

类砂岩相似材料配合比方案试验研究

申艳军¹, 荣腾龙², 杨更社¹, 袁延召¹, 杨 阳¹, 余 翔¹

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:以白垩系中粒砂岩为模拟对象,采用细砂、高强水泥、细石膏、铁粉、蒸馏水为基础原料配制类砂岩相似材料。根据正交设计试验方法,确定以水灰比、骨料与水泥质量比、铁粉掺入量为控制因素的3因素3水平正交设计方案,利用极差敏感分析法分析以上因素对饱和密度、声波波速、导热系数、单轴抗压强度的影响。试验结果表明:骨料与水泥质量比对饱和密度、声波波速和单轴抗压强度起主导作用,且随着骨料与水泥质量比的增大,饱和密度及声波波速均显著降低;铁粉掺入量对导热系数起主导作用,掺入量增大,导热系数增加明显。通过多元线性回归分析,推算得到类砂岩材料的最优质量配合比方案,即水灰比0.53,骨料与水泥质量比0.45,掺入物质量分数4.2%,根据该配合比制作的类砂岩材料与白垩系砂岩各项参数值非常接近。

关键词:类砂岩相似材料;正交试验;敏感性分析;多元线性回归;最优质量配合比

中图分类号:TU458 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)04-0075-05

Experimental study on ratio of quasi-sandstone similar material//SHEN Yanjun¹, RONG Tenglong², YANG Gengshe¹, YUAN Yanzhao¹, YANG Yang¹, YU Xiang¹(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the middle grained sandstone in the Cretaceous as simulation object, fine sand, high strength cement, fine gypsum, iron powder and distilled water were used as raw materials to configure the quasi-sandstone similar samples. According to the orthogonal experiment method, the design scheme was determined with the water-cement ratio, the ratio of aggregate to cement and the iron powder content being controlling factors, and the influence of these factors on saturation density, acoustic wave velocity, heat conduction coefficient and uniaxial compressive strength was analyzed with the range sensitive analysis method. Experiment results show that the ratio of aggregate to cement plays a leading role in saturation density, acoustic wave velocity and uniaxial compressive strength. The saturation density and acoustic wave velocity obviously decrease with the increase of the ratio of aggregate to cement. Meanwhile, the iron powder content has a governing effect on the thermal conduction coefficient, and the thermal conductivity obviously increases with the increase of the iron powder content. Through multiple linear regression analysis, the optimal mass ratio scheme of the sandstone material was deduced, which meant the water-cement ratio was 0.53, the ratio of aggregate to cement was 0.45 and the iron powder content was 4.2%. The physics and mechanics parameters of the quasi-sandstone using this similar material ratio are very close to that of sandstone in the Cretaceous.

Key words: quasi-sandstone similar material; orthogonal experiment; sensitivity analysis; multiple linear regression; optimal mass ratio

因制作方便、成本低廉、尺度较小、变量可控等诸多优点,以相似理论和因次分析为依据的相似模拟试验近年来得到广泛应用,相似模拟试验可以人为地控制和改变试验条件,以确定其中因素对所研究问题的影响规律^[1-2]。在矿山压力、坝体渗流、边坡失稳、围岩分类等方面的研究中,多采用相似材料进行模拟试验。相似模拟试验中相似材料能否真正

模拟和体现原型材料的特性尤为重要。王崇革等^[3]根据石膏、碳酸钙、砂子和水的不同配合比制作三维模型,探究煤层开采过程中上覆岩层的运动和地表沉陷情况;杜时贵等^[4]利用高强水泥、硅粉、高效减水剂、标准砂和水研制出满足结构面抗剪强度试验要求的相似材料;陈智强等^[5]利用细硅砂、碳酸钙和石膏,按照不同的配合比分别模拟花岗岩、

闪长岩和粗玄岩,进行了深埋隧道围岩岩爆特性研究;武伯弢等^[6]通过重晶石粉、石膏、细砂、洗衣液和水为原材料模拟Ⅳ级围岩,分析了隧道围岩的力学特性及稳定性;刘德军等^[7]利用精铁粉、石英砂、重晶石粉、松香酒精溶液配制出盐岩相似材料;黄彦华等^[8]以砂质泥岩为模拟对象,使用石膏、水泥、石英砂配制相似材料,并进行了力学特性试验研究;张强勇等^[9]利用铁矿粉、重晶石粉、石英砂、石膏粉和松香酒精溶液拌和研制出铁晶砂胶结混合材料(IBSCM);董金玉等^[10]在文献[9]的基础上,通过正交试验法分析了原材料对相似材料各项参数指标的影响规律及敏感性;史小萌等^[11]采用水泥、石膏、石英砂、重晶石粉和水配制出模拟煤层岩体的相似材料,并分析了各种因素对相似材料的影响。

目前,关于类岩石材料的研究从硬岩到软岩俱有,涉及多种工程模拟对象,但以砂岩为研究对象进行模拟的配合比试验较少,且以往研究主要考虑模型与原型在物理参数和力学特性方面的相似性,几乎未考虑两者间导热性能方面的相似性。针对以上问题,笔者以白垩系中粒砂岩为模拟对象,首先确定基础配制原材料,而后设计水灰比、骨料与水泥质量比、掺入物质量分数的3因素3水平正交设计方案,并利用极差敏感分析法分析各因素敏感程度。最后,基于分析结果,采用多元线性回归分析确定相似材料最优质量配合比。根据本研究成果可批量制作适用于高低温环境下相关物理力学特性研究的类砂岩试样。

1 材料选取及配合比设计

分析国内近些年类岩石材料的配合比研究^[3-15]可以看出,以往研究多以砂子、水泥、碳酸钙、石膏、重晶石粉、水及外加剂等为原材料进行配制。综合考虑各种原材料的功能作用,本文骨料选用1.25 mm 筛子筛分后的细砂,胶结材料选用高强白水泥(河北唐山北极熊牌 CSA825 硫铝酸盐超高强水泥),并采用普通石膏增强其胶结效果,水采用蒸馏水,另外,为考虑类砂岩材料的导热性能,还加入还原铁粉进行调节,细度控制在35 μm 之内。模拟对象为白垩系中粒砂岩,其各项物理力学参数见表1。

表 1 白垩系中粒砂岩物理力学参数测试值				
指标	饱和密度/ (g · cm ⁻³)	声波波速/ (m · s ⁻¹)	导热系数/ (W · (m · K) ⁻¹)	单轴抗压 强度/MPa
取值范围	2.16 ~ 2.25	1588 ~ 2325	1.355 ~ 2.249	19.80 ~ 37.70
平均值	2.20	1878	1.775	31.02
标准差	0.035	286	0.376	3.80

为实现材料在物理力学参数上的全面相似性,参考前人配合比方案。基于总质量相等控制法,采

用正交试验法进行配合比设计。分别以水灰比(A)、骨料与水泥质量比(B)、掺入物质量分数(C)作为正交设计3个因素,每个因素设置3个水平,完成多组不同配合比方案设计,见表2和表3。

表 2 类砂岩相似材料正交设计水平			
因素水平	A	B	C/%
1	0.45	1	2.5
2	0.50	1/3	5.0
3	0.55	0	7.5

表 3 类砂岩相似材料配合比设计方案			
试验方案	A	B	C/%
1	0.45	1	2.5
2	0.45	1/3	5.0
3	0.45	0	7.5
4	0.50	1	5.0
5	0.50	1/3	7.5
6	0.50	0	2.5
7	0.55	1	7.5
8	0.55	1/3	2.5
9	0.55	0	5.0

2 试样制作及参数测试

制样时,将称量好的砂子、水泥、石膏、铁粉倒入搅拌机中搅拌均匀后添加蒸馏水。将搅拌完成的物料装入有机玻璃模具盒制样,制样过程中需将模具盒放在混凝土振动台上振捣,以防试件中产生气泡及孔洞。试样制作完成1 d 后拆模进行养护,待试件养护28 d 后,进行各项参数的测定。相关制样模具及成品试件见图1。

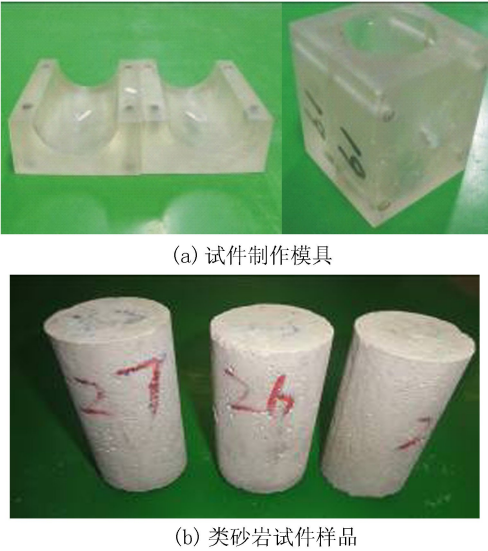


图 1 制样模具及成品试件

相似判定指标的选用上,物理参数指标选用饱和密度、声波波速;热力学参数指标选用导热系数;力学参数指标选用单轴抗压强度。首先根据 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》中的相关规

定,对试件的饱和密度和声波波速进行测定;为了分析类砂岩材料的导热性能,利用 HOT Disk 热常数分析仪对类砂岩材料的导热系数进行测定;利用液压万能试验机对类砂岩试件的单轴压缩强度进行测定。类砂岩材料的各项参数测试结果如表 4 所示。

表 4 类砂岩材料各项参数测试结果

试验方案	饱和密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	声波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	单轴抗压强度/MPa
1	2.054	1576	1.643	16.75
2	2.171	1693	1.735	21.54
3	2.281	1754	1.803	29.93
4	2.158	1603	1.967	23.87
5	2.222	2026	1.855	28.98
6	2.241	1857	1.579	35.44
7	2.176	1805	1.926	26.59
8	2.201	1698	1.732	32.87
9	2.257	2097	1.811	39.77

由表 4 可见,类砂岩材料的饱和密度为 2.054 ~ 2.281 g/cm^3 ,声波波速为 1576 ~ 2097 m/s ,导热系数为 1.579 ~ 1.967 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,单轴抗压强度为 16.75 ~ 39.77 MPa。对比表 1 与表 4 可以看出,9 组配合比方案下类砂岩材料的各项参数都与白垩系砂岩较为接近,可作为相似材料的基础配合比做进一步计算分析。

3 试验结果的敏感性分析

极差敏感分析法是采用每一因素的极差来分析问题,极差大小反映了各因素在不同水平变动情况下对评价指标的影响强弱程度,是一种高效处理多因素灵敏度分析问题的可靠计算方法。采用敏感分析法能够满足不同配合比方案多因素灵敏性分析的要求。

3.1 饱和密度敏感性分析

计算影响类砂岩试件饱和密度的各因素水平下的均值和极差,并绘制图 2。从图 2 可以看出,骨料与水泥质量比(B)因素的极差最大,其次是掺入物质量分数(C)因素,最后是水灰比(A)因素,各因素对饱和密度影响的敏感性排序为 $B > C > A$ 。

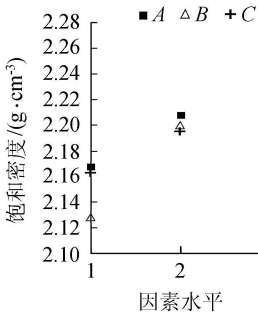


图 2 饱和密度敏感性直观分析

可见,对饱和密度起主导作用的是骨料与水泥质量比,对照表 2 和图 2 可知,随着骨料与水泥质量

比的增大,饱和密度显著降低。

3.2 声波波速敏感性分析

计算影响类砂岩试件声波波速的各因素水平下的均值和极差,绘制图 3。从图 3 可以看出,骨料与水泥质量比(B)的极差最大,其次是水灰比(A),最后是掺入物质量分数(C),各因素对声波波速影响的敏感性排序为 $B > A > C$ 。由此可见,对声波波速起主导作用的是骨料与水泥质量比,且随着骨料与水泥质量比的增大,声波波速降低。因此认为骨料含量对于试件整体波速穿透性能的提升具有控制性影响。

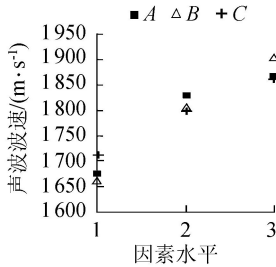


图 3 声波波速敏感性直观分析

3.3 导热系数敏感性分析

计算影响类砂岩试件导热系数的各因素水平下的均值和极差,并绘制图 4。从中可以看出,掺入物质量分数(C)的极差最大,其次是骨料与水泥质量比(B),最后是水灰比(A),各因素对声波波速影响的敏感性排序为 $C > B > A$ 。由此可见,对导热系数起主导作用的是掺入物质量分数,且随铁粉掺入量的增大,试样导热系数明显增大。掺入铁粉对提升试件导热性能的影响显著,该结论对于指导类砂岩材料热力学参数配合比具有重要意义。

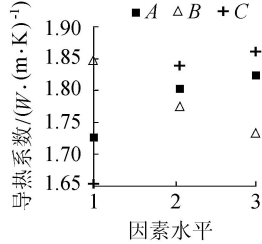


图 4 导热系数敏感性直观分析

3.4 单轴抗压强度敏感性分析

计算影响类砂岩试件单轴抗压强度的各因素水平下的均值和极差,见图 5。从图 5 可以看出,骨料与水泥质量比(B)的极差最大,其次是水灰比(A),最后是掺入物质量分数(C),各因素对单轴抗压强度影响的敏感性排序为 $B > A > C$ 。可见,对试件单轴抗压强度起主导作用的是骨料与水泥质量比。同时,水灰比对于单轴抗压强度影响也较为显著,而掺入物质量分数的影响较小,说明对于类砂岩材料强度相似模拟,重点在于对骨料与水泥质量比及水灰比的合理控制,掺入铁粉对强度提升的效果不显著。

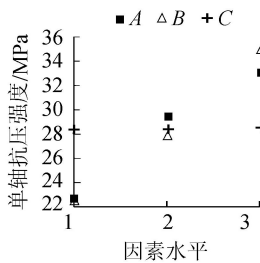


图5 单轴抗压强度敏感性直观分析

4 最优质量配合比选取

结合表3和表4中的数据进行多元线性回归分析,设基础自变量水灰比、骨料与水泥质量比、掺入物质量分数分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 ;考虑回归方程秩数,选择饱和密度 Y_1 (代表物理参数)、导热系数 Y_2 (代表热力学参数)、单轴抗压强度 Y_3 (代表力学参数)为因变量,以声波波速 Y_4 作为验证值进行计算结果的验算,可得线性回归拟合方程为

$$\begin{cases} Y_1 = 1.98 + 0.43X_1 - 0.13X_2 + 0.012X_3 \\ Y_2 = 1.04 + 0.96X_1 + 0.11X_2 + 0.042X_3 \\ Y_3 = -18.09 + 103.37X_1 - 11.99X_2 + 0.03X_3 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,在已知白垩系砂岩的饱和密度、导热系数、单轴抗压强度的情况下,可推算出相似材料配合比中的水灰比、骨料与水泥质量比、掺入物质量分数。将表1中各参数的平均值,即 $Y_1=2.20\text{ g/cm}^3$ 、 $Y_2=1.775\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、 $Y_3=31.02\text{ MPa}$ 代入式(1)求得 $X_1=0.53$ 、 $X_2=0.45$ 、 $X_3=4.17\%$ 。将计算结果代入由表3、表4拟合分析得到的声波波速计算公式:

$$Y_4 = 782.534 + 1923.33X_1 - 237.762X_2 + 30.267X_3 \quad (2)$$

由式(2)得出 $Y_4=1818.7\text{ m/s}$,与砂岩实测的声波波速平均值 1878 m/s 非常接近,可认为该计算结果满足要求。

根据计算得出的相似材料配合比,并考虑实际操作中材料配合比的可实现性,综合确定类砂岩材料的最优质量配合比为水灰比0.53、骨料与水泥质量比0.45、掺入物质量分数4.2%。基于以上配合比,重新制作类砂岩材料并测定其各项参数,并将测试结果与白垩系砂岩进行比较(表5)。由此可见,基于最优质量配合比制作出的类砂岩材料与白垩系砂岩的各项参数值非常接近,完全可以模拟白垩系砂岩的物理力学及导热性能。

表5 白垩系中粒砂岩与类砂岩材料参数对比

材 料	饱和密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	单轴抗压 强度/MPa
砂 岩	2.20	1878	1.775	31.02
相似材料	2.18	1824	1.806	26.24

5 结 论

a. 以砂子、水泥、石膏、铁粉、蒸馏水为原料模拟白垩系砂岩材料,根据正交设计试验方法确定出以水灰比、骨料与水泥质量比、掺入物质量分数为控制因素的3因素3水平正交设计方案,得到了9组配合比方案下相似材料的饱和密度、声波波速、导热系数、单轴抗压强度。

b. 对饱和密度与声波波速起主导作用的是骨料与水泥质量比,且随着骨料与水泥质量比的增大,饱和密度值及声波波速均明显降低;对导热系数起主导作用的是掺入物质量分数,随着铁粉掺入量的增大,材料的导热系数增加明显;骨料与水泥质量比对单轴抗压强度起主导作用,同时,水灰比对单轴抗压强度的影响也十分显著。

c. 类砂岩材料的最优质量配合比为水灰比0.53,骨料与水泥质量比0.45,掺入物质量分数4.2%。依据最优质量配合比制作的类砂岩材料与白垩系砂岩各项参数值非常相近。

参考文献:

[1] 左东启. 相似理论:20世纪的演进和21世纪的展望[J]. 水利水电科技进展,1997,17(2): 12-17. (ZUO Dongqi. Development of the theory of similarity: its progress in the 20th century & new trends in the 21st century[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,1997,17(2): 12-17. (in Chinese))

[2] 李晓红,卢义玉,康勇,等. 岩石力学实验模拟技术[M]. 北京:科学出版社,2007.

[3] 王崇革,王莉莉,宋振骥,等. 浅埋煤层开采三维相似材料模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(增刊2): 4926-4929. (WANG Chongge, WANG Lili, SONG Zhenqi, et al. Testing study on 3D similar material simulation for shallow coal swam mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Sup2): 4926-4929. (in Chinese))

[4] 杜时贵,黄曼,罗战友,等. 岩石结构面力学原型试验相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(11): 2263-2270. (DU Shigui, HUANG Man, LUO Zhanyou, et al. Similar material study of mechanical prototype test of rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2263-2270. (in Chinese))

[5] 陈智强,张永兴,周检英. 基于数字散斑技术的深埋隧道围岩岩爆倾向相似材料试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(增刊1): 141-148. (CHEN Zhiqiang, ZHANG Yongxing, ZHOU Jianying. Experimental study of deep tunnel surrounding rock rockburst proneness with similarity material simulating method based on digital

- speckle correlation technique [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Sup1): 141-148. (in Chinese))
- [6] 武伯弢, 朱合华, 徐前卫, 等. IV级软弱围岩相似材料的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34 (增刊1): 109-116. (WU Batao, ZHU Hehua, XU Qianwei, et al. Experimental study of similar material for weak surrounding rock mass of class IV [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (Sup1): 109-116. (in Chinese))
- [7] 刘德军, 吕晶, 张强勇, 等. 具有流变特性的盐岩相似材料的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (10): 1590-1595. (LIU Dejun, LÜ Jing, ZHANG Qiangyong, et al. Development and application of salt rock-similar materials with rheological property [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (10): 1590-1595. (in Chinese))
- [8] 黄彦华, 杨圣奇, 刘相如. 类岩石材料力学特性的试验及数值模拟研究[J]. 实验力学, 2014, 29 (2): 239-249. (HUANG Yanhua, YANG Shengqi, LIU Xiangru. Experimental and numerical study on the mechanical characteristics of rock-like materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29 (2): 239-249. (in Chinese))
- [9] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29 (8): 2126-2130. (ZHANG Qiangyong, LI Shucai, GUO Xiaohong, et al. Research and development of new typed cementations geotechnical similar material for iron crystal sand and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (8): 2126-2130. (in Chinese))
- [10] 董金玉, 杨继红, 杨国香, 等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配合比试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37 (1): 44-49. (DONG Jinyu, YANG Jihong, YANG Guoxiang, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (1): 44-49. (in Chinese))
- [11] 史小萌, 刘保国, 肖杰. 水泥和石膏胶结相似材料配合比的确定方法[J]. 岩土力学, 2015, 36 (5): 1357-1362. (SHI Xiaomeng, LIU Baoguo, XIAO Jie. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (5): 1357-1362. (in Chinese))
- [12] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水力发电学报, 2004, 23 (1): 48-51. (MA Fangping, LI Zhongkui, LUO Guangfu. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23 (1): 48-51. (in Chinese))
- [13] 左保成, 陈从新, 刘才华, 等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25 (11): 1805-1808. (ZUO Baocheng, CHEN Congxin, LIU Caihua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (11): 1805-1808. (in Chinese))
- [14] 李明田, 李术才, 杨磊, 等. 类岩石材料中表面裂纹扩展模式的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24 (1): 21-26. (LI Mingtian, LI Shucai, YANG Lei, et al. Experimental study of the surface crack propagation mode in rock-like materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24 (1): 21-26 (in Chinese))
- [15] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31 (11): 3661-3666. (PU Chengzhi, CAO Ping, ZHAO Yanlin, et al. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (11): 3661-3666. (in Chinese))
- (收稿日期: 2015-06-08 编辑: 骆超)

(上接第 69 页)

- [7] 李航. 统计学习方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [8] 林开平. 人工神经网络的泛化性能与降水预报的应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [9] XU Yejun, WANG Huimin. The induced generalized aggregation operators for intuitionistic fuzzy sets and their application in group decision making [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12 (3): 1168-1179.
- [10] LI Xuezhen, XU Lizhong, MA Zhenli, et al. Quotient space based flood risk analysis [J]. International Review on Computers and Software, 2012, 7 (1): 344-352.
- [11] BENGIO Y, COURVILLE A, VINCENT P. Representation learning: a review and new perspectives [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35 (8): 1798-1828.
- [12] WU Y, HWANG K, YUAN Y, et al. Adaptive workload prediction of grid performance in confidence windows [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems Distrib, 2010, 21 (7): 925-938.
- [13] WANG H M, CHEN Z S, SU S L. Optimal pricing and coordination schemes for the eastern route of the south-to-north water diversion supply chain system in China [J]. Transportation Journal, 2012, 51 (4): 487-505.
- [14] CHEN Zhisong, WANG Huimin, QI Xiangtong. Pricing and water resource allocation scheme for the south-to-north water diversion project in China [J]. Water Resources Management, 2013 (27): 1457-1472.
- [15] CHEN T Y, KUO F C, MERKEL R. On the statistical properties of the *F*-measure [C] // Proceeding 4th International Conference on Quality Software. Braunschweig, Germany: QSIC, 2004: 505-513.
- (收稿日期: 2015-06-23 编辑: 熊水斌)