

西北干旱内陆区石羊河流域用水结构演变及其驱动力分析

马黎华¹, 康绍忠², 栗晓玲¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘 要: 基于 1991~2004 年的甘肃省水资源公报中的用水数据, 采用信息熵描述用水结构的演变, 运用因子分析法研究用水结构演变的驱动力。结果表明, 石羊河流域的用水结构特点是以农业用水为主, 工业、生活及生态用水比例小; 1991 年以来总用水量变化不明显, 农业用水比例降低, 工业、生活用水比例相应增加; 用水结构信息熵结果表明: 金昌市的用水结构信息熵显著增加, 而武威市和全流域的未来趋势不明显; 因子分析结果显示以农业发展为主的社会经济因子是石羊河流域用水结构演变的主要驱动力。因此, 石羊河流域应继续加大用水结构调整力度, 通过关井压田和节水技术的推广降低农业用水比例, 发展高效节水农业。

关键词: 石羊河流域; 用水结构; 信息熵; 因子分析; 农业用水

中图分类号: TV 211.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008) 01-0125-06

在西北干旱地区, 人类活动和生态系统均依赖于径流性水资源的支撑, 有限水资源怎样进行合理有效地使用就显得尤为重要。用水结构(构成)指一定时期某用水系统中各类用水量的比例关系。全国用水可分为河道内用水和河道外用水。河道外用水可分为城镇生活用水、农村生活用水、工业用水和农业用水四大用水部门。合理分析用水结构将能够预测未来的用水状况, 从而为长期用水安全提供依据^[1]。

用水结构的研究主要涉及用水预测以及用水结构演变与社会发展相关联等方面。G·Darrel Jenerette 认为世界大部分城市都面临着持续水供应的危机, 未来的用水形式则是由人口的聚散情况、单个牲畜的水使用、气候以及生态供水条件改变而决定^[2]。对于环境变化敏感地区的用水预测^[3], 以及假设经济条件不变前提下的用水预测^[4], 均是在人口预测和经济发展模型的基础之上, 分析和预测城市用水的可能情况。但是用水过程本身是较为复杂的过程, 不仅仅有人为环境变化的因素, 而且还存在环境与人类活动相互作用。Graedel et al. 提出: 需要更好的模型与方法综合分析人类与复杂生态的相互作用^[5]。已经建立诸如 ANNs 等模型来进行模拟, Shan muganat han -S 基于环境、社会和经济状况, 应用神经网络检测系统的方法来进行未来水资源可持

续发展的预测与拟合^[6]。贾绍凤采用库兹涅茨曲线分析工业用水^[7], 工业用水的增长趋势很好地符合库兹涅茨曲线的结论。雷社平通过对一产、二产、三产的产值比例与用水比例的相关分析表明, 工业产值增长与工业用水高度相关^[8]; 李洋依据区域用水结构及水资源需求的分布进行分析^[9], 提出用水结构的合理调整需要结合本地区地理状况的现实而进行。刘燕基于信息熵的分析方法来描述用水结构的变化过程, 信息熵的变化反映用水结构有序度的变化, 从而定性地去理解用水结构的演变^[10]。

在用水结构的演变过程中, 社会经济因素、人口因素、水资源约束因素等都将成为影响用水结构变化的制约因素。本文以西北干旱内陆河石羊河流域为例, 分析用水结构的演变过程, 并试图找出在该地区导致用水结构变化的主要驱动力。

1 石羊河流域概况

石羊河流域是甘肃省河西走廊三大内陆河流域之一, 位于祁连山东段与巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠南缘之间, 东经 101°41′~104°16′、北纬 36°29′~39°27′, 流域面积 4.16 万 km²。地势南高北低, 该地区干旱少雨、日照强烈、蒸发量大, 具有大陆性温带干旱气候特征^[11], 流域行政区划包括武威市的古浪县、凉州区、民勤县及天祝县(部分), 金昌市的永昌

收稿日期: 2007-04-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40771034); 西北干旱灌区节水改造对区域水循环的影响及生态环境效应研究

作者简介: 马黎华(1983—), 女, 河南平顶山人, 在读硕士, 主要从事水资源领域的研究。E-mail: malihua 1210@hotmail.com。

通信作者: 康绍忠(1962—), 男, 湖南桃源人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水与水资源领域的研究。E-mail: kangshaozhong@tom.com。

县、金川区以及张掖市肃南裕固族自治县(部分)共三市、七县。该地区是甘肃省河西内陆河流域中人口最多、经济较发达、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的地区。石羊河流域水资源总量为 16.608 亿 m^3 , 由于地表水地下水资源之间多次转化重复利用, 2004 年实际用水量为 26.127 亿 m^3 , 水资源开发利用程度高达 157.3%。总用水量中地下水开采量为 11.7737 亿 m^3 。农业、工业、生活及生态用水量分别为 24.18、1.28、0.65 及 0.02 亿 m^3 。农业用水占总用水量的 92.57%。目前流域共有 8.6 万 hm^2 农田面积得不到保灌, 流域各行业之间以及生产用水与生态用水之间矛盾十分尖锐。

流域用水结构的合理确定与科学预测是实现区域水资源的合理配置、社会经济协调发展的重要前提^[13]。因此, 针对石羊河流域进行用水结构演变规律分析以及相关的驱动力因子分析具有现实意义。

2 石羊河流域用水结构多年变化

2.1 用水量的变化

用水资料主要来源于甘肃省水资源公报(1991~2004)^[13]。自 1991 年以来, 石羊河流域总用水量维持在 26.5 亿 m^3 左右, 近年来呈现缓慢下降趋势(图 1), 1997 年达到最大值 26.96 亿 m^3 。农业用水在 1995 年达到最大值, 1996~1998 年明显降低, 1998 年以后的农业用水量基本稳定; 总用水量与农业用水量保持一致的变化趋势。在石羊河流域, 总用水量大部分消耗于农业用水, 农业用水是控制总用水量的关键。

2.2 用水结构的变化

用水结构是指农业、工业、居民生活等用水部门在总用水中的比例。用水结构的变化由用水比例来反映(图 2)。自 1991 年以来, 石羊河流域的农业用水比例呈下降趋势, 从 1991 年的 95.17% 下降到 2004 年的 92.57%; 工业用水比例在 1997、1998 年处于较高水平, 分别为 6.12% 和 6.41%, 之后由于工业用水节水措施的使用使得工业用水呈平稳下降趋势; 生活用水比例变化不大。

用水结构与社会经济发展密切相关, 由石羊河流域金昌市、武威市的对比可以看出(表 1): 武威市以农业用水为主, 1991 年的农业用水比例高达 98.31%, 之后持续下降, 2000 年最低, 为 94.34%, 之后维持在 95% 左右。金昌市盛产镍及铂族贵金属, 工业发展迅速, 工业用水的比例相对较高, 在

20% 左右, 2004 年达到最大值 25.95%, 而农业用水比例在大部分年份里不足 80%。金昌的用水结构同样呈现农业用水比例下降, 工业生活用水比例增加的趋势。

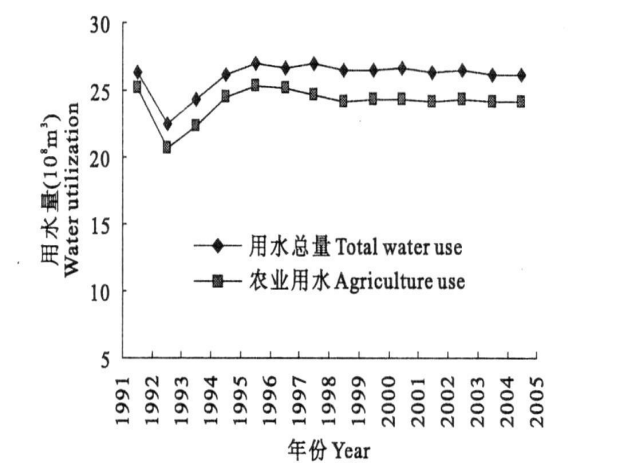


图 1 石羊河流域各部门用水量的变化

Fig. 1 Change of water utilization in different sectors in the Shiyang River Basin

表 1 1991~2004 年石羊河流域的用水比例

Table 1 Contrast of water utilization structure of Jinchang with Wuwei in 1991~2004

地区 Region	年份 Year	农业用水 Agricultural (%)	工业用水 Industrial (%)	生活用水 Municipal (%)
金昌市 Jinchang	1991	75.27	22.20	2.52
	2004	70.47	25.95	3.21
武威市 Wuwei	1991	98.31	0.50	1.18
	2004	95.08	2.45	2.44

3 基于信息熵的用水结构演变分析

用水结构的长期演变具有一定的阶段性, 并与社会经济发展密切相关。大致可分为: 地区经济不发达的以农业用水为主的初级阶段; 随着工业发展, 工业用水量的激增, 工业、农业用水趋于均衡的中间阶段; ‘以人为本’并由于人口增加, 重视生活质量的提高而导致生活用水的增加, 从而农业、工业、生活用水趋于均衡的高级阶段。根据上述金昌市、武威市的对比分析也有类似结论。用水结构的这一演变过程可以近似假设为系统的不可逆过程, 将其纳入信息熵的数学模型中。通过对逐年信息熵值的计算来反映农业、工业和生活用水比例的分配状态, 从而更直观地反映用水结构的演变过程。

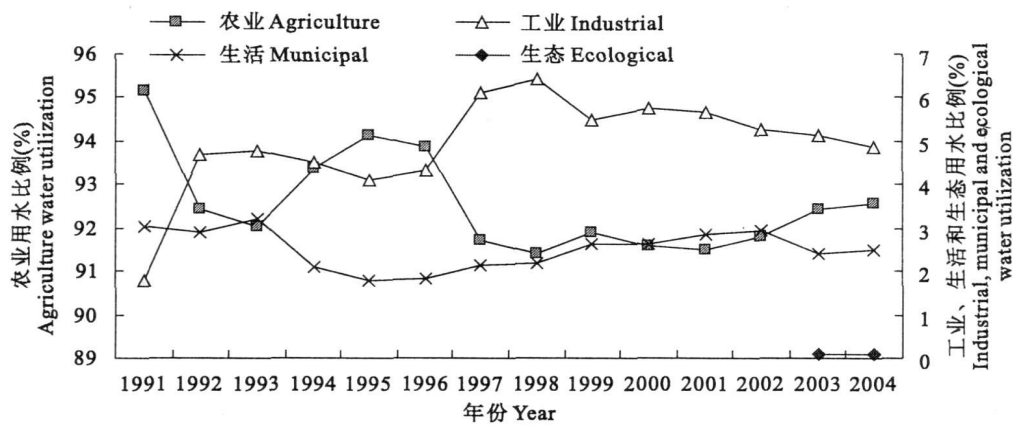


图 2 石羊河流域不同部门用水比例的年际变化

Fig. 2 Water utilization structure in the Shiyang River Basin from 1991 to 2004

3.1 信息熵理论

“熵”是建立在热力学第二定律基础之上的,用以描述自发过程不可逆性的状态函数^[19]。为了与热力学过程有所区别,1908 年,Shannon 首先在信息论中引入了熵的概念,将其定义为信息熵。即对于一个不确定性系统,用随机变量 S 表示其状态特征;对于离散型随机变量,设 x 的取值为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,每一取值对应的概率为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$,且有 $\sum P p_i = 1$,则该系统的信息熵为:

$$S = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \tag{1}$$

这一公式称作 Shannon 公式,其定义的熵为广义熵或泛熵,可用来描述任何一种体系或物质运动的混乱度和无序度^[13]。信息熵值增加表明无序度增加,在用水结构信息熵的表达中,信息熵值越大表明用水量在各个用水部门的分配越平均。

3.2 石羊河流域用水结构演变的信息熵分析

设各部门用水量 H_i ,总用水量 $H = \sum H_i$,用水比例 $P_i = \frac{H_i}{H}$, $\sum P_i = 1$ 。用式(1)计算得到该地区的用水结构信息熵的时间序列,对于不同的比例构成信息熵的表达唯一确定。信息熵在产业结构、能源利用类型、用水结构分析中都有运用。

石羊河流域用水结构的信息熵值变化见图 2。从图 2 中可以看出,金昌市的用水结构熵值要高于武威,这与金昌用水结构中,农业、工业、生活用水比较平均,而武威的农业用水比例过大的事实相符合。同时,金昌市用水结构熵值呈持续稳定的上升趋势,表明其农业用水进一步下降,工业、生活用水比例进一步提高,用水结构向趋于均衡的结构发展。而武威地区的用水结构熵值虽然 20 世纪 90 年代较 80 年代有所提高,但是 90 年代呈现小幅波动,变化趋

势不明显,表明该地区减少农业用水比例的效果并不显著,农业用水依然是最主要的用水部门,在总用水中所占比例很大。

用水结构信息熵值大小与经济发展程度关系密切。金昌市的社会经济条件整体水平要好于武威市,石羊河流域是两个地区的加权平均,在图 3 中就表现为,金昌市的该值最大,武威地区信息熵值最小,石羊河流域居中。用水结构信息熵值与社会经济条件的一致变化表明,经济发展与用水结构调整是一个相互响应的发展过程。经济的发展促进了用水结构朝向均衡性的方向发展;用水结构的均衡性又为实现该地区的可持续发展提供前提。

4 用水结构演变的驱动力分析

各个部门用水量的变化受到各种因素变化的影响^[7,17],用水结构的长期演变是社会经济因素、自然环境变化因素共同作用的结果。例如,节水技术的推广、种植结构的调整、城市化等影响农村用水变化;人口增长、居民生活水平的提高导致居民生活用水的增长;城市建设、环境质量的提高以及服务业的蓬勃发展造成了公共用水的增加;重复利用率、用水定额水平的提高对工业用水变化的负驱动作用,工业产值增长则增加了工业用水量。

社会经济因素的变化涉及社会各个层面的多项指标,通过比较与分析,初步选取较为有代表性的八个指标作为基础参数,即人口、城镇人口比例、农业产值、工业产值、GDP(国内生产总值)以及耕地面积、有效灌溉面积、粮食产量。其中耕地面积同时也能反映出土地利用类型的多年变化。采用降水、气温、 ET (参考作物的蒸发蒸腾量)反映自然环境因素的变化。其中经济资料来自武威、金昌的统计年鉴,气象资料来自石羊河流域各个气象站点的原始

资料, ET_0 使用对该流域 ET_0 的相关研究^[1] 的计算结果。

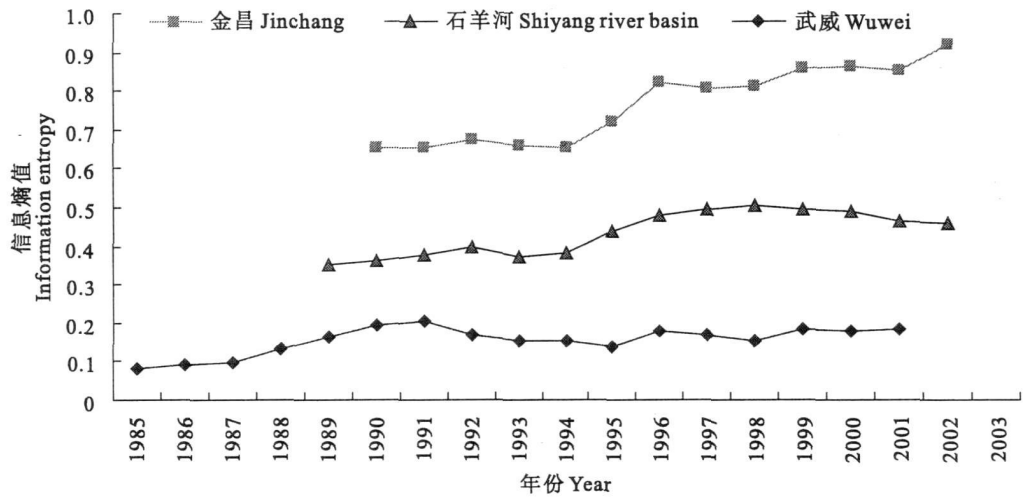


图 3 石羊河流域用水结构信息熵值

Fig. 3 Information entropy of water utilization structure in the Shiyang River Basin

所有数据的时序列在进行标准化处理后, 采用 SPSS 软件提供的因子分析法进行用水结构变化的驱动力分析。

4.1 社会经济因素及环境变化因素的量化处理

正态标准化法由于统计特点明显, 特别是在进行多元统计分析时, 经正态标准化的数据矩阵的相关阵与协方差阵是相同的, 比较常用, 因此本文采用正态标准化法将选取的指标进行标准化处理。

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_j) / SD_j \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个地区第 j 个指标值; $\bar{X}_j$ 为第 j 个指标样本区间的平均值; SD_j 为第 j 个指标所有样本数据的标准差。

对逐年石羊河流域各个站点的降水、气温资料按照面积加权的方式得到各年全流域平均的降水、

气温指标值, 其逐年变化如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 石羊河流域降水量变化不显著, 气温值显著上升。

4.2 用水结构演变的驱动力分析

因子分析的目的是将具有错综复杂关系的变量综合为较少的几个因子, 以再现原始变量与因子之间的相互关系, 同时根据不同的因子对变量进行分类。因子分析属于多元分析中降维的一种统计方法^[1]。用水结构驱动力涉及到社会条件变化的因子复杂多变, 指标之间也存在一定的线性关系, 为了更为直观地反映驱动力类型以及各个因子的贡献率将所有指标进行因子分析。在经过标准化处理的各项指标时间序列基础上进行因子分析, 得到驱动力的因子负荷矩阵如表 2。

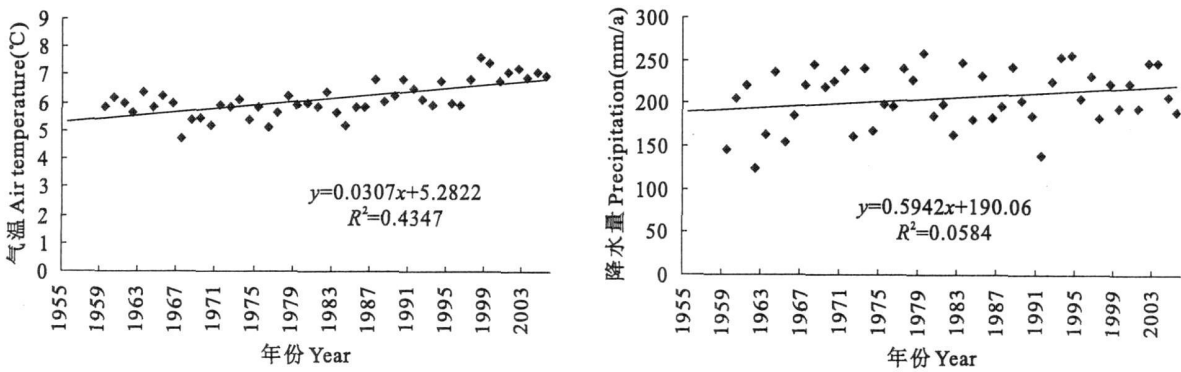


图 4 1955~2005 年石羊河全流域气温、降水量变化

Fig. 4 Temperature and precipitation in the Shiyang River Basin during 1955~2005

表 2 驱动力因子分析旋转负荷矩阵

Table 2 Rotated component matrix in factor analysis

项 目 Items	社会经济因子 Social and economic factor	农业面积因子 Area in agricultural factor	自然环境因子 Environ ment factor
人口 Population	0.845	−0.236	−0.071
城镇人口 Population in urban areas	0.786	−0.233	−0.192
耕地面积 Farmland area	0.125	0.906	0.182
有效灌溉面积 Available irrigation area	−0.086	0.921	0.021
粮食产量 Food output	0.967	−0.099	−0.056
农业产值 Agricultural output value	0.957	0.079	0.050
工业产值 Industrial output value	0.877	0.276	−0.011
GDP	0.917	0.244	0.006
降水量 Precipitation	0.204	−0.130	−0.812
气温 Air temperature	0.726	0.063	0.383
ET ₀	0.149	0.053	0.917

首先进行样本充足度检验(KMO 检验),该组数据的 KMO 值为 0.704,满足大于 0.5 的要求,可以进行因子分析(KMO 指数越接近于 1 越适于进行因子分析)。由表 2 因子分析结果来看,粮食产量、农业产值、GDP、工业产值、人口、城镇人口比例与气温构成第一因子,根据表 3 中对因子 1 贡献率的大小将因子 1 定义为社会经济因子,社会经济因子的贡献率为 49.16%;因子 2 贡献率占到总因子的 17.78%,其中耕地面积、有效灌溉面积对于因子 2 的贡献率较大,分别为 0.906、0.921,将因子 2 定义为农业面积因子;因子 3 主要由降水量、ET₀ 构成,定义为自然环境因子,其贡献率为 15.71%。其中,降水量、ET₀ 对于该因子的贡献率分别是一0.812、0.917。

表 3 驱动力因子分析不同因子的贡献计量值

Table 3 Total variance explained in factor analysis

成分 Components	矩阵旋转累计结果 Rotation sums of squared loadings		
	总计 Total	分类百分比 Variance (%)	累计百分比 Cumulative (%)
社会经济因子 Social and economic factor	5.41	49.16	49.16
农业面积因子 Area in agricultural factor	1.96	17.78	66.93
自然环境因子 Environmental factor	1.73	15.71	82.65

因子分析结果表明:(1) 在影响石羊河流域用水结构长期演变的驱动力因子中,以粮食产量、农业产值、GDP、工业产值为代表的社会经济因子是主要的驱动力因子。社会经济的发展程度,特别是该地区农业发展程度对于石羊河流域用水结构的构成起

到决定性作用;(2) 耕地面积、有效灌溉面积为代表的农业面积因子的发展变化对于用水结构演变有重要的影响。农业面积变化将直接影响农业用水量的变化,从而对石羊河流域用水结构的变化产生直接影响;(3) 自然环境因子的变化产生的总驱动力影响相对较小,降水量、ET₀ 为代表的自然环境因子对于用水结构演变的因子贡献较小。

总之,社会经济的发展、农业面积的变化等人类活动是影响石羊河流域用水结构演变的主要原因。社会经济因子、农业面积因子是石羊河流域用水结构演变的主要驱动力。

5 结 论

1) 石羊河流域用水结构的显著特点是以农业用水为主。由于该地区气候干燥,“非灌不植”,水是农业发展的支撑,农业用水(灌溉、林、牧、副、渔用水)比例占总用水的比例很大,其中武威市农业用水比例占 95%以上,全流域这一比例也达到 92%。工业、生活用水比例很小。由用水量以及用水比例的分析来看,该地区农业用水下降缓慢,工业、生活用水比例上升。

2) 用水结构信息熵结果表明,石羊河流域内金昌市正朝着向各用水部门之间分配更平均的方向发展,而武威市、以及石羊河全流域的用水结构的长期演变趋势不明显。

3) 以农业发展为主的社会经济因子是影响石羊河流域用水结构演变的主要驱动力,社会经济的发展、农业面积的变化等人类活动是影响石羊河流域用水结构演变的主要原因。基于以上结论,要改变石羊河流域农业用水比例过大的现状,实现西北

干旱区水资源的长效利用,促使该地区用水结构朝向合理均衡的方向发展就需要进一步加大用水结构调整力度。社会经济因子和农业面积因子是用水结构演变的主要驱动力因子。因此,提高经济效益与减少灌溉面积相结合,形成具有地方特色的高效农业节水模式是解决水问题的主要途径。

参考文献:

- [1] 林洪孝,王国新.用水管理理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] G·Darrel Jenerette. A global perspective on changing sustainable urban water supplies[J]. Global and Planetary Change, 50(2): 202—211.
- [3] Alcamo J. Critical regions :a model —based estimation of world water resources sensitive to global changes[J]. Aquatic Sciences, 2002, 64(4): 352—362.
- [4] Alcamo J. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future 'business as usual' conditions[J]. Hydrological sciences Journal Journal Des Sciences Hydrologiques, 2003, 48(3): 339—348.
- [5] Graedel, et al. Grand Challenges in Environmental Science[R]. Washington : National Academy Press, 2001. 96—98.
- [6] Shanmuganathan · S. Applications of an unsupervised neural net —work to support sustainable development by modeling environmen —

tal social and economic conditions[R]. Proceedings of the Fourth international Symposium on Digital Earth Japan (ISDE Japan), 2005. 28—31.

- [7] 贾绍凤,张士锋.工业用水与经济发展关系——用水库兹涅茨曲线[J].自然资源学报,2004,19(3): 279—284.
- [8] 雷社平,解建仓.产业结构与水资源相关分析理论及其实证[J].运筹与管理,2004,19(1): 100—105.
- [9] 刘洋,金凤君.区域水资源空间匹配分析[J].辽宁工程技术大学学报,2006,24(5): 658—660.
- [10] 刘燕,胡安焱,邓亚芝.基于信息熵的用水系统结构演化研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(6): 141—144.
- [11] 佟玲,康绍忠,粟晓玲.石羊河流域气候变化对参考作物蒸发蒸腾量影响的分析[J].农业工程学报,2004,20(2): 15—18.
- [12] 甘肃省水利厅.1991~2004年甘肃省水资源公报[R].兰州:甘肃省水利厅,1991~2004.
- [13] 刘宝勤,姚治君.北京市用水结构变化趋势及驱动力分析[J].资源科学,2003,25(2): 38—43.
- [14] 湛垦华,沈小峰.普利高津与耗散结构理论[M].西安:陕西科学技术出版社,1998.
- [15] 蔡绍洪,彭仕政.耗散结构与非平衡相变原理及应用[M].贵阳:贵州科技出版社,1998.
- [16] 汪党献,王浩,倪红珍,等.国民经济行业用水特性分析与评价[J].水利学报,2005,36(2): 167—173.
- [17] 张菊芳.多元统计方法中的降维与应用[D].山东:山东大学,2004.

Study on evolution and its driving forces of water utilization structure of Shiyang River Basin in Northwest arid areas

MA Li hua¹, KANG Shao zhong², SU Xiao ling¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract : Shiyang River Basin is an inland river basin in arid areas, the water resources can not satisfy the water demand. To obtain sustainable water utilization, analyzing the change of water utilization structure and finding out the factors are important. Based on the data from the Communiques of Water Resources in Gansu Province (1991~2004), Information Entropy is used to describe the process of water utilization structure changing. The Method of Factor Analysis is used to find out the driving forces of water utilization structure, which leads this variety happening. The results indicate that the agricultural water utilization is the majority, while other sectors' water utilization is in small proportion; With the structure of water utilization changing faintly, the percentage of agricultural water utilization has been decreasing since 1991, at the same time, that of industrial water utilization and domestic water utilization has been increasing. Information Entropy of water utilization structure shows that Jinchang has a bright future, and water utilization structure in this region is in equilibrium; but Wuwei and the total basin are not. Therefore, continuous efforts should be made to adjust the water utilization structure in the Shiyang River basin, through controlling irrigation areas, closing wells and promoting water saving technologies to reduce the quantity of agricultural water use, and developing highly efficient water saving agriculture.

Key words : water utilization structure; information entropy; factor analysis; Shiyang River basin; agricultural water use