之间相关性差异,可将九个设区市划分为四种不同的类型:

第一类(厦门市):三大用水与三大产业均高度正相关,在有效因子载荷图中表现为产业和用水之间的距离均较近,几乎重叠在一起(图4)。从1998年到2010年,厦门市三大产业结构从5:52:43转化为1:50:49,用水结构由59:23:18转化为27:30:43^[16-17],产业和用水结构趋于成熟,使三大产业与用水结构之间具有较强的相关性。

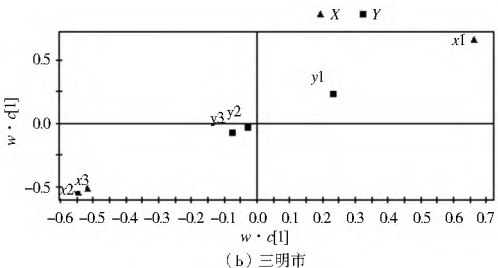
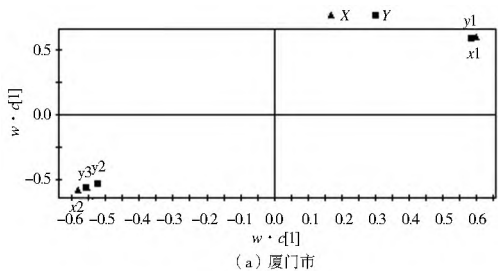


图4 厦门市和三明市回归因子载荷对比

Fig. 4 Regression factor loading diagram in Xiamen and Sanming

第二类(泉州市、福州市和莆田市):第一、二产业与相应

的用水结构均高度相关,第三产业与生活用水的相关性不显著。这些城市均为福建省东部经济较发达城市,工业在整个产业结构中占有重要地位,对用水结构影响显著。以泉州市为例,1998 年-2010 年第二产业从 52% 逐渐增长到 60%,工业用水从 27% 逐步增长到 55%;同时,第一产业和灌溉用水比重均出现显著下降,其中灌溉用水从 55% 下降到 29%;而第三产业和生活用水分别在 34% 和 15% 附近徘徊,没有出现显著的变化规律。

第三类(南平市、龙岩市和宁德市):第一产业与灌溉用水呈较强相关性,工业用水与第二产业相关性次之,第三产业与生活用水的相关性不显著。这些地区第一产业和灌溉用水在产业和用水结构中仍占有重要地位,农业生产占当地 GDP 的近 20%,却消耗了 60% 左右的水资源^[16-17]。以南平市为例,1998 年-2010 年第一产业从 29% 下降到 23%,灌溉用水从 83% 逐步下降到 64%。

第四类(三明市和漳州市):三大用水与三大产业相关性均不显著。在因子载荷图中三大用水趋近于原点(图 4),用水结构与产业结构相互关系均不显著,产业结构对用水结构解释能力不足,说明用水结构的变化可能不仅受产业结构的影响,还与其它因素有关。三明市为福建省老工业基地,1998 年-2010 年产业结构和用水结构呈波动变化,并没有明显的演化规律,这可能因为受到政策导向等因素的干扰所致。

3 结论

(1) 福建省沿海地区与山区用水结构与产业结构相关性存在显著差异。山区灌溉用水与第一产业相关性最强,而沿海地区工业用水与第二产业相关性最强,山区和沿海地区的生活用水与各产业相关性均不显著。

(2) 根据用水结构与产业结构之间相关性差异,可将福建省九个设区市划分为四类:第一类为厦门市,三大产业与三大用水均成高度相关;第二类包括泉州市、福州市和莆田市,第一、二产业与相应的用水结构均成高度相关,生活用水与第三产业的相关性不显著;第三类包括南平市、龙岩市和宁德市,仅灌溉用水与第一产业成较强相关性;第四类包括三明市和漳州市,三大用水与三大产业相关性均不显著。

参考文献(References):

- [1] 潘雄锋,刘凤朝,郭蓉蓉.我国用水结构的分析与预测[J].干旱区资源与环境,2008,22(10):11-14. (PAN Xiong-feng, LIU Feng-chao, GUO Rong-rong. Analysis and forecast of water utilization structure in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(10): 11-14. (in Chinese))
- [2] 范群芳,董增川,杜芙蓉.农业用水和生活用水效率研究与探讨[J].水利学报,2007(增刊):465-469. (FAN Qun-fang, DONG Zeng-chuan, DU Furong. Study of agriculture water and life water use efficiency[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007 (Suppl): 465-469. (in Chinese))
- [3] 郭磊,张士锋.北京市工业用水节水分析及工业产业结构调整对节水的贡献[J].海河水利,2004(3):55-58. (GUO Lei, ZHANG Shi-feng. Analysis of industrial waters and contribution of industrial structure adjustment to water saving In Beijing[J]. Haihe Water Resources, 2004(3): 55-58. (in Chinese))
- [4] 王红瑞,王岩,吴峙山,等.北京市用水结构现状分析与对策研究[J].环境科学,1994,16(2):31-34. (WANG Hong-rui, WANG yan, WU Shi-shan, et al. Analysis of the current structure of Beijing municipal water use and a study on the response strategy for water conservation [J]. Environmental Science 1994, 16(2): 31-34. (in Chinese))
- [5] 曹连海,陈南祥,徐建新.城市生活用水量预测的 PLS-ANN 模型[J].华中科技大学学报:城市科学版,2006,23(3):20-22. (CAO Lian-hai, CHEN Nan-xiang, XU Jian-xin. Model of network coupling with partial Least-Squares Method for urban life water quantity prediction[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2006, 23(3): 20-22. (in Chinese))
- [6] Hotlos, H. Variations in Water Consumption Observed in Some Municipalities in the Time Span of 1990 to 2008[J]. Ochrone srodwska, 2010, 32(3): 39-42.
- [7] 贾绍凤,张士锋,杨红,等.工业用水与经济发展的关系—用水库兹涅茨曲线[J].自然资源学报,2004,19(3):279-285. (JIA Shao-feng, ZHANG Shi-feng, YANG Hong, et al. Relation of industrial water use and economic development: water use Kuznets Curve[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(3): 279-285. (in Chinese))
- [8] 王玉宝,吴普特,赵西宁,等.我国农业用水结构演变态势分析[J].中国生态农业学报,2010,18(2):399-404. (WANG Yu-bao, WU Pu-te, ZHAO Xi-ning, et al. Development tendency of agricultural water structure in China[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2010, 18(2): 399-404. (in Chinese))
- [9] 刘晓霞,解建仓.山西省用水结构与产业结构变动关系[J].系统工程,2011,29(4):45-52. (LIU Xiao-xia, XIE Jian-cang. The interactive relationship between water consumption structure and industrial structure of Shanxi Province[J]. Systems Engineering, 2011, 29(4): 45-52. (in Chinese))
- [10] 张小军,张建云,贺瑞敏,等.区域用水结构演变规律与调控对策研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(2):61-65. (ZHANG Xiao-jun, ZHANG Jian-yun, HE Rui-min, et al. Study on the evolution law of water utilization structure and regulating approach in Yulin City[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(2): 61-65. (in Chinese))
- [11] 云逸,邹志红,王惠文.北京市用水结构与产业结构的成分数据回归分析[J].系统工程,2008,26(4):67-71. (YUN Yi, ZOU Zhi-hong, WANG Hui-wen. A regression model based on the compositional data of Beijing's water consumed structure and industrial structure[J]. Systems Engineering, 2008, 26(4): 67-71. (in Chinese))
- [12] 苏龙强,陈兴伟,徐宗学.福建省产业结构与用水结构回归分析[J].水资源研究,2012,21(1):154-160. (SU Long-qiang, CHEN Xing-wei, XU Zong-xue. Regression analysis on the relationship between water consumption structure and industrial structure in Fujian Province[J]. Journal of Water Resources Research, 2012, 21(1): 154-160. (in Chinese))
- [13] 张曼,吴佳斌.泉州市产业结构变化对用水结构演变的驱动分析[J].开发研究,2012,26(5):40-46. (ZHANG Man, WU Jia-bin. Quanzhou industrial structure change on water structure evolution driven analysis[J]. Research on Development, 2012, 26(5): 40-46. (in Chinese))

(下转第 605 页)

- 究[J]. 混凝土, 2010, 254(12): 111-113. (YANG Jur cheng, GUO Lei, HE Ding, et al. Study on concrete's temperature control measures for the inverted siphon project in winter[J]. concrete, 2010, 254(12): 111-113. (in Chinese))
- [10] 季日臣, 严娟, 苏小凤. 混凝土箱形渡槽日照高温下结构安全研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 90-92, 109. (JI Ri chen, YAN Juan, SU Xiaofeng. Structural safety research of concrete box aqueduct under solar radiayion with high temperature[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 90-92, 109. (in Chinese))
- [11] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. (ZHU Borfang. Thermal stress and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Water Power Press, 1998. (in Chinese))
- [12] 朱伯芳, 吴龙坤, 李玥, 等. 混凝土坝施工工期坝块越冬温度应力及表面保温计算方法[J]. 水利水电技术, 2007(8): 34-37. (ZHU Borfang, WU Longsheng, LI Yue, et al. The thermal stress and superficial thermal insulation of concrete dam under construction in winter in temperature control of cold regions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007(8): 34-37. (in Chinese))
- [13] 张晓飞, 陈尧隆, 李守义, 等. 寒冷地区混凝土坝表面保温效果研究[J]. 河北农业大学学报. 2010, 33(1): 98-103. (ZHANG Xiaofei, CHEN Yaolong, LI Shouyi, et al. A study of the effect of superficial insulation RCC dam in cold area[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2010, 33(1): 98-103. (in Chinese))
- [14] 毛松鹤. 混凝土箱形输水桥日照温度场及温度应力研究[J]. 山西建筑, 2012(33): 190-191. (MAO Songhe. The solar radiation temperature field and thermal stresses research of concrete box water bridge [J]. Shanxi Architecture, 2012(33): 190-191. (in Chinese))

(上接第 596 页)

- [14] 蔡健民. 福建水资源的特点与面临的挑战[J]. 水利科技, 2003, 25(3): 1-3. (CAI Jianmin. Fujian water characteristics and challenges[J]. Hydraulic Science and Technology, 2003, 25(3): 1-3. (in Chinese))
- [15] 王惠文, 黄薇. 成分数据的线性回归模型[J]. 系统工程, 2003, 21(2): 102-106. (WANG Huiwen, HUANG Wei. A simple linear regression model based on the compositional data systems engineering[J]. 2003, 21(2): 102-106. (in Chinese))
- [16] 福建省水利厅. 福建省水资源公报[R]. 2010. (Ministry of water resources in Fujian province. Water Resources Bulletin [R]. 2010. (in Chinese))
- [17] 福建省统计局. 福建统计年鉴[G]. 中国统计出版社, 2010. (Department of statistics of Fujian province. Statistical Yearbook in Fujian province[R]. China statistics press, 2010. (in Chinese))
- [18] 陈佳贵, 黄群惠. 工业发展、国情变化与经济现代化战略[J]. 中国社会科学, 2005(4): 56-61. (CHEN Jiagui, HUANG Qunhui. Industrial development, conditions change and economic modernization strategy [J]. Social Sciences in China. 2005, 25(4): 56-61. (in Chinese))

(上接第 600 页)

- [27] 张俊然, 许强, 孙德安. 吸力历史对非饱和土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2810-2814. (ZHANG Juran, XU Qiang, SUN De'an. Effect of suction history on mechanical behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2810-2814. (in Chinese))
- [28] Bocking K A, Fredlund D G. Limitations of the axis translations technique[C]// Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils. Denver: ASCE, 1980: 117-135.
- [29] 赵成刚, 李舰, 刘艳, 等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1825-1831. (ZHAO Chenggang, LI Jian, LIU Yan, et al. Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1825-1831. (in Chinese))
- [30] 谢定义, 冯志焱. 对非饱和土有效应力研究中若干基本观点的思辨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 170-173. (XIE Dingyi, FENG Zhiyan. Consideration of some fundamental view points in studying effective stress of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 170-173. (in Chinese))