

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.005

基于 PLSR 的中山市水资源压力演变特征与趋势

郭卫华^{1,2,3}, 周永章²

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 2. 中山大学地球环境与地球资源研究中心, 广东 广州 510275;
3. 中山市环境保护局, 广东 中山 528400)

摘要:以珠江三角洲腹地城市中山市为研究目标,分析城市社会经济发展多个指标对水资源压力的影响,并利用偏最小二乘回归(PLSR)方法对 1991 年以来中山市水资源压力的演变特征和趋势进行分析和预测。结果表明,节水水平和第三产业发展是中山市水资源压力的主要影响因素。1991—2011 年间,中山市的水资源压力整体上呈先降后升的变化趋势,并将可能在今后 20 年的时间内保持上升趋势。中山市水资源压力与人均 GDP 之间则呈现出 N 形环境库尔兹涅曲线特征,表明随着经济发展到一定程度,中山市水资源压力将有所下降,但同时也面临着重新上升的压力。
关键词:水资源压力;偏最小二乘回归方法;珠江三角洲;环境库尔兹涅曲线
中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2014)01-0023-05

Evolution characteristics and trend of water resources stress of Zhongshan City based on PLSR method

GUO Weihua^{1, 2, 3}, ZHOU Yongzhang²

(1. Geography and Planning School, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Center for Earth Environment and Resources, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Zhongshan Environmental Protection Bureau, Zhongshan 528400, China)

Abstract: Taking Zhongshan City, a hinterland city in the Pearl River Delta, as a case study, the influence of urban socioeconomic development indicators on the water resources stress was examined. The partial least squares regression method was used to analyze the evolution characteristics and predict the trend of the water resources stress of Zhongshan City since 1991. The results show that the water conservation level and the development of the tertiary industry were the principal factors influencing the water resources stress of the city. During the period from 1991 to 2011, the water resources stress of the city first decreased, then increased on the whole, and may maintain an increasing trend over the coming 20 years. The relationship between the water resources stress and per-capita GDP of Zhongshan City was characterized by an N-shaped environmental Kuznets curve, indicating that when the economy develops to a certain extent, the water resources stress of the city may decrease, but, meanwhile, rising pressure on water resources in Zhongshan City may still exist.

Key words: water resources stress; partial least squares regression method; Pearl River Delta; environmental Kuznets curve

水资源压力是指在一定的时空尺度和自然地理背景下,人类社会经济活动对其区域内水资源和水生态环境所产生的影响和冲击。水资源压力受区域人口、社会、经济发展所驱动,但又在一定程度上,随着科学技术和城市管理水平的提高而得到缓解。因此,水资源压力是一个由水资源-社会经济-生态环境等方面因素综合作用的结果^[1-2]。

近年来,国内外学者基于不同的研究区域,使用

基金项目:广东省科技计划项目(2009B030801003)

作者简介:郭卫华(1971—),男,博士研究生,研究方向为资源环境一体化与区域可持续发展。E-mail: guoweihua01@sina.com

不同的评价方法从水资源总量、区域水资源安全、水资源承载力等不同角度对水资源压力开展研究,建立了相应的指标体系和评价方法^[3-5]。但目前关于区域水资源压力的诸多研究中,侧重点在于评价指标体系的构建^[4];而笔者认为,为深入研究区域经济发展过程各影响因素与水资源压力的内在联系,需解决以下两个问题:①如何实现区域水资源压力的定量化评价;②如何确定不同影响因素对水资源压力的贡献。

笔者以珠江三角洲中山市 1991—2011 年的相关数据为基础,提出基于城市水资源开发强度-水环境污染相结合的水资源压力指标,并利用偏最小二乘回归(PLSR)方法,研究人口、社会、经济、水资源及环境管理水平等因素对城市水资源压力的影响,以期为区域水资源管理提供参考。

1 研究对象及方法

1.1 研究区域概况

中山市地处广东省中南部,珠江口西岸,全市行政区面积为 1 800. 14 km²,多年平均水资源总量为 17. 38 亿 m³。尽管位于雨量充沛的珠三角河网地区,但由于社会经济的迅猛发展和人口的快速增加,中山市的人均水资源量仅为 1 100 m³/a,低于全国平均水平。此外,中山市水资源年内分配不均,汛期(4—10 月)降雨量约占全年的 85%,且由于地处珠江出海口,每年枯水期都要遭受咸潮上溯侵袭,频繁出现局部季节性淡水资源短缺的现象。

表 1 中山市 1991—2011 年水资源压力相关指标数据

年份	x_1 /万人	x_2 /万元	x_3 /万元	x_4 /万元	x_5 /m ³	x_6 /(kg·万元 ⁻¹)	y
1991	133. 14	207 159	929 597	237 363	734	6. 47	11 983
1992	141. 91	235 062	1 079 457	324 240	697	7. 37	17 900
1993	151. 25	247 139	1 387 901	456 506	655	4. 74	13 121
1994	161. 21	266 336	1 936 860	603 569	619	2. 62	9 806
1995	171. 83	291 967	3 098 684	750 177	421	1. 99	14 509
1996	183. 14	314 703	4 185 592	826 474	511	2. 29	9 908
1997	195. 20	327 622	3 679 577	950 610	464	1. 77	9 496
1998	208. 05	346 797	4 297 300	1 089 262	403	1. 68	9 819
1999	221. 75	35 8531	5 109 500	1 224 825	366	0. 93	6 536
2000	236. 47	370 019	5 807 820	1 410 900	441	1. 10	6 306
2001	238. 30	38 4171	6 271 019	1 591 873	617	0. 94	8 657
2002	240. 13	422 851	7 381 205	1 794 679	707	0. 83	11 335
2003	241. 98	451 807	9 449 326	2 033 614	568	0. 72	13 067
2004	242. 73	494 861	11 580 754	2 415 971	719	0. 90	17 940
2005	243. 46	529 072	15 442 858	3 155 871	616	0. 80	19 815
2006	254. 86	588 532	20 214 892	3 807 987	693	0. 75	27 391
2007	268. 68	654 056	25 002 348	4 768 617	691	0. 95	41 379
2008	281. 95	753 596	30 501 894	5 623 882	730	0. 74	43 744
2009	296. 53	777 737	36 320 469	6 167 299	731	0. 62	51 056
2010	312. 27	868 204	41 645 365	7 258 108	619	0. 49	36 534
2011	314. 23	1 003 700	63 146 600	8 194 403	589	0. 36	35 623

注:相关数据来源于各年度中山市统计年鉴、中山市水资源公报、中山市环境统计数据。

1.2 评价指标

1.2.1 水资源压力指标

在珠三角地区,水资源供需压力和水质性缺水是水资源利用中的两个主要问题,水资源压力集中体现在由水量—水质所导致的各种问题中。笔者以年度水资源开发强度和入河污染物等标污染负荷的乘积作为区域水环境压力的表征指标,以实现水环境压力的定量化评价。水资源压力指标 y 的计算公式为

$$y = EP_n \tag{1}$$

式中: E 为水资源开发强度(年度总取水量与年度水资源总量之比); P_n 为入河污染物等标污染负荷,其计算方法见文献[6],参评项目及标准分别为:COD(10 mg/L)、Cr⁶⁺(0. 05 mg/L)、氰化物(0. 1 mg/L)、石油类(0. 5 mg/L)、NH₃-N(0. 5 mg/L)。

1.2.2 水资源压力的驱动指标

水资源压力驱动指标应全面、综合反映区域内社会经济发展状况对水资源系统的影响,因此按照区域性(能够体现珠三角地区城市水资源情势特征和利用特点)、规范性(指标科学、规范,在统计、水利部门中得到广泛使用)、可量化(便于定量化,为进一步的数据分析提供条件)原则,将以下指标作为水资源压力的驱动指标:①社会发展压力指标包括:总人口 x_1 ,农林牧渔业总产值 x_2 ,工业总产值 x_3 ,第三产业生产总值 x_4 ;②用水特征指标,即人均用水量 x_5 ;③环境管理指标,即单位产值 COD 排放量 x_6 。中山市 1991—2011 年各相关指标年度统计值见表 1。

1.3 PLSR 模型算法

由于城市水资源压力各指标之间通常存在相关性,利用传统的最小二乘法建立多元线性回归方程常会破坏参数估计,扩大模型误差,难以保证预测模型的精确性和可靠性^[7-8],因此本研究中选择 PLSR 方法以解决回归方程中变量的多重共线性问题。PLSR 方法是一种基于高维投影思想的非参数回归方法,通过提取主成分能很好地概括自变量系统,可较好地解释因变量,并排除系统中的噪声干扰^[9]。近年来,PLSR 方法在城市水资源承载能力研究、城市生活用水量预报等方面得到良好的应用^[10-11]。PLSR 方法的原理是:设有单因变量 y 和 p 个自变量 $x_1, x_2, \dots, x_p$, 观测 n 个样本点,构成自变量与因变量的数据矩阵 $X=(x_{ij})$, 其中 $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, p$ 和 $Y=y_1, y_2, \dots, y_n$ 。PLSR 分别在 X 和 Y 中提取成分 t_1 和 u_1 , 这两个主成分分别为 X 和 Y 的线性组合, 它们应满足两个要求:① t_1 和 u_1 应尽可能大地提取它们各自原变量系统中的变异信息;② t_1 和 u_1 的相关程度能够达到最大。PLSR 方法的具体步骤如下^[9, 11]:

步骤 1: 标准化处理 X 和 Y , 得到的标准化矩阵, 分别记为 E_0 和 F_0 。

步骤 2: 从 F_0 中提取一个成分 $u_1=F_0c_1, \|c_1\|=1$ 。由于 F_0 只是一个变量, 所以 c_1 为常数。同时从 E_0 中提取一个成分 $t_1, t_1=E_0w_1, w_1$ 是第一主轴, $w_1=E_0^T F_0/\|E_0^T F_0\|$, 并且 $\|w_1\|=1$ 。分别求 E_0 和 F_0 对 t_1 的两个回归方程:

$$E_0=t_1p_1^T+E_1 \tag{2}$$

$$F_0=t_1r_1^T+F_1 \tag{3}$$

其中, 回归系数向量为

$$p_1=\frac{E_0^T t_1}{\|t_1\|^2} \tag{4}$$

$$r_1=\frac{F_0^T t_1}{\|t_1\|^2} \tag{5}$$

步骤 3: 用残差矩阵 E_1 和 F_1 取代 E_0 和 F_0 , 用同样方法求第 2 个 w_2 轴和 c_2 以及第 2 个成分 u_2 和 t_2 , 如此计算下去, 如果进行了 m 次运算, 则会有

$$E_0=t_1p_1^T+t_2p_2^T+\dots+t_m p_m^T+E_m \tag{6}$$

$$F_0=t_1r_1^T+t_2r_2^T+\dots+t_m r_m^T+F_m \tag{7}$$

由于 $t_1, t_2, \dots, t_m$ 均可表示成 $E_{01}, E_{02}, \dots, E_{0p}$ 的线性组合, 因此, 上式可还原成 F_0 关于 E_{0p} 的回归方程形式, 即

$$F_0=\alpha_1E_{01}+\alpha_2E_{02}+\dots+\alpha_pE_{0p} \tag{8}$$

在 PLSR 方法中确定主成分个数的常用方法有舍一交叉验证方法、分批交叉验证方法、分裂样本交叉验证方法、随机样本交叉验证方法等^[9, 12]。在本文

中采用舍一交叉验证方法确定主成分的选取个数。

2 结果与讨论

2.1 水资源压力驱动指标多重相关性诊断

本研究中利用方差膨胀因子对 $x_1 \sim x_6$ 的相关数据进行多重相关性诊断。自变量 x_j 的方差膨胀因子记为 S'_{VIF} , 其表达式为

$$S'_{VIF}=(1-R_j^2)^{-1} \tag{9}$$

式中, R_j^2 为以 x_j 为自变量时对其他自变量回归的复测定系数。

若最大的 $S'_{VIF}>10$, 则认为自变量之间存在高度的相关现象^[9]。本文中水资源压力驱动指标的多重相关性诊断结果见表 2。由表 2 可见, 最大的 $S'_{VIF}=401>10$, 自变量间存在高度的多重相关性。

表 2 水资源压力驱动指标的多重相关性诊断结果

驱动指标	显著性检验		共线性统计量	
	T	Sig 值	容差	S'_{VIF}
x_1	-1.604	0.131	0.032	31.463
x_2	0.371	0.716	0.002	401.863
x_3	-2.363	0.033	0.015	66.425
x_4	2.164	0.048	0.005	194.354
x_5	0.693	0.500	0.460	2.175
x_6	0.291	0.775	0.121	8.244

2.2 PLSR 分析

根据上述原理及步骤, 通过统计软件 SAS 9.1 for Windows(SAS Institute Inc.) 实现数据的 PLSR 分析。经过数据标准化、提取成分并作交叉有效性判别, 计算结果提取了 2 个主成分 t_1 和 t_2 , 这两个主成分解释了原自变量系统中 92.47% 的信息, 同时解释了因变量系统中 80.89% 的变异信息, 显示模型精度较好, 其模型效应负荷量及标准偏回归系数见表 3。

表 3 模型效应负荷量及标准偏回归系数

主成分	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
t_1	0.450	0.480	0.463	0.477	0.187	-0.300
t_2	-0.267	-0.046	0.026	0.008	0.726	0.632
标准偏回归指数	0.104	0.224	0.225	0.259	0.311	0.096

结果显示, 在提取的两个主成分中, $x_1 \sim x_4$ 对 t_1 有较大负载, 反映了社会经济发展对水资源造成的压力; 而 x_5 和 x_6 对 t_2 有较大负载, 反映了城市节水水平和环境管理水平对压力的影响。而各指标的标准偏最小二乘系数表明, 人均用水量 x_5 对城市水资源压力的影响最大, 显示节水水平对于水资源压力有直接的作用。代表不同产业发展特征的 $x_2 \sim x_4$ 项指标对水资源压力的影响基本相同, 其中以第三产业总产值 x_4 的影响最大。而在各项指标中, 人口因素和环境管理因素对水资源压力的贡献较小。

通过建立 y 对提取的主成分的回归,以及数据的逆标准化操作,最终得到的回归方程为

$$y = -21\,559.674\,34 + 26.173\,16\,x_1 + 0.013\,65\,x_2 + 0.000\,19\,x_3 + 0.001\,46\,x_4 + 35.556\,12\,x_5 + 671.635\,52\,x_6 \quad (10)$$

经检验,所建方程的决定系数 $R^2 = 0.81$, $p < 0.01$,方程具有显著性。通过多重共线性检验得到最大的 $S'_{VIF} = 1.01$,多重共线性问题已基本解决。

2.2 水资源压力趋势及演变特征

根据中山市水资源综合规划等资料,获得 2020 年及 2030 年中山市水资源压力各影响指标的数据,代入式(10)后得到水资源压力预测,结果见表 4。可见随着人口及城市工农业的发展,今后一段时期内中山市水资源压力仍将保持一定的上升态势。2020 年中山市水资源压力为 2011 年的 1.54 倍,而到了 2030 年将达到 2.32 倍。

表 4 中山市水资源压力预测

年份	x_1 / 万人	x_2 / 万元	x_3 / 万元	x_4 / 万元	x_5 / m^3	x_6 / ($\text{kg} \cdot \text{万元}^{-1}$)	y
2020	372	1 058 336	70 298 200	14 048 229	514	0.28	54 954
2030	414	1 228 242	114 508 400	26 608 250	448	0.20	82 710

1991—2030 年中山市水资源压力数据的演变趋势表明,在不同的时间段内,中山市的水资源压力增长呈现不同的特点。1991—2000 年间,中山市水资源压力在往复变化中整体呈下降趋势,年均增长率为 -6.89% ,主要原因在于该时期内环境保护工作的大力开展,废水污染物排放得到一定程度的缓解。2001—2010 年间,中山市水资源压力呈迅速上升趋势,年均增长率为 17.3% ,增长的主要贡献来自于工业总产值以及第三产业总产值,显示该时期内城镇化、工业化过程中所带来的用水量增长及工业废水污染物排放的增加对水资源带来极大的压力。而 2011—2020 年间以及 2020—2030 年间,由于人口及各项经济指标的上升,水资源压力不断增加,但年均增长速度有所下降,分别为 4.9% (2011—2020 年)和 4.2% (2020—2030 年)。

2.3 水资源压力与城市经济发展的关系

经验数据显示,发达国家城市环境质量指标随经济发展的变化存在着一个由上升转而下降的转折点。因此,城市环境质量随收入增长的演变模式可以用环境库兹涅茨曲线(environment Kuznets curve, EKC)形式来表示^[13-14]。笔者以环境库兹涅茨理论为基础,研究中山市人均 GDP 与水资源压力之间的关系。为了消除异方差的问题,并使模型估计更准确,将水资源压力指标值作自然对数变换,并采用三次多项式形式建立中山市经济发展与水资源压力关

系的 EKC 分析模型。拟合结果显示,方程的一、二、三次项系数分别为 7.548 、 -1.344 、 0.0648 , R^2 为 0.91 , $p < 0.01$,方程有显著意义。

图 1 显示,1991—2030 年,中山市水资源压力与人均 GDP 之间呈现出典型的 N 形曲线特征。这与国外环境库兹涅茨曲线理论一般假说中认为的倒 U 形曲线形式有所不同^[15-16],但与张捷等^[17]发现广东省人均 GDP 增长与工业“三废”排放量之间的关系一致。该曲线特征表明,在中山市城市发展过程中,经济增长和水资源压力存在复杂的相关关系。当社会经济发展到一定程度后,随着节水、环保意识的提高以及相关公共管理措施的加强,城市水资源压力将得到一定的缓解,但并非就此必然一路下降。随着人口的增长和社会经济的发展,水资源压力的各种内在驱动因素仍然存在,可能导致城市水资源压力的改善出现曲折反复。根据中山市统计资料,2011 年中山市人均 GDP 约为 10.5 万元,按照上述 EKC 曲线,这段时期中山市水资源压力正处于该曲线二次上升的转折点(人均 GDP 9.9 万元)。

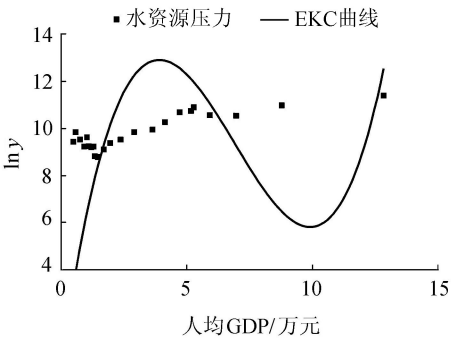


图 1 中山市人均 GDP 与水资源压力关系的 EKC 曲线

3 结 论

- a. 利用偏最小二乘回归方法在自变量存在高度相关性的条件下进行回归建模,适用于水资源压力与城市社会经济发展各指标间的相互关系研究。研究结果显示节水水平和第三产业发展是中山市水资源压力的主要影响因素。
- b. 1991—2011 年间,中山市的水资源压力整体上呈先降后升的演变特征。对中山市水资源压力的预测结果显示,未来 20 年中山市的水资源压力仍然将处于上升的过程。中山市水资源压力与人均 GDP 之间呈现出 N 形 EKC 曲线特征,显示随着城市经济的发展,水资源压力有经过改善后再次加剧的倾向。在今后的城市发展过程中,应更加重视水资源利用和水环境保护,通过转变产业发展模式、提高水资源利用水平、加大环境保护工作力度等措施以缓解未来面临的水资源压力。

参考文献:

- [1] 王颖,邵磊,周孝德,等. 山西省水资源系统压力综合评价[J]. 水力发电学报,2011,30(6):189-198. (WANG Ying, SHAO Lei, ZHOU Xiaode, et al. Comprehensive evaluation of water resources system stress in Shanxi Province[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2011,30(6):189-198. (in Chinese))
- [2] 郭梅,许振成,彭晓春. 水资源安全问题研究综述[J]. 水资源保护,2007,23(3):40-43. (GUO Mei, XU Zhengcheng, PENG Xiaochun. Progress in water security [J]. Water Resources Protection,2007,23(3):40-43. (in Chinese))
- [3] 贾绍凤,张军岩,张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展,2002,21(6):538-545. (JIA Shaofeng, ZHANG Junyan, ZHANG Shifeng. Regional water resources stress and water resources security appraisalment indicators[J]. Progress in Geography,2002,21(6):538-545. (in Chinese))
- [4] 吴佩林. 我国区域发展的水资源压力分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(10):143-149. (WU Peilin. A quantificational and comparative analysis on the regional water resource pressure and water scarcity in China [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2005, 33 (10): 143-149. (in Chinese))
- [5] 文琦,何彤慧. 近10年来我国水资源承载力研究综述[J]. 水资源保护,2005,21(6):19-22. (WEN Qi, HE Tonghui. Review on the study of water resources carrying capacity in China in the last ten years [J]. Water Resources Protection,2005,21(6):19-22. (in Chinese))
- [6] 钟定胜,张宏伟. 等标污染负荷法评价污染源对水环境的影响[J]. 中国给水排水,2005,21(5):101-103. (ZHONG Dingsheng, ZHANG Hongwei. Equal standard pollution load method for evaluating the effect of pollution source on aquatic environment [J]. China Water & Wastewater,2005,21(5):101-103. (in Chinese))
- [7] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(2)[J]. 数理统计与管理,2002,21(2):60-64. (GAO Huixuan. Statistical analyses for multiple correlation variables of two sets (2) [J]. Application of Statistics and Management, 2002,21(2):60-64. (in Chinese))
- [8] WOLD S, RUHE A, WOLD H, et al. The collinearity problem in linear regression; the partial least squares (PLS) approach to generalized inverses[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1984, 5 (3): 735-743.
- [9] 王慧文,吴载斌,孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京:国防工业出版社,2006:111-116.
- [10] 王帅,孙月峰. 基于耦合逐步回归的PLS模型城市用水量预测[J]. 安全与环境学报,2012,12(4):170-173. (WANG Shuai, SUN Yuefeng. Urban water consumption prediction based on a partial least square model coupled with stepwise regression [J]. Journal of Safety and Environment,2012,12(4):170-173. (in Chinese))
- [11] 李林,付强. 偏最小二乘回归模型的城市水资源承载力研究[J]. 水科学进展,2005,16(6):822-825. (LI Lin, FU Qiang. Study on the city water resources capacity model with partial least squares regression [J]. Advances in Water Science,2005,16(6):822-825. (in Chinese))
- [12] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(3):偏最小二乘回归与PLS过程[J]. 数理统计与管理,2002,21(3):58-64. (GAO Huixuan. Statistical analyses for multiple correlation variables of two sets (3):partial least-squares regression and PLS procedure [J]. Application of Statistics and Management, 2002, 21 (3): 58-64. (in Chinese))
- [13] 陈华文,刘康兵. 经济增长与环境质量:关于环境库兹涅茨曲线的经验分析[J]. 复旦学报:社会科学版,2004(2):87-94. (CHEN Huawen, LIU Kangbing. Economic growth and environmental quality:an empirical analysis of the environmental Kuznets curve [J]. Fudan Journal: Social Sciences,2004(2):87-94. (in Chinese))
- [14] DINDA S. Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey[J]. Ecological Economics,2004,49(4):431-455.
- [15] DUARTE R, PINILLA V, SERRANO A. Is there an environmental Kuznets curve for water use? a panel smooth transition regression approach [J]. Economic Modelling,2013,31:518-527.
- [16] CHENG H, HU Y. Economic transformation, technological innovation, and policy and institutional reforms hold keys to relieving China's water shortages [J]. Environmental Science & Technology,2010,45(2):360-361.
- [17] 张捷,张玉媚. 广东省的库兹涅茨环境曲线及其决定因素:广东省工业化进程中经济增长与环境变迁关系的实证研究[J]. 广东社会科学,2006(3):17-23. (Zhang Jie, Zhang Yumei. Environmental Kuznets curve in Guangdong and its determinants: an empirical study of relationship between economic growth and environmental changes in the progress of industrialization in Guangdong Province [J]. Social Sciences in Guangdong,2006(3):17-23. (in Chinese))

(收稿日期:2013-07-15 编辑:徐娟)

